

# TESIS DOCTORAL

AÑO 2017

**Estudio de la fiabilidad de los sistemas reparables  
y desarrollo de un procedimiento de análisis  
multivariante**

**MIGUEL ANGEL NAVAS ALVAREZ**

Ingeniero en Organización Industrial

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
CONTROL, TELEMÁTICA Y QUÍMICA APLICADA A LA INGENIERÍA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES

Dr. D. José Carpio Ibáñez

Dr. D. Carlos Sancho de Mingo





**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,  
CONTROL, TELEMÁTICA Y QUÍMICA APLICADA A LA INGENIERÍA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES**

**Estudio de la fiabilidad de los sistemas reparables y  
desarrollo de un procedimiento de análisis  
multivariante**

Autor:

**Miguel Ángel Navas Alvarez**

Máster Universitario en Investigación en Ingeniería Eléctrica,  
Electrónica y Control Industrial  
Ingeniero en Organización Industrial  
Ingeniero Técnico en Telecomunicaciones

Director:

**Dr. D. José Carpio Ibáñez**

Catedrático de Ingeniería Eléctrica de la E.T.S.  
de Ingenieros Industriales de la UNED

Codirector:

**Dr. D. Carlos Sancho de Mingo**

Profesor Asociado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica,  
Electrónica, Control, Telemática y Química aplicada a la Ingeniería  
de la E.T.S de Ingenieros Industriales de la UNED

*A mi familia Nuria, Arturo y Gonzalo, por haberme apoyado y permitido realizar esta investigación.*

## Agradecimientos

---

En primer lugar quisiera agradecer a Metro de Madrid, S.A. el apoyo recibido y la autorización de acceso a su documentación técnica, bases de datos y sistema de gestión del mantenimiento, sin la cual hubiera sido imposible efectuar esta investigación.

También a todos mis compañeros de trabajo, y en especial a Jesús Gormaz y Juan Navalón que me han ayudado en el estudio y la comprensión técnica de los sistemas reparables objeto de estos estudios.

Al caluroso acogimiento de mi propuesta de doctorado en la Universidad Nacional de Educación a Distancia, en su Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, y en especial a todo el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control.

Y por supuesto, al Director y Codirector de la investigación, Dr. D. José Carpio Ibáñez y Dr. D. Carlos Sancho de Mingo, por sus inestimables aportaciones y consejos en la orientación de los estudios, redacción de artículos y elaboración de esta tesis Doctoral.

*Miguel Ángel Navas Alvarez*

*Madrid, 2017*

## Resumen

---

Para el análisis y modelado de la fiabilidad de sistemas reparables la comunidad científica dispone diversas metodologías estadísticas desarrolladas en las últimas décadas. Los métodos de mayor aceptación y empleo han sido recogidos por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en su Comité Técnico TC56 "Dependability" mediante la emisión de normas para el espacio europeo, teniendo en cuenta los manuales militares (MIL-HDBK) emitidos por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América.

La norma IEC 60300-3-5 recoge los métodos estadísticos y procedimientos de análisis aplicables. La intensidad de fallo de un elemento reparable se puede estimar empleando los sucesivos tiempos entre fallos, mediante un Proceso Puntual Estocástico. Si los tiempos entre fallos se distribuyen exponencialmente, entonces la intensidad de fallo es constante. En este caso se puede modelar por una Proceso de Poisson Homogéneo. En los casos en los que existe una tendencia en la intensidad de fallo, puede ser de aplicación el Proceso de Poisson No Homogéneo y se aplica la Ley de Potencia.

La norma IEC 60605-6 desarrolla los contrastes para comprobar la existencia o no de tendencia en la intensidad de fallo mediante el Estadístico  $U$ , tanto para un sistema reparable, como para un conjunto idéntico de sistemas reparables. En el caso de no existir tendencia, se procede a la estimación puntual de parámetros e intervalos de confianza para la distribución exponencial con la norma IEC 60605-4. Si existe tendencia en la intensidad de fallo, se realiza la estimación de los parámetros del modelo de la Ley de Potencia con la norma IEC 61710.

Se ha aplicado la metodología propuesta por IEC al sistema de tracción eléctrica ferroviario en 3 series de trenes de Metro de Madrid, de los que se dispone los datos de explotación para un periodo superior a 10 años, y al objeto de contrastar los resultados obtenidos, se ha efectuado el mismo estudio a un grupo de escaleras mecánicas de Metro de Madrid con 10 años de datos de explotación, proponiéndose a continuación un análisis complementario y multivariante para caracterizar las intensidades de fallo obtenidas y la influencia de los fallos repetitivos.

## Abstract

---

For the modeling and analysis of the reliability of repairable systems the scientific community provides various statistical methodologies developed in the last few decades. The methods of greater acceptance and employment have been collected by the International Electrotechnical Commission (IEC) in its Technical Committee TC56 Dependability, through the issuance of standards for the European space, taking into account the military handbooks (MIL-HDBK) issued by the U.S. Department of Defense.

IEC 60300-3-5 collects statistical methods and analysis procedures applicable. The failure intensity of a repairable system can be estimated using the successive times between failures, using a Stochastic Point Process. If there is no trend and the times between failures are distributed exponentially, then failure intensity is constant and in this case can be modeled by a Homogeneous Poisson Process. In cases where there is a tendency in the failure intensity, is modeled with a Non-Homogeneous Poisson Process (NHPP) and the standard includes applying the Power Law Process.

IEC 60605-6 develops the contrasts to verify the existence or not of trend in the failure intensity by means of the statistic  $U$ , both for a repairable system, such as for an identical set of repairable systems. In the event that there are no trend, is the point estimate of parameters and confidence intervals, alleged an exponential distribution with the standard IEC 60605-4. If there is a trend in the failure intensity the estimate is made of the model parameters of the Power Law Process with IEC 61710.

It has been applied the methodology proposed by IEC to the electric traction system in 3 series of railway trains of Metro de Madrid, on the available data of operation for a period exceeding 10 years, and in order to compare the results obtained, has been made on the same study of a group of 40 escalators of Metro de Madrid with 10 years of operating data, propose below a complementary and multivariate analysis to characterize the failure intensity obtained and the influence of repetitive failures.

# Índice General

<b>Agradecimientos</b>	<b>iii</b>
<b>Resumen</b>	<b>iv</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Índice General</b>	<b>vi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xii</b>
<b>Abreviaturas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>19</b>
1.1 Motivación	19
1.2 Objetivos	20
1.3 Metodología	21
1.4 Estructura	24
<b>2. Estado del Arte</b>	<b>26</b>
2.1. Introducción	26
2.2. Expresiones matemáticas básicas para términos de fiabilidad	27
2.2.1. Elementos no reparables	27
2.2.2. Elementos reparables con tiempo hasta la restauración nulo	31
2.2.3. Elementos reparables con tiempo hasta la restauración no nulo	32
2.3. Definiciones y tipos de métodos en el análisis de la fiabilidad	34
2.4. Métodos generales de ingeniería que apoyan los análisis de la fiabilidad	35
2.5. Métodos específicos para el análisis de la fiabilidad	38
2.5.1. Predicción de la tasa de fallo en condiciones de referencia y operativas	38
2.5.2. Predicción de la tasa de fallo usando análisis de semejanzas	44
2.5.3. Análisis por árbol de fallos (AAF)	45
2.5.4. Análisis por árbol de sucesos (AAS)	46
2.5.5. Análisis por diagramas de bloques de fiabilidad (DBF)	47
2.5.6. Análisis de Markov	49
2.5.7. Análisis por redes de Petri	50
2.5.8. Análisis de los modos de fallos y de sus efectos (AMFE)	52
2.5.9. Estudios de peligros y operatividad (HAZOP)	53
2.5.10. Análisis de fiabilidad humana (HRA)	54
2.5.11. Análisis de esfuerzo-resistencia	55
2.5.12. Tabla de verdad (MTV)	55
2.5.13. Métodos estadísticos de fiabilidad	57
2.6. Métodos estadísticos para elementos no reparables	59
2.6.1. Métodos paramétricos para elementos no reparables	60
2.6.2. Métodos no paramétricos para elementos no reparables	65
2.6.3. Métodos semi-paramétricos para elementos no reparables	66
2.7. Métodos estadísticos para elementos reparables	66
2.7.1. Postulado de Duane	67
2.7.2. Métodos gráficos de tendencia	69
2.7.3. Procesos estocásticos	71
2.7.4. Métodos basados en cadenas estocásticas	75
2.7.5. Métodos basados en procesos de Poisson homogéneos (HPP)	78
2.7.6. Métodos basados en procesos de Poisson no homogéneos (NHPP)	81
2.7.7. Métodos basados en procesos de renovación (RP)	84
2.7.8. Métodos basados en procesos estocásticos imperfectos y otros	85

2.7.9. Procedimiento para la selección del método estadístico	91
<b>3. Normativa Europea de Fiabilidad</b>	<b>93</b>
3.1. Referencias cruzadas de normas de fiabilidad EIC y AENOR	94
3.2. Aplicación de la Norma IEC 60300-3-1	103
3.3. Aplicación de la Norma IEC 61703	106
3.4. Aplicación de la norma IEC 60300-3-2	108
3.5. Aplicación de la norma IEC 60300-3-5	109
3.6. Aplicación de la norma IEC 60605-6	112
3.7. Aplicación de la norma IEC 60605-4	115
3.8. Aplicación de la norma IEC 61710	116
3.9. Procedimiento metodológico en aplicación de normas IEC	121
<b>4. Sistemas de Tracción Eléctrica Ferroviaria</b>	<b>122</b>
4.1. Las técnicas de tracción eléctrica ferroviaria	123
4.1.1. Técnica reostática	123
4.1.2. Técnica Chopper	126
4.1.3. Técnica trifásica - ondulator de corriente	129
4.1.4. Técnica trifásica - ondulator de tensión	132
4.2. Bloques constructivos de los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria	135
4.3. Trenes serie 5000-1ª	140
4.4. Trenes serie 5000-4ª	141
4.5. Trenes serie 2000-B	142
4.6. Trenes serie 8000	144
<b>5. Escaleras Mecánicas</b>	<b>146</b>
5.1. Las escaleras mecánicas TNE	148
<b>6. Estudio Normativo de la Fiabilidad de los Sistemas Reparables</b>	<b>152</b>
6.1. Preparación y tratamiento de los datos	154
6.2. Calcular el estadístico $U$ para test de tendencia de $z(t)$ para múltiples ítems	158
6.3. Aplicar el modelo de PLP	160
6.4. Aplicar el test de tendencia $U$ para $z(t)$ en cada ítem	162
6.5. Estimar $\lambda$ constante para cada ítem sin tendencia	170
6.6. Aplicar el modelo PLP a cada ítem con tendencia	177
6.7. Resumen de resultados del estudio normativo IEC de la fiabilidad	183
<b>7. Estudio Complementario de la Fiabilidad de los Sistemas Reparables</b>	<b>185</b>
7.1. Selección de modelos alternativos a los estándares IEC	185
7.2. Análisis de los TBF y la naturaleza de los fallos	187
7.3. Aplicar modelos RP a cada ítem sin tendencia	214
7.4. Aplicar modelos NHPP a cada ítem con tendencia	224
7.5. Aplicación de modelos de "reparación imperfecta" y otros	230
7.6. Resumen de resultados del estudio complementario de la fiabilidad	240
<b>8. Propuestas de Análisis Multivariante</b>	<b>244</b>
8.1. Representación gráfica tridimensional de $z(t)$ del sistema reparable	244
8.2. Potenciales aplicaciones multivariante para el análisis de fiabilidad de sistemas reparables	249
8.3. Caracterización y creación de clústeres de sistemas reparables	256
8.4. Procedimiento metodológico complementario a IEC	262
<b>9. Conclusiones y líneas de investigación</b>	<b>264</b>
9.1. Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos	264
9.2. Principales resultados de la investigación	268
9.3. Aportaciones originales al conocimiento general en el campo de la fiabilidad	270
9.4. Conclusiones	271
9.5. Conclusions	272
9.6. Potenciales futuras líneas de investigación	273

<b>Bibliografía</b>	<b>277</b>
<b>Apéndices</b>	<b>299</b>

# Índice de Figuras

Figura 1 - Distribución exponencial aplicada a la fiabilidad .....	29
Figura 2 – Formas de $f(t)$ para la familia de distribuciones de Weibull para $\alpha = 1$ .....	30
Figura 3 – Esquema general de un árbol de sucesos .....	47
Figura 4 – Modelos elementales para análisis DBF .....	48
Figura 5 – Diagrama de transición de estados en análisis de Markov .....	50
Figura 6 – Tabla de verdad para sistemas simples .....	56
Figura 7 – Curva de la bañera de $\lambda(t)$ .....	61
Figura 8 – Clasificación de observaciones censuradas o truncadas.....	62
Figura 9 – Forma de $\lambda(t)$ para varias distribuciones de probabilidad.....	64
Figura 10 – Tiempo de funcionamiento entre fallos para un solo elemento reparable .....	66
Figura 11 – Ejemplo de tendencia creciente del tiempo entre fallos de un solo elemento reparable .....	68
Figura 12 – Ejemplo sin tendencia del tiempo entre fallos de un solo elemento reparable.....	69
Figura 13 – Gráficos de Duane para tres sistemas con tendencias dispares en los tiempos entre fallos .....	70
Figura 14 – Gráfica de representación de un proceso estocástico .....	71
Figura 15 – El proceso de Poisson y los tiempos de ocurrencia de eventos.....	73
Figura 16 – Diagrama de estados y secuencia operativa.....	75
Figura 17 – Modelo de cadena de Markov de dos estados para elementos reparables .....	76
Figura 18 – Ejemplo de cadena de Markov multi-estado para elementos reparables.....	77
Figura 19 – Gráfico de $N(t)$ para un elemento reparable sin tendencia .....	79
Figura 20 – Gráfico de $R(t)$ para un elemento modelado HPP. ....	80
Figura 21 – Gráfico de $N(t)$ para dos elementos modelado NHPP (tendencia creciente y decreciente). .....	82
Figura 22 – Supuestos de reparación y modelos de edad virtual de un elemento reparable. ....	89
Figura 23 – Procedimiento básico para la selección del método estadístico en elementos reparables. ....	92
Figura 24 – Ejemplo de un sistema con tiempo hasta la restauración nulo .....	108
Figura 25 – Métodos disponibles para la estimación de la fiabilidad bajo IEC 60300-3-5 .....	111
Figura 26 – Pruebas de tendencia para elementos no reparables IEC 60605-6.....	112
Figura 27 – Pruebas de tendencia para elementos reparables IEC 60605-6.....	113
Figura 28 – Estimación de parámetros en distribución exponencial según IEC 60605-4.....	115
Figura 29 – Procedimiento metodológico para análisis de la fiabilidad según normas IEC.....	121
Figura 30 – Motor de corriente continua en excitación serie .....	123
Figura 31 – Configuración simplificada serie de arranque de motores de tracción.....	124
Figura 32 – Configuración simplificada paralelo de motores de tracción.....	124
Figura 33 – Configuración simplificada de frenado de motores de tracción.....	125
Figura 34 – Esquema básico de la técnica chopper .....	126

Figura 35 – Circuitos de corriente con interruptor chopper cerrado y abierto.....	127
Figura 36 – Tensión de entrada y salida en la técnica chopper.....	128
Figura 37 – Esquema eléctrico de la técnica chopper con tiristores.....	128
Figura 38 – Circuito de apagado en la técnica chopper con tiristores.....	129
Figura 39 – Curva par/velocidad de un motor de corriente alterna.....	131
Figura 40 – Esquema de bloques de técnica trifásica – ondulator de corriente.....	131
Figura 41 – Esquema básico de un ondulator de tensión (inversor PWM).....	133
Figura 42 – Esquema básico de un ondulator de tensión (inversor PWM) ferroviario.....	134
Figura 43 – Tensión (V) modulada PWM y densidad de flujo magnético (B) obtenido en un motor.....	135
Figura 44 – Elementos constructivos de un pantógrafo.....	136
Figura 45 – Elementos constructivos de un disyuntor.....	136
Figura 46 – Ejemplo de cofre de aparellaje eléctrico de tracción.....	137
Figura 47 – Bloques principales del cofre de un ondulator de tensión ferroviario.....	138
Figura 48 – Estructura modular por tarjetas electrónicas de un regulador de marcha.....	138
Figura 49 – Detalle constructivo de un conjunto de resistencias de frenado.....	139
Figura 50 – Detalle constructivo de un motor de corriente alterna con rotor de jaula.....	139
Figura 51 – Características básicas de los trenes de la serie 5000-1ª.....	140
Figura 52 – Características básicas de los trenes de la serie 5000-4ª.....	142
Figura 53 – Características básicas de los trenes de la serie 2000-B.....	143
Figura 54 – Características básicas de los trenes de la serie 8000.....	144
Figura 55 – Dimensiones constructivas de escaleras mecánicas TNE.....	148
Figura 56 – Bloques constructivos de escaleras mecánicas TNE.....	149
Figura 57 – Bloques de reparación de un sistema de tracción eléctrico y una escalera mecánica.....	154
Figura 58 – Distribución de resultados del test de tendencia $U$ de cada ítem por sistema.....	169
Figura 59 – Distribución de los TBF del tren 53 de la serie 2000-B.....	174
Figura 60 – Fallos acumulados por el tren 9 de la serie 8000 (sin tendencia).....	176
Figura 61 – Gráfica de dispersión de $\lambda$ de sistemas de tracción serie 2000-B con modelo HPP aceptado..	176
Figura 62 – Distribución de los TBF del tren 54 de la serie 2000-B.....	177
Figura 63 – Fallos acumulados por el tren 6 de la serie 8000 (tendencia decreciente).....	182
Figura 64 – Fallos acumulados por el tren 17 de la serie 5000-4ª (tendencia creciente).....	183
Figura 65 – Menú de análisis de sistemas reparables (Tiempos) de STATGRAPHICS Centurion.....	186
Figura 66 – Construcción gráfica de la estimación de $z(km)$ instantánea del tren 1 de la serie 8000.....	188
Figura 67 – Gráficos de densidad de los TBF de los sistemas de tracción y escaleras mecánicas.....	189
Figura 68 – Gráfico de densidad de los grupos de TBF de los sistemas de tracción en trenes 5000-4ª.....	202
Figura 69 – Gráfico de densidad de los grupos de TBF de los sistemas de tracción en trenes 2000-B.....	203
Figura 70 – Gráfico de densidad de los grupos de TBF de los sistemas de tracción en trenes 8000.....	204
Figura 71 – Gráfico de densidad de los grupos de TBF de las escaleras mecánicas TNE.....	205
Figura 72 – Histograma de fallos acumulados en sistemas de los tracción de trenes 5000-4ª.....	206

Figura 73 – Gráfico de fallos en 32 sistemas de los sistemas tracción de trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	208
Figura 74 – Histograma de fallos acumulados en sistemas de los tracción de trenes 2000-B.....	209
Figura 75 – Histograma de fallos acumulados en sistemas de los tracción de trenes 8000.....	210
Figura 76 – Gráfico de fallos de los 23 sistemas de los sistemas tracción de trenes 8000.....	212
Figura 77 – Histograma de fallos acumulados en escaleras mecánicas TNE.....	212
Figura 78 – Gráfico de fallos de 32 escaleras mecánicas TNE.....	214
Figura 79 – Menú de selección de distribuciones STATGRAPHICS Centurion para ajuste de los TBF.....	216
Figura 80 – Histograma de los TBF y distribución logística generalizada en tren 19 de 5000-4 <sup>a</sup> .....	221
Figura 81 – Histograma de los TBF y distribución log-normal 3 parámetros de la escalera mecánica 8.....	221
Figura 82 – Fallos acumulados por el tren 1 de la serie 8000.....	223
Figura 83 – Menú de selección de modelos NHPP en STATGRAPHICS Centurion.....	225
Figura 84 – Fallos acumulados por el tren 20 de la serie 2000-B.....	230
Figura 85 – Modelo de regresión simple lineal del tren 20 de la serie 5000-4 <sup>a</sup> .....	237
Figura 86 – Modelo de regresión simple cuadrado de $x$ del tren 1 de la serie 5000-4 <sup>a</sup> .....	237
Figura 87 – Modelo de regresión simple raíz cuadrada de $x$ de la escalera mecánica TNE número 33.....	239
Figura 88 – Representación gráfica 3D de $z(km)$ del sistema de tracción de trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	245
Figura 89 – Representación gráfica 3D de $z(km)$ del sistema de tracción de trenes 2000-B.....	246
Figura 90 – Representación gráfica 3D de $z(km)$ del sistema de tracción de trenes 8000.....	247
Figura 91 – Representación gráfica 3D de $z(t)$ de las escaleras mecánicas TNE.....	248
Figura 92 – Dendograma de los clústeres de los sistemas de tracción de trenes 2000-B con modelo RP.....	258
Figura 93 – Dendograma de los clústeres de los sistemas de tracción de trenes 8000 con modelo RP.....	259
Figura 94 – Dendograma de los clústeres de las escaleras mecánicas TNE con modelo RP.....	260
Figura 95 – Dendograma de los clústeres de trenes 2000-B con modelo NHPP decreciente.....	261
Figura 96 – Procedimiento complementario a IEC de análisis de la fiabilidad de sistemas reparables.....	263
Figura 97 – El futuro análisis de la fiabilidad de sistemas reparables.....	275

## Índice de Tablas

Tabla 1 – Símbolos que se utilizan en la representación del árbol de fallos.....	46
Tabla 2 – Símbolos de redes de Petri no temporizadas .....	51
Tabla 3 – Ejemplo del formato de una hoja de trabajo de AMFE.....	52
Tabla 4 – Modelos estadísticos clásicos apropiados para el análisis de datos de fallos .....	59
Tabla 5 – Clasificación de los procesos estocásticos .....	72
Tabla 6 – Guía para la selección del método de análisis de la fiabilidad IEC 60300-3-1 .....	104
Tabla 7 – Modelos apropiados para análisis de datos según IEC 60300-3-5.....	110
Tabla 8 – Valores críticos estadístico $U$ .....	114
Tabla 9 – Resumen de datos de los fallos de los sistemas de tracción en trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	155
Tabla 10 – Resumen de datos de los fallos de los sistemas de tracción en trenes 2000-B.....	156
Tabla 11 – Resumen de datos de los fallos de los sistemas de tracción en trenes 8000 .....	157
Tabla 12 – Resumen de datos de los fallos en escaleras mecánicas TNE.....	157
Tabla 13 – Resultados del test de tendencia $U$ al conjunto de ítems de cada sistema .....	159
Tabla 14 – Resultados de la estimación de parámetros de cada sistema con el modelo PLP .....	160
Tabla 15 – Resultados de las prueba de bondad de ajuste de cada sistema con el modelo PLP .....	161
Tabla 16 – Resultados del test de tendencia $U$ de cada sistema de tracción de trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	163
Tabla 17 – Resultados del test de tendencia $U$ de cada sistema de tracción de trenes 2000-B (I).....	164
Tabla 18 – Resultados del test de tendencia $U$ de cada sistema de tracción de trenes 2000-B (II).....	165
Tabla 19 – Resultados del test de tendencia $U$ de cada sistema de tracción de trenes 8000 .....	166
Tabla 20 – Resultados del test de tendencia $U$ de cada escalera mecánica TNE.....	167
Tabla 21 – Resumen de resultados del test de tendencia $U$ de cada ítem por sistema.....	168
Tabla 22 – Estimación de $\lambda$ constantes de ítems de cada sistema de tracción de trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	170
Tabla 23 – Estimación de $\lambda$ constantes de ítems de cada sistema de tracción de trenes 2000-B (I).....	171
Tabla 24 – Estimación de $\lambda$ constantes de ítems de cada sistema de tracción de trenes 2000-B (II) .....	172
Tabla 25 – Estimación de $\lambda$ constantes de ítems de cada sistema de tracción de trenes 8000 .....	173
Tabla 26 – Estimación de $\lambda$ constantes de ítems de cada escalera mecánica TNE.....	173
Tabla 27 – Resumen de aceptación y rechazo del modelo HPP por sistema e ítems.....	174
Tabla 28 – $\lambda$ de ítems con modelo HPP aceptado con valores del intervalo de confianza bilateral .....	175
Tabla 29 – Estimación de $\beta$ y $\lambda$ de modelo PLP de cada sistema de tracción de trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	178
Tabla 30 – Estimación de $\beta$ y $\lambda$ de modelo PLP de cada sistema de tracción de trenes 2000-B.....	179
Tabla 31 – Estimación de $\beta$ y $\lambda$ de modelo PLP de cada sistema de tracción de trenes 8000 .....	180
Tabla 32 – Estimación de $\beta$ y $\lambda$ de modelo PLP de cada escalera mecánica TNE .....	180
Tabla 33 – Resumen de aceptación y rechazo del modelo PLP por sistema e ítems.....	181
Tabla 34 - Parámetros $\beta$ y $\lambda$ de ítems con modelo PLP aceptado .....	181
Tabla 35 - Parámetros básicos de los TBF de los sistemas.....	189

Tabla 36 - Correlaciones de los TBF con variables de contexto en trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	191
Tabla 37- Correlaciones de los TBF con variables de contexto en trenes 2000-B (I) .....	192
Tabla 38 - Correlaciones de los TBF con variables de contexto en trenes 2000-B (II).....	193
Tabla 39 - Correlaciones de los TBF con variables de contexto en trenes 8000 .....	194
Tabla 40 - Correlaciones de los TBF con variables de contexto en escaleras mecánicas TNE.....	195
Tabla 41 – Leyenda de los subsistemas que componen los sistemas de tracción de trenes .....	196
Tabla 42 - Correlaciones de los TBF total y subsistemas en trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	197
Tabla 43 - Correlaciones de los TBF total y subsistemas en trenes 2000-B (I) .....	198
Tabla 44 - Correlaciones de los TBF total y subsistemas en trenes 2000-B (II).....	199
Tabla 45 - Correlaciones de los TBF total y subsistemas en trenes 8000 .....	200
Tabla 46 - Correlaciones de los TBF total y subsistemas en escaleras mecánicas TNE.....	201
Tabla 47 – Parámetros básicos de los grupos de TBF de los trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	202
Tabla 48 – Parámetros básicos de los grupos de TBF de los trenes 2000-B .....	203
Tabla 49 – Parámetros básicos de los grupos de TBF de los trenes 8000 .....	204
Tabla 50 – Parámetros básicos de los grupos de TBF de las escaleras mecánicas TNE.....	205
Tabla 51 – Fallos acumulados en intervalos de 15.000 km en trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	207
Tabla 52 – Fallos acumulados en intervalos de 15.000 km en trenes 2000-B.....	209
Tabla 53 – Fallos acumulados en intervalos de 15.000 km en trenes 8000.....	211
Tabla 54 – Fallos acumulados en intervalos de 300 horas en escaleras mecánicas TNE.....	213
Tabla 55 – Tabla de distribuciones ensayadas sobre los TBF para los modelos RP .....	217
Tabla 56 – Estimación de $\lambda$ constantes para modelos RP en sistemas de tracción de trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	218
Tabla 57 – Estimación de $\lambda$ constantes para modelos RP en sistemas de tracción de trenes 2000-B (I).....	218
Tabla 58 – Estimación de $\lambda$ constantes para modelos RP en sistemas de tracción de trenes 2000-B (II) .....	219
Tabla 59 – Estimación de $\lambda$ constantes para modelos RP en sistemas de tracción de trenes 8000.....	219
Tabla 60 – Estimación de $\lambda$ constantes para modelos RP en escaleras mecánicas TNE.....	220
Tabla 61 – Resumen de aceptación y rechazo del modelo RP por sistema e items.....	220
Tabla 62 – $\lambda$ de items con modelo RP aceptado (I) .....	222
Tabla 63 – $\lambda$ de items con modelo RP aceptado (II).....	223
Tabla 64 – Resultados de aceptación de modelos NHPP en sistemas de tracción de trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	226
Tabla 65 – Resultados de aceptación de modelos NHPP en sistemas de tracción de trenes 2000-B .....	227
Tabla 66 – Resultados de aceptación de modelos NHPP en sistemas de tracción de trenes 8000 .....	228
Tabla 67 – Resultados de aceptación de modelos NHPP en sistemas de tracción de trenes 8000 .....	228
Tabla 68 – Resumen de aceptación y rechazo del modelo NHPP por sistema e items .....	229
Tabla 69 – Parámetros de items con modelo NHPP aceptado.....	229
Tabla 70 – Modelos de regresión simple de STATGRAPHICS para estimación de $E[N(t)]$ .....	235
Tabla 71 – Modelos de regresión simple estimados de $E[N(t)]$ en trenes 5000-4 <sup>a</sup> .....	236
Tabla 72 – Modelos de regresión simple estimados de $E[N(t)]$ en escaleras mecánicas TNE.....	238
Tabla 73 – Correlaciones entre variables de contexto de las escaleras mecánicas TNE .....	250

Tabla 74 – Métodos multivariantes. Aplicación a la fiabilidad de sistemas reparables .....	255
Tabla 75 – Clústeres de los sistemas de tracción de trenes 2000-B con modelo RP aceptado .....	257
Tabla 76 – Clústeres de los sistemas de tracción de trenes 8000 con modelo RP aceptado .....	258
Tabla 77 – Clústeres de las escaleras mecánicas TNE con modelo RP aceptado .....	259
Tabla 78 – Clúster creciente de los sistemas de tracción de trenes 2000-B con modelo NHPP aceptado.....	260
Tabla 79 – Clústeres decrecientes de los s. de tracción de trenes 2000-B con modelo NHPP aceptado .....	261

## Abreviaturas

---

$F(t)$	Función acumulada de la probabilidad de fallo
$R(t)$	Función de fiabilidad
$\Lambda(t)$	Función de renovación ( $= E[N(t)]$ )
$f(t)$	Función densidad de probabilidad de fallo
$z(t)$	Función intensidad de fallo
$H_0$	Hipótesis nula
$N(t)$	Numero acumulado de fallos
$E[N(t)]$	Numero acumulado esperado de fallos
$\alpha$	Parámetro de escala
$\beta$	Parámetro de forma
$\gamma$	Parámetro de localización
$\mu(t)$	Tasa de aparición de fallos (ROCOF)
$\lambda$	Tasa de fallo constante
$\hat{\lambda}$	Tasa de fallo constante estimada
$\mu(t)$	Tasa de reparación
$\mu$	Tasa de reparación constante
$\lambda(t)$	Tasa instantánea de fallo
$A^2$	Test Anderson-Darling
$\chi^2$	Test Chi-cuadrado
$C^2$	Test Cramer-von-Mises
$K-S$	Test Kolmogorov-Smirnov
$V$	Test Kuiper
$U^2$	Test Watson
$\rightarrow$	Tiende a
$v.a.$	Variables Aleatorias

3D	3 Dimensiones
AAF	Análisis por Árbol de Fallos
AAS	Análisis por Árbol de Sucesos
ACP	Análisis del Caso Peor
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
AG	Modelo Andersen–Gill
AIFAC	Análisis por Informe de Fallos y Acciones Correctoras
AMFE	Análisis de los Modos de Fallos y de sus Efectos
AMFEC	Análisis de los Modos de Fallos, de sus Efectos y de su Criticidad
AMSAA	Army Materiel Systems Analysis Activity
ANOVA	Análisis de la Varianza (ANalysis Of Variance)
ARIMA	Modelo autorregresivo integrado de promedio móvil (Autoregressive Integrated Moving Average Process)
ATO	Operación Automática del Tren (Automatic Train Operation)
ATP	Protección Automática de Tren (Automatic Train Protection)
BBS	Modelo Block-Borges-Savits
BIP	Proceso de intensidad encerrada (Bounded Intensity process)
BP	Modelo Brown-Proschan
BPP	Proceso de Poisson de ramificación (Branching Poisson Process)
CA	Corriente Alterna
CC	Corriente Continua
CDF	Función acumulada de la probabilidad de fallo (Cumulative Distribution Function)
CEI	Comisión Electrotécnica Internacional
CEN	Comité Europeo de Normalización (Comité Européen de Normalisation)
CENELEC	Comité Europeo de Normalización Electrotécnica (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique)
CNET	Centre National d'Études des Télécommunication
DBF	Análisis por Diagramas de Bloques de Fiabilidad
EBP	Proceso Engelhardt-Bain ( Engelhardt-Bain Process)
ES	Suavización exponencial (Exponential Smoothing)
G1-RP	Proceso de renovación geométrico G1 (Geometric G1-Renewal Process)
GRP, G-RP	Procesos de renovación generalizados (Generalized- Renewal Process)
GTO	Tiristor GTO (Gate Turn-Off Thyristor)
HAZOP	Estudios de peligros y operatividad (HAZard and OPerability studies)
HPP	Proceso de Poisson homogéneo (Homogeneous Poisson Process)
HRA	Análisis de fiabilidad humana (Human Reliability Aspects)
HTRP	Modelo heterogéneo de renovación con tendencia (Heterogeneous TRP)
i.i.d.	Variable independiente e idénticamente distribuida (independent and identically distributed)
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional (International Electrotechnical Commission)
IFS	Ingeniería de Fiabilidad del Software
IGBT	Transistor bipolar de puerta aislada (Insulated Gate Bipolar Transistor)
MA	Media Móvil (Moving Average)
IoT	Internet de las cosas (Internet of Things)
MATLAB	MATrix LABoratory
MCF	Función Acumulativa Media (Mean Cumulative Function)
MIL-HDBK	MILiraty-HanDBooK. United States Defense Standard
MLE	Estimador de máxima verosimilitud (Maximum Likelihood Estimation)
MOSFET	Transistor MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

MPLP	Ley de potencia modulada (Modulated Power Law Process)
MRP	Proceso de renovación modulado (Modulated Renewal Process)
MTBF	Tiempo Medio Entre Fallo (Mean Time Between Failure)
MTTF	Tiempo Medio Hasta el Fallo (Mean Time To Failure)
MTV	Método de la Tabla de Verdad
NHPP	Procesos de Poisson No Homogéneo (Non Homogeneous Poisson Process)
ORP	Proceso de renovación normal (Ordinary Renewal Process)
PCNT	Test no paramétrico "pair-wise comparison" (Pair-wise Comparison Nonparametric Test)
PDF	Función de densidad de probabilidad del fallo (Probability Density Function)
PEXP	Modelo exponencial por tramos (Piecewise Exponential Model)
PH	Modelo de riesgos proporcionales (Proportional Hazards)
PI	Modelo de intensidad proporcional (Proportional Intensity)
PLC	Controlador lógico programable/Autómata programable (Programmable Logic Controller)
PLP	Ley de potencia (Power Law Process)
PWM	Modulación de ancho de pulso (Pulse Width Modulation)
PWP-GT	Modelo Prentice–Williams–Peterson–Gap Time
PWP-TT	Modelo Prentice–Williams–Peterson–Total Time
RAT	Test de disposición inversa (Reverse Arrangement Test)
RGA	Análisis del crecimiento de la fiabilidad (Reliability Growth Analysis)
ROCOF	Tasa de aparición de fallos (Rate of Occurrence Of Failures)
RP	Procesos de Renovación (Renewal Processes)
SARIMA	Modelo autorregresivo integrado de promedio móvil estacional (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Process)
SP	Proceso Estocástico (Stochastic Process)
SPP	Proceso Puntual Estocástico (Stochastic Point Process)
SRP	Proceso de renovación superpuesto (Superimposed Renewal Process)
TBF	Tiempos Entre Fallos (Time Between Failure)
TRP	Procesos de renovación con tendencia (Trend Renewal Process)
TCP/IP	Protocolo de red TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol)
TTT	Test en Tiempo Total (Total Time on Test)
UNE	Una Norma Española
UMTS	Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (Universal Mobile Telecommunications System)
UNE-EN	Una Norma Española - European Norm
UTEC	Union Technique de l'électricité et de la Communication
VDE	Federación Alemana de Industrias Electrotécnicas, Electrónicas y de Tecnologías de la Información
WIFI	Estándar de comunicaciones inalámbricas IEEE 802.11
WLW	Modelo Wei–Lin–Weissfeld



# 1 INTRODUCCIÓN

---

Los sistemas industriales son un activo de las empresas que en muchos sectores suponen el mayor coste de inversión sostenido al que tiene que hacer frente el ejercicio tras ejercicio. Es muy conveniente que dichos sistemas se mantengan adecuadamente y cumplan sus ciclos teóricos de vida útil, con adecuados indicadores de servicio: seguridad, fiabilidad y disponibilidad.

Los países y empresas que prestan la adecuada atención al mantenimiento de sus sistemas industriales presentan una mayor eficacia y eficiencia en sus procesos productivos, y por ende unos mejores resultados económicos y financieros, ya que no se producen paradas indeseadas de las plantas, y los bienes mantienen sus condiciones operativas de diseño durante prolongados periodos de tiempo.

Los países con una mayor tradición y desarrollo en la ingeniería de mantenimiento son por este orden: Japón, Estados Unidos, Alemania, Reino Unido y Francia. No es casualidad que ocupen los primeros puestos como potencias mundiales, siendo los referentes en la investigación y el desarrollo en amplias áreas del conocimiento técnico.

Desgraciadamente en España la ingeniería de mantenimiento es tratada, tanto en el mundo académico como empresarial, como una ingeniería “menor”, siendo relegada en los planes de estudio universitarios a un segundo plano e ignorada como disciplina técnica con entidad propia en la mayoría de empresas.

## 1.1 Motivación

Después de más de treinta años dedicados casi en su totalidad al mantenimiento de sistemas industriales, la experiencia acumulada y los datos de campo generan una serie de preguntas cuyas respuestas no son evidentes y no responden a los tópicos que tenemos en relación al comportamiento esperado en la operación de sistemas.

Las preguntas deberían tener una sencilla contestación:

- ¿Varios sistemas idénticos en el mismo contexto de operación tiene la misma (o muy parecida) fiabilidad?
- ¿La fiabilidad de los sistemas está determinada básicamente por su diseño técnico y constructivo?
- ¿Los sistemas empeoran su fiabilidad con el paso del tiempo?

Evidentemente las tres preguntas tienen un sí por respuesta en la ortodoxia de la ingeniería de mantenimiento. El problema es que los datos de campo de cualquier sistema industrial complejo no permiten corroborar ninguna de estas hipótesis, más bien al contrario, las rebaten con un no rotundo.

Todos tenemos la impresión subjetiva, correcta por otro lado, de que sistemas idénticos, por ejemplo los automóviles fabricados en serie, tienen una fiabilidad operacional distinta y en muchos casos incluso dispar. Las explicaciones que se nos ocurren tienden al anecdótico: “me vendieron el primero de la serie...”, “lo fabricaron un lunes después de un puente...”, “tengo muy mala suerte, sólo se avería el mío...”.

Hace ya más de 10 años en mi empresa Metro de Madrid S.A., tuve la oportunidad de realizar un primer estudio estadístico de la fiabilidad de una serie de trenes metropolitanos, cuyos resultados fueron muy inquietantes:

- Trenes constructivamente idénticos y operando en las mismas condiciones presentaban fiabilidades muy distintas.
- Había trenes cuya fiabilidad no respondía a lo esperado de su diseño constructivo.
- Un número no despreciable de trenes mejoraban o empeoraban su fiabilidad con el paso de los meses sin explicación aparente.

Se analizó la correlación de la fiabilidad obtenida de cada tren con múltiples variables técnicas y operacionales si ningún resultado: orden de fabricación, temperaturas, línea de operación, centro mantenedor, etc.

No obstante, se manifestó un comportamiento en la evolución de la fiabilidad de los trenes con un patrón muy definido (que se desvelará en el análisis complementario) que me ha servido como motor de búsqueda para afrontar esta investigación, para la formulación de respuestas con el debido contraste estadístico y metodológico, y demostrar los modelos de comportamiento demostrados en los sistemas objeto del estudio.

Sirva esta investigación como una humilde contribución a la profundización en el conocimiento y divulgación a la comunidad científica de los hallazgos más relevantes obtenidos en los estudios de la fiabilidad de sistemas industriales desarrollados durante 5 años por este equipo de investigación, y que se resumen y cristalizan en esta tesis doctoral.

## 1.2 Objetivos

El objetivo central de esta investigación es la profundización en el conocimiento de la fiabilidad real obtenida en los sistemas industriales una vez transcurridos largos periodos de operación.

Para ello, este equipo de investigación se ha planteado como objetivos principales del doctorado:

- Identificar y clasificar adecuadamente el tipo de sistemas industriales objeto de los estudios de fiabilidad.
- Tener un profundo conocimiento del estado del arte del modelado de la fiabilidad de los sistemas industriales.

- Aplicar los métodos para el cálculo de la fiabilidad de sistemas industriales mayoritariamente aceptados por la comunidad científica, y recogidos en las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC).
- Analizar los resultados obtenidos en el modelado de la fiabilidad de los sistemas de acuerdo a las normas IEC.
- Desarrollar y aplicar un procedimiento metodológico de análisis complementario y multivariante, al objeto de analizar la fiabilidad obtenida en operación por los sistemas industriales.
- Presentar los resultados más relevantes de los análisis multivariantes exploratorios efectuados, dando respuestas a las hipótesis planteadas con el suficiente soporte y contraste estadístico.

Se procede a redactar esta tesis doctoral de síntesis, al objeto de que contribuya al modelado, conocimiento e interpretación de la fiabilidad obtenida en la operación de los sistemas industriales.

### 1.3 Metodología

La metodología empleada ha supuesto uno de los mayores retos para este equipo de investigación. En una primera fase se barajó la posibilidad de desarrollar una metodología desarrollada desde cero para el modelado de la fiabilidad de los sistemas industriales partiendo de los datos de operación, que permitiera representar adecuadamente el comportamiento de la fiabilidad de los mismos en largos periodos de operación.

Las dificultades técnicas para su cálculo estadístico son muy altas y los resultados que se fueron obteniendo carecían de la robustez necesaria, ya que las pruebas de bondad de ajuste e hipótesis nula no permitían tomar en consideración conclusión alguna.

Hay que tener en cuenta la casi nula publicación de libros y artículos en castellano en este campo, y en el vehicular idioma inglés están restringidos a contadas monografías y artículos científicos de limitada divulgación internacional, incluso académica.

Es entonces cuando nos centramos en analizar y profundizar los andamiajes matemáticos empleados en las publicaciones científicas para modelar la fiabilidad de sistemas industriales, llegando a la conclusión de que gran parte de los modelos publicados discernían desde el origen en aplicar unos tipos de modelos matemáticos para los sistemas no reparables y otros tipos de modelos para los sistemas reparables, resultando:

- Gran parte de los modelos de fiabilidad de mayor uso para sistemas no reparables se basan en encontrar un modelo de distribución estadística ya existentes que se asemeje a la función real de la densidad de probabilidad de fallo  $f(t)$ .

- Y una buena parte de los modelos estadísticos aceptados mayoritariamente para sistemas reparables se basan en emplear los tiempos sucesivos entre fallos, modelando la intensidad de fallo  $z(t)$  con un **Proceso Puntual Estocástico (SPP)** que se asemeje a los datos reales.

Tanto para los sistemas no reparables, como para los sistemas reparables, existen publicados un buen número de métodos matemáticos alternativos a los citados, y que se analizarán en detalle en el capítulo del estado del arte, pero se anticipa que cuentan con un respaldo y empleo limitado en el sector del mantenimiento.

Lo verdaderamente desconcertante ha sido detectar en una parte nada despreciable de los análisis y modelados de la fiabilidad sistemas industriales recogidos en publicaciones y herramientas de gestión del sector empresarial de mantenimiento, el grave error conceptual de base que consistente en emplear los resultados de operación de los sistemas reparables, para caracterizarlos como un único individuo “tipo”, calculado como “promedio de fallos” de los “n” sistemas idénticos, así como emplear métodos estadísticos inadecuados, como son la distribución exponencial y la distribución de Weibull aplicados a la función de la densidad de probabilidad de fallo, cuyo uso debe de estar limitado a los sistemas no reparables.

En este proceso de análisis y selección de las diferentes metodologías existentes, finalmente se ha optado por aplicar, y siempre que sea posible, las normas internacionales en vigor en esta materia, al objeto de dotar a los estudios y análisis que se presentan en esta tesis del máximo rigor en los métodos, métricas y formulaciones matemáticas empleados, y con criterios de aceptación y/o rechazo de las hipótesis efectuadas, que cuentan con el respaldo más amplio de la comunidad científica internacional.

La IEC cuenta con un Comité Técnico, el TC56 cuya denominación actual es "dependability". El propósito del TC56 es preparar normas internacionales en materia de fiabilidad, de aplicación en todas las áreas tecnológicas. En España AENOR ha traducido una parte importante de las normas editadas por el IEC, por medio de su Comité Técnico AEN/CTN 200/SC56 “Confiabilidad”.

Por lo tanto la metodología seleccionada para modelar la fiabilidad en los sistemas industriales reparables con los datos de reales de operación es la normalizada por la IEC.

Sin embargo, las normas IEC no contemplan ningún análisis complementario en los sistemas que fracasan sus modelos o análisis multivariante para su aplicación a la fiabilidad de los sistemas reparables.

La fase de análisis complementario y multivariante de la fiabilidad de los sistemas reparables es exploratoria, efectuando este equipo de investigación diferentes ensayos multivariante, y en esta tesis se presentan los resultados de los análisis que han concluido de forma satisfactoria en algún grado.

Por lo tanto, la metodología aplicada consta de tres fases y se desarrollará posteriormente de forma detallada:

- 1ª Fase: Modelado de la fiabilidad de los sistemas reparables bajo normativa IEC.
- 2ª Fase: Análisis complementario de modelado de la fiabilidad de cada sistema reparable alternativo al de las normas IEC.
- 3ª Fase: Ensayos multivariantes exploratorios de la fiabilidad modelada de cada sistema.

Una vez seleccionada la metodología, se tuvo que decidir las herramientas de apoyo y soporte para la aplicación de los métodos estadísticos, al universo de datos disponibles en la operación de los cuatro sistemas reparables objeto de estudio.

Para la 1ª Fase se analizó el sector del software de programas específicos para el estudio y modelado de la fiabilidad, resultando el más completo del mercado el módulo RGA “Reliability Growth Analysis and Repairable System Analysis” de ReliaSoft. Sin embargo, ni RGA ni el resto de módulos y programas de software comercializados para el tratamiento de datos y modelado de la fiabilidad de sistemas reparables incluyen los métodos estadísticos de las normas IEC, empleando otros métodos estadísticos similares y alternativos, que no son los expresamente recogidos en la norma.

Es por ello, que se han tenido que crear sobre la hoja de cálculo Excel, los métodos estadísticos de las norma IEC. A tal efecto y a partir de las formulaciones de cada método, se ha creado una hoja Excel patrón de cada método estadístico de las normas IEC sobre la que se ha comprobado que los resultados de los ejemplos de los anexos de las normas, tienen los mismos resultados la hoja Excel patrón, como prueba de contraste de su correcta formulación.

Para la 2ª y 3ª Fase, es decir el modelado alternativo al de las normas IEC y el análisis multivariante, igualmente se ha sondeado el mercado del software de apoyo, resultado el programa más conveniente para esta investigación STATGRAPHICS Centurion, ya que aúna potentes herramientas de análisis multivariante, con la posibilidad de aplicar métodos estadísticos para sistemas reparables, que si bien no corresponden a los recogidos en las normas IEC, nos permiten establecer análisis complementarios, e incluso comparar los resultados obtenidos aplicando diferentes metodologías.

Por lo tanto, el software de apoyo seleccionado para implementar los métodos estadísticos requeridos en los estudios son:

- 1ª Fase: Hoja Excel patrón (formulada) para cada método estadístico de las normas IEC. STATGRAPHICS Centurion para métodos estadísticos alternativos a los de las normas IEC.
- 2ª Fase: STATGRAPHICS Centurion para el modelado de la fiabilidad alternativo a las normas EIC.
- 3ª Fase: STATGRAPHICS Centurion para el análisis multivariante exploratorio.

Con el objetivo marcado para que los hallazgos y conclusiones obtenidos en la investigación sean extensibles al mayor campo de aplicación posible, y al mismo tiempo cuenten con la mayor robustez y espectro de datos posible, se han seleccionado cuatros tipos de sistemas reparables de los que se dispone de una completa base de datos de fallos con más de 10 años de operación y con un número destacado de sistemas por cada tipo:

1. Sistema de tracción eléctrica ferroviaria tipo “chopper” en 36 trenes de la serie 5.000-4ª de Metro de Madrid.
2. Sistema de tracción eléctrica ferroviaria técnica trifásica con ondulator de corriente en 88 trenes de la serie 2.000-B de Metro de Madrid.
3. Sistema de tracción eléctrica ferroviaria técnica trifásica con ondulator de tensión en 23 trenes de la serie 8.000 de Metro de Madrid.
4. 40 escaleras mecánicas de la serie TNE20XX de Metro de Madrid.

Los tres primeros tipos de sistemas reparables son principalmente electro-electrónicos, y como contraste el cuarto es esencialmente electromecánico. Por todo ello, se estima que los resultados de esta investigación son de aplicación general a todo tipo de sistemas reparables, con independencia de la tecnología de base constructiva.

En relación a la metodología empleada para la elaboración de esta tesis, se han seguido las instrucciones y formatos recomendados en:

- La norma UNE 50136:1997 “Documentación, tesis, presentación”, así como el resto de normas de apoyo a las que ésta hace referencia.
- El documento “Tesis Doctoral. Elaboración: Idioma, Estructura, Redacción, Formato/Soporte” de 28 de mayo de 2013 del Vicerrectorado de Investigación de la UNED.
- El formato de publicación para tesis doctorales por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

## 1.4 Estructura

La estructura seleccionada para este documento tiene como objetivo presentar de una forma ordenada, clara y concisa los trabajos de la investigación efectuados y que se desarrollan en los siguientes capítulos:

- Capítulo 2 - Estado del arte: Se presentan los resultados de la investigación en relación al estado actual de desarrollo de los métodos estadísticos de modelado de la fiabilidad de sistemas, y en particular de los sistemas reparables.
- Capítulo 3 – Normativa europea de fiabilidad: Presentación de las normas europeas en materia de fiabilidad, desarrollando las que se emplearán como metodología de análisis en la investigación.

- Capítulo 4 – Sistemas de tracción eléctrica ferroviaria: Sucinta introducción técnica a la evolución histórica de sistemas de tracción eléctrica ferroviaria, siendo tres de ellos objeto del modelado de la fiabilidad con los datos de operación históricos.
- Capítulo 5 – Escaleras mecánicas: Somera descripción técnica de las escaleras mecánicas de la serie TNE20XX objeto de estudio de su fiabilidad modelada mediante sus datos de operación.
- Capítulo 6 – Estudio normativo de la fiabilidad de los sistemas reparables: Aplicación de la normativa IEC para el modelado de la fiabilidad de los cuatro tipos de sistemas reparables, según el procedimiento normativo que de una forma simplificada consta de seis fases:
  - 1) Aplicar el test de intensidad de fallo  $z(t)$  constante al conjunto de items de cada tipo de sistema reparable.
  - 2) Si no hay tendencia modelar  $z(t)$  como constante para el conjunto de items de cada tipo de sistema reparable.
  - 3) En caso de tendencia, aplicar la ley de potencia para modelar  $z(t)$  del conjunto de items. Comprobar la bondad de ajuste del modelo.
  - 4) Si se rechaza el modelado con la ley de potencia de  $z(t)$  del conjunto de items, se aplica el test de  $z(t)$  constante a cada ítem de cada sistema reparable.
  - 5) Para los items sin tendencia modelar  $z(t)$  como constante.
  - 6) Para los items con tendencia aplicar la ley de potencia para modelar  $z(t)$ . Comprobar la bondad de ajuste del modelo a cada ítem.
- Capítulo 7 - Estudio complementario de la fiabilidad de los sistemas reparables: Análisis de la naturaleza de los tiempos entre fallos y aplicación de los modelos estadísticos seleccionados para el modelado de la fiabilidad de los cuatro tipos de sistemas reparables y contraste con los resultados con los modelos de IEC.
- Capítulo 8 - Propuestas de análisis multivariante: Presentación de los resultados de la investigación más relevantes en el análisis multivariante efectuado sobre los modelos de fiabilidad obtenidos mediante la aplicación de la normativa IEC:
  1. Representación gráfica de de  $z(t)$  de los ítems con modelado aceptado.
  2. Aplicación de las herramientas estadísticas multivariantes de análisis.
  3. Análisis, caracterización y modelado de clústeres para cada grupo de ítems con fiabilidades homogéneas.
- Capítulo 9 – Conclusiones: Presentación y resumen de los hallazgos más relevantes de la investigación, así como de las principales aportaciones al conocimiento en el campo de la fiabilidad de sistemas reparables, y las potenciales nuevas líneas de investigación.

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

*Todos los hombres tienen por naturaleza el deseo de saber.*

*- Aristóteles -*

El estudio de la fiabilidad de los sistemas industriales es uno de los retos más complejos a los que se enfrenta un ingeniero cuya actividad se desarrolle en el sector del mantenimiento. Los sistemas se averían, y en su operación real no se ajustan habitualmente a los modelos estimados en la fase de diseño, y tampoco responden a los modelos que habitualmente se estudian y desarrollan en los planes de estudios académicos y monografías de mantenimiento industrial.

### 2.1. Introducción

La fiabilidad según definición de la norma UNE-EN 13306:2011 de terminología de mantenimiento es la “aptitud de un elemento de realizar una función requerida bajo unas condiciones determinadas durante un intervalo de tiempo dado”.

En la norma se aclara que se asume que el elemento está en estado de poder funcionar como se requiere desde el inicio del intervalo de tiempo dado. La fiabilidad se puede cuantificar como una probabilidad o mediante indicadores de desempeño utilizando medidas apropiadas, y entonces se menciona como desempeño de la fiabilidad. En algunos casos se puede considerar un determinado número de unidades de utilización en vez de un intervalo de tiempo dado (número de ciclos, número de horas de funcionamiento, número de kilómetros, etc.).

También define como elemento a la “parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que puede describirse y considerarse de forma individual”.

Un determinado número de elementos, por ejemplo, un conjunto de elementos o una muestra, pueden considerarse por sí mismos un elemento. Un elemento puede consistir en hardware, software, o en ambos. El software consiste en programas, procedimientos, reglas, documentación y datos de un sistema de proceso de información.

Es importante también atender a la clasificación de elementos que se realiza en la norma UNE-EN 13306:2011, ya que en general se confunden los términos:

- Elemento reparable: elemento que, después de un fallo y bajo condiciones dadas, se puede devolver a un estado en el que pueda realizar una función requerida. Las condiciones dadas pueden ser económicas, ecológicas, técnicas y/o de otro tipo.

- Elemento consumible: elemento o material que es fungible, que puede ser sustituido de forma regular y que generalmente no es un elemento específico. Normalmente, los elementos consumibles son de un coste relativamente bajo comparado con el elemento en sí.
- Repuesto: elemento destinado a sustituir a un elemento análogo, con objeto de conservar o mantener la función original requerida del elemento. El elemento original se puede reparar posteriormente. En inglés, un elemento que sea dedicado y/o intercambiable con un elemento específico, con frecuencia se denomina “replacement item”.

Cabe destacar, desde un primer momento, las diferencias que conllevan el estudio y análisis de la fiabilidad en los sistemas compuestos por elementos reparables, respecto de los sistemas no reparables (consumibles), ya que la metodología estadística a aplicar es muy distinta.

## 2.2. Expresiones matemáticas básicas para términos de fiabilidad

Siguiendo las recomendaciones de la norma UNE-EN 61703:2003 que recoge las expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y de logística de mantenimiento, se deben emplear separadamente expresiones matemáticas diferentes atendiendo a las siguientes clases de elementos: elementos no reparables, elementos reparables con tiempo hasta la restauración nulo y elementos reparables con tiempo hasta la restauración no nulo:

- Para **elementos no reparables** se emplean los modelos matemáticos basados en la variable aleatoria (tiempo hasta el fallo).
- En el caso de **elementos reparables con tiempo hasta la restauración nulo**, los modelos matemáticos son procesos de renovación simple (ordinario).
- Y por último para **elementos reparables con tiempo hasta la restauración no nulo**, se emplean procesos de renovación alternativo simple (ordinario).

### 2.2.1. Elementos no reparables

Se procede a enumerar y desarrollar las expresiones matemáticas básicas para elementos no reparables, así como la relación entre las mismas. Se denomina  $R(t)$  a la **función de fiabilidad (o supervivencia)**, que representa la probabilidad de supervivencia hasta el instante  $t$  de un elemento no reparable, y se expresa como:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(x)dx \quad (1)$$

Donde  $f(x)$  es la función de densidad de probabilidad del tiempo hasta el fallo del elemento.

La **función de densidad de probabilidad del fallo (PDF)**  $f(t)$ , representa la probabilidad de que un elemento falle entre el instante  $t$  y el instante  $t + dt$ :

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (2)$$

La **función acumulada de la probabilidad de fallo (CDF)**  $F(t)$  representa la probabilidad de que el elemento falle al cabo del tiempo  $t$ :

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (3)$$

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx \quad (4)$$

La **tasa instantánea de fallo**  $\lambda(t)$  representa la probabilidad de fallo de un determinado elemento entre el instante  $t$  y el instante  $t + dt$ .

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (5)$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(x)dx} \quad (6)$$

El **tiempo medio hasta el fallo** MTTF se calcula como:

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (7)$$

Siempre se intenta ajustar a la fiabilidad esperada u obtenida de un elemento no reparable, a alguna de las distribuciones estadísticas existentes que se asemeje a  $f(t)$ . Entre las distribuciones estadísticas continuas más aplicadas en análisis de la fiabilidad destacan la exponencial y Weibull.

Otras funciones de distribución también empleadas, pero con menor profusión en la modelización de la fiabilidad de elementos no reparables son la gamma, Erlang, Rayleigh, normal, log-normal. Para aplicar correctamente las funciones de distribución estadística, es necesario efectuar:

- a. Pruebas de significación (si se estudian muestras): para determinar si los resultados que da una muestra son coherentes con las características hipotéticas de la población total. Se suelen efectuar las pruebas de distribución normal, Chi<sup>2</sup> o de F de Snedecor-Fischer.

- b. Bondad del ajuste: para determinar si los datos disponibles se ajustan realmente a una función distribución determinada. Se realizan normalmente el test de ajuste  $\chi^2$ , ensayo Kolmogorov-Smirnov, ensayo de mínimos cuadrados, recta de regresión o curva de regresión.

La **distribución exponencial** es, probablemente, la distribución más utilizada en los análisis de fiabilidad, y concretamente en los análisis de elementos no reparables. Al aplicarla a (2), (6) y (5) se obtienen:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (8)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (9)$$

$$\lambda(t) = \lambda \quad (10)$$

El valor de  $\lambda(t)$  se mantiene constante durante toda la vida útil del elemento. La profusión con la que se utiliza este modelo, está justificada por su facilidad de estimación de su único parámetro  $\lambda$ , su facilidad de su tratamiento matemático y que es una distribución reproductiva, es decir, la suma de variables independientes exponencialmente distribuidas, se distribuye también según un modelo exponencial. La aplicabilidad práctica de esta distribución ha sido y sigue siendo muy discutida, dado que para fallar exponencialmente, un elemento ha de ser insensible a la edad y al uso, cuestión real sólo en una parte de los componentes eléctricos y electrónicos, pero más cuestionable si se trata de analizar la fiabilidad de elementos complejos o mecánicos.

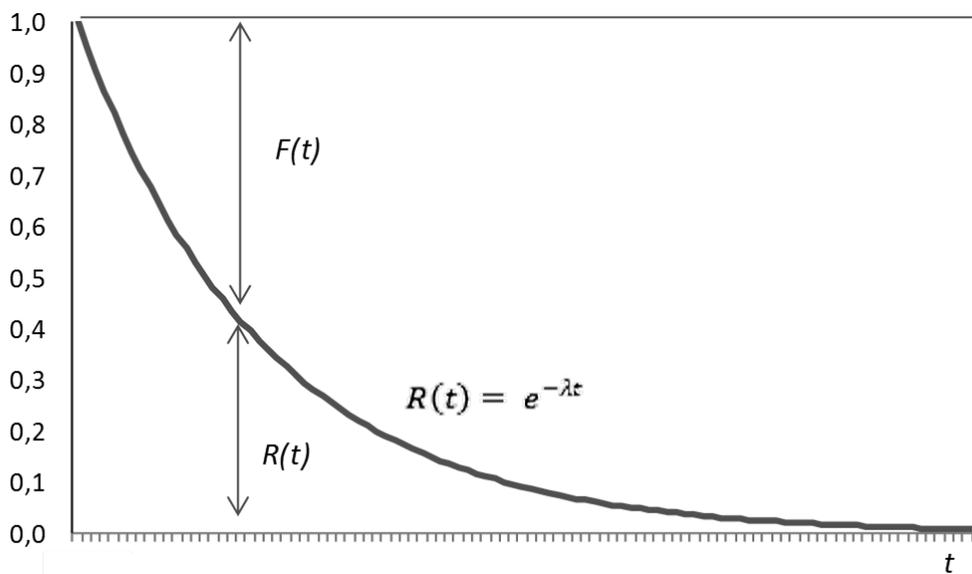


Figura 1 - Distribución exponencial aplicada a la fiabilidad

Cuando la tasa instantánea de fallos no tiene un comportamiento constante en el tiempo, se suele intentar emplear la **distribución de Weibull**, que aplicada a (2), (6) y (5) se obtiene:

$$f(t) = \beta \alpha (\alpha t)^{\beta-1} e^{-(\alpha t)^\beta} \quad (11)$$

$$R(t) = e^{-(\alpha t)^\beta} \quad (12)$$

$$\lambda = \beta \alpha (\alpha t)^{\beta-1} \quad (13)$$

Siendo  $\alpha$  el parámetro de escala y  $\beta$  el parámetro de forma.

La distribución de Weibull se emplea para modelar datos sin tener en cuenta si la tasa de fallo es creciente, decreciente o constante. La distribución de Weibull es flexible y se puede adaptar a una gran variedad de datos.

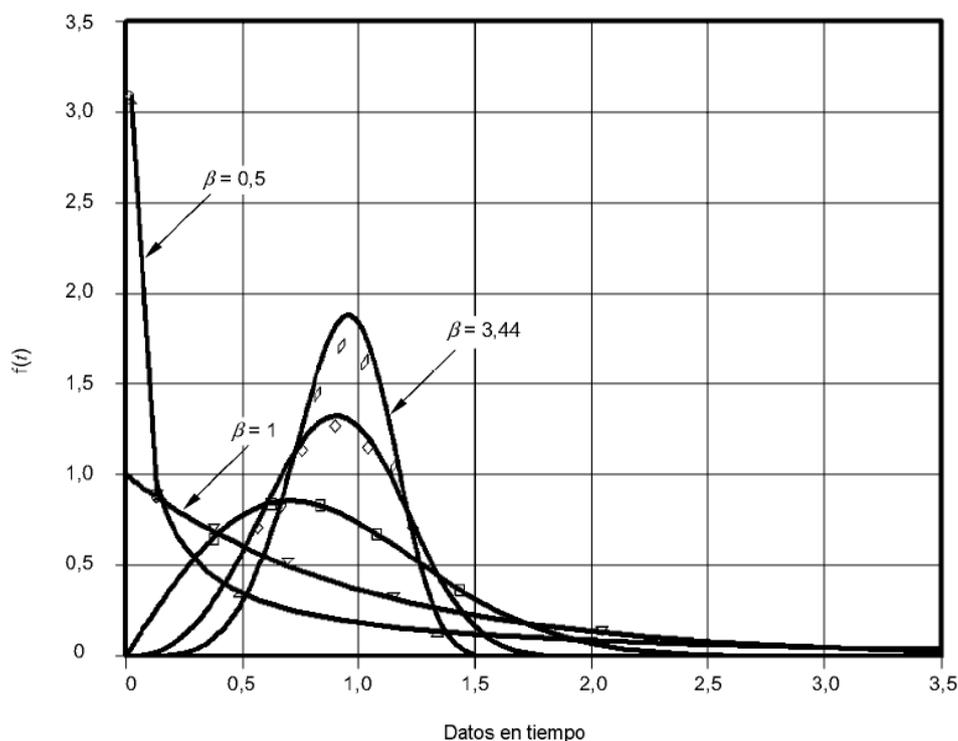


Figura 2 – Formas de  $f(t)$  para la familia de distribuciones de Weibull para  $\alpha = 1$

### 2.2.2. Elementos reparables con tiempo hasta la restauración nulo

Para elementos reparables, el modelo matemático básico es un proceso de renovación simple, cuando se puede despreciar el tiempo hasta la restauración del elemento. Una característica de fiabilidad del elemento reparable ampliamente utilizada es la intensidad de fallo, que equivale a la densidad de renovación.

La función de fiabilidad de un elemento no reparable se puede escribir como:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(s) ds \quad (14)$$

Donde  $f(s)$  es la función de densidad de probabilidad (también denominada función de densidad de fallos) de los tiempos hasta el fallo del elemento.

Por definición, la **intensidad instantánea de fallo**  $z(t)$ , es la derivada del número esperado de fallos,  $Z(t) = E[N(t)]$  en el intervalo de tiempo  $(0, t)$  donde  $N(t)$  es el número de fallos durante el intervalo de tiempo  $(0, t)$  y  $E$  indica la esperanza matemática:

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \left( \frac{Z(t+\Delta t) - Z(t)}{\Delta t} \right) = \frac{dZ(t)}{dt} \quad (15)$$

De la teoría de procesos de renovación, se concluye que  $z(t)$ , se puede escribir como:

$$z(t) = \sum_{n=1}^{\infty} h_{CTTF}^{(n)}(t) \quad (16)$$

Donde  $h_{CTTF}^{(n)}$  es la función de densidad de probabilidad de los tiempos reales hasta el  $n$ -ésimo fallo del componente.

Esto se puede calcular mediante la siguiente relación recurrente:

$$h_{CTTF}^{(1)}(t) = f_U(t) \quad (17)$$

$$h_{CTTF}^{(n)}(t) = \int_0^t f_U(x) h_{CTTF}^{(n-1)}(t-x) dx \quad (18)$$

Para  $n > 1$  y donde  $f_U(t)$  es la función de densidad de probabilidad de los tiempos de disponibilidad del elemento, es decir,  $f_U(t)\Delta t$  es aproximadamente la probabilidad de que un tiempo dado de disponibilidad termine en el intervalo de tiempo  $(t, t + \Delta t)$ , suponiendo que el tiempo de disponibilidad empezara en el instante  $t = 0$ .

El tiempo medio hasta el fallo MTTF se calcula como:

$$MTTF = \int_0^{\infty} tf(t)dt = \int_0^{\infty} R(t)dt \quad (19)$$

### 2.2.3. Elementos reparables con tiempo hasta la restauración no nulo

Para elementos reparables, el modelo matemático básico es un proceso de renovación alternativo simple cuando el tiempo hasta la restauración del elemento no es nulo. En este caso elemento reparable alterna entre un estado de disponibilidad y otro de indisponibilidad y una característica de fiabilidad del elemento ampliamente utilizada es la intensidad de fallo, que equivale a la densidad de renovación.

La función de fiabilidad de un elemento no reparable se puede escribir como:

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(s)ds \quad (20)$$

Donde  $f(s)$  es la función de densidad de probabilidad (también denominada función de densidad de fallos) de los tiempos hasta el fallo del elemento.

Por definición la **intensidad instantánea de fallo**  $z(t)$ , es la derivada del número esperado de fallos,  $Z(t) = E[N(t)]$  en el intervalo de tiempo  $(0, t)$  donde  $N(t)$  es el número de fallos durante el intervalo de tiempo  $(0, t)$  y E indica la esperanza matemática:

$$z(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \left( \frac{Z(t+\Delta t) - Z(t)}{\Delta t} \right) = \frac{dZ(t)}{dt} \quad (21)$$

De la teoría de procesos de renovación, se concluye que  $z(t)$ , se puede escribir como:

$$z(t) = \sum_{n=1}^{\infty} h_{CTTF}^{(n)}(t) \quad (22)$$

Donde  $h_{CTTF}^{(n)}$  es la función de densidad de probabilidad de los tiempos reales hasta el enésimo fallo del componente.

Esto se puede calcular mediante la siguiente relación recurrente:

$$h_{CTTF}^{(1)}(t) = f_U(t) \quad (23)$$

$$h_{CTTF}^{(n)}(t) = \int_0^t f_U(x) h_{CTTF}^{(n-1)} f_{U+R}(t-x) dx \quad (24)$$

Para  $n > 1$  y donde  $f_U(t)$  es la función de densidad de probabilidad de los tiempos de disponibilidad del elemento (incluyendo sus tiempos de funcionamiento, reposo, espera e inhabilitaciones externas).  $f_U(t)\Delta t$  es aproximadamente la probabilidad de que un tiempo dado de disponibilidad termine en el intervalo de tiempo  $(t, t + \Delta t)$ , suponiendo que el tiempo de disponibilidad empezara en el instante  $t = 0$ .

$f_{U+R}(t)$  es la función de densidad de probabilidad de la suma de los tiempos de disponibilidad ( $\tau_u$ ) y el correspondiente tiempo hasta la restauración ( $\xi_R$ ) y está dada por:

$$f_{U+R}(t) = \int_0^t g_R(t-s) f_U(s) d(s) \quad (25)$$

Donde  $g_R(t)$  es la función de densidad de probabilidad de los tiempos hasta la restauración del elemento, es decir,  $g_R(t)\Delta t$  es aproximadamente la probabilidad de que un elemento se restaure de un estado de avería a uno de disponibilidad en el intervalo de tiempo  $(t, t + \Delta t)$ , suponiendo que el fallo que produjera la avería sucediera en el instante  $t = 0$ . La magnitud  $z(t)\Delta t$  es aproximadamente la probabilidad (incondicional) de que el fallo del elemento suceda durante  $(t, t + \Delta t)$ .

El tiempo medio hasta el fallo MTTF se calcula como:

$$MTTF = \int_0^\infty t f(t) dt = \int_0^\infty R(t) dt \quad (26)$$

## 2.3. Definiciones y tipos de métodos en el análisis de la fiabilidad

Los métodos de análisis de la fiabilidad de un elemento se utilizan tanto para la predicción, revisión y la mejora de los valores alcanzados.

Estos análisis se realizan durante las fases de concepción y definición, de diseño y desarrollo y de operación y mantenimiento, a diferentes niveles del sistema y con diferentes grados de detalle, con el fin de evaluar, determinar y mejorar las características de fiabilidad de un elemento.

También se pueden emplear para comparar los resultados del análisis con los requisitos especificados.

Además, se utilizan en la logística y planificación del mantenimiento, para estimar las frecuencias de mantenimiento y de sustitución de piezas. Estas estimaciones determinan, a menudo, los elementos que más contribuyen al coste del ciclo de vida y se deberían aplicar con precaución en el desarrollo de estudios del coste del ciclo de vida y la realización de análisis comparativos.

Para proporcionar resultados significativos, el análisis debe tener en cuenta todas las posibles contribuciones a la fiabilidad de un sistema: hardware, software, así como factores humanos y aspectos organizativos.

Es importante remarcar la definición de los siguientes conceptos:

- Elemento: Cualquier parte, componente, dispositivo, subsistema, unidad funcional, equipo o sistema que puede considerarse individualmente. Un elemento puede constar de hardware, software o ambos y puede incluir, en casos particulares, personas.
- Sistema: Conjunto de elementos interrelacionados o que interactúan. El concepto de sistema es jerárquico. En el contexto de la fiabilidad, un sistema tendrá:
  - a) un propósito definido que se expresa en términos de funciones requeridas y
  - b) condiciones establecidas de uso u operación.
- Componente: Es el elemento de más bajo nivel que se considera en el análisis.
- Fallo: Terminación de la capacidad de un elemento para realizar una función requerida. Después de un fallo, el elemento tiene una avería. "Fallo" es un suceso, a diferencia de "avería" que es un estado.
- Avería: Estado de un elemento que se caracteriza por la incapacidad para realizar una función requerida, excluyendo la incapacidad por mantenimiento preventivo u otras acciones planificadas por la falta de recursos externos. Una avería es, a menudo, el resultado de un fallo del propio elemento, pero puede ocurrir sin un fallo previo.

Los métodos de análisis de la fiabilidad se clasifican en dos categorías principales:

1. Métodos generales de ingeniería que apoyan los análisis de la fiabilidad o añaden valor al proceso de diseño en función de la fiabilidad.
2. Métodos específicos para análisis de la fiabilidad.

## 2.4. Métodos generales de ingeniería que apoyan los análisis de la fiabilidad

Entre los métodos de ingeniería generales o de apoyo, se destacan:

- Análisis de circuitos ocultos: es un planteamiento informatizado para encontrar los circuitos “ocultos” que se definen como los caminos latentes que pueden causar una funcionalidad no deseada o inhibir una funcionalidad deseada sin considerar el fallo de los componentes. El camino puede consistir en cables, partes, interfaces software y fuentes de energía. El análisis de los circuitos ocultos se emplea para descubrir condiciones de circuitos latentes que pueden provocar modos imprevistos de operación. El análisis de los circuitos ocultos se utiliza ampliamente en sistemas aeroespaciales, en las industrias de desarrollo espacial y en las de generación de energía y centrales nucleares.
- Análisis del caso peor (ACP): es un planteamiento no estadístico que se utiliza para confirmar y determinar si el funcionamiento del sistema se encuentra dentro o fuera de especificaciones, en todas las combinaciones de los límites de tolerancia dados de los parámetros del sistema. Se utiliza generalmente para los sistemas compuestos de varios componentes y principalmente durante el diseño y la fase de desarrollo. Por ejemplo, cualquier mecanismo, circuito o red diseñados puede considerarse como un sistema. Las características de funcionamiento de los componentes, como los parámetros del sistema, pueden afectar a las características de funcionamiento del sistema y se combinan con expresiones matemáticas o con funciones lógicas.
- Modelado por simulación de las variaciones: El modelado por simulación de las variaciones consiste en un conjunto de planteamientos estadísticos que se utilizan para confirmar y determinar si el funcionamiento del sistema está dentro o no de especificaciones en todas las combinaciones de los límites dados de tolerancia de los parámetros del sistema. Hay dos métodos estadísticos típicos: el método de los momentos y el método de Monte Carlo.

El primero, diseñado para la variable que representa el funcionamiento del sistema, está basado en la aproximación lineal de una función de los parámetros de diseño mediante series de Taylor para los valores nominales. El segundo modelo se basa en la simulación por métodos estadísticos donde cada parámetro de diseño se selecciona aleatoriamente de una distribución dada de probabilidad.

El modelado por simulación de las variaciones se utiliza generalmente para sistemas compuestos por varios componentes y conjuntamente con el método del caso peor principalmente durante la fase de diseño y de desarrollo.

Por ejemplo, cualquier mecanismo, circuito o red se puede considerar como un sistema. Las características de funcionamiento de los componentes, así como los parámetros de diseño del sistema, pueden afectar a las características de funcionamiento del sistema. La simulación de Monte Carlo se realiza frecuentemente en los procesos de diseño asistido por ordenador.

- Ingeniería de fiabilidad del software (IFS): El propósito de la IFS es predecir la fiabilidad del software mediante métodos estadísticos. El problema es que, en principio, el software no falla, sino que proporciona de forma determinista un resultado correcto o erróneo para una entrada dada. El modelo subyacente no supone, por tanto, que el software actúa aleatoriamente, sino que la configuración del sistema y el perfil de operación (por ejemplo, los datos de entrada) pueden verse como un entorno aleatorio. La IFS se puede aplicar tanto durante las pruebas para decidir cuándo finalizar éstas (suponiendo que se ha establecido un criterio de aceptación) o para predecir la fiabilidad en la explotación. Normalmente los datos se muestrean en grupos, por ejemplo como número de fallos por tiempo de ejecución acumulado, ya que es muy difícil obtener tiempos entre apariciones de fallos reales. Existen desarrollados múltiples modelos IFS, siendo los más reconocidos por la comunidad científica:
  - o Modelos de Predicción:
    - Modelo de Colección de Datos Históricos Internos.
    - Modelo de Tiempo de Ejecución de Musa.
    - Modelo de Putnam.
    - Modelos de Predicción del Laboratorio Rome.
  - o Modelos de Estimación:
    - Modelos de Distribución Exponencial:
      - Modelo Exponencial General.
      - Lloyd-Lipow Model.
      - Modelo Básico de Musa.
      - Modelo Logarítmico de Musa.
      - Modelo de Shooman.
      - Modelo Goel-Okumoto.
    - Modelo de Distribución de Weibull.
    - Modelo de Estimación del Ratio de Fallo Bayesiano; fórmula de Bayes, modelos de distribución previos y posteriores, modelos de distribución previos conjugados.

- Análisis por elementos finitos: es un método numérico por ordenador utilizado para analizar los efectos de aplicar cargas a elementos físicos. Las cargas pueden ser mecánicas, térmicas, electromagnéticas, de carácter fluido o combinaciones de éstas. Normalmente el problema acometido es demasiado complejo para resolverlo por los métodos clásicos.

Esta técnica difiere fundamentalmente de los métodos clásicos en la forma de tratamiento de un dispositivo. Los elementos diferenciales infinitesimales que se utilizan en el cálculo, las ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales consideran al dispositivo como un todo continuo. Para el análisis por elementos finitos, el dispositivo se divide en bloques constituyentes simples interrelacionados que se denominan elementos. Los elementos se caracterizan por funciones de forma. Colectivamente, forman un modelo geométrico del dispositivo. Los elementos se interconectan en nodos. La información fluye de un elemento a otro sólo a través de nodos comunes. Se utiliza la interpolación para asegurar la continuidad dentro de los elementos y más allá de sus límites. De este modo, los efectos en cualquier punto dentro de la unidad pueden expresarse en términos de desplazamientos de los nodos.

El análisis por elementos finitos es un método efectivo para predecir el comportamiento y los modos de fallo de estructuras complejas. Puede utilizarse para analizar tipos de problemas muy diferentes, incluyendo análisis de esfuerzos mecánicos, vibración, circulación de fluidos, transferencia de calor, campos electromagnéticos y otros.

- Selección de componentes y reducción de esfuerzos: Los componentes se seleccionan, teniendo en cuenta dos criterios, su fiabilidad y su capacidad para resistir los esfuerzos operacionales y ambientales esperados cuando se utilizan como integrantes de un producto. La selección de componentes contempla ambos, es decir la fiabilidad requerida a un componente así como su valor nominal mecánico o eléctrico junto con la descripción de los entornos de trabajo en los que los componentes deben funcionar sin experimentar un fallo.
- Análisis de Pareto: Basado en el principio de Pareto, desarrollado por Vilfredo Pareto (un economista italiano), es una de las siete herramientas básicas de control de calidad (hojas de comprobación, diagramas de Pareto, diagramas de Ishikawa, diagramas de flujo, histogramas, gráficos de dispersión y gráficos de control). La aplicación de estas herramientas, desarrolladas y ampliamente utilizadas en el campo del control de calidad, puede resultar útil en el campo de la ingeniería de fiabilidad. El principio de Pareto establece que un pequeño conjunto de problemas (los pocos vitales) que afectan a un resultado común tienden a suceder mucho más frecuentemente que el resto (los muchos triviales).

Este principio puede enunciarse también como que el 20% de las causas causan el 80% de los problemas. El propósito del análisis de Pareto es concentrar los esfuerzos en aquellos problemas que tengan mayor potencial de mejora y ayudar en la priorización y asignación de los recursos allí donde sean más efectivos.

- Diagramas causa-efecto: El diagrama causa-efecto, también denominado diagrama de Ishikawa (por su creador, Kaoru Ishikawa de Japón) o diagrama de la espina de pez (debido a su forma), proporciona una representación gráfica y organizada de una lista de posibles causas de problemas o factores necesarios para asegurar el éxito o el fallo. Es una herramienta efectiva que permite ver rápidamente la relación entre factores cuando se estudian procesos y situaciones así como para planificación. Los diagramas causa-efecto se construyen típicamente mediante técnicas de tormenta de ideas. Como consecuencia de ello, a menudo se dibujan a mano en papel. Sin embargo, existen aplicaciones informáticas capaces de representar profesionalmente el diagrama. El diagrama causa efecto se utiliza para los análisis preliminares durante la fase de diseño y para el análisis de los efectos que se encuentran durante la operación.
- Análisis por informe de fallos y acciones correctoras (AIFAC): Es un sistema de bucle cerrado para la identificación, evaluación y corrección de problemas derivados de fallos de una manera conveniente. Se documentan los fallos que ocurren durante la fase de pruebas y evaluación. Los datos se recopilan a múltiples niveles. El sistema se utiliza para rastrear, analizar e identificar ulteriormente problemas de los componentes, errores de diseño, defectos de manipulación y deficiencias del proceso que requieren una acción correctora. El desarrollo de acciones correctoras se deriva de la determinación de la causa raíz del fallo. Se verifica la efectividad de las acciones correctoras antes de su implantación.

Un AIFAC se debería realizar tan pronto como el hardware y el software estén disponibles. Todo el personal implicado en la fase de pruebas y evaluación es responsable de la documentación de fallos. Los fallos se justifican y localizan en toda la extensión posible.

## **2.5. Métodos específicos para el análisis de la fiabilidad**

Existe una gran proliferación de métodos desarrollados específicamente para el análisis de la fiabilidad o que se emplean principalmente para realizar estos análisis. Se presentan en este apartado los que cuentan con un empleo habitual y la adecuada aceptación por la comunidad científica.

### **2.5.1. Predicción de la tasa de fallo en condiciones de referencia y operativas**

La predicción de la tasa de fallo es un método que se aplica principalmente durante las fases de concepción y diseño inicial para estimar la tasa de fallo de los equipos y del sistema. Se puede utilizar también en la fase de fabricación para mejorar el producto.

Se pueden adoptar tres técnicas básicas:

- Predicción de la tasa de fallo en las condiciones de referencia, también se denomina análisis por relación de componentes.
- Predicción de la tasa de fallo en las condiciones operativas, también se denomina análisis de esfuerzo de componentes.
- Predicción de la tasa de fallo usando análisis de semejanzas.

La elección de qué técnica se debe usar depende del nivel de conocimiento que se tenga del sistema en el momento en que se realiza la predicción de la fiabilidad y también del grado de aproximación que se considera aceptable.

Tanto para la predicción de la tasa de fallo en las condiciones de referencia y predicción de la tasa de fallo en las condiciones operativas, el analista necesita saber el número y tipo de componentes que constituyen el sistema. El analista también precisa conocer las condiciones de operación para las que se realiza la predicción de la tasa de fallo. Si las condiciones operativas coinciden con las de referencia para los componentes, entonces no es necesario tener en cuenta las condiciones de operación.

Sin embargo, cuando la predicción de la tasa de fallo es para unas condiciones de operación que difieren de las de referencia, entonces sí que se deben tener en cuenta las condiciones específicas de aplicación del componente (eléctricas, térmicas, ambientales) utilizando modelos desarrollados para tal propósito.

Para predicciones más exactas, se necesita una base de datos fiable de tasas de fallo por componente y se proporcionan recomendaciones en diversas normas internacionales de cómo se pueden determinar las tasas de fallo para las denominadas condiciones de referencia, a partir de dicha base de datos.

Se han desarrollado algunos manuales con datos de tasas de fallo y algunos de ellos están disponibles comercialmente. Sin embargo, los cálculos de fiabilidad pueden consumir mucho tiempo y, por ello, existen herramientas comerciales de software para realizar estos cálculos. La predicción de la tasa de fallos está basada en las suposiciones siguientes:

- los componentes están conectados lógicamente en serie (es decir, cada uno es necesario para el sistema);
- las tasas de fallo de los componentes son constantes en el tiempo;
- los fallos de los componentes son independientes.

Deben analizarse estos supuestos en relación con el sistema bajo estudio ya que pueden conducir a una estimación pesimista si existen redundancias en los niveles superiores de agregación.

La suposición de que las tasas de fallo son constantes reduce considerablemente el esfuerzo de cálculo, ya que la tasa de fallo total es simplemente la suma de las tasas de fallo de las partes. Esto no implica necesariamente que la tasa de fallo total sea una característica significativa de la fiabilidad: no todos los fallos afectarán al sistema de la misma manera.

Los fallos de los elementos de diagnóstico, así como algunos modos de averías puede que no afecten a la funcionalidad del sistema. En este caso, la tasa de fallo total sólo proporciona una medida del número de acciones de mantenimiento correctivo, independientemente de si guardan relación o no con los fallos funcionales del sistema. La predicción de la fiabilidad de un sistema producirá las predicciones con un nivel de precisión aceptable, dependiendo de los modelos disponibles de fallo de los componentes. Lo mismo aplica cuando la predicción de la tasa de fallos se realiza en condiciones de operación.

Este método está muy extendido para la predicción de la fiabilidad de un sistema, elemento o componente eléctrico o electrónico.

Entre las bases de datos más empleadas destaca la de la **norma MIL-HDBK-217**, que es la más conocida y reconocida mundialmente, desarrollada por el Departamento de Defensa de los EE.UU. Define dos métodos complementarios; recuento de partes y solicitantes de partes. Se parte de la base de que los componentes tienen una tasa de fallo constante  $\lambda(t) = \lambda$ , que se ve modificada por las condiciones ambientales con el método solicitante de partes y estas  $\lambda_i$  se agregan mediante el método de recuento de partes.

El **método solicitante de partes**, permite calcular la tasa de fallos de un componente a partir de:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_R \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E \quad (27)$$

Siendo;

$\lambda_b$  = Tasa de fallo básica.

$\pi_T$  = Factor Temperatura.

$\pi_A$  = Factor Aplicaciones.

$\pi_R$  = Factor Potencia.

$\pi_S$  = Factor Tensión.

$\pi_C$  = Factor Construcción.

$\pi_Q$  = Factor Calidad.

$\pi_E$  = Factor Ambiente.

El **método de recuento de partes**, emplea la fórmula para un sistema de  $i$  componentes:

$$\lambda_{Sist} = \sum N_i (\lambda_g \Pi_Q)_i \quad (28)$$

Siendo;

$N_i$  = Número de componentes  $i$ .

$\lambda_g$  = Tasa de fallo del componente  $i$ .

$\Pi_Q$  = Factor de ajuste de la calidad del componente.

Los valores de tasa de fallo básica y los factores están recogidos en tablas de la norma MIL-HDBK-217 para cada tipo de componente electrónico y eléctrico, cuyos valores han sido recopilados durante años, sometiendo cada componente a programas de pruebas y ensayo.

Otra norma de amplio uso para la predicción de la tasa de fallo es la europea IEC/TR 62380:2004 "Reliability data handbook - Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment". Esta norma incluye una guía de cálculo de la fiabilidad esperada de una tarjeta electrónica.

La norma europea incluye modelos de cálculo para tener en cuenta la influencia de las condiciones ambientales. Estos modelos tienen en cuenta si la placa electrónica opera en trabajo permanente, en ciclos de encendido/apagado o en aplicaciones inactivas de reserva. Por otra parte, la tasa de fallo de la soldadura de componentes también es incluida como una tasa de fallo de un componente.

La **norma IEC 61709:2011** desarrolla las condiciones de referencia para tasas de fallo y modelos de conversión en función de los esfuerzos para componentes electrónicos, si bien no cuenta con las bases de datos de los valores de tasa de fallo básica para cada tipo de componente.

Esta norma internacional está pensada para la predicción de fiabilidad de componentes utilizados en equipos y está dirigida a las organizaciones que disponen de sus propios datos, describiendo cómo establecer y utilizar dichos datos para realizar predicciones de fiabilidad. La tasa de fallo de un componente en condiciones de funcionamiento se calcula de la forma siguiente:

$$\lambda = \lambda_{ref} \pi_U \pi_I \pi_T \pi_E \pi_S \pi_{ES} \quad (29)$$

Siendo;

$\lambda_{ref}$  = Tasa de fallo en las condiciones de referencia.

$\pi_U$  = Factor de dependencia con la tensión.

$\pi_I$  = Factor de dependencia con la corriente.

$\pi_T$  = Factor de dependencia con la temperatura.

$\pi_E$  = Factor de aplicación ambiental.

$\pi_S$  = Factor de dependencia con la frecuencia de conmutación.

$\pi_{ES}$  = Factor de dependencia con el esfuerzo eléctrico.

Por lo tanto, la tasa de fallo para conjuntos de componentes en condiciones de funcionamiento se calcula como agregación de la forma siguiente:

$$\lambda_{Equip} = \sum_{i=1}^n (\lambda)_i \quad (30)$$

La norma desarrolla modelos de esfuerzo específicos y valores de los factores  $\pi$  aplicables a los distintos tipos de componentes que deben emplearse para convertir las tasas de fallo de referencia a tasas de fallo en las condiciones de funcionamiento en la explotación. Los factores  $\pi$  son modificadores de la tasa de fallo asociado a una condición o esfuerzo específico. Proporcionan una medida de la modificación de la tasa de fallo como consecuencia de cambios en dicho esfuerzo o condición.

Gran parte de estos modelos emplean como base de cálculo de la tasa de fallo intrínseca de un componente, la degradación mecánica de los semiconductores por influencia de los factores ambientales y de operación. Entre estas fórmulas destacan:

- Arrhenius.
- Eyring.
- Tensión.
- Tensión Exponencial.
- Temperatura/Voltaje.
- Electromigración.
- Temperatura/Voltaje/Humedad.
- Coffin-Manson (stress mecánico).

Como ejemplo, la ecuación de Arrhenius es una expresión matemática que se utiliza para comprobar la dependencia de la constante de velocidad (o cinética) de una reacción química con la temperatura a la que se lleva a cabo esa reacción, de acuerdo con la expresión:

$$k(T) = Ae^{-\frac{Ea}{RT}} \quad (31)$$

Siendo;

$k(T)$ : constante cinética (dependiente de la temperatura)

$A$ : factor pre-exponencial de cada componente

$Ea$ : energía de activación

$R$ : constante universal de los gases

$T$ : temperatura absoluta [K]

Si se toma como hipótesis de partida que los fallos del componente son generados por las reacciones químicas la tasa de fallos  $\lambda$  sería igual a  $k(T)$ :

$$\lambda = k(T) = Ae^{-\frac{Ea}{RT}} \quad (32)$$

Por otra parte, los datos de tasas de fallo de componentes  $\lambda_b$  o  $\lambda_{ref}$  se publican en una serie de manuales de diferente índole y origen de elaboración. Normalmente, los datos publicados son datos de componentes obtenidos de equipos en aplicaciones específicas, por ejemplo, centrales telefónicas. En ocasiones, la fuente de los datos no está especificada y pueden no proceder de datos de la explotación.

Por esta razón, las predicciones de tasas de fallo, a menudo difieren significativamente de las observaciones en la explotación y pueden llevar a conclusiones erróneas. La lista adjunta proporciona información relativa a fuentes de datos para la determinación de las tasas de fallo de componentes más empleadas.

- PRISM: La base de datos del manual de datos de fiabilidad de componentes electrónicos RAC (EPRD) es la misma que la utilizada previamente como base de la MIL-HDBK-217 y está apoyada por una aplicación informática que se comercializa con el nombre de PRISM.
- BELLCORE: Módulo de predicción de la fiabilidad desarrollado por Bellcore en el documento TR-NWT-000332 en revisión 6.
- GJB/Z 299: Estándar de fiabilidad chino que incluye los métodos de recuento de partes y solicitantes de partes.
- BRITISH TELECOM HRD5: Es una norma sobre fiabilidad desarrollada por British Telecommunications plc que proporciona también modelos para una amplia gama de componentes. En general HRD5 es similar a CNET RDF, pero proporciona unos modelos más sencillos y requiere para el análisis menos parámetros de datos.
- IEEE Gold Book: El Gold Book del IEEE contiene las prácticas recomendadas para el diseño de equipos de potencia industriales y comerciales fiables; proporciona datos relativos a la fiabilidad de equipos utilizados en equipos de distribución de energía industriales y comerciales.
- CNET RDF 2003: Es la última versión del manual del CNET. Este manual ha sido adoptado por UTEC y se conoce como manual de datos de fiabilidad UTEC 80810. El manual cubre la mayoría de los componentes de la MIL-HDBK-217.
- FIDES Guide 2009: Es un manual desarrollado por un consorcio de la industria francesa bajo la supervisión del Departamento de Defensa francés (DGA). La metodología FIDES se basa en la física de los fallos y está soportada por el análisis de datos de ensayos, devoluciones de la explotación y los modelos existentes.
- ITALTEL IRPH2003: El manual de predicción de Italtel se publicó, inicialmente, en 1993 como resultado de la colaboración entre muchas organizaciones y compañías europeas, en particular de un grupo de estudio con la participación de British Telecom, Italtel y CNET. IRPH 2003 adopta los modelos de tasas de fallo de la norma IEC 61709:2011 con algunas simplificaciones para facilitar su empleo.

- NPRD-95: Proporciona tasas de fallo para una amplia gama de elementos, incluyendo componentes y conjuntos mecánicos y electromecánicos. El documento proporciona datos detallados de tasas de fallo para más de 25.000 componentes de numerosos tipos, agrupados por ambiente y nivel de calidad.
- Telcordia SR-332: El procedimiento de predicción de fiabilidad de componentes electrónicos SR-232 documenta los métodos recomendados para predecir la fiabilidad de dispositivos y unidades hardware.
- Siemens SN 29500: El método Siemens de tasas de fallo de componentes y valores esperados lo desarrolló Siemens AG para uso propio de sus empresas asociadas como una base uniforme para la realización de predicciones de fiabilidad. SN 29500 se basa en la norma IEC 61709:2011 y establece tasas de fallo en condiciones de referencia, según se describe en esta norma.

### 2.5.2. Predicción de la tasa de fallo usando análisis de semejanzas

El análisis de semejanzas incluye el uso de datos sobre las prestaciones de los equipos instalados (en servicio) para efectuar la comparación entre equipos con un nuevo diseño y equipos ya existentes para predecir la fiabilidad final del elemento.

Las comparaciones de equipos similares se pueden hacer a los niveles de elemento final, subconjunto o componente utilizando los mismos datos de campo, pero empleando algoritmos y factores de cálculo distintos para los diferentes elementos. Los elementos que se compararán pueden incluir:

- condiciones operativas y ambientales (medidas y especificadas);
- características de diseño;
- procesos de diseño;
- procesos de aseguramiento de la fiabilidad;
- procesos de fabricación;
- procesos de mantenimiento;
- componentes y materiales.

Para cada uno de los elementos anteriores, se debe comparar un número de sub-elementos. A título de ejemplo, las condiciones operativas y ambientales pueden incluir la temperatura en el estado estacionario, la humedad, las variaciones de temperatura, la potencia eléctrica, el ciclo de trabajo, la vibración mecánica, etc.; las características del diseño de un equipo pueden incluir un número de componentes (separados de acuerdo con las principales familias de componentes), número de tarjetas electrónicas, tamaño, peso, materiales, etc.

El análisis de semejanza debe incluir los algoritmos o métodos de cálculo necesarios para cuantificar las semejanzas y diferencias existentes entre los equipos que se están evaluando y los equipos anteriores.

El análisis de semejanza entre elementos o partes se utiliza cuando no es posible llevar a cabo un análisis de semejanza ya que ningún equipo anterior es suficientemente similar o está disponible para realizar una comparación “uno a uno con el equipo que se diseña nuevamente y que se está evaluando. El análisis de semejanzas entre elementos es la comparación estructurada de elementos del nuevo equipo con elementos similares de un número de diferentes equipos anteriores, para los que existen datos de fiabilidad.

### 2.5.3. Análisis por árbol de fallos (AAF)

El análisis por árbol de fallo es un planteamiento arriba – abajo para el análisis de la fiabilidad de un producto. Persigue la identificación y análisis de las condiciones y factores que causan, o contribuyen a, la ocurrencia de un suceso determinado no deseado y que puede afectar al funcionamiento, seguridad, economía o a otras características especificadas del producto.

El AAF puede realizarse también para proporcionar un modelo de predicción de la fiabilidad de un sistema y permitir estudios coste-beneficio en la fase de diseño de un producto. Utilizado como una herramienta para la detección y evaluación cuantitativa de una causa de fallo, el AAF representa un método eficiente que identifica y evalúa los modos y causas de fallo de efectos conocidos o sospechados.

Tomando en consideración los efectos conocidos desfavorables y la capacidad de encontrar los respectivos modos y causas de fallo, el análisis por árbol de fallos permite la mitigación oportuna de los modos potenciales de fallo, permitiendo la mejora de la fiabilidad del producto en su fase de diseño.

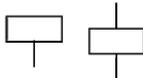
Construido para representar la arquitectura hardware y software además de analizar la funcionalidad, el AAF, desarrollado para tratar sucesos básicos, se convierte en una técnica sistemática de modelado de la fiabilidad que tiene en cuenta las interacciones complejas existentes entre las partes de un sistema mediante el modelado de sus dependencias funcionales o de fallo, de los sucesos que activan fallos y de los sucesos de causa común y permitiendo la representación de redes.

Para estimar la fiabilidad y disponibilidad de un sistema utilizando la técnica del AAF, se emplean métodos tales como la reducción Booleana y el análisis de los conjuntos de corte. Los datos básicos que se requieren son las tasas de fallo de los componentes, tasas de reparación, probabilidad de ocurrencia de los modos de fallo, etc.

El análisis por árbol de fallos tiene una doble aplicación, como medio para la identificación de una causa de un fallo conocido y como una herramienta de análisis de los modos de fallo y modelización y predicción de la fiabilidad. Los elementos clave de un árbol de fallos son:

- puertas y sucesos;
- conjuntos de corte.

Las puertas representan resultados y los sucesos representan entradas a las puertas. La representación simbólica de algunas puertas específicas puede variar de un libro de texto o software de análisis a otro; sin embargo, la representación de las puertas básicas es claramente universal.

Símbolo del AAF	Nombre del símbolo	Descripción
	SUCESO SUPERIOR o SUCESO INTERMEDIO	Suceso superior o intermedio que describe el fallo del sistema, el fallo del subsistema o el fallo de un nivel más alto que el del fallo de sucesos básicos
	SUCESO BÁSICO	Suceso básico para el que se dispone de información de fiabilidad
	SUCESO NO DESARROLLADO	Una parte del sistema que se tiene todavía que desarrollar o definir
	PUERTA DE TRANSFERENCIA	Puerta que indica que esta parte del sistema se desarrolla en otro lugar o página del diagrama
	PUERTA O	El suceso de salida ocurre si cualquiera de sus sucesos de entrada ocurre
	PUERTA Y	El suceso de salida ocurre si todos los sucesos de entrada ocurren

[UNE-EN 61025:2011]

Tabla 1 – Símbolos que se utilizan en la representación del árbol de fallos.

Los conjuntos de corte son grupos de sucesos que, si todos ocurren, provocarían el fallo del sistema. Los conjuntos mínimos de corte contienen el mínimo número de sucesos que son requeridos para el fallo. Cualquier eliminación de uno de ellos provocaría que el sistema no fallara.

Los siguientes métodos no se han incluido como métodos distintos al AAF porque derivan o están muy relacionados con este método primario:

- el análisis de causa/consecuencia es una combinación de los análisis por árbol de sucesos y árbol de fallos;
- el análisis por árbol de fallos dinámico es una extensión del análisis por árbol de fallos, donde ciertos sucesos se expresan mediante sub-modelos de Markov;
- los diagramas de decisión binarios se utilizan principalmente como una representación eficiente de los árboles de fallos.

#### 2.5.4. Análisis por árbol de sucesos (AAS)

El árbol de sucesos considera un número de posibles consecuencias de un suceso iniciador o fallo del sistema. Así, el árbol de sucesos se puede combinar muy eficientemente con el árbol de fallos. La raíz de un árbol de sucesos puede verse como el suceso principal de un árbol de fallos. Esta combinación se denomina, a veces, análisis de causas y consecuencias, donde el AAF se utiliza para analizar las causas y el AAS se utiliza para analizar las consecuencias de un suceso iniciador.

Para evaluar la gravedad de determinadas consecuencias que se derivan del suceso iniciador, se deberían identificar e investigar todos los posibles caminos de consecuencias y determinar sus probabilidades.

El análisis por árbol de sucesos se utiliza cuando es esencial investigar todos los posibles caminos de sucesos consecuentes, sus secuencias y las consecuencias o resultados más probables del suceso iniciador. Después de un suceso iniciador, hay algunos primeros sucesos o consecuencias posteriores que pueden seguir. La probabilidad asociada a la ocurrencia de un camino específico (secuencia de sucesos) representa el producto de las probabilidades condicionadas de todos los sucesos de ese camino.

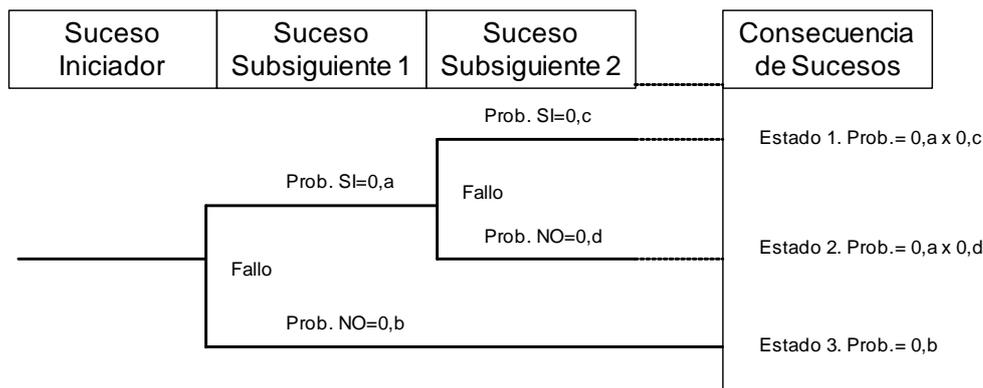


Figura 3 – Esquema general de un árbol de sucesos

Los elementos clave en la aplicación del árbol de sucesos son:

- el iniciador (suceso iniciador);
- los sucesos subsiguientes;
- y las consecuencias de los sucesos.

### 2.5.5. Análisis por diagramas de bloques de fiabilidad (DBF)

El análisis por diagramas de bloques de fiabilidad (DBF) es un método de análisis de un sistema mediante la representación gráfica de una estructura lógica de un sistema en términos de subsistemas o componentes. Esto permite que los caminos de éxito del sistema se representen mediante el camino en el que los bloques (subsistemas/componentes) se conectan lógicamente.

Los diagramas de bloques se encuentran entre las primeras tareas que se completan durante la definición del producto. Deberían construirse como parte del desarrollo conceptual inicial. Deberían arrancarse tan pronto como exista la definición del programa, completarse como parte del análisis de requisitos, y extenderse continuamente a un mayor nivel de detalle, a medida que los datos estén disponibles con el fin de tomar decisiones y hacer estudios coste-beneficio.

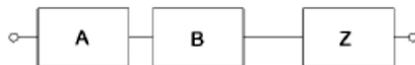
Para construir un DBF, se pueden emplear varias técnicas de análisis cualitativo.

- Establecer la definición del éxito del sistema.
- Dividir el sistema en bloques funcionales apropiados para el propósito del análisis de fiabilidad. Algunos bloques pueden representar subestructuras del sistema que, a su vez, pueden representarse por otros DBF (reducción del sistema).
- Efectuar el análisis cualitativo; hay varios métodos para la evaluación cuantitativa de un DBF. Dependiendo del tipo de estructura (reducible o irreducible), se pueden emplear técnicas booleanas sencillas, tablas de verdad o análisis de conjuntos de corte o de camino para la predicción de los valores de fiabilidad y disponibilidad del sistema a partir de los datos de los componentes básicos.

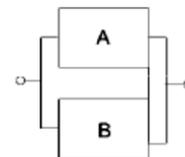
Se pueden evaluar modelos más complejos en los que el mismo bloque aparece más de una vez en el diagrama mediante el uso de:

- El teorema de la probabilidad total;
- Tablas booleanas de verdad.

Serie



Paralelo (activo)



Modelo m de n

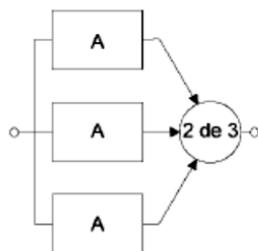
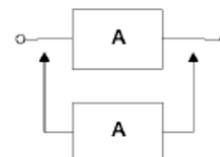
En espera  
(en espera fría)

Figura 4 – Modelos elementales para análisis DBF

### 2.5.6. Análisis de Markov

El modelo de Markov es un método probabilista que permite adaptar la dependencia estadística de las características de fallo o reparación de los componentes individuales al estado del sistema. Por tanto, el modelo de Markov puede considerar los efectos tanto de los fallos de los componentes dependientes del orden como de las tasas de transición variables que cambian como consecuencia de esfuerzos u otros factores.

Por esta razón, el análisis de Markov es un método adecuado para la evaluación de la fiabilidad de estructuras de sistemas funcionalmente complejos y con estrategias complejas de reparación y mantenimiento.

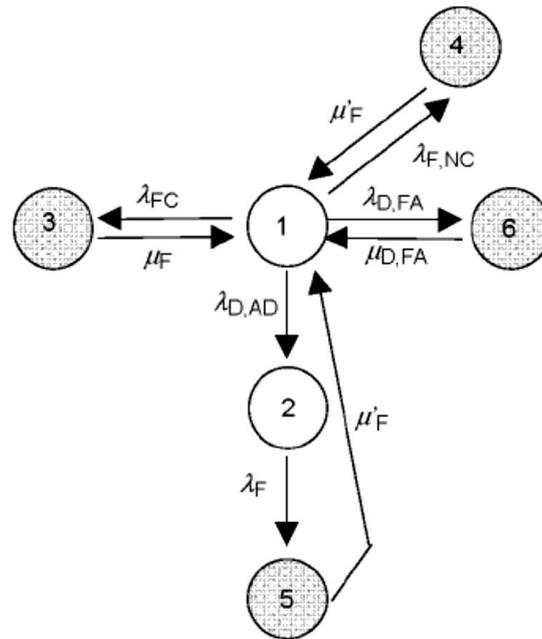
El método se basa en la teoría de las cadenas de Markov. Para aplicaciones de fiabilidad, el modelo de referencia normal es el modelo de Markov homogéneo en el tiempo que requiere que las tasas de transición (fallo y reparación) sean constantes. A expensas del incremento del espacio de estados, las transiciones no exponenciales pueden aproximarse por una secuencia de transiciones exponenciales. Para este modelo, se dispone de técnicas generales y eficientes de métodos numéricos y su única limitación para su aplicación es la dimensión del espacio de estados.

La representación del comportamiento del sistema por medio de un modelo de Markov requiere la determinación de todos los estados posibles del sistema, preferiblemente representados de forma gráfica mediante un diagrama de transición de estados. Además, tienen que especificarse las tasas de transición (constantes) de un estado a otro (tasas de fallo o de reparación de un componente, tasas de sucesos, etc.). El resultado típico de un modelo de Markov es la probabilidad de estar en un conjunto dado de estados (normalmente esta probabilidad es la medida de disponibilidad).

El campo adecuado de aplicación de esta técnica es cuando las tasas de transición (fallo o reparación) dependen del estado del sistema o varían con la carga, el nivel de esfuerzo, la estructura del sistema (por ejemplo, en espera), la política de mantenimiento u otros factores. En particular, la estructura del sistema (espera fría o en caliente, repuestos) y la política de mantenimiento (equipos de reparación simple o múltiple) inducen dependencias que no se pueden considerar con otras técnicas menos intensivas computacionalmente. Las aplicaciones típicas son las predicciones de fiabilidad/disponibilidad.

Para la aplicación de esta metodología, hay que tener en cuenta los siguientes pasos clave:

- Definición del espacio de los estados del sistema;
- Asignación de las tasas de transición entre estados (independientes del tiempo);
- Definición de las medidas de salida (grupo de estados que conducen a un fallo del sistema);
- Generación del modelo matemático (matriz de tasas de transición) y resolución de los modelos de Markov mediante la utilización de un paquete de software adecuado;
- Análisis de resultados.



[IEC 61165:2006]

Figura 5 – Diagrama de transición de estados en análisis de Markov

En la figura adjunta de ejemplo los círculos blancos representan estados "operativos", mientras que los círculos grises representan estados "no operativos".  $\lambda_x$  son las tasas de fallo de transición de un estado a otro y  $\mu_x$  son las tasas de reparación de paso de un estado a otro.

### 2.5.7. Análisis por redes de Petri

Las redes de Petri son una herramienta gráfica para la representación y análisis de interacciones lógicas complejas entre los componentes o sucesos de un sistema. Las interacciones complejas típicas que se incluyen de forma natural en el lenguaje de la red de Petri son concurrencia, conflicto, sincronización, exclusión mutua y limitación de recursos.

La estructura estática del sistema que se modela se representa por un grafo de red de Petri, que se compone de tres elementos primarios:

- Nodos (normalmente dibujados como círculos) que representan las condiciones en las que el sistema puede encontrarse;
- Transiciones (normalmente dibujados como barras) que representan los sucesos que pueden cambiar una condición en otra;
- Arcos (dibujados como flechas) que conectan nodos con transiciones y transiciones con nodos y que representan las conexiones lógicas admisibles entre condiciones y sucesos.

Una condición es válida en una situación dada si el nodo correspondiente está marcado, es decir, contiene al menos una marca “•” (dibujado como un punto negro). La dinámica del sistema se representa mediante el movimiento de las marcas en el grafo. Se permite una transición si sus nodos de entrada contienen al menos una marca.

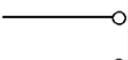
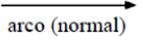
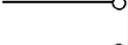
Una transición permitida puede dispararse y dicho disparo quita una marca de cada nodo de entrada y pone una marca en cada nodo de salida. La distribución de las marcas en los nodos se denomina “marcado”.

Comenzando desde un el marcado inicial, la aplicación de las reglas de activación y disparo produce todos los marcados posibles que constituyen el conjunto alcanzable de las redes de Petri. Este conjunto alcanzable proporciona todos los estados que el sistema puede alcanzar a partir del estado inicial.

Las redes de Petri estándares no contemplan la noción del tiempo. Sin embargo, han aparecido muchas extensiones en las que aspectos temporales se superponen a la red de Petri. Si se asigna una tasa de disparo (constante) a cada transición, la dinámica de las redes de Petri puede analizarse mediante una cadena de Markov de tiempo continuo cuyo espacio de estados es isomórfico con el conjunto alcanzable de la correspondiente red de Petri.

La red de Petri puede utilizarse como un lenguaje de alto nivel para generar modelos de Markov y algunas herramientas utilizadas para el de análisis de la fiabilidad se basan en esta metodología. Las redes de Petri proporcionan también un entorno natural para simulación.

El uso de las redes de Petri se recomienda cuando se deben tener en cuenta interacciones lógicas complejas (conurrencia, conflicto, sincronización, exclusión mutua, limitación de recursos). Además, las redes de Petri son normalmente un lenguaje más fácil y más natural para describir un modelo de Markov.

<i>Identificador</i>	<i>Identificador</i>	<i>Identificador</i>	$n$			
		 <i>(peso)</i>	 arco (normal)			
Símbolo de lugar, empleado también para lugares múltiples	Símbolo de transición	Símbolo de transición con un peso de la transición	Símbolos de relación – arcos normales	Símbolos de transición – arcos de ensayo	Símbolos de transición – arcos inhibidores	Símbolo de marca
Hay distintas posibilidades para trazar los arcos de ensayo e inhibidores. El símbolo de marca no es un símbolo de la estructura estática de la red, sino que se emplea para representar el flujo de información.						

[UNE-EN 62551:2014]

Tabla 2 – Símbolos de redes de Petri no temporizadas

El elemento clave de un análisis por red de Petri es la descripción de la estructura del sistema, y de su comportamiento dinámico en términos de elementos primarios (nodos, transiciones, arcos y marcas) propios del lenguaje de la red de Petri; este paso requiere el uso de herramientas de software “ad hoc”:

1. análisis cualitativo estructural;
2. análisis cuantitativo: si se asignan tasas de disparo constantes a las transiciones de la red de Petri el análisis cuantitativo se puede realizar mediante la solución numérica del correspondiente modelo de Markov, en otro caso la simulación es la única técnica viable.

### 2.5.8. Análisis de los modos de fallos y de sus efectos (AMFE)

El análisis de los modos de fallos y de sus efectos (AMFE) es un método abajo-arriba y cualitativo de análisis de la fiabilidad que es particularmente adecuado para el estudio de los fallos de los materiales, componentes y equipamiento y de sus efectos sobre el siguiente nivel funcional más alto. Las iteraciones de este paso (identificación de los modos de fallo único y la evaluación de sus efectos sobre el siguiente nivel más alto) producen la identificación de todos los modos de fallo único del sistema.

El AMFE se presta para el análisis de sistemas de diferentes tecnologías (eléctrica, mecánica, hidráulica, software, etc.) con estructuras funcionales simples. El análisis de los modos de fallos, de sus efectos y de su criticidad (AMFEC) extiende el AMFE para incluir el análisis de criticidad, cuantificando los efectos de los fallos en términos de probabilidad de ocurrencia y la gravedad de los mismos. La gravedad de los efectos se asigna con respecto a una escala específica.

Tanto el AMFEC como el AMFE se llevan a cabo normalmente cuando se prevé un cierto riesgo en el programa correspondiente al inicio del desarrollo de un proceso o producto. Los factores que se pueden considerar son nueva tecnología, nuevos procesos, nuevos diseños o cambios en el entorno, cargas o regulaciones. Los AMFE y AMFEC pueden realizarse sobre componentes o sistemas que formen parte de productos, procesos o equipamiento de fabricación. Se pueden también llevar a cabo sobre sistemas software.

Elemento final: Periodo de operación:			Elemento: Revisión:					Preparado por: Fecha:			
Ref. Elemento	Descripción y función del elemento	Modo de fallo	Código del modo de fallo	Posibles causas de fallo	Efecto local	Efecto final	Método de detección	Medidas de compensación contra el fallo	Categoría de severidad	Frecuencia o probabilidad de ocurrencia	Comentarios

[UNE-EN 60812:2008]

Tabla 3 – Ejemplo del formato de una hoja de trabajo de AMFE

Los análisis AMFE y AMFEC siguen generalmente los pasos siguientes:

- Identificación de cómo debería funcionar el componente de un sistema;
- Identificación de sus potenciales modos de fallo, causas y efectos;
- Identificación del riesgo relativo a los modos de fallo y sus efectos;
- Identificación de las acciones recomendadas para eliminar o reducir el riesgo;
- Seguimiento de actividades para cerrar las acciones recomendadas.

El método de análisis de fallos funcionales es un caso particular del AMFE, por lo que no se ha incluido como un método específico diferenciado.

### 2.5.9. Estudios de peligros y operatividad (HAZOP)

Un estudio HAZOP es un proceso detallado de identificación de peligros y problemas de operatividad, llevado a cabo por un equipo. Un HAZOP trata de la identificación de desviaciones potenciales en la propuesta de diseño, examen de sus posibles causas y evaluación de sus consecuencias.

La base de un HAZOP es un examen de palabras-guía que constituye una búsqueda deliberada de desviaciones en la propuesta de diseño. El diseño planteado contempla el comportamiento de un sistema, sus elementos y características deseados, o especificados, por el diseñador. Para facilitar el examen, el sistema se divide en partes de modo que la propuesta de diseño de cada una de las partes pueda definirse adecuadamente. La propuesta de diseño de una parte dada de un sistema se expresa en términos de elementos que transmiten las prestaciones esenciales de dicha parte y que representan sus divisiones naturales. Los elementos pueden ser pasos o etapas de un procedimiento, señales individuales y elementos de equipamiento en un sistema de control, equipos o componentes en un proceso o sistema electrónico, etc.

La identificación de las desviaciones en la propuesta de diseño se obtiene mediante un proceso de preguntas utilizando palabras-guía predeterminadas. El papel de la palabra guía es estimular el pensamiento imaginativo, para focalizar el estudio y provocar ideas y discusión, de este modo se maximizan las oportunidades de conseguir un estudio más completo.

El HAZOP es muy adecuado en las últimas etapas del diseño detallado para examinar las capacidades operativas y cuando se hacen cambios en las instalaciones existentes. El mejor momento para llevar a cabo un estudio HAZOP es justo antes de que el diseño se congele. Los estudios HAZOP consisten en cuatro pasos secuenciales básicos:

- Definición de alcances, objetivos, responsabilidades y equipos;
- Preparación del estudio, formato de registro y recopilar datos;
- Examen dividiendo en partes el sistema e identificando problemas, causas y consecuencias. Identificar mecanismos y medidas de protección;
- Documentación y seguimiento con informe de conclusiones iniciales, acciones preventivas y correctivas tomadas e informe final de resultados.

### 2.5.10. Análisis de fiabilidad humana (HRA)

El análisis de fiabilidad humana es una sub-tarea del análisis más general del factor humano, que es un nombre colectivo para la asignación de funciones, tareas y recursos entre personas y máquinas y la evaluación de la fiabilidad humana. El análisis del factor humano no es una disciplina en sí misma, sino una actividad que supone la aplicación de varias disciplinas a la problemática relacionada con la actuación fiable de personas y máquinas.

Incluye las disciplinas de psicología, fisiología, sociología, medicina e ingeniería. Un propósito particular del análisis del factor humano es evaluar los factores que pueden influir en la fiabilidad humana durante la operación de un sistema; a menudo se denomina análisis de fiabilidad humana. Un comportamiento humano fiable es necesario para garantizar el éxito de los sistemas hombre-máquina, viéndose influido por múltiples factores.

Estos factores pueden ser internos como el estrés, el estado emocional, el entrenamiento, la motivación y la experiencia, o externos como las horas de trabajo, el entorno, la realización de acciones supervisadas o con procedimientos y las interfaces hardware.

La aplicación más efectiva de la perspectiva del factor humano se consigue mediante su implicación activa en todas las fases del desarrollo del sistema, desde el diseño hasta el entrenamiento, la operación y la retirada. Su foco de atención se extiende desde las consideraciones del sistema global (incluyendo la gestión de la operación) hasta la interacción de un elemento individual al nivel operativo más bajo.

En principio, cualquier tarea realizada por las personas representa una oportunidad de error humano; esto es, cada una de estas tareas se deberían realizar fiablemente. Después de identificar aquellas tareas, se analiza cada una de ellas para detectar cualquier situación posible de error que pueda causar el fallo del operador. Esto puede compararse con un tipo de AMFE para las tareas humanas.

A menudo, estas tareas se analizan creando árboles de sucesos para cada una de ellas. El árbol de sucesos contiene la información del análisis de tareas y determina un esquema para evaluar cuantitativamente la combinación de fallos. Los siguientes elementos son típicos en un análisis de fiabilidad humana:

- Descripción del personal, del entorno de trabajo y las tareas realizadas;
- Análisis de las interfaces hombre/máquina;
- Realización del análisis de las tareas de las funciones previstas del operador;
- Realización del análisis de los errores humanos en la función prevista del operador;
- Documentación de los resultados.

### 2.5.11. Análisis de esfuerzo-resistencia

El análisis de esfuerzo-resistencia es un método para determinar la capacidad de un componente o un elemento para resistir el esfuerzo eléctrico, mecánico, ambiental o de otra clase que podría causar su fallo. Este análisis determina el efecto físico de los esfuerzos sobre un componente, así como la resistencia mecánica o física del componente. La probabilidad de fallo de un componente es directamente proporcional a los esfuerzos aplicados. La relación específica entre los esfuerzos y la resistencia de un componente determina su fiabilidad.

El análisis de esfuerzo-resistencia se utiliza fundamentalmente para la determinación de la fiabilidad o de la tasa de fallo equivalente de componentes mecánicos. Se usa también en la física del fallo para determinar la posibilidad de ocurrencia de un modo de fallo particular en un componente debido a causas individuales específicas.

La fiabilidad estructural de un componente, es decir su capacidad para resistir esfuerzos eléctricos o de otro tipo, depende de su resistencia a la capacidad de carga, donde la fiabilidad es la medida probabilista del aseguramiento del funcionamiento del componente. La determinación de esta capacidad de carga supone incertidumbre, por consiguiente, esta capacidad se modela como una variable aleatoria, que se opone al esfuerzo aplicado, el cual, por la misma razón de incertidumbre, se modela como otra variable aleatoria. El solapamiento entre estas variables aleatorias, cuando se representan por una distribución, representa el grado de probabilidad con que el esfuerzo excederá a la resistencia; esto es, el área de solapamiento de las respectivas funciones de densidad de probabilidad representa la probabilidad de ocurrencia del fallo.

La evaluación del esfuerzo frente a la resistencia y de la fiabilidad resultante de las partes depende de la evaluación de los momentos de orden dos, los valores medios y la varianza de las variables aleatorias del esfuerzo y la resistencia esperados. Esta evaluación se simplifica a menudo considerando una variable de esfuerzo que se compara con la resistencia del componente.

De forma general, la resistencia y el esfuerzo se deben representar por la función de operación o por la función de estado, que es representativa de una multitud de variables de diseño que incluyen capacidades y esfuerzos. Los valores positivos de esta función representan los estados seguros y los negativos los de fallo.

Los elementos clave incluyen un conocimiento detallado de los materiales de los componentes y de la construcción, así como otras propiedades de interés y una modelización apropiada de los esfuerzos esperados.

### 2.5.12. Tabla de verdad (MTV)

Las cualidades matemáticas del método de la tabla de verdad (MTV) (también llamado análisis de la función de estructura) son muy apreciados en varios campos, en particular en las áreas de ingeniería eléctrica y la electrónica. El método consiste en enumerar todas las combinaciones de estados posibles (estado de operación, estado de fallo) para los distintos componentes que constituyen un sistema y estudiar sus efectos.

Los primeros pasos en la aplicación del método son similares a los que se dan en el AMFEC. Los modos de fallo de los componentes así como sus estados de fallo se deberán numerar una vez que el sistema se halla dividido en partes de un tamaño manejable. Generalmente cada componente se caracteriza por un estado de operación y otro de fallo. La definición del vector de estado es, por tanto, una combinación de los estados de los componentes, cada componente se representa bien por su estado de operación o por su estado de fallo.

La tabla de verdad se resuelve analizando los efectos de todos los vectores de estado de los componentes. Se identificarán así todos los fallos del sistema. Los resultados se resumen entonces en una tabla llamada la "tabla de verdad", donde "0" representa el estado en operación y "1" el estado de fallo. El estudio de cada vector de estado debería también incluir un análisis de fallo (o avería) para averiguar las posibles causas de fallo común.

La probabilidad del estado de fallo del sistema se obtiene calculando la probabilidad de ocurrencia de cada vector de estado que lleve al sistema a un estado de fallo. Esto puede hacerse ya que los vectores de estado son excluyentes cuando los componentes son independientes. El MTV supone el estudio de todas las posibles combinaciones de los estados de operación y fallo de los componentes. Es, en teoría, el método más riguroso hasta la fecha. Para obtener las combinaciones pertinentes, la tabla de verdad puede reducirse mediante un método booleano. Puede ser difícil aplicar el método a un sistema complejo, ya que el número de estados puede hacerse rápidamente muy grande y, por tanto, difícil de tratar.

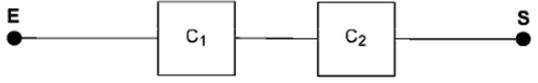
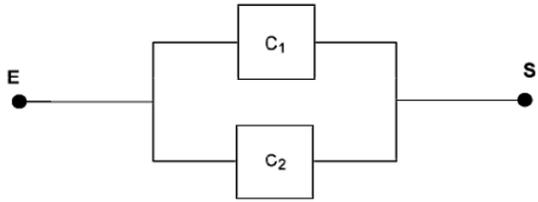
Sistema		Tabla de verdad		
	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	<b>S</b>	
	0	0	0	
	0	1	1	
	1	0	1	
	1	1	1	
	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	<b>S</b>	
	0	0	0	
	0	1	0	
	1	0	0	
	1	1	1	

Figura 6 – Tabla de verdad para sistemas simples

### 2.5.13. Métodos estadísticos de fiabilidad

La fiabilidad es un aspecto de la incertidumbre en la ingeniería que puede cuantificarse como una probabilidad. La necesidad de medir y gestionar la incertidumbre en los análisis de fiabilidad implica el uso de métodos estadísticos.

Los métodos estadísticos se usan para cuantificar la fiabilidad por un número de razones entre las que se incluyen las siguientes:

- Estimación y predicción de la fiabilidad del producto;
- Evaluación de las características de los materiales durante un período de garantía o durante la vida de diseño del producto;
- Predicción de los costes de garantía;
- Evaluación del efecto de un cambio de diseño propuesto;
- Evaluación del cumplimiento de los requisitos del cliente y las regulaciones del gobierno;
- Seguimiento del producto en campo para obtener información sobre causas de fallo y métodos para mejorar la
- Fiabilidad del producto;
- Comparación de componentes de dos o más fabricantes, materiales, períodos de producción, entornos de operación, etc.

Para aplicar cualquier método estadístico, se deben reunir datos. Estos datos dependen del problema que se quiere resolver y del tipo de análisis que se va a realizar. Los datos utilizados para el análisis de fiabilidad tienen por objetivo recoger información sobre el funcionamiento de los elementos expuestos a riesgo (por ejemplo, dentro de un entorno operativo).

Los tipos de datos variarán dependiendo del tipo de elemento bajo investigación. Por ejemplo, los datos básicos para dispositivos de un solo uso son el número de pruebas y el número de operaciones satisfactorias; los datos básicos para elementos no reparables son los tiempos hasta los sucesos de fallo para elementos de la población en riesgo, mientras que los datos básicos para elementos reparables son los tiempos acumulados hasta los sucesos de fallo a lo largo de toda la vida del elemento.

Normalmente, no todos los elementos en riesgo fallarán durante el período de observación. Por consiguiente, el tiempo hasta los sucesos de fallo se registra sólo para aquellos elementos que fallen y los tiempos de funcionamiento se registran para los que no fallen. Estas denominadas estructuras truncadas pueden ser bastante complejas y dependerán de los objetivos del estudio de fiabilidad y del elemento de interés.

Además de los datos básicos se puede recopilar información sobre factores que influyen en la fiabilidad e incluirse en un análisis estadístico para medir su influencia sobre el funcionamiento.

Los métodos estadísticos clásicos utilizan solamente los datos cuantitativos sobre sucesos como se ha descrito anteriormente. Sin embargo, los datos de fiabilidad procedentes de la experiencia pasada o de pruebas pueden estar limitados, siendo no obstante necesario disponer de algunas medidas estadísticas de fiabilidad. Por esta razón, se pueden recoger y combinar datos procedentes del criterio de expertos con datos cuantitativos para producir estimaciones de fiabilidad utilizando métodos bayesianos.

Los métodos bayesianos permiten combinar datos de diferentes fuentes con el fin de estimar la fiabilidad. Su aplicación implica la elaboración de un modelo de fiabilidad y la utilización posterior de los datos disponibles para formular una distribución a priori. La distribución a priori es una distribución de probabilidad que representa la incertidumbre existente en los parámetros del modelo o en la fiabilidad con anterioridad a la recogida de las observaciones sobre la fiabilidad.

La distribución a priori debería recoger todos los datos disponibles, por ejemplo, datos históricos sobre la fiabilidad en servicio de los elementos, datos sobre las capacidades de los procesos de fabricación y datos sobre la efectividad percibida de las pruebas. Los datos utilizados pueden servir como criterio técnico subjetivo de ingeniería. La combinación de todos los datos en una única distribución a priori puede constituir una tarea difícil. Los métodos bayesianos proporcionan un marco en el que las estimaciones de fiabilidad se pueden actualizar a medida que se dispone de nuevos datos. La distribución a priori se combina con el modelo de fiabilidad original para producir la distribución a posteriori, desde la que se obtiene una estimación actualizada de la fiabilidad. Por ejemplo, una estimación inicial de la fiabilidad durante el diseño podría actualizarse durante el desarrollo, a medida que los datos de las pruebas están disponibles. Puede cuantificarse la incertidumbre en las estimaciones proporcionando los límites superior e inferior de la fiabilidad.

Los modelos de fiabilidad que se utilizan varían de acuerdo con la aplicación, por ejemplo, distribuciones de tiempo de vida como la exponencial, Weibull; procesos estocásticos como el modelo de ley de potencia; modelos de crecimiento de la fiabilidad; modelos de degradación; modelos de mantenimiento y muchos otros. Cada tipo de modelo se puede estimar utilizando métodos clásicos o bayesianos. Ambos proporcionan estimaciones de fiabilidad, incluyendo bandas de incertidumbre.

Los métodos estadísticos clásicos de fiabilidad constan generalmente de los siguientes pasos:

- Identificación del modelo de fiabilidad que se va a utilizar para el problema considerado;
- Identificación de los datos requeridos para proporcionar información sobre los parámetros del modelo de fiabilidad;
- Recogida de los datos de los sucesos a considerar;
- Estimación del modelo estadístico utilizando métodos clásicos;
- Extracción de las estimaciones de fiabilidad a considerar a partir del modelo;

- Repetición de los pasos anteriores cuando la estimación de la fiabilidad se vaya a actualizar.

Elemento	Valor	Tasa o intensidad	Datos	Modelo	Comentario
No reparable	Tasa de fallo	Constante	Tiempo (de funcionamiento) hasta el fallo; número de fallos	Los tiempos hasta el fallo se distribuyen exponencialmente	
		No constante	Tiempo (de funcionamiento) hasta el fallo; número de fallos	Los tiempos hasta el fallo pueden seguir una distribución de Weibull	
Reparable	Intensidad de fallo	Constante	Tiempo (de funcionamiento) entre fallos; número de fallos	Proceso puntual; los tiempos entre fallos pueden distribuirse exponencialmente	El número de fallos puede seguir un proceso de Poisson homogéneo
		No constante	Tiempo (de funcionamiento) entre fallos consecutivos; número de fallos	Proceso puntual; los tiempos entre fallos pueden seguir una ley potencial	El número de fallos puede seguir un proceso de Poisson no homogéneo

[UNE 200001-3-5:2002]

Tabla 4 – Modelos estadísticos clásicos apropiados para el análisis de datos de fallos

Los métodos bayesianos de fiabilidad constan generalmente de los pasos siguientes:

- Identificación del modelo de fiabilidad que se va a utilizar para el problema considerado;
- Identificación de los datos requeridos para proporcionar información sobre los parámetros del modelo de fiabilidad;
- Combinación de criterios técnicos subjetivos en la distribución a priori a considerar;
- Combinación de la distribución a priori con el modelo para generar la distribución a posteriori;
- Extracción de las estimaciones de fiabilidad a considerar a partir de la distribución a posteriori;
- Repetición de los pasos anteriores cuando la estimación de la fiabilidad se vaya a actualizar.

## 2.6. Métodos estadísticos para elementos no reparables

Los métodos tradicionalmente utilizados en análisis estadístico para elementos no reparables, pueden dividirse en tres grupos:

- Paramétricos.
- No paramétricos.
- Semi-paramétricos.

Los más extendidos son los paramétricos, y las estimaciones que se obtienen con los métodos semi-paramétricos, sirven de gran apoyo a posteriores análisis estadísticos más detallados y elaborados.

Los métodos no paramétricos tienden a ser más sencillos. Éstos métodos son menos eficientes que los métodos paramétricos, pero resultan de gran utilidad cuando no se conoce ningún modelo paramétrico que se ajuste adecuadamente a los datos. La elección de un determinado modelo es en función de su flexibilidad para reproducir las características de las funciones de fiabilidad y su ajuste a los datos.

### 2.6.1. Métodos paramétricos para elementos no reparables

Estos métodos intentan ajustar a la fiabilidad esperada u obtenida de un elemento no reparable, a alguna de las distribuciones estadísticas existentes para que se asemeje a la función de densidad de probabilidad del fallo  $f(t)$ .

El problema consiste en suponer que la función puede modelarse por una distribución concreta, que depende de un número finito de parámetros que será necesario estimar a partir de muestras de datos reales o simulados.

Debido a que los valores observados en este tipo de problemas son positivos, la modelización usualmente supone una distribución de tipo no normal. Así, es común el empleo de distribuciones como la exponencial, la log-normal o la Weibull. Existen también modelos paramétricos específicos, como la relación de Arrhenius, que permiten modelar procesos en donde la duración de un material depende de la temperatura u otra variable, que son usados en problemas de pruebas aceleradas.

Sin duda, entre todas las distribuciones disponibles para la modelización de datos de tiempos de vida, sigue siendo la distribución denominada de Weibull y que hace honor Waloddi Weibull, profesor del Royal Institute of Technology en Suiza, que la propuso para describir la duración de aceros. Un caso particular, sería la propia distribución exponencial, que puede obtenerse como la Weibull para el caso en el que el parámetro de escala sea 1, y que sigue usando para la estimación de la fiabilidad de muchos elementos no reparables, especialmente electrónicos.

Históricamente se ha empleado para la representación función **tasa instantánea de fallo**  $\lambda(t)$  la forma de “bañera”, la mundialmente conocida como “**curva de la bañera**”:

- Cuando se inicia la vida de un elemento,  $\lambda(t)$  resulta ser relativamente alta (es lo que se denomina "mortalidad infantil");
- Una vez que los componentes y partes electromecánicas se han acoplado,  $\lambda(t)$  es relativamente constante y baja (etapa de “vida útil”);
- Más adelante, tras un tiempo de funcionamiento,  $\lambda(t)$  vuelve a incrementarse hasta que, finalmente, todos los dispositivos habrán fallado (“efecto envejecimiento”).

La profusa difusión de curva de la bañera como modelo único del comportamiento de elementos no reparables es un grave error ya que se ha contrastado que menos de un 10% de los elementos no reparables responden a este modelo y su empleo masivo es generatriz de muchos errores en estudios fiabilidad presentados, que no contrastan los resultados mediante las adecuadas pruebas de bondad de ajuste.

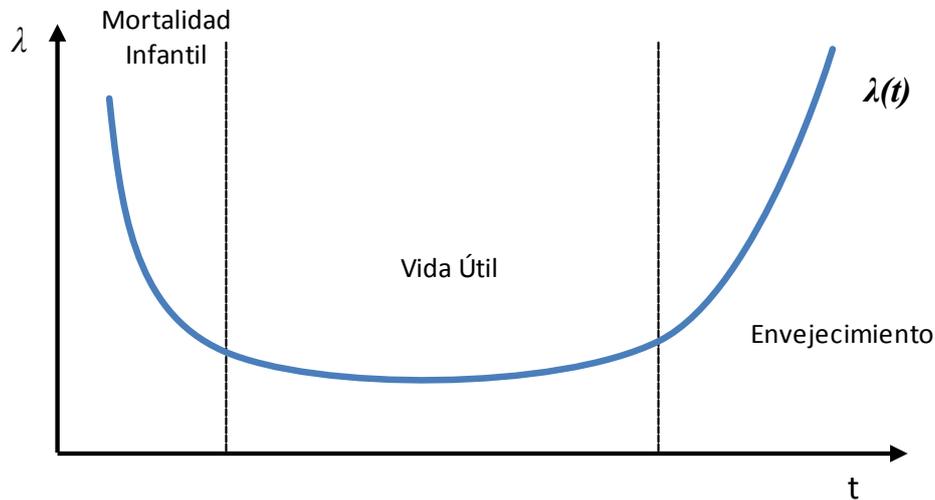


Figura 7 – Curva de la bañera de  $\lambda(t)$

En general, la mayoría de distribuciones usadas en fiabilidad tienen, a lo sumo, tres parámetros:

- Parámetro de escala  $\alpha$ : este es el parámetro que caracteriza a las distribuciones uni-paramétricas. El parámetro de escala define cuán dispersa se encuentra la distribución (en el caso de la distribución normal, el parámetro de escala es la desviación típica).
- Parámetro de forma  $\beta$ : este parámetro define la forma de la distribución. Algunas distribuciones (como la exponencial o la normal) carecen de este parámetro pues tienen una forma predeterminada que nunca varía (en el caso de la normal, ésta tiene siempre forma de campana).
- Parámetro de localización  $\gamma$ : se usa para desplazar una distribución hacia un lado u otro. Esto significa que, dada una distribución cuyo dominio habitual sea  $[0, +\infty)$ , la inclusión de un parámetro de localización  $\gamma$  cambiará el dominio a  $[\gamma, +\infty)$ . En el caso de la normal, el parámetro de localización es la media.

Normalmente, los estudios de fiabilidad tienen una duración predeterminada, por lo que no todos los elementos analizados habrán fallado a su conclusión. Por tanto, el investigador sabrá que un cierto número de elementos han “sobrevivido” durante el período de tiempo que ha durado el test, pero desconocerá el momento exacto en que hubieran fallado si el estudio se hubiese prolongado de forma indefinida. Este tipo de datos se llaman observaciones censuradas o truncadas.

Las observaciones de censura por tiempo o de tipo I aparecen al finalizar un test de duración predeterminada: de los elementos “supervivientes” sólo se sabe que no han fallado hasta ese momento. En este caso, el tiempo de duración del test es fijo, mientras que el número de elementos que fallan es una variable aleatoria.

Por contra, las observaciones de censura por fallos o de tipo II aparecen cuando el test continúa hasta que una proporción predeterminada de elementos hayan fallado. Ahora, el número de elementos que fallan es fijo, siendo el tiempo de duración del test una variable aleatoria.

Por otra parte, cuando la censura ocurre para un  $t > 0$  (siendo  $t = 0$  el instante en que se inicia el test de fiabilidad) estaremos ante lo que se conoce como censura a la derecha. También podría ocurrir también que la censura tuviera lugar para  $t < 0$  (censura a la izquierda), en casos en que el test se realiza a posteriori del inicio de operación de los elementos.

Los métodos estadísticos paramétricos para elementos no reparables deben de tener en cuenta si los datos con los que se trabaja son censurados y el tipo concreto, ya que los resultados pueden variar de forma notable si no se tienen en cuenta adecuadamente el tratamiento de las censuras.

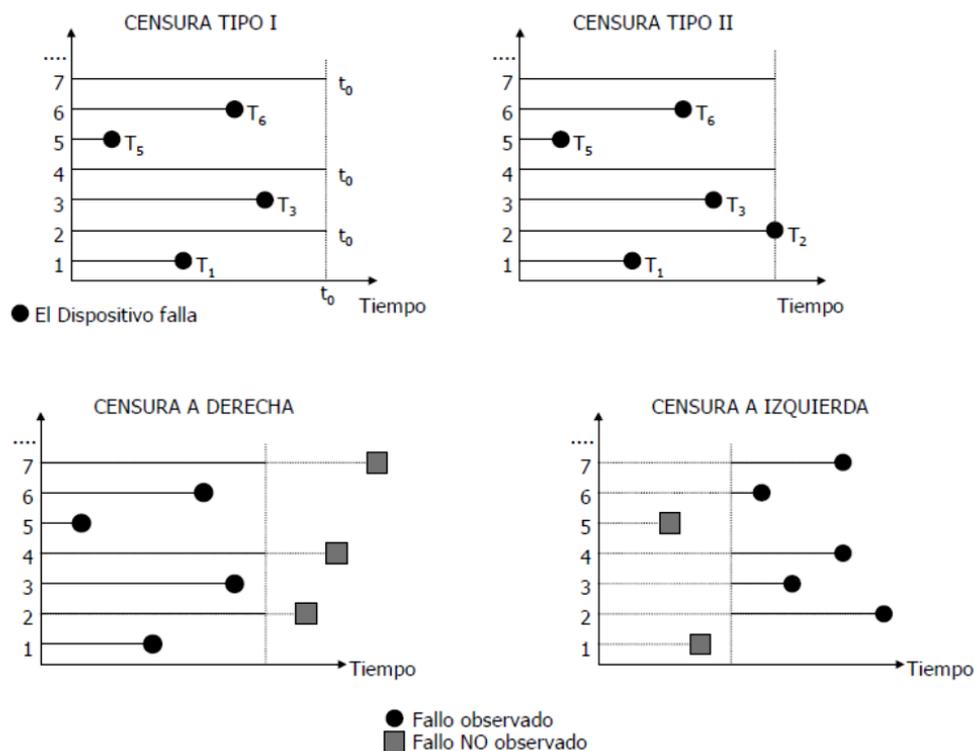


Figura 8 – Clasificación de observaciones censuradas o truncadas

Las distribuciones paramétricas uni-variantes han venido jugando un importante papel en la modelización de un amplio rango de comportamientos. Dentro de estos modelos, los más utilizados son:

- Distribución Exponencial: Se utiliza comúnmente para elementos que presentan una  $\lambda$  constante. Debido a su simplicidad, se ha empleado ampliamente, incluso en casos en que no se debe aplicar. Su desarrollo matemático ya se ha presentado en 2.2.1.
- Distribución de Weibull: Es una distribución general fiabilidad propósito utilizado para modelar  $\lambda(t)$  de elementos electrónicos y mecánicos, equipos o sistemas. En su caso más general, se emplea la Weibull 3 parámetros. Su desarrollo matemático ya se ha presentado en 2.2.1.
- Distribución normal: se utiliza comúnmente para el análisis general de la fiabilidad, y modelar  $\lambda(t)$  de elementos electrónicos y componentes mecánicos simples.

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (33)$$

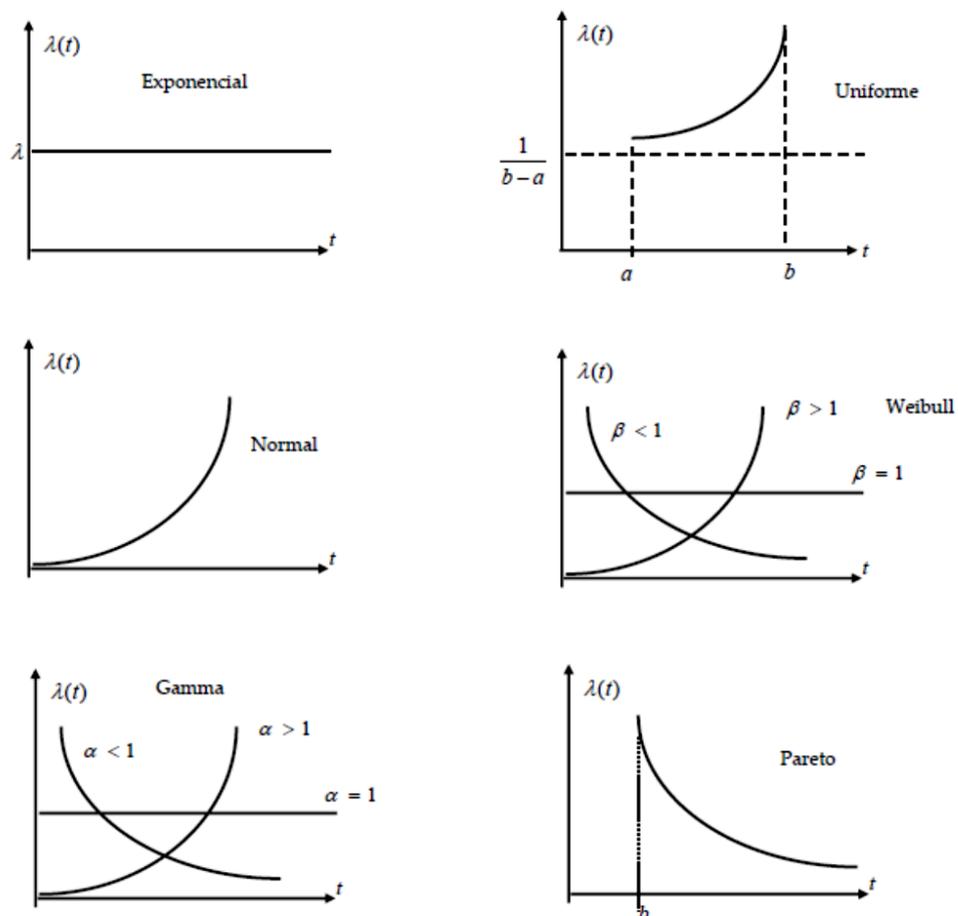
Donde  $\mu$  es la media de los tiempos hasta el fallo y  $\sigma$  es la desviación estándar de los tiempos hasta el fallo.

- Distribución log-normal: Se utiliza comúnmente para el análisis de la fiabilidad general, los ciclos hasta el fallo en la fatiga y carga de variables en el diseño probabilístico. Cuando el logaritmo de los tiempos hasta el fallo es normalmente distribuido, entonces se puede decir que los datos se ajustan a esta distribución.

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma'\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t'-\mu'}{\sigma'}\right)^2} \quad (34)$$

$$t' = \ln(t) \quad (35)$$

Donde  $\mu'$  es la media del logaritmo de los tiempos hasta el fallo y  $\sigma'$  es la desviación estándar del logaritmo los tiempos hasta el fallo.



[Zapata (2011)]

Figura 9 – Forma de  $\lambda(t)$  para varias distribuciones de probabilidad

Además de las distribuciones mencionadas anteriormente, que se utilizan con mayor frecuencia en el análisis de la fiabilidad, las siguientes distribuciones también tienen una variedad de aplicaciones y se pueden encontrar en muchas referencias y estudios estadísticos:

- Distribución Gamma.
- Distribución Gamma Generalizada.
- Distribución Logística.
- Distribución Log-logística.
- Distribución Gumbel.
- Distribución Uniforme.
- Distribución Pareto.

### 2.6.2. Métodos no paramétricos para elementos no reparables

La otra filosofía en la estimación de los modelos, la estimación no paramétrica, no presupone ningún modelo a priori para la distribución, se basa en la filosofía que algunos autores han llamado “dejar que los datos decidan por sí mismos”. Estas técnicas, que durante mucho tiempo se han utilizado en el análisis tanto de datos completos, como en el análisis de datos con censura han demostrado ser herramientas empíricas simples y efectivas. Se destacan el papel probabilístico y el papel de riesgo, que para su utilización requieren de antemano de una estimación no paramétrica de la función  $f(t)$ .

En los estudios no paramétricos, no se asume ningún tipo concreto de modelo probabilístico para los tiempos de fallo y las funciones básicas (fiabilidad, probabilidad del fallo) se estiman directamente de los datos. En algunos casos, estos métodos no paramétricos serán suficientes para realizar el análisis de los datos. Sin embargo, en otras circunstancias, son un paso intermedio hacia un modelo más estructurado (paramétrico), que permita profundizar más en el análisis de las observaciones.

Los métodos estadísticos no paramétricos para elementos no reparables más empleados son los adjuntos:

- Tablas de Vida: Tienen como objetivo describir y establecer previsiones sobre la mortalidad, fiabilidad o supervivencia de una población de interés, a partir de la consideración de una cohorte, o conjunto de datos procedentes de un estudio (o ensayo clínico), a los cuales se les hace un seguimiento en un período de tiempo determinado, comprobando si se registra en cada uno de sus miembros o elementos, la presencia o ausencia de una característica o evento de interés (aprendizaje de un método, recuperación física de un paciente, mortalidad de un enfermo, fallo de un dispositivo, etc.) en la población. La validez de éste método exige que la distribución del tiempo de fallo de todos los individuos, censurados y no censurados, sea la misma.

Este es uno de los métodos más clásicos y directos para describir la fiabilidad de una muestra a través de la llamada Tabla de Supervivencia o Actuarial, la cual no es más que una tabla de frecuencias mejorada y ampliada. A partir de ella, es posible hacer una primera estimación sobre los comportamientos de las funciones  $f(t)$ ,  $R(t)$ ,  $F(t)$  y  $\lambda(t)$ .

- Estimador Kaplan-Meier: El impulso de las técnicas de estimación no paramétricas con datos censurados se inician con los aportes de Kaplan y Meier en 1958, quienes publican algunos resultados obtenidos en ese momento para observaciones censuradas a la derecha y añaden un estudio de las propiedades básicas de un nuevo estimador, que se conocerá más tarde con el nombre de sus creadores. De los métodos no paramétricos, desarrollados para estimar la función de fiabilidad con datos no agrupados en presencia de censura, el más utilizado es *el estimador producto límite de Kaplan-Meier*. Dicho método descompone la supervivencia o fiabilidad de un elemento al cabo de  $t$  tiempo, en un producto de probabilidades condicionadas, que deben ser previamente estimadas, antes del cálculo del estimador.

- Estimador de Nelson-Aalen: Fue propuesto por primera vez en el ámbito de la fiabilidad por Nelson, W. A partir del estimado propuesto por Nelson y de la relación logarítmica entre  $F(t)$  y  $R(t)$ , se obtiene un estimador alternativo de  $\hat{F}(t)$ , conocido comúnmente como el estimador de Nelson-Aalen.

### 2.6.3. Métodos semi-paramétricos para elementos no reparables

Varias aproximaciones han sido propuestas para modelar los efectos de las variables explicativas o sobre el tiempo de vida  $T$ . Una de estas modalidades corresponde a los modelos de riesgo proporcional, basados en el hecho de que, de las diferentes funciones que pueden describir la distribución de  $T$ , la más sencilla de modelar es  $\lambda(t)$ . En consecuencia, una buena aproximación para analizar los efectos de las variables explicativas sobre el tiempo de vida de un elemento, puede ser considerar modelar  $\hat{\lambda}(t)$  dado un vector de covariables  $Z$ .

El método estadístico semi-paramétricos aplicado a la fiabilidad más extendido es:

- Modelo de riesgo proporcional de Cox: Introducido inicialmente por Cox, es el modelo de regresión más utilizado en análisis de supervivencia, sin embargo no fue sino a partir del desarrollo del enfoque basado en los procesos de conteo, que este modelo logra su completa madurez, este enfoque ha permitido la verificación de los supuestos de riesgos proporcionales y el estudio de los residuos. El modelo de riesgos proporcionales, ofrece una representación más unificada de la relación entre el entorno y el proceso de fallos, dado que nos permite modelar no sólo la relación entre  $\lambda$  y el tiempo, sino también la posible relación con diferentes variables registradas para cada sujeto. Se trata por tanto de calcular  $\hat{\lambda}(t)$  y las variables pronóstico o de predicción.

## 2.7. Métodos estadísticos para elementos reparables

Los elementos reparables se reparan cuando fallan y puede continuar con la operación del sistema. Después del fallo, un elemento que es devuelto a la capacidad de realizar todas sus funciones requeridas por cualquier método excepto sustitución se llama reparado. Dado que un elemento reparado puede fallar más de una vez, es de interés el modelado del tiempo entre fallos del elemento.

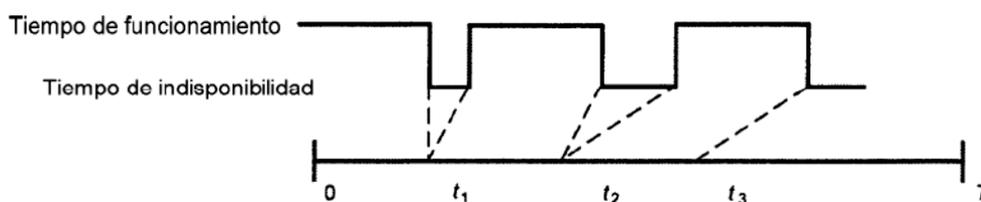


Figura 10 – Tiempo de funcionamiento entre fallos para un solo elemento reparable

La mayor parte de las magnitudes que se observan en conexión con la evaluación de la fiabilidad, son variables aleatorias. Esto quiere decir que cada fallo será imprevisto pero la probabilidad de que ocurra, dentro de un intervalo dado de tiempo, puede ser estimada. El verdadero valor de esta probabilidad puede no llegar a ser conocido, pero puede estimarse en base a observaciones.

Ejemplos típicos de variables aleatorias son: tiempo hasta el fallo, tiempo entre fallos, número de fallos en un intervalo de tiempo, número de fallos entre un número de intentos o elementos.

En principio, la tasa instantánea de fallo  $\lambda(t)$  se refiere a cualquier clase de elemento, reparable o no reparable. Sin embargo, en la práctica,  $\lambda(t)$  se utiliza para elementos no reparables, tales como componentes o piezas.  $\lambda(t)$  está asociada con una distribución de tiempo hasta el fallo.

La **intensidad de fallo**  $z(t)$  se refiere exclusivamente a elementos reparables, por ejemplo, un sistema. Esto significa que  $z(t)$  de un elemento único reparable se puede estimar empleando los sucesivos tiempos entre fallos. Se estima por el número de fallos por unidad de tiempo elementos reparables.

Por lo tanto la naturaleza estadística de los fallos en elementos reparables no tiene un comportamiento asimilable a los elementos no reparables. El tiempo hasta el fallo de elementos no reparables se modela por una distribución, como se han desarrollado en puntos anteriores, y los datos sobre tiempos entre fallos sucesivos de elementos reparables se modelan utilizando otros modelos matemáticos que se desarrollan a continuación.

### 2.7.1. Postulado de Duane

El primer patrón matemático aceptado más comúnmente para estudio de la fiabilidad de elementos reparables fue establecido en un artículo por J. T. Duane (1964). En este artículo, Duane planteaba sus observaciones sobre datos de fallo para un número de productos durante los ensayos de desarrollo. Observó que el **número de fallos acumulado por unidad de tiempo**  $N(T)$  dividido por el tiempo de ensayo acumulado,  $T$ , iba decreciendo y tendía casi a una línea recta cuando se representaba en función del tiempo en una escala logarítmica doble. Esto es, aproximadamente:

$$\ln\left(\frac{N(T)}{T}\right) = \delta - \alpha \ln T, \text{ con } \delta > 0, \alpha > 0 \quad (36)$$

Duane interpretó estos gráficos y concluyó que el número acumulado de fallos puede aproximarse por la función de la ley de potencia:

$$N(T) = \lambda T^\beta, \text{ con } \lambda > 0, \beta = 1 - \alpha \quad (37)$$

Basado en esta observación, Duane expresó la intensidad instantánea de fallos  $z(t)$  en el instante  $t$  como:

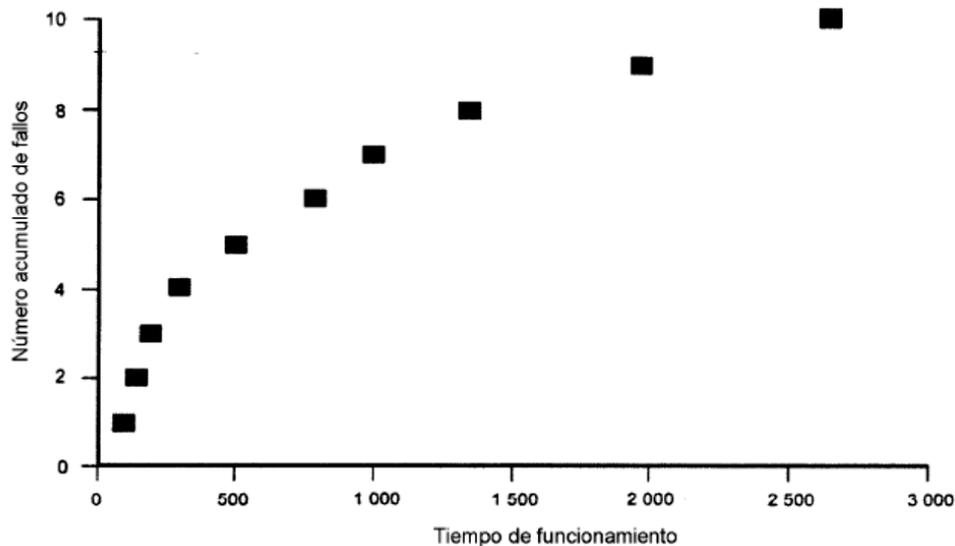
$$z(t) = \frac{d}{dT} N(T) = \lambda \beta T^{\beta-1}, \text{ con } T > 0 \quad (38)$$

Que da el Tiempo Medio Entre Fallos MTBF instantáneo:

$$MTBF = (\lambda \beta T^{\beta-1})^{-1}, \text{ con } T > 0 \quad (39)$$

El postulado de Duane es determinista, en el sentido de que proporciona el patrón esperado para la evolución de la fiabilidad de un elemento reparable, pero no aborda la variabilidad de los datos asociada a la misma.

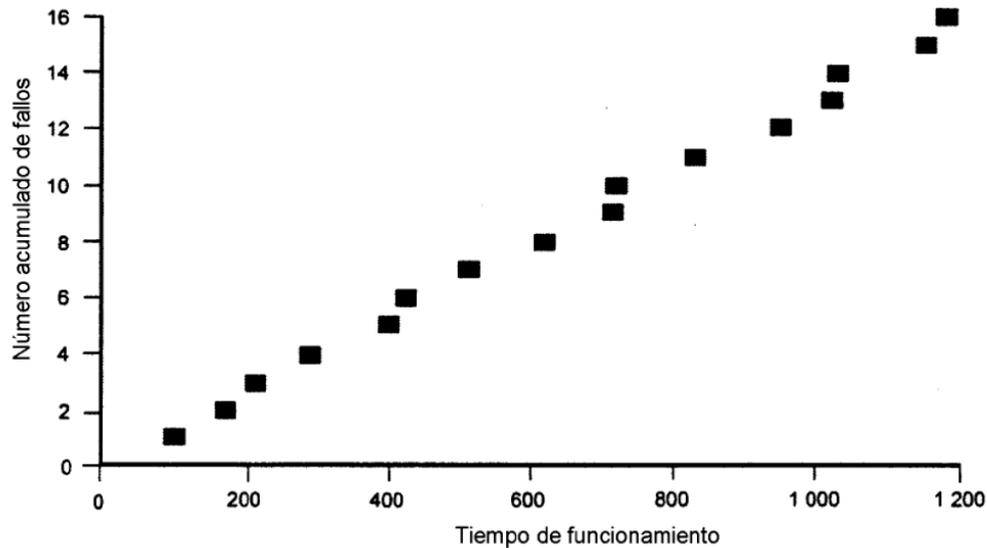
La Figura 11 muestra el número acumulado de fallos en función del tiempo  $N(T)$  de funcionamiento de un elemento reparable. Los tiempos entre fallos sucesivos aumentan con el tiempo de funcionamiento, es decir la intensidad de fallo decrece con el tiempo de funcionamiento. La pendiente desde el origen a cualquier punto del gráfico es la estimación de la intensidad media de fallos, mientras que la pendiente de la tangente a la curva en cualquier punto es la estimación de la intensidad instantánea de fallos  $z(t)$ . En este caso en existe una tendencia en  $z(t)$  y se puede aplicar la ley de potencia.



[UNE 200001-3-5:2002]

Figura 11 – Ejemplo de tendencia creciente del tiempo entre fallos de un solo elemento reparable

La Figura 12 también muestra el número acumulado de fallos en función del tiempo  $N(T)$  de funcionamiento de un elemento reparable. Sin embargo, en este caso, los tiempos entre fallos sucesivos no tienen ninguna tendencia, es decir la intensidad de fallo  $z(t)$  es constante, y por lo tanto no hay ninguna tendencia y no se puede aplicar la ley de potencia.



[UNE 200001-3-5:2002]

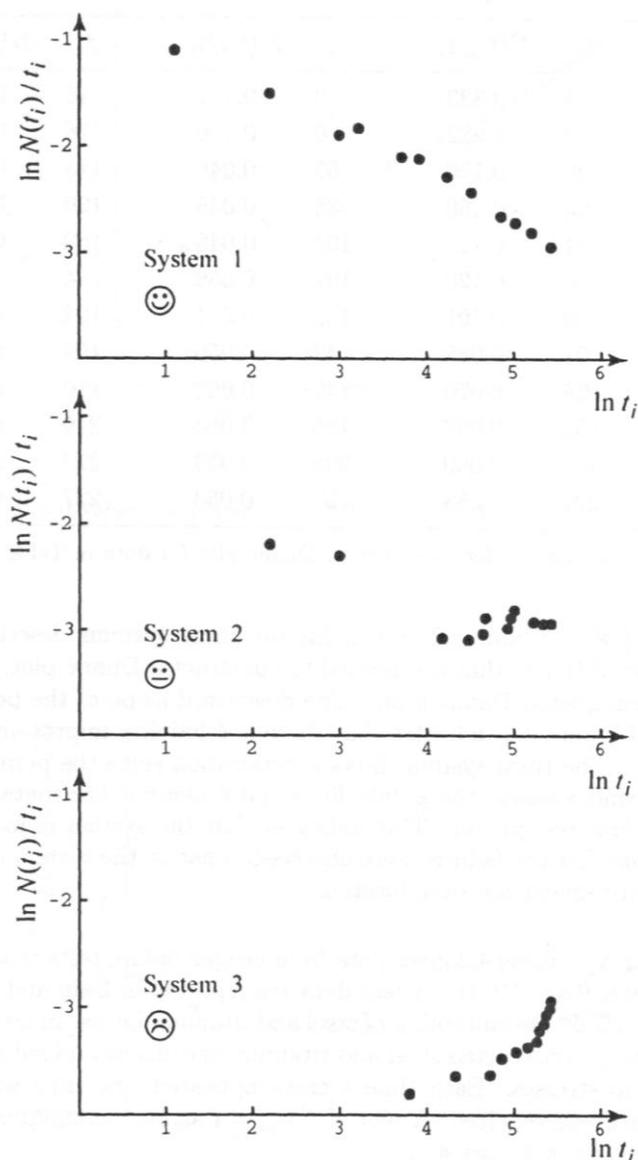
Figura 12 – Ejemplo sin tendencia del tiempo entre fallos de un solo elemento reparable

### 2.7.2. Métodos gráficos de tendencia

Los métodos gráficos están orientados básicamente a determinar si hay o no tendencia en el número acumulado de fallos  $N(T)$  en uno elemento reparable o un conjunto de elementos reparables idénticos. Los métodos gráficos no proporcionan herramientas matemáticas para la estimación de los valores de  $N(T)$  o  $z(t)$ , limitándose a orientar sobre la conveniencia aplicar un modelo de crecimiento/decrecimiento del tiempo entre fallos o un modelo sin tendencia para el tiempo entre fallos.

Por lo tanto, se deben emplear complementariamente con otros métodos de estimación que se desarrollan en los apartados siguientes. Se presentan los tres modelos gráficos más extendidos:

- Gráfico de Duane: Es un gráfico de dispersión que representa en el eje de ordenadas  $N(t_i)/t_i$  y en el eje de abscisas  $t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , siendo ambos ejes representados en escala logarítmica.



[Rigdon y Basu (2000)]

Figura 13 – Gráficos de Duane para tres sistemas con tendencias dispares en los tiempos entre fallos

- Gráfico TTT: El grafico “Total Time on Test” fue desarrollado por Barlow y Campo al objeto de ayudar a seleccionar la distribución más adecuada para  $\lambda(t)$  en elementos no reparables, si bien puede ser aplicada para detectar la tendencia de los tiempos entre fallos en elementos reparables. Conlleva la transformación del eje de ordenadas y de abscisas con ayudas de estadísticos lineales, que en caso de aplicación para elementos reparables conlleva la transformación del eje de abscisas a escala logarítmica.

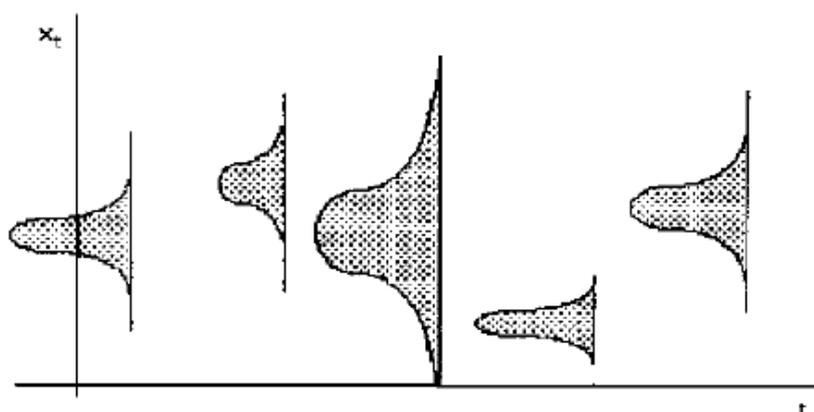
- Gráfico  $M(t)$ : Este gráfico es apropiado cuando se disponen de datos de uno o más elementos reparables incluso cuando se han observado en diferentes espacios de tiempo. Permite identificar los diferentes patrones de tendencia de  $z(t)$ , siendo complementario a los métodos paramétricos que se analizan en los puntos posteriores. El eje de ordenadas se representa el estadístico  $M(t)$  siendo su valor en cada  $t$  el número de fallos en  $t$  dividido entre el número de elementos del ensayo en  $t$ . El eje de abscisas representa a  $t$  sin ninguna transformación.

Para determinar la tendencia del tiempo entre fallos también se puede usar el directamente el gráfico  $N(T)$  o de MTBF. Nelson (2003) desarrolló un gráfico conocido como función acumulativa media (MCF) para fallos repetitivos. Otra alternativa es graficar el tiempo entre fallos consecutivos "Interevent Time".

### 2.7.3. Procesos estocásticos

La teoría de los procesos estocásticos se centra en el estudio y modelización de sistemas que evolucionan a lo largo del tiempo, o del espacio, de acuerdo a unas leyes no deterministas, esto es, de carácter aleatorio. La forma habitual de describir la evolución del sistema es mediante sucesiones o colecciones de variables aleatorias *v.a.* De esta manera, se puede estudiar cómo evoluciona una variable aleatoria a lo largo del tiempo.

Un proceso estocástico es una colección o familia de variables aleatorias  $\{X_t, \text{ con } t \in T\}$ , ordenadas según el subíndice  $t$  que en general se suele identificar con el tiempo. Por tanto, para cada instante  $t$  tendremos una variable aleatoria distinta representada por  $X_t$ , con lo que un proceso estocástico puede interpretarse como una sucesión de variables aleatorias cuyas características pueden variar a lo largo del tiempo. Por ejemplo, si observamos sólo unos pocos valores de  $t$ , tendríamos una imagen similar a la de la Figura adjunta, en la que se representa para cada  $t$  la función de densidad correspondiente a  $X_t$ .



[Departamento de Matemática Aplicada y Estadística - UPCT]

Figura 14 – Gráfica de representación de un proceso estocástico

Aunque en la Figura se han representado unas funciones de densidad variables, un proceso estocástico no tiene por que presentar esas diferencias en la función de densidad a lo largo del tiempo.

Se denomina conjunto de estados  $E$ , al conjunto de los posibles valores que pueden tomar las variables aleatorias  $\{X_t\}$ . Al conjunto de subíndices se le denomina conjunto paramétrico  $T$  y puede ser continuo o numerable. Los procesos estocásticos se pueden clasificar según la estructura del conjunto paramétrico  $T$  y del conjunto de estados  $E$ .

$E \setminus T$	Discreto	Continuo
Discreto	Cadena	Proceso Puntual
Continuo	Sucesión <i>v.a.</i>	Proceso Continuo

Tabla 5 – Clasificación de los procesos estocásticos

Asimismo los procesos estocásticos también se tipifican según las características probabilísticas de las *v.a.*:

- Procesos Markovianos: La característica principal de los procesos estocásticos markovianos es que la distribución de  $X_{n+1}$  sólo depende de la distribución de  $X_n$  y no de las anteriores ( $X_{n-1}, X_{n-2}, \dots$ ). Se puede resumir diciendo que el estado futuro del proceso, sólo depende del estado presente, y no del resto de estados pasados.
- Procesos estacionarios: Un proceso es estacionario en sentido estricto si la función de distribución conjunta de cualquier subconjunto de variables es constante respecto a un desplazamiento en el tiempo.
- Procesos de incrementos independientes: Se dice que un proceso  $\{X_t \text{ tal que } t \in T\}$  es de incrementos independientes si  $\forall n \in \mathbb{N}, \forall t_1, \dots, t_n \in T$ , con  $t_1 < \dots < t_n$  las *v.a.* son independientes.

Los métodos estadísticos desarrollados para el estudio de la fiabilidad de elementos reparables se basan en la aplicación de procesos estocásticos, en los que un fallo de un elemento es una variable aleatoria, y una vez reparado el siguiente fallo es otra variable aleatoria, que puede o no tener funciones de densidades de probabilidad iguales. Los métodos estocásticos más empleados son:

- Cadenas de Markov: Tanto el conjunto de estados  $E$ , como el de conjunto paramétrico  $T$  son discretos y las *v.a.* sólo depende del estado actual y no de los anteriores. También se emplean para el análisis de elementos no reparables. Una cadena de Markov es un proceso estocástico a tiempo discreto  $\{X_n: n = 0, 1, \dots\}$ , con espacio de estados discreto, y que satisface la propiedad de Markov, esto es, para cualquier entero  $n \geq 0$ , y para cualesquiera estados  $x_0, \dots, x_{n+1}$ , se cumple:

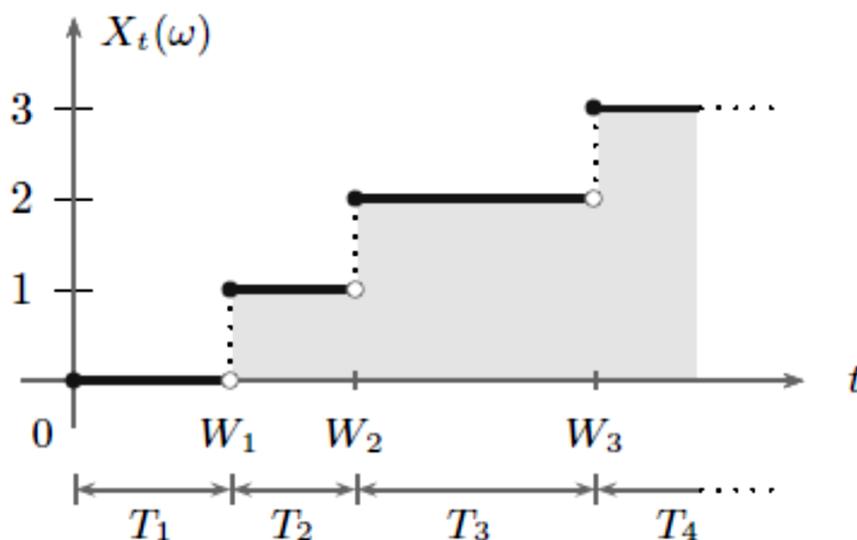
$$p(x_{n+1} | x_0, \dots, x_n) = p(x_{n+1} | x_n) \quad (40)$$

Si el tiempo  $n+1$  se considera como un tiempo futuro, el tiempo  $n$  como el presente y los tiempos  $0, 1, \dots, n-1$  como el pasado, entonces la condición (40) establece que la distribución de probabilidad del estado del proceso al tiempo futuro  $n+1$  depende únicamente del estado del proceso al tiempo  $n$ , y no depende de los estados en los tiempos pasados  $0, 1, \dots, n-1$ .

- Procesos de Poisson Homogéneo (HPP): El conjunto de estados  $E$  es discreto, el conjunto paramétrico  $T$  es continuo y las *v.a.* son de incrementos independientes y estacionarios (i.i.d.) con distribución exponencial. Un proceso  $\{X_t; t \geq 0\}$  es un HPP con parámetro  $\lambda > 0$ , si:

1.  $X_0 = 0$
2.  $X_1 - X_0, X_2 - X_1, \dots, X_n - X_{n-1}$  son variables aleatorias independientes (proceso de incrementos independientes).
3. Para cualquier  $t \geq 0$ , y cuando  $h \searrow 0$ ;  $P(X_{t+h} - X_t \geq 1) = \lambda(h) + o(h)$ ;  $P(X_{t+h} - X_t \geq 2) = o(h)$ .

El adjetivo homogéneo se refiere a que el parámetro  $\lambda$  no cambia con el tiempo, es decir, es homogéneo en el tiempo. Una trayectoria típica de este proceso puede observarse en la Figura 15, la cual es no decreciente, constante por partes, continua por la derecha y con límite por la izquierda. A los tiempos  $T_1, T_2, \dots$  corresponden a los tiempos que transcurren entre un salto del proceso y el siguiente salto. Estos tiempos son independientes y que todos tienen distribución exponencial  $\lambda$ . La variable  $W_n$  representa el tiempo real en el que se observa la ocurrencia del  $n$ -ésimo evento. Se observa la igualdad de eventos  $(X_t \geq n) = (W_n \leq t)$ , esto equivale a decir que al tiempo  $t$  han ocurrido por lo menos  $n$  eventos si, y sólo si, el  $n$ -ésimo evento ocurrió antes de  $t$ .



[Rincón (2011)]

Figura 15 – El proceso de Poisson y los tiempos de ocurrencia de eventos

Una de las características de este proceso es que puede encontrarse explícitamente la distribución de probabilidad de la variable  $X_t$  para cualquier valor de  $t$ . La respuesta es la distribución Poisson, y es de allí de donde el proceso adquiere su nombre. La variable  $X_t$  tiene distribución Poisson ( $\lambda t$ ), es decir, para cualquier  $t > 0$ , y para  $n = 0, 1, \dots$ :

$$P(X_n = n) = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!} \quad (41)$$

- Procesos de Poisson No Homogéneo (NHPP): El conjunto de estados  $E$  es discreto, el conjunto paramétrico  $T$  es continuo y las *v.a.* son de incrementos independientes y no son estacionarios homogéneos. Un proceso  $\{X_t; t \geq 0\}$  es un NHPP con función localmente integrable  $\lambda(t)$  si:
  - 1.  $X_0 = 0$
  - 2.  $X_1 - X_0, X_2 - X_1, \dots, X_n - X_{n-1}$  son variables aleatorias independientes (proceso de incrementos independientes).
  - 3. Para cualquier  $t \geq 0$ , y cuando  $h \searrow 0$ ;  $P(X_{t+h} - X_t \geq 1) = \lambda(t)h + o(h)$ ;  $P(X_{t+h} - X_t \geq 2) = o(h)$ .

En este caso el parámetro  $\lambda(t)$  varía con el tiempo, generalmente de manera decreciente. Es decir, la distribución de probabilidad de la variable incremento  $X_{t+s} - X_s$  depende de los valores de la función  $\lambda$  en el intervalo  $(s, s + t]$ . Sin embargo, y en completa analogía con el HPP, la variable  $X_t$  continúa teniendo distribución Poisson.

- Procesos de renovación (RP): El conjunto de estados  $E$  es discreto, el de conjunto paramétrico  $T$  es continuo y las *v.a.* son de incrementos independientes y estacionarias (i.i.d.), pero su distribución puede no ser exponencial. Dado un proceso de renovación  $\{T_1, T_2, \dots\}$ , se definen los tiempos reales de renovación como  $W_0 = 0$  y  $W_n = T_1 + \dots + T_n$ , para  $n \geq 1$ . El proceso de puntual de renovaciones es:

$$N_t = \text{máx} \{n \geq 0 : W_n \leq t\}, \text{ para cada } t \geq 0 \quad (42)$$

La variable aleatoria  $W_n$  representa el tiempo real en el que se realiza la  $n$ -ésima renovación, mientras que  $N_t$  indica el número de renovaciones realizadas hasta el tiempo  $t$ . Se denota en los procesos de renovación por  $F(t)$  a la función de distribución de los tiempos de vida o tiempos entre fallos (TBF). Por lo tanto, la función de distribución de  $W_n$  es la convolución de  $F(t)$  consigo misma  $n$  veces, es decir,  $F_{W_n}(t) = P(T_1 + \dots + T_n \leq t) = F^{*n}(t) = (F * \dots * F)(t)$ . Una de las primeras necesidades de un proceso de renovación es la de conocer la distribución de la variable  $N_t$ .

La respuesta no es fácil de encontrar pues la distribución de esta variable depende de la distribución de TBF como indica la siguiente fórmula, para cualquier  $n \geq 0$ :

$$P(N_t = n) = F^{*n}(t) - F^{*(n+1)}(t) \quad (43)$$

La función de renovación, y se le denota por  $\Lambda(t) = E[N(t)]$ , en general no es fácil encontrar una forma explícita para esta función. Sin embargo, se cuenta con la siguiente ecuación integral general:

$$\Lambda(t) = F(t) + \int_0^t \Lambda(t-s) dF(s) \quad (44)$$

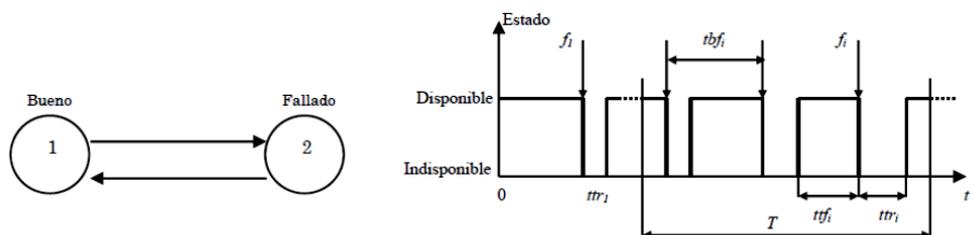
La tasa de aparición de fallos ROCOF  $\mu(t)$ , se puede calcular si  $\Lambda(t)$  es diferenciable como:

$$\mu(t) = \frac{d}{dt} \Lambda(t) \quad (45)$$

ROCOF se puede interpretar como la tasa instantánea de cambio en el número de fallos esperado. Si no ocurren (o pueden ocurrir) dos fallos de forma simultánea, ROCOF y  $z(t)$  son dos funciones idénticas.

#### 2.7.4. Métodos basados en cadenas estocásticas

El modelo clásico para componentes reparables es el de dos estados que se muestra en la Figura. También se muestra la secuencia operativa del elemento que es definida por los fallos y reparaciones; esta es una secuencia de estados de disponibilidad e indisponibilidad.

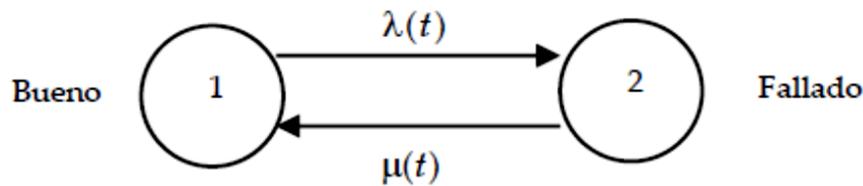


[Zapata (2011)]

Figura 16 – Diagrama de estados y secuencia operativa

Cada fallo ( $f_i$ ) tiene asociado un tiempo para fallo ( $ttf_i$ ) y un tiempo para reparación ( $ttr_i$ ), los cuales son aleatorios e independientes entre sí, en cuanto a su duración. Otra medida en la secuencia operativa es el tiempo entre fallos ( $tbf_i$ ). El número de fallos  $n_f$  en un periodo de tiempo  $T$  es aleatorio. Por consiguiente, el número de reparaciones  $n_r$  en un periodo de tiempo  $T$  también lo es.

El cero, en la secuencia operativa, es el momento en el cual el componente inicia su operación “nuevo”. La secuencia de fallos y reparaciones de un elemento reparable define un proceso aleatorio que se puede representar como una cadena estocástica de Markov de dos estados discretos y tiempo continuo cuya representación se muestra en la Figura adjunta.



[Zapata (2011)]

Figura 17 – Modelo de cadena de Markov de dos estados para elementos reparables

El modelo matemático se basa en el cálculo de la tasa de fallos  $\lambda(t)$  y la tasa de reparación  $\mu(t)$  como:

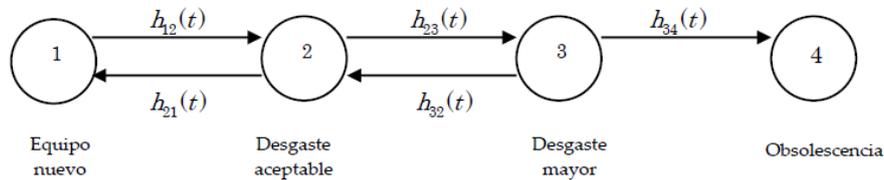
$$\lambda(t) = \frac{1}{E(ttf)} = \frac{dE[n_f(t)]}{dt} \quad (46)$$

$$\mu(t) = \frac{1}{E(ttr)} = \frac{dE[n_r(t)]}{dt} \quad (47)$$

Para definir cómo se resuelve el modelo matemático de la cadena de Markov de dos estados, antes es necesario analizar la tendencia e independencia de los datos de tiempos entre fallo y de tiempos de reparación:

- Cadena de Markov homogénea exponencial: Los tiempos entre fallo y de reparación son estacionarios, independientes y exponencialmente distribuidos. Por lo tanto  $\lambda(t)$  constante y  $\mu(t)$  constante. Requiere de la aplicación de métodos de solución analítica, métodos numéricos o de simulación de Montecarlo.
- Cadena de Markov homogénea general: Los tiempos entre fallos y de reparación son estacionarios, independientes, pero ambos no están exponencialmente distribuidos. Por lo tanto  $\lambda(t)$  constante y  $\mu(t)$  constante. Los métodos de solución para este tipo de cadenas son; simulación de Montecarlo, mecanismo de las etapas y adición de variables.
- Cadena de Markov no homogénea: Los tiempos entre fallos o los de reparación son no estacionarios. En este caso  $\lambda(t)$  y/o  $\mu(t)$  no son constantes. Los métodos de solución matemáticos son analíticos (sólo para algunos casos) y numéricos.

También han definido modelos multi-estado para elementos reparables. En este caso, los estados se refieren a situaciones de desgaste o estados operativos relacionados con la capacidad de producción del elemento. Todos los estados no tienen que estar conectados entre sí.



[Zapata (2011)]

Figura 18 – Ejemplo de cadena de Markov multi-estado para elementos reparables

Las tasas de transición  $h_{ij}(t)$  entre estados  $i$  y  $j$  se refieren a diversos tipos de fallos y reparaciones y se definen en forma general como:

$$h_{ij}(t) = \frac{1}{E(t_{ij})} = \frac{dE[n_{ij}]}{dt} \quad (48)$$

Tres casos aparecen en el estudio de este proceso estocástico multi-estado:

- Cadena de Markov homogénea exponencial: Los  $t_{ij}$  son estacionarios, independientes y exponencialmente distribuidos. Por lo tanto los  $h_{ij}$  son constantes. Requiere de la aplicación de métodos de solución analítica, métodos numéricos o de simulación de Montecarlo.
- Cadena de Markov homogénea general: Los  $t_{ij}$  son estacionarios pero no todos están exponencialmente distribuidos. Por lo tanto los  $h_{ij}$  son constantes. Los métodos de solución para este tipo de cadenas son: simulación de Montecarlo, mecanismo de las etapas y adición de variables.
- Cadena de Markov no homogénea: Algún o varios  $t_{ij}$  no es estacionario. En este caso algún o varios  $h_{ij}$  no es constante. Los métodos son simulación de Montecarlo, mecanismo de las etapas y adición de variables.

Se puede profundizar en los métodos desarrollados en cadenas de Markov de dos estados en ejemplos de Kumamoto (1980), Simpson (2002), Zheng (2006) o Xiao (2008). Se recomienda la lectura de Narváez (2012) para cadenas de Markov multi-estado.

### 2.7.5. Métodos basados en procesos de Poisson homogéneos (HPP)

El modelar en un elemento reparable los fallos mediante un proceso estocástico puntual HPP implica:

- Los fallos ocurren sólo uno a la vez (algunos investigadores argumentan que esto es válido pues en términos prácticos es difícil probar que dos fallos realmente ocurren en el mismo instante de tiempo).
- La indisponibilidad del componente es despreciable (esto se cumple para muchos elementos; sin embargo, se recomienda verificarlo para cada caso bajo estudio).
- Las reparaciones del elemento o sistema son “**como nuevo**” (Perfect Repair), es decir, la reparación lleva al elemento a un estado de operación equivalente al inicial.

En un HPP el tiempo entre fallos TBF es la *v.a.* con incrementos independientes y estacionarios (i.i.d.) con distribución exponencial. Es necesario comprobar que la *v.a.* tiene incrementos independientes, es decir, que los TBF no muestran relación o correlación con ninguna otra variable (fallo previo, temperatura, etc.), mediante análisis de correlación, covarianza, etc.

Asimismo los TBF deben de ser estacionarios, es decir, no muestran tendencia, al objeto de aceptarse o no que se trata de un proceso HPP. Los **test de tendencia** más empleados son:

- Test de Laplace, también denominado estadístico *U*.
- Test MIL-HDBK-189 también conocido como AMSAA/Crow (Army Materiel Systems Analysis Activity) o Military Handbook Test.
- Test RAT (Reverse Arrangement Test).
- Test PCNT (Pair-wise Comparison Nonparametric Test).
- Test Lewis-Robinson.
- Test de Mann.
- Y los métodos gráficos del apartado 2.7.2.

Se puede profundizar en este campo en los artículos de Wang (2005), Bain (1985), Schilling (1988) y Garmabaki (2016), donde se comparan diferentes test de tendencia sobre datos y ensayos, comparándose la robustez y mejor conveniencia de empleo de los mismos. Si se demuestra tendencia en los datos de TBF, se debe intentar modelar mediante un NHPP.

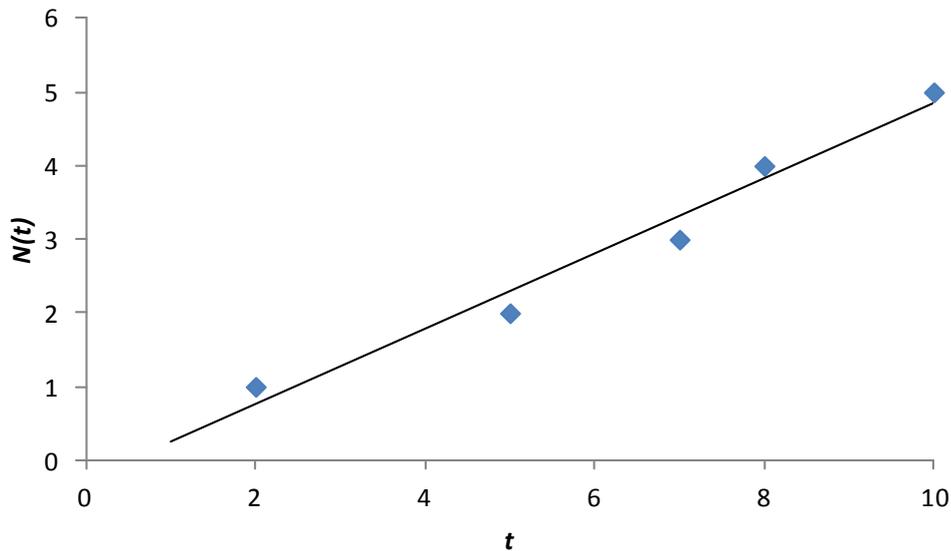


Figura 19 – Gráfico de  $N(t)$  para un elemento reparable sin tendencia

Una vez que se ha aceptado que los datos responden a un proceso puntual estacionario, se debe comprobar que los datos de TBF tiene una distribución exponencial, para ello se tiene que emplear un **test de bondad de ajuste** a la citada distribución, siendo los más habituales que se emplean:

- Chi-cuadrado  $\chi^2$ .
- Kolmogorov-Smirnov ( $K-S$ ).
- Kuiper  $V$ .
- Cramer-von-Mises  $C^2$ .
- Watson  $U^2$ .
- Anderson-Darling  $A^2$ .

Sólo en el caso de que no sea rechazada la hipótesis de que los datos de TBF se distribuyen exponencialmente, se pueden emplear el modelo HPP para estimar la fiabilidad del elemento reparable. En caso de ser rechazada la hipótesis, se debe emplear un RP. Si se acepta el modelo HPP se aplica (15), (14) y (2), y se obtienen  $z(t)$ ,  $R(t)$  y  $f(t)$  que se realiza para el punto de fin del ensayo con  $r$  el número total de fallos a considerar en el ensayo y  $T^*$  el tiempo total del ensayo terminado por tiempo o por fallo:

$$z(t) = \hat{\lambda} = \frac{r}{T^*} \quad (49)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (50)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (51)$$

Señalar que  $\hat{\lambda}$  es la tasa de fallo constante estimada para el punto final del estudio, y asumir este valor para predicciones de  $z(t)$  debe de tomarse con cautela, ya que matemáticamente el modelo HPP no predice valores futuros.

Asimismo, y una vez aplicado el modelo HPP para la estimación de parámetros, se han desarrollado métodos estadísticos complementarios para:

- Establecer intervalos de confianza lateral y bilateral de la estimación de  $\hat{\lambda}$ .
- Predecir los intervalos futuros del número de fallos acumulados  $r$ .
- Estimación bayesiana del parámetro  $\lambda$ .
- Estimación bayesiana del futuro número de fallos acumulados  $N(t)$ .

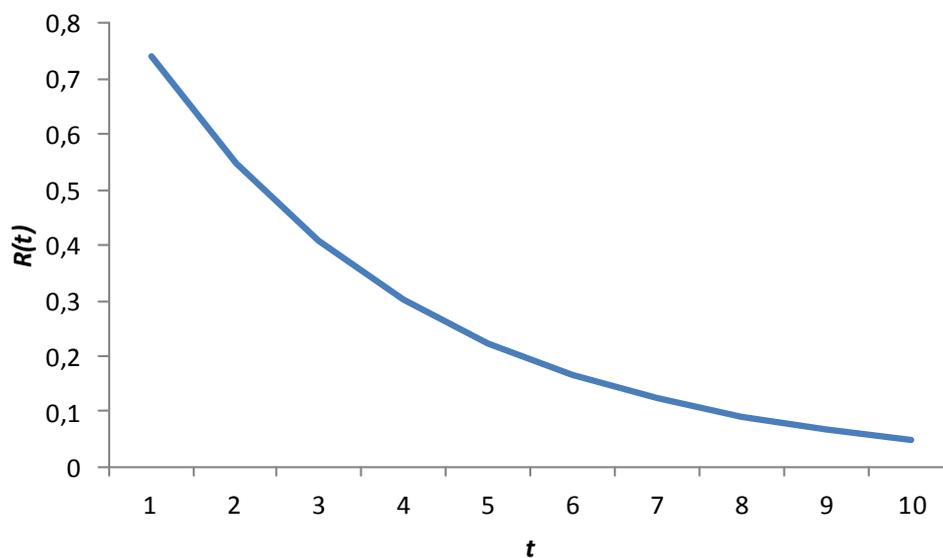


Figura 20 – Gráfico de  $R(t)$  para un elemento modelado HPP.

En Rigdon y Basu (2000) se compendian y desarrollan diversas fuentes primarias de métodos estadísticos de HPP. Esta obra es una de las mejores recopilaciones de métodos estadísticos para la fiabilidad de elementos reparables.

Para profundizar en la estimación bayesiana de parámetros y número de fallos acumulados futuros se recomienda la lectura de Beiser (1997), Krivtsov (2000), Hall (2009) y Ghosh (2011).

Es necesario volver a resaltar que el modelo HPP sólo se puede aplicar si se demuestra que los datos de TBF del elemento o sistema reparable son independientes, estacionarios y con distribución exponencial, ver Tang y otros (2008) y Wu y otros (2011).

### 2.7.6. Métodos basados en procesos de Poisson no homogéneos (NHPP)

Estos métodos se deben ensayar si el resultado de la aplicación de las pruebas estadísticas de tendencia, se rechaza la hipótesis de la no existencia de tendencia. Si existe una tendencia (intensidad de fallo creciente o decreciente), puede ser de aplicación el denominado Proceso de Poisson No Homogéneo (NHPP).

Los fallos en un elemento reparable a modelar mediante un proceso estocástico puntual NHPP implica:

- Los fallos ocurren sólo uno a la vez (algunos investigadores argumentan que esto es válido pues en términos prácticos es difícil probar que dos fallos realmente ocurren en el mismo instante de tiempo).
- La indisponibilidad del componente es despreciable (esto se cumple para muchos elementos; sin embargo, se recomienda verificarlo para cada caso bajo estudio).
- Las reparaciones del elemento o sistema son “**como viejo**” (Minimal Repair), es decir, la reparación lleva al elemento a un estado de operación equivalente justo al momento anterior a la reparación.

En un NHPP el tiempo entre fallos TBF es la *v.a.* con incrementos independientes y no estacionarios. Es necesario comprobar que la *v.a.* tiene incrementos independientes, es decir, que los TBF no muestran relación o correlación con ninguna otra variable (fallo previo, temperatura, etc.).

Asimismo los TBF deben de ser no estacionarios, es decir que muestran tendencia, al objeto de aceptarse (o no) que se trata de un proceso NHPP. Los **test de tendencia** empleados son los ya comentados en el apartado del proceso HPP.

L. H. Crow (1974) consideró el patrón de la ley de potencia (PLP) para crecimiento de la fiabilidad y formuló el modelo probabilístico subyacente para fallos como un proceso de Poisson no homogéneo (NHPP),  $\{N(t), t > 0\}$ , con función valor medio;

$$E[N(t)] = \lambda t^\beta \quad (52)$$

y función intensidad de fallo;

$$z(t) = \frac{d}{dt} E[N(t)] = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad (53)$$

Siendo;

$E[N(t)]$	<i>el número acumulado de fallos esperado hasta tiempo de fallo T</i>
$\lambda$	<i>es el parámetro de escala</i>
$\beta$	<i>es el parámetro de forma</i>
$z(t)$	<i>la intensidad de fallo actual tras T tiempo de ensayo</i>

El modelo NHPP con la probabilidad de Poisson de que  $N(t)$  tomará un valor particular;

$$\Pr [N(t) = n] = \frac{(\lambda t^\beta)^n e^{-\lambda t^\beta}}{n!} \quad \text{con } n = 0, 1, 2, \dots \quad (54)$$

También, con este modelo;

$$E [\lambda t_j^\beta] = j \quad \text{con } j = 0, 1, 2, \dots \quad (55)$$

Siendo  $t_j$  el tiempo acumulado hasta el fallo de orden  $j$ . Esto da la útil aproximación de primer orden, para el tiempo esperado hasta el fallo  $j$ ;

$$E[t_j] = \left(\frac{j}{\lambda}\right)^{1/\beta} \quad \text{con } j = 0, 1, 2, \dots \quad (56)$$

Cuando  $\beta = 1$ , entonces  $z(t) = \lambda$  y los tiempos entre fallos sucesivos siguen una distribución exponencial de media  $1/\lambda$  (proceso homogéneo de Poisson), indicando una intensidad de fallo constante. La función intensidad  $z(t)$  es decreciente para  $\beta < 1$  (crecimiento de la fiabilidad) y creciente para  $\beta > 1$  (deterioro de la fiabilidad).

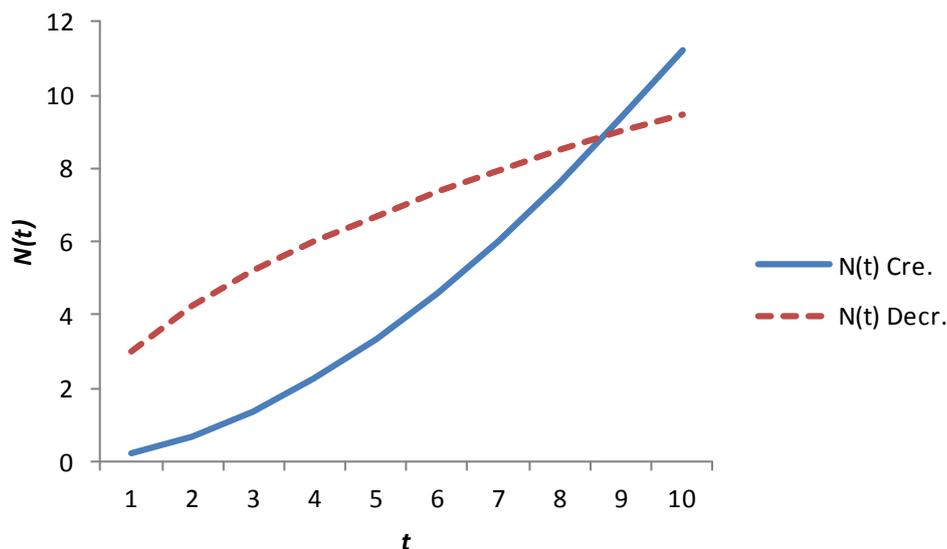


Figura 21 – Gráfico de  $N(t)$  para dos elementos modelado NHPP (tendencia creciente y decreciente).

Existen múltiples modelos alternativos a la PLP en NHPP, del que se han publicado numerosas aportaciones para su desarrollo y mejora, ver Attardi (2005) y Bettini (2007). Se describen los más destacados:

$$\text{Función potencia; } z(t) = \lambda t^\beta \quad (57)$$

$$\text{Función exponencial; } z(t) = e^{\lambda + \beta t} \quad (58)$$

$$\text{Modelo IBM; } z(t) = \lambda + \beta \sigma e^{-\sigma t} \quad (59)$$

$$\text{Modelo BIP; } z(t) = \alpha [1 - e^{t/\beta}] \quad (60)$$

$$\text{Modelo Gompertz; } z(t) = ab^{c^t} \quad (61)$$

$$\text{Logística (S-Shaped); } z(t) = \frac{1}{1 + be^{-kt}} \quad (62)$$

Otros modelos NHPP que se han empleado en diferentes estudios son los modelos log-normal, log-logística, log-cuadrática, EBP (Engelhardt-Bain Process), 2-EBP 2 parámetros, Gompertz modificado, exponencial 2º orden y exponencial 3º orden. También se pueden aplicar modelos NHPP desarrollados para fiabilidad del software (IFS): Musa, Goel-Okumoto, distribución de Weibull, etc.

Una vez estimados los parámetros del modelo NHPP se debe efectuar una prueba de bondad de ajuste, al objeto de validar el ajuste de modelo a los datos reales de cada elemento reparable. Las **pruebas de bondad de ajuste** más extendidas son:

- Chi-cuadrado  $\chi^2$ .
- Kolmogorov-Smirnov  $K-S$ .
- Kolmogorov-Smirnov modificada  $D$ .
- Kuiper  $V$ .
- Cramer-von-Mises  $C^2$ .
- Watson  $U^2$ .
- Anderson-Darling  $A^2$ .

Asimismo, y una vez aplicado el modelo NHPP para la estimación de parámetros, se han desarrollado métodos estadísticos complementarios para:

- Establecer intervalos de confianza lateral y bilateral de la estimación de parámetros.

- Predecir los intervalos futuros del número de fallos acumulados  $r$ .
- Estimación bayesiana del parámetros.
- Estimación bayesiana del futuro número de fallos acumulados  $N(t)$ .

En Rigdon y Basu (2000) se compendian y desarrollan diversas fuentes primarias de métodos estadísticos de NHPP. Para profundizar en la estimación bayesiana de parámetros ver Beiser (1997), Krivtsov (2000), Hall (2009) y Ghosh (2011).

### 2.7.7. Métodos basados en procesos de renovación (RP)

El modelar un elemento reparable los fallos mediante un proceso de renovación (RP) implica:

- Los fallos ocurren sólo uno a la vez (algunos investigadores argumentan que esto es válido pues en términos prácticos es difícil probar que dos fallos realmente ocurren en el mismo instante de tiempo).
- La indisponibilidad del componente es despreciable (esto se cumple para muchos elementos; sin embargo, se recomienda verificarlo para cada caso bajo estudio).
- Las reparaciones del elemento o sistema son “**como nuevo**” (Perfect Repair), es decir, la reparación lleva al elemento a un estado de operación equivalente al inicial.

En un RP el tiempo entre fallos TBF es la *v.a.* con incrementos independientes y estacionarios (i.i.d.) con cualquier distribución. Por lo tanto, el modelo HPP realmente una particularización de un proceso RP en el que los TBF tiene una distribución exponencial.

Es necesario comprobar que la *v.a.* tiene incrementos independientes, es decir, que los TBF no muestran relación o correlación con ninguna otra variable (fallo previo, temperatura, etc.).

Asimismo los TBF deben de ser estacionarios, es decir, no muestran tendencia, al objeto de aceptarse o no que se trata de un proceso RP. Los test de tendencia empleados son los ya comentados en el apartado del proceso HPP.

Para la selección de la distribución que mejor se ajusta a los datos de TBF, se tienen que emplear un test de bondad de ajuste para cada distribución ensayada, siendo los más habituales que se emplean:  $\chi^2$ ,  $K-S$ ,  $V$ ,  $C^2$ ,  $U^2$ ,  $A^2$ .

El desarrollo de la ecuación integral general es:

$$E[N(t)] = \Lambda(t) = F(t) + \int_0^t \Lambda(t-s) dF(s) = F(t) + \Lambda(t) * F(t) \quad (63)$$

La solución matemática para esta ecuación integral con convolución es compleja y se debe particularizar a cada distribución que presenten los TBF, ver Gámiz (2011), Baxter (1982), Andronov (2014), Maghsoodloo (2014). Se enumeran algunos de los estimadores empleados para el cálculo del parámetro  $\hat{\lambda}$ :

- Transformada de Laplace.
- Algoritmo splines cúbicos generalizado.
- Teorema del valor medio para integrales.
- Re-muestro.
- No paramétricos:
  - o Empírico.
  - o Tipo-histograma.
  - o Simulaciones Monte Carlo.
  - o Parámetros de ancho de banda.
  - o Tipo Kernel.

Sólo en el caso de que no sea rechazada la hipótesis de que los datos de TBF se distribuyen con alguna distribución conocida (Weibull, gamma, log-normal, etc.), se pueden emplear el modelo RP.

Con ayuda de software de fiabilidad-estadístico (que incorporan estimadores) o implementando algún estimador en MATLAB se calcula  $\hat{\lambda}$ , valor contante de la intensidad de fallo,  $z(t) = \hat{\lambda}$  en los modelos RP.

Los modelos RP en sistemas reparables tienen una amplia difusión, ver Baxter y otros (1982), Smeitink and Dekker (1990), Rigdon and Basu (2000), Rausand and Hoyland (2004), Fajardo y otros (2010), Tobias and Trindade (2011) y Maghsoodloo and Helvaci (2014).

### 2.7.8. Métodos basados en procesos estocásticos imperfectos y otros

En muchos casos datos de fallo de los elementos reparables a menudo desafían cualquier modelo simple, como son el HPP, el NHPP y los RP. El comportamiento de los fallos en los elementos a veces es aparentemente errático; durante ciertos periodos son de tendencia creciente, estacionarios o de tendencia decreciente.

Uno de los fenómenos más observado por los investigadores es la tendencia a la acumulación de varios fallos consecutivos durante cortos periodos temporales, a los que preceden y anteceden largos periodos temporales sin fallos acumulados. Este fenómeno es bien conocido por los responsables de mantenimiento de sistemas reparables, son los conocidos como “fallos repetitivos”, ver Hatton (1999) y Karanikas (2013).

De forma subjetiva, todos tenemos la percepción de que series fabricadas de forma idéntica de sistemas reparables complejos (por ejemplo, los automóviles), tienen una fiabilidad en su explotación diferentes, y en algunos casos con valores dispares, y los datos obtenidos en la toma de datos en operación corroboran esta percepción subjetiva en múltiples estudios. Por lo tanto, en un conjunto de sistemas reparables complejos, se suele observar que cada elemento no se comporta como un modelo simple de fiabilidad (HPP, NHPP o RP) y que entre elementos reparables idénticos no se obtienen los mismos valores de fiabilidad, presentando en algunos casos diferencias notables.

Es por ello que los profesores matemáticos y estadísticos han diversificado las investigaciones para el desarrollo de modelos que puedan representar adecuadamente la fiabilidad de los sistemas reparables.

Fueron iniciados por Lewis (1964) que presentó el proceso de Poisson de ramificación (BPP) y Cox (1972) con el proceso de renovación modulado (MRP). En los modelos de “reparación imperfecta” destacan BP de Brown y Proschan (1983), BBS de Block y otros (1985), los procesos de renovación con tendencia (TRP) de Lindqvist y otros (2003), los procesos de renovación generalizados (GRP) iniciados por Kijima (1989) y los modelos de intensidad proporcional (PI), ver comparativas de Jiang (2005) y Peña (2006). Otra vía de desarrollo se basa en modelos de fragilidad para datos correlacionados, ver Peña y Hollander (2004).

En estos momentos el número de modelos desarrollados supera ampliamente el centenar, ver Ascher y Feingold (1984), Pham y Wang (1996), Rigdon y Basu (2000), Guo (2000), Rausand y Hoyland (2004), y Peña (2006).

Se presentan a continuación los modelos basados en procesos estocásticos (SP) agrupados bajo el concepto de “imperfectos” y otros modelos, que intentan modelar los datos de los elementos reparables teniendo en cuenta que la reparación no ha sido “como nueva” (Perfect Repair), ni tampoco ha sido “como vieja” (Minimal Repair), por lo tanto incluyen un parámetro o parámetros adicionales para modular el estado de restauración al que cada reparación lleva al elemento reparable.

En la mayoría de estos modelos el tiempo entre fallos TBF es la *v.a.* con incrementos dependientes, es decir manifiestan algún grado de relación con otra *v.a.* que puede ser la reparación anterior, una intervención de mantenimiento preventivo, condiciones ambientales, etc. Si se demuestra dependencia de TBF con alguna *v.a.* se invalida estadísticamente la conveniencia del empleo de los modelos HPP, HNPP y RP.

Dada la profusión de modelos existentes se compendian los tipos de modelos de mayor impacto científico internacional y sus características básicas, al objeto de poner de manifiesto su diversidad y la complejidad de apartamenta matemática asociada.

- Modelo de proceso de Poisson de ramificación (Branching Poisson Process, BPP): Desarrollado por Lewis (1964) tiene en cuenta que un elemento puede no ser reparado correctamente y que posteriormente se generan fallos recurrentes. Se supone que cada fallo primario tiene el modelo HPP y existe una probabilidad  $1 - r$  de que la reparación sea correcta. Por lo tanto con probabilidad  $r$  la reparación no es correcta y se genera un proceso de renovación RP en los fallos recurrentes.

Su desarrollo matemático completo se ha presentando para los casos en que los fallos recurrentes  $S$  presentan una distribución  $S-1$  geométrica, binomial negativa y Poisson.

- Modelo de proceso de renovación superpuesto (Superimposed Renewal Process, SRP): Se trata de modelar un elemento reparable ficticio  $n$  mediante la superposición de los fallos de un grupo de elementos idénticos que responden a un modelo RP (aún con diferente distribución de TBF). El modelo resultante de la superposición de los fallos en el elemento  $n$  no resultar a su vez un modelo RP, ver Blumenthal (1993) y Tian (2013).
- Modelos de proceso de renovación modulado (Modulated Renewal Process, MRP): Propuesto por Cox (1972) modula la intensidad de fallo  $z(t)$  en el tiempo  $t$  a un tiempo  $B_t$  de recurrencia hacia atrás. Si  $B_t$  es igual a 0 el modelo se comporta como un modelo RP perfecto y la restauración es “como nuevo”. De esta forma el modelo MRP es una generalización de ambos modelos RP y HNPP. Cox sugiere que la modulación de modelo RP se puede realizar por un modelo de tendencia HNPP, por fenómenos periódicos ( $\cos \omega t$ ) o por factores de carga (temperatura, etc.). Berman (1981) desarrolla un modelo RP con distribución gamma de los TBF con modulación HNPP, conocido como “inhomogeneous gamma processes”. Una variante es el MPLP (Modulated Power Law Process) que sobre un modelo RP con distribución gamma se realiza una modulación PLP.
- Modelo exponencial por tramos (Piecewise Exponential Model, PEXP): Este modelo plantea la posibilidad de que los TBF sean independientes, con tendencia y distribución exponencial, pero que no implica necesariamente que sean un proceso de Poisson no homogéneo NHPP, abriendo la posibilidad a otras distribuciones cuando se demuestra tendencia. El modelo propone que la fiabilidad de un elemento permanece sin cambios entre los fallos y da un “salto” cada vez que se produce un fallo, ver aportaciones al modelo de Arab (2012).
- Modelo Brown-Proschan (BP): Iniciado por Nakagawa (1979), a través del modelo de Brown y Proschan (1983) se introduce el concepto de reparación “imperfecta”. Un elemento falla con reposición “como nuevo” con probabilidad  $p$  y con reposición “como viejo” con probabilidad  $1 - p$ . En los casos extremos,  $p = 0$  el modelo se comporta como un NHPP, y  $p = 1$  el modelo se comporta como un RP. En los valores intermedios el modelo permite ajustar  $p$  a los valores de reparación “imperfecta”, es decir “mejor que viejo” pero no “como nuevo”.
- Modelo Block-Borges-Savits (BBS): Es una extensión del modelo BP que permite que la probabilidad de la reposición “como nuevo” dependa del tiempo. Se supone que un elemento que falla con reposición “como nuevo” tiene una probabilidad  $p(t)$  y con reposición “como viejo” con probabilidad  $q(t) = 1 - p(t)$ , ver Block, Borges y Savits (1985).

- Método de factor de mejora (Improvement factor method): Malik (1979) y Stadjie y Zuckerman (1991) introducen el concepto de factor de mejora. El mantenimiento correctivo (reparación de un fallo) mejora en su reposición “como viejo”, pero sin llegar a reposición “como nuevo”, es decir reposición “imperfecta”. Este método mantenimiento “imperfecto” también incluye las intervenciones de mantenimiento preventivo (sin que ocurra fallo) con reposición “imperfecta”. El grado de mejora de  $z(t)$  se denomina “factor de mejora”. El modelo supone que dado que los sistemas necesitan un mantenimiento más frecuente con el aumento de la edad, el mantenimiento preventivo debe de disminuir sus intervalos para contener los fallos, y propone un algoritmo para determinar estos intervalos sucesivos de mantenimiento preventivo.
- Procesos de edad virtual (“virtual age”)/ Procesos de renovación generalizados (GRP): Kijima y Sumita (1986) introduce el concepto de “edad virtual” e inician los desarrollos de los procesos de renovación bajo la denominación de “generalizados”(GRP). Kijima (1989) desarrolla dos posibles modelos probabilísticos; Kijima I que asume que las reparaciones sólo corrigen el desgaste y daños creados en el último período de funcionamiento y Kijima II asume que las reparaciones “fijan” los desgastes y el daño acumulado hasta el momento actual. A partir de este concepto, se han desarrollado diferentes modelos que emplean el concepto de “edad virtual”, entre los que destacan:
  - o Modelo I – Kijima (1989).
  - o Modelo II – Kijima (1989).
  - o Modelo General - Finkelstein (1993).
  - o Modelo Unificado - Guo, Love y Bradley (1995).
  - o Modelo Generalizado - Makis (1995), Dagpunar (1998).
  - o Modelo Geométrico G1 - Kaminskiy y Krivtsov (2010).

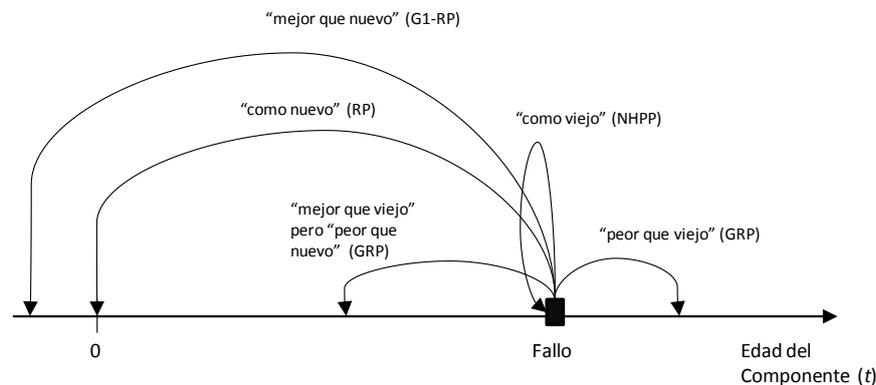
El desarrollo matemático, la estimación de parámetros, intervalos de confianza, etc. de estos modelos es muy complejo.

Destacan los trabajos de Kaminskiy y Krivtsov (1998) para la solución de los modelos GRP con el método Monte Carlo y las soluciones con estimadores de máxima verosimilitud (MLE) propuestas por Yañez (2002) y Mettas y Zhao (2005).

En la Figura adjunta se representan las diferentes posibilidades de estado de un elemento reparable después de una reparación (restauración) y modelos apropiados para su estudio:

- “como nuevo” = Modelos RP (se incluye HPP), algunos autores los denominan como RP normal o simples ORP (Ordinary Renewal Process).
- “como viejo” = Modelos NHPP.
- “mejor que viejo” pero “peor que nuevo” = Modelos GRP.

- “peor que viejo” = Modelos GRP.
- “mejor que nuevo” = Modelo G1-RP.



[Traducción de Kaminskiy y Krivtsov (2015)]

Figura 22 – Supuestos de reparación y modelos de edad virtual de un elemento reparable.

- Modelos de procesos de renovación con tendencia (Trend Renewal Process, TRP): sobre la idea del modelo de Berman (1981) “inhomogeneous gamma processes”, Lindqvist y otros (2003) generalizaron la idea, llamando al nuevo modelo como proceso de renovación con tendencia. Se basa en especificar una función de distribución  $F$  sobre los TBF que se modelan con un modelo RP. Los modelos desarrollados son:
  - Modelo TRP - Lindqvist y otros (2003).
  - Modelo Heterogeneous TRP, HTRP - Lindqvist y otros (2003).
  - Modelo Multi-level TRP, MTRP – Xu y otros (2015).
- Modelos de intensidad proporcional (Proportional Intensity, PI): Cox (1972) propuso el modelo de distribución libre (semi-paramétrico) de riesgos proporcionales (PH) aplicable a elementos no reparables. El modelo no busca tanto estimar la función de fallo, que es idéntica para todos los elementos, como la relación entre los riesgos de fallos entre dos individuos expuestos a factores distintos y para ello, el modelo parte de una hipótesis fundamental; que los riesgos son proporcionales. La idea de su aplicación a los sistemas reparables mediante modelos PH transformados en intensidad proporcional PI fue presentada por Kumar (1995).  
 Estos modelos requieren de la identificación de una o varias variables que influyen en los TBF de los elementos reparables. Los modelos PH y PI más destacados son:
  - Modelo Cox-Lewis, PH log-lineal (1978).
  - Modelo PWP-GT - Prentice-Williams-Peterson-Gap Time (1981).
  - Modelo PWP-TT - Prentice-Williams-Peterson-Total Time (1981).

- Modelo AG - Andersen–Gill (1982).
- Modelo WLW - Wei–Lin–Weissfeld (1989).
- Modelos de fragilidad para datos correlacionados: Estos modelos han iniciado su aplicación para el análisis de supervivencia multivariante (medicina, economía, etc.), debido principalmente a la falta de independencia entre los tiempos de supervivencia. Su aplicación inicial en el campo de la fiabilidad se restringe a elementos no reparables, si bien se están iniciando el desarrollo de modelos con posibilidades de empleo en elementos reparables, ver Peña y Hollander (2004).
- Modelos de predicción basados en el análisis de series de tiempo: Se trata básicamente de un enfoque orientado a los datos, que no requiere la especificación del modelo a priori. Esta técnica de series de tiempo tiene la flexibilidad de ajuste de un modelo empírico apropiado, que es una adaptación de la estructura de los datos en sí. Por lo tanto, la naturaleza estocástica de la serie de tiempo se puede modelar con mayor precisión, si bien es necesario emplear herramientas de auto-correlación, correlación parcial y análisis espectral para examinar las propiedades subyacentes de los datos, tales como la existencia de no estacionalidad, tendencia, etc. Los modelos más empleados han sido consolidados en diferentes estudios aplicados, ver Liang (2011):
  - Modelo de suavización exponencial (ES, Exponential Smoothing).
  - Modelo de la media móvil (MA, Moving Average).
  - Modelo autorregresivo integrado de promedio móvil, Box-Jenkins ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average Process) – Box y otros (1994).
  - Modelo Box-Jenkins SARIMA (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average Process) – Box y otros (1994).
- Otros modelos: Se destacan otros modelos para el modelado de la fiabilidad de elementos reparables:
  - Modelos de ecuaciones diferenciales: Lloyd-Lipow (fase de diseño), Aroef, IBM, etc. La mayoría se desarrollaron en los años 60.
  - Procesos de desgaste y daño acumulado: Modelo Kijima y Nakagawa (1991), modelo Christer and Wong (1995), etc. Son modelos más adecuados para componentes mecánicos.
  - Modelo Monte Carlo: Kaminskiy y Krivtsov (1998).
  - No paramétricos: Nelson (2003), Block y otros (2013) para MCF, ver compendio en Gámiz y otros (2011).
  - Modelos de predicción basados en redes neuronales: Tong y Liang (2005), Liang (2008).
  - Modelos con dependencia multivariantes: Ma y Krings (2008), Yang y otros (2013).

El desarrollo intensivo durante décadas de modelos estadísticos para la fiabilidad de elementos reparables denota la gran complejidad del tratamiento y modelado de los datos reales que se obtienen en los sistemas en operación. Mayoritariamente estos modelos se basan en procesos estocásticos, pero no todos.

La dificultad reside en elegir el modelo más apropiado para los datos de los elementos reparables objeto de estudio, y si bien la comunidad científica ha llegado a algunos puntos de encuentro en relación a la aplicabilidad de los modelos HPP, NHPP y RP, a la fecha no existe consenso respecto a qué modelos imperfectos (u otros) son los más adecuados para intentar modelar aquellos elementos reparables que no son de aplicación los modelos HPP, NHPP o RP.

### 2.7.9. Procedimiento para la selección del método estadístico

El procedimiento metodológico más extendido para la selección de modelo de fiabilidad de elementos reparables, se basa en la aplicación de los procesos puntuales estocásticos aplicados a los tiempos entre fallos TBF con la siguiente prelación:

1. Efectuar una prueba de tendencia sobre los TBF (ver 2.7.5).
2. Si los datos no muestran tendencia:
  - 2.1. Realizar pruebas de independencia sobre los TBF:
    - 2.1.1. Si no se demuestra dependencia, los TBF pueden considerarse como i.i.d. y son de aplicación:
      - 2.1.1.1. Modelo HPP si los TBF se distribuyen exponencialmente (ver 2.7.5).
      - 2.1.1.2. Modelos RP si los TBF se ajustan a alguna distribución estadística (ver 2.7.7).
      - 2.1.1.3. Modelos imperfectos y otros, si los TBF no se ajustan a ninguna distribución (ver 2.7.8).
    - 2.1.2. Si se demuestra dependencia son de aplicación los Modelos imperfectos y otros (ver 2.7.8).
3. Si los datos muestran tendencia son de aplicación los Modelos NHPP (ver 2.7.6):
  - 3.1. Si se rechaza el ajuste del modelo HNPP con la prueba de bondad de ajuste, son de aplicación Modelos imperfectos y otros (ver 2.7.8).

En la Figura adjunta se representa el flujograma del procedimiento básico de selección del modelo de fiabilidad más apropiado a cada elemento reparable mediante el análisis de los datos de los TBF.

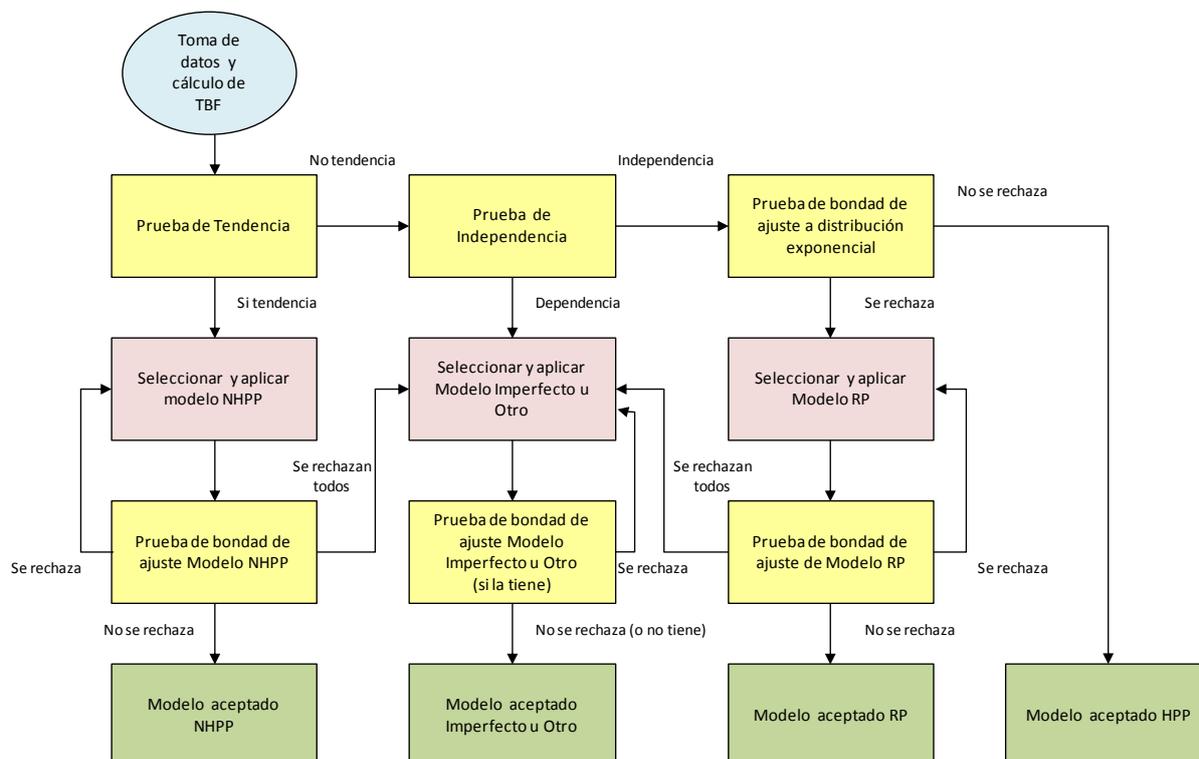


Figura 23 – Procedimiento básico para la selección del método estadístico en elementos reparables.

Una vez profundizado en el conocimiento de los métodos para el modelado de la fiabilidad, y en particular en los métodos estadísticos para la fiabilidad de elementos reparables (objeto de este estudio), y dada la cantidad y diversidad de propuestas publicadas, se estima conveniente analizar la normativa europea existente en esta materia, al objeto de objetivar y seleccionar los procedimientos y métodos que actualmente cuentan con el respaldo de los organismos internacionales de normalización, y en particular los del espacio europeo de aplicación al Estado español.

### 3. NORMATIVA EUROPEA DE FIABILIDAD

---

*El europeo no puede vivir a no ser que se embarque en una empresa unificadora.*

*- José Ortega y Gasset-*

La Comisión Electrotécnica Internacional (CEI o IEC por sus siglas en inglés, International Electrotechnical Commission) es una organización de normalización en los campos eléctrico, electrónico y tecnologías relacionadas. Integrada por los organismos nacionales de normalización, en las áreas indicadas de los países miembros, a la IEC pertenecen más de 60 países, incluyendo los de la Unión Europea, Japón y EE.UU. España está representada por AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación) y numerosas normas se desarrollan y trasladan a las normas españolas UNE (Una Norma Española), UNE-EN (Una Norma Española - European Norm) y CEI.

La Comisión Electrotécnica Internacional cuenta con un Comité Técnico, el TC56 cuya denominación actual es "Dependability". El propósito del TC 56 es preparar normas internacionales en materia de fiabilidad, de aplicación en todas las áreas tecnológicas. La fiabilidad puede ser expresada en términos de los atributos esenciales de apoyo como la disponibilidad, mantenibilidad, etc. Las normas proporcionan sistemática de métodos y herramientas para la evaluación de la fiabilidad y la gestión de equipos, servicios y sistemas a lo largo de sus ciclos de vida. A Mayo de 2016 el TC56 cuenta con 54 normas en vigor en esta materia.

En España AENOR ha traducido una parte importante de las normas editadas por el CEI, por medio de su Comité Técnico AEN/CTN 200/SC56 "Confiabilidad". Las normas trasladadas a Mayo de 2016 son un total de 49. Cabe destacar, asimismo, la escasa repercusión, análisis y aplicación de la normativa citada en la bibliografía de fiabilidad existente en castellano, que en muchos casos es ignorada y en otros su indicación es meramente testimonial.

A la hora de efectuar un ensayo o análisis de la fiabilidad de "Sistemas No Reparables" o de "Sistemas Reparables" se debe intentar aplicar las normas internacionales en vigor en esta materia, al objeto de dotar a los estudios del máximo rigor en los métodos, métricas y formulaciones matemáticas empleadas, y con criterios de aceptación y/o rechazo de las hipótesis efectuadas que cuentan con el respaldo de la comunidad científica internacional.

### 3.1. Referencias cruzadas de normas de fiabilidad EIC y AENOR

Como ya se ha indicado la traslación de las normas europeas EIC en el Estado español es efectuado por AENOR, y a la fecha no todas las normas europeas de fiabilidad han sido trasladadas y otras han sido trasladadas sin traducción. A continuación se enumeran y se relacionan las normas EIC con las normas AENOR:

- I. IEC/ISO 31010:2009: Risk management - Risk assessment techniques (Edition 1.0).  
UNE-EN 31010:2011: Gestión del riesgo. Técnicas de apreciación del riesgo.
  
- II. IEC 60300-1:2014: Dependability management - Part 1: Guidance for management and application (Edition 3.0).  
UNE-EN 60300-1:2015: Gestión de la confiabilidad. Parte 1: Directrices para su gestión y aplicación.
  
- III. IEC 60300-3-1:2003: Dependability management - Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability - Guide on methodology (Edition 2.0).  
UNE-EN 60300-3-1:2005: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-1: Guía de aplicación. Técnicas de análisis de la confiabilidad. Guía metodológica.
  
- IV. IEC 60300-3-2:2004: Dependability management - Part 3-2: Application guide - Collection of dependability data from the field (Edition 2.0).  
UNE-EN 60300-3-2:2008: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-2: Guía de aplicación. Recogida de datos de confiabilidad en la explotación.
  
- V. IEC 60300-3-3:2004: Dependability management - Part 3-3: Application guide - Life cycle costing (Edition 2.0).  
UNE-EN 60300-3-3:2009: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-3: Guía de aplicación. Cálculo del coste del ciclo de vida.
  
- VI. IEC 60300-3-4:2007: Dependability management - Part 3-4: Application guide - Guide to the specification of dependability requirements (Edition 2.0).  
UNE-EN 60300-3-4:2011: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-4: Guía de aplicación. Guía para la especificación de los requisitos de confiabilidad.

- 
- VII. IEC 60300-3-5:2001: Dependability management - Part 3-5: Application guide - Reliability test conditions and statistical test principles (Edition 1.0).  
UNE 200001-3-5:2002: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-5: Guía de aplicación. Condiciones para los ensayos de fiabilidad y principios para la realización de contrastes estadísticos.
- VIII. IEC 60300-3-10:2001 : Dependability management - Part 3-10: Application guide - Maintainability (Edition 1.0 ).  
UNE-IEC 60300-3-10:2007: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-10: Guía de aplicación. Mantenibilidad (IEC 60300-3-10:2001).
- IX. IEC 60300-3-11:2009 : Dependability management - Part 3-11: Application guide - Reliability centred maintenance (Edition 2.0).  
UNE-EN 60300-3-11:2013: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-11: Guía de aplicación. Mantenimiento centrado en la fiabilidad.
- X. IEC 60300-3-12:2011: Dependability management - Part 3-12: Application guide - Integrated logistic support (Edition 2.0).  
UNE-EN 60300-3-12:2014: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-12: Guía de aplicación. Soporte logístico integrado.
- XI. IEC 60300-3-14:2004 : Dependability management - Part 3-14: Application guide - Maintenance and maintenance support (Edition 1.0).  
UNE-EN 60300-3-14:2007: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-14: Guía de aplicación. Mantenimiento y logística de mantenimiento (IEC 60300-3-14:2004).
- XII. IEC 60300-3-15:2009: Dependability management - Part 3-15: Application guide - Engineering of system dependability (Edition 1.0).  
UNE-EN 60300-3-15:2013: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-15: Guía de aplicación. Ingeniería de la confiabilidad de sistemas.

- XIII. IEC 60300-3-16:2008: Dependability management - Part 3-16: Application guide - Guidelines for specification of maintenance support services (Edition 1.0).  
UNE-EN 60300-3-16:2012: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-16: Guía de aplicación. Directrices para la especificación de los servicios de logística de mantenimiento.
- XIV. IEC 60319:1999: Presentation and specification of reliability data for electronic components (Edition 3.0).  
UNE 20512-6:2001: Presentación y especificación de datos de fiabilidad de componentes electrónicos.
- XV. IEC 60605-2:1994: Equipment reliability testing - Part 2: Design of test cycles (Edition 1.0).  
UNE 20608-2:1999: Pruebas de fiabilidad de equipos. Parte 2: Diseño de los ciclos de prueba.
- XVI. IEC 60605-4:2001: Equipment reliability testing - Part 4: Statistical procedures for exponential distribution - Point estimates, confidence intervals, prediction intervals and tolerance intervals (Edition 2.0).  
NO HAY NORMA AENOR
- XVII. IEC 60605-6:2007: Equipment reliability testing - Part 6: Tests for the validity and estimation of the constant failure rate and constant failure intensity (Edition 3.0).  
NO HAY NORMA AENOR
- XVIII. IEC 60706-2:2006: Maintainability of equipment - Part 2: Maintainability requirements and studies during the design and development phase (Edition 2.0).  
UNE-EN 60706-2:2009: Mantenibilidad de equipos. Parte 2: Requisitos y estudios de mantenibilidad durante la fase de diseño y desarrollo.
- XIX. IEC 60706-3:2006: Maintainability of equipment - Part 3: Verification and collection, analysis and presentation of data (Edition 2.0).  
UNE-EN 60706-3:2009: Mantenibilidad de equipos. Parte 3: Verificación y recogida, análisis y presentación de datos.

- 
- XX. IEC 60706-5:2007: Maintainability of equipment - Part 5: Testability and diagnostic testing (Edition 2.0).  
UNE-EN 60706-5:2011: Mantenibilidad de equipos. Parte 5: Facilidad de ensayo y ensayos de diagnóstico.
- XXI. IEC 60812:2006: Analysis techniques for system reliability - Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA) (Edition 2.0).  
UNE-EN 60812:2008: Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas. Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE).
- XXII. IEC 61014:2003: Programmes for reliability growth (Edition 2.0).  
UNE-EN 61014:2004: Programas de crecimiento de fiabilidad.
- XXIII. IEC 61025:2006: Fault tree analysis (FTA) (Edition 2.0)  
UNE-EN 61025:2011: Análisis por árbol de fallos (AAF).
- XXIV. IEC 61070:1991: Compliance test procedures for steady-state availability (Edition 1.0).  
UNE 20970:1999: Procedimientos de ensayo de conformidad con la disponibilidad en régimen permanente.
- XXV. IEC 61078:2006: Analysis techniques for dependability - Reliability block diagram and boolean methods (Edition 2.0).  
UNE-EN 61078:2006 : Técnicas de análisis de la confiabilidad. Método del diagrama de bloques de la fiabilidad y métodos booleanos (IEC 61078:2006).
- XXVI. IEC 61123:1991: Reliability testing - Compliance test plans for success ratio (Edition 1.0).  
UNE 20932:1996: Ensayos de fiabilidad. Planes de ensayo de conformidad con una proporción de éxitos.
- XXVII. IEC 61124:2012: Reliability testing - Compliance tests for constant failure rate and constant failure intensity (Edition 3.0).  
UNE-EN 61124:2014: Ensayos de fiabilidad. Planes de ensayos de conformidad para tasa de fallo constante y para intensidad de fallo constante.

- XXVIII. IEC 61160:2005: Design review (Edition 2.0).  
UNE-EN 61160:2007 : Revisión de diseño (IEC 61160:2005).
- XXIX. IEC 61163-1:2006: Reliability stress screening - Part 1: Repairable assemblies manufactured in lots (Edition 2.0).  
UNE-EN 61163-1:2010: Cribado de elementos mediante esfuerzos. Parte 1: Elementos reparables fabricados en lotes.
- XXX. IEC 61163-2:1998: Reliability stress screening - Part 2: Electronic components (Edition 1.0).  
CEI 61163-2:1998: Selección mediante pruebas de vida bajo condiciones de esfuerzo. Parte 2: Componentes electrónicos.
- XXXI. IEC 61164:2004: Reliability growth - Statistical test and estimation methods (Edition 2.0).  
UNE-EN 61164:2005: Crecimiento de la fiabilidad. Ensayos estadísticos y métodos de estimación.
- XXXII. IEC 61165:2006: Application of Markov techniques (Edition 2.0).  
EN 61165:2006: Application of Markov techniques (IEC 61165:2006).
- XXXIII. IEC 61649:2008: Weibull analysis ( Edition 2.0).  
UNE-EN 61649:2012: Análisis de Weibull.
- XXXIV. IEC 61650:1997: Reliability data analysis techniques - Procedures for comparison of two constant failure rates and two constant failure (event) intensities (Edition 1.0).  
NO HAY NORMA AENOR
- XXXV. IEC 61703:2001: Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms (Edition 1.0).  
UNE-EN 61703:2003: Expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y de logística de mantenimiento.

- XXXVI. IEC 61709:2011: Electric components - Reliability - Reference conditions for failure rates and stress models for conversion (Edition 2.0).  
UNE-EN 61709:2014 : Componentes electrónicos. Fiabilidad. Condiciones de referencia para tasas de fallo y modelos de conversión en función de los esfuerzos.
- XXXVII. IEC 61710:2013: Power law model - Goodness-of-fit tests and estimation methods (Edition 2.0).  
UNE-EN 61710:2014: Modelo de ley de potencia. Ensayos de bondad de ajuste y métodos de estimación.
- XXXVIII. IEC 61882:2001: Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide (Edition 1.0).  
NO HAY NORMA AENOR
- XXXIX. IEC 61907:2009: Communication network dependability engineering (Edition 1.0).  
UNE-EN 61907:2013: Ingeniería de confiabilidad de las redes de comunicación.
- XL. IEC 62198:2013: Managing risk in projects - Application guidelines (Edition 2.0).  
UNE-EN 62198:2015 Gestión de riesgos del proyecto. Directrices de aplicación.
- XLI. IEC 62308:2006: Equipment reliability - Reliability assessment methods (Edition 1.0).  
UNE-EN 62308:2010: Fiabilidad de los equipos. Métodos de evaluación de la fiabilidad.
- XLII. IEC 62309:2004: Dependability of products containing reused parts - Requirements for functionality and tests (Edition 1.0).  
UNE-EN 62309:2005: Confiabilidad de productos que contienen componentes reutilizados. Requisitos para funcionabilidad y ensayos.

- XLIII. IEC 62347:2006: Guidance on system dependability specifications (Edition 1.0).  
UNE-EN 62347:2010: Directrices para especificaciones de confiabilidad de sistemas.
- XLIV. IEC TR 62380:2004: Reliability data handbook - Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment (Edition 1.0)  
NO HAY NORMA AENOR
- XLV. IEC 62402:2007: Obsolescence management - Application guide (Edition 1.0).  
UNE-EN 62402:2011: Gestión de la obsolescencia. Guía de aplicación.
- XLVI. IEC 62429:2007: Reliability growth - Stress testing for early failures in unique complex systems (Edition 1.0).  
UNE-EN 62429:2012: Crecimiento de la fiabilidad. Ensayos de esfuerzo para revelar fallos infantiles en sistemas complejos únicos.
- XLVII. IEC 62502:2010: Analysis techniques for dependability - Event tree analysis (ETA) (Edition 1.0).  
EN 62502:2010: Analysis techniques for dependability - Event tree analysis (ETA).
- XLVIII. IEC 62506:2013: Methods for product accelerated testing (Edition 1.0).  
EN 62506:2013: Methods for product accelerated testing.
- XLIX. IEC 62508:2010: Guidance on human aspects of dependability (Edition 1.0).  
EN 62508:2010: Guidance on human aspects of dependability.
- L. IEC 62551:2012: Analysis techniques for dependability - Petri net techniques (Edition 1.0).  
UNE-EN 62551:2014 Técnicas de análisis de la confiabilidad. Técnicas de redes de Petri.

- 
- LI. IEC 62628:2012: Guidance on software aspects of dependability (Edition 1.0).  
UNE-EN 62628:2015: Guía sobre la confiabilidad del software.
  
  - LII. IEC 62673:2013: Methodology for communication network dependability assessment and assurance (Edition 1.0).  
EN 62673:2013: Methodology for communication network dependability assessment and assurance.
  
  - LIII. IEC 62740:2015: Root cause analysis (RCA) (Edition 1.0).  
UNE-EN 62740:2015: Análisis de causa raíz (RCA).
  
  - LIV. IEC 62741:2015: Demonstration of dependability requirements - The dependability case (Edition 1.0).  
UNE-EN 62741:2015: Demostración de los requisitos de confiabilidad. El caso de confiabilidad.

La norma IEC 60300-3-9 :1995: Dependability management - Part 3: Application guide - Section 9: Risk analysis of technological systems (Edition 1.0) ha sido recientemente anulada por el IEC. Sin embargo AENOR aún no lo ha realizado estando en vigor su trasposición CEI 60300-3-9:1995: Gestión de la confiabilidad. Parte 3: Guía de aplicación. Sección 9: Análisis del riesgo de sistemas tecnológicos.

Antes de iniciar los ensayos de esta investigación se han analizado todas las normas, revisando en primera instancia la versión de norma AENOR en vigor traducida del IEC, y en caso de que no estuviese disponible en castellano se han empleado las normas IEC en su versión en inglés.

En primer lugar se deben de descartar para esta investigación todas aquellas normas orientadas a predecir la fiabilidad de un diseño o medir la fiabilidad mediante ensayos controlados, ya que en este caso se disponen de los datos reales de operación durante gran parte de su vida útil y la investigación está orientada a obtener modelos matemáticos que representen adecuadamente la evolución de la fiabilidad real de los sistemas objeto del estudio.

Del resultado del análisis y estudio de las normas aplicables a esta investigación, cobran especial relevancia las siguientes:

- i. IEC 60300-3-1:2003: Dependability management - Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability - Guide on methodology (Edition 2.0).  
UNE-EN 60300-3-1:2005: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-1: Guía de aplicación. Técnicas de análisis de la confiabilidad. Guía metodológica.

- ii. IEC 61703:2001: Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms (Edition 1.0).  
UNE-EN 61703:2003: Expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y de logística de mantenimiento.
  
- iii. IEC 60300-3-2:2004: Dependability management - Part 3-2: Application guide - Collection of dependability data from the field (Edition 2.0).  
UNE-EN 60300-3-2:2008: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-2: Guía de aplicación. Recogida de datos de confiabilidad en la explotación.
  
- iv. IEC 60300-3-5:2001: Dependability management - Part 3-5: Application guide - Reliability test conditions and statistical test principles (Edition 1.0).  
UNE 200001-3-5:2002: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-5: Guía de aplicación. Condiciones para los ensayos de fiabilidad y principios para la realización de contrastes estadísticos.
  
- v. IEC 60605-6:2007: Equipment reliability testing - Part 6: Tests for the validity and estimation of the constant failure rate and constant failure intensity (Edition 3.0).  
NO HAY NORMA AENOR
  
- vi. IEC 60605-4:2001: Equipment reliability testing - Part 4: Statistical procedures for exponential distribution - Point estimates, confidence intervals, prediction intervals and tolerance intervals (Edition 2.0).  
NO HAY NORMA AENOR
  
- vii. IEC 61710:2013: Power law model - Goodness-of-fit tests and estimation methods (Edition 2.0).  
UNE-EN 61710:2014: Modelo de ley de potencia. Ensayos de bondad de ajuste y métodos de estimación.

Estas siete normas, como se detalla en los apartados posteriores, son las de aplicación a los sistemas reparables objeto de los ensayos en este estudio. Se ha decidido que durante el desarrollo de los siguientes apartados de la tesis se realizará siempre mención a la norma europea IEC, en lugar de su equivalente AENOR por dos motivos fundamentales:

- Facilitar su lectura y comprensión a futuros lectores ajenos al Estado español del documento, al referenciarse la norma IEC en idioma inglés.

- Hay dos normas fundamentales que no cuentan con transposición por AENOR, por lo que obligatoriamente en estos dos casos hay que referenciar las normas IEC. Al objeto de homogeneizar la presentación de las normas se referencian las emitidas por IEC.

–

### 3.2. Aplicación de la Norma IEC 60300-3-1

La norma IEC 60300-3-1:2003, Dependability management - Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability - Guide on methodology (Edition 2.0) ha sido trasladada por AENOR mediante la norma UNE-EN 60300-3-1:2005: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-1: Guía de aplicación. Técnicas de análisis de la confiabilidad. Guía metodológica.

Las técnicas de análisis se describen en esta parte del conjunto de normas IEC 60300 y se utilizan para la predicción, revisión y mejora de la fiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad de un elemento.

Estos análisis se realizan durante las fases de concepción y definición, de diseño y desarrollo y de operación y mantenimiento, a diferentes niveles del sistema y con diferentes grados de detalle, con el fin de evaluar, determinar y mejorar las características de confiabilidad de un elemento. También se pueden emplear para comparar los resultados del análisis con los requisitos especificados.

Los métodos recogidos en esta norma se clasifican en dos categorías principales:

- Métodos que se utilizan principalmente para análisis de la confiabilidad;
- Métodos generales de ingeniería que apoyan los análisis de la confiabilidad o añaden valor al proceso de diseño en función de la confiabilidad.

El ámbito de utilización de los métodos de análisis de la confiabilidad dentro de las tareas generales de análisis de la confiabilidad consideradas en el procedimiento general de análisis se recoge en la tabla adjunta de la página siguiente.

Los métodos se explican brevemente en el anexo A de la norma IEC 60300-3-1 y se referencia la norma IEC que desarrolla cada método, en el caso de que exista.

La selección de métodos a implantar en un programa de confiabilidad es un proceso muy individualizado, tanto que no es posible realizar una sugerencia genérica para la selección de uno o más de los métodos específicos. La elección del método apropiado debería hacerse con el esfuerzo conjunto de expertos en confiabilidad y en el campo de la ingeniería de sistemas. La selección se debería realizar al principio del desarrollo del programa y debería revisarse su aplicabilidad.

Método	Adecuado para sistemas complejos	Adecuado para diseños de sistemas novedosos	Análisis cuantitativo	Adecuado para combinación de fallos	Adecuado para tratar dependencia de secuencias	Puede usarse para sucesos dependientes	Abajo – arriba y arriba – abajo	Adecuado para asignación de la confiabilidad	Dominio requerido (de bajo a alto)	Aceptación y uso común	Necesidad de apoyo de herramientas	Comprobaciones de credibilidad	Disponibilidad de herramientas	Norma IEC
Predicción de la tasa de fallo	No	Si	Si	No	No	No	2	Si	Bajo	Alto	Med	Si	Alto	61709
Análisis por árbol de fallos (AAF)	Si	Si	Si	Si	No	No	1	Si	Med	Alto	Med	Si	Alto	61025
Análisis por árbol de sucesos (AAS)	NR	NR	Si	NR	Si	Si	2	NR	Alto	Med	Med	Si	Med	
Análisis por diagramas de bloques de fiabilidad (DBF)	NR	NR	Si	Si	No	No	1	Si	Bajo	Med	Med	Si	Med	61078
Análisis de Markov	Si	Si	Si	Si	Si	Si	1	Si	Alto	Med	Alto	No	Med	61165
Análisis por red de Petri	Si	Si	Si	Si	Si	Si	1	Si	Alto	Bajo	Alto	No	Bajo	
Análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE)	NR	NR	Si	No	No	No	2	NR	Bajo	Alto	Bajo	Si	Alto	60812
Estudios HAZOP	Si	Si	No	No	No	No	2	No	Bajo	Med	Bajo	Si	Med	61882
Análisis de fiabilidad humana	Si	Si	Si	Si	Si	Si	2	No	Alto	Alto	Med	Si	Med	
Análisis de esfuerzo-resistencia	NA	NA	Si	NA	NA	No	NA	No	Alto	Med	Alto	Si	Med	
Tabla de verdad	No	Si	Si	Si	No	No	NA	Si	Alto	Med	Alto	No	Bajo	
Métodos estadísticos de fiabilidad	Si	Si	Si	Si	Si	Si	NA	NR	Alto	Med	Alto	Med	Bajo	60300-3-5
NR	Se puede emplear para sistemas simples, no se recomienda como método único, para utilizarse conjuntamente con otros métodos.													
1	Arriba – abajo.													
2	Abajo – arriba.													
Med	Medio.													
NA	El criterio no es aplicable con respecto a este método.													

Tabla 6 – Guía para la selección del método de análisis de la fiabilidad IEC 60300-3-1

Esta norma incluye una guía para la selección del método de análisis apropiado, que aplicada a esta investigación de sistemas de tracción eléctrica ferroviaria y escaleras mecánicas, se obtiene;

a. La complejidad del sistema:

Se trata de sistemas complejos, con gran número de subsistemas, equipos y componentes.

- 
- b. Novedad del sistema:

Se trata de sistemas consolidados técnicamente, sin gran novedad técnica.
  - c. Análisis cuantitativo vs análisis cualitativo:

Se pretende efectuar un análisis cuantitativo.
  - d. Fallo único frente a fallos múltiples:

No son relevantes los efectos del fallo múltiple.
  - e. Comportamiento dependiente de tiempo o de una secuencia:

No es relevante la secuencia de fallos, su orden y de potencial relación concatenada.
  - f. Uso en sucesos dependientes:

Los sucesos no son dependientes del estado del sistema.
  - g. Análisis abajo – arriba o arriba-abajo:

No se pretende efectuar un análisis de arriba-abajo o de abajo-arriba, se trata de estimar la fiabilidad del sistema en su conjunto.
  - h. Adecuado para asignación de la confiabilidad:

No se requiere asignar unos requisitos de fiabilidad previos o de diseño, se trata de estimar la fiabilidad de los sistemas a partir de los datos de operación
  - i. Dominio requerido:

Se requiere un alto dominio de conocimiento de los sistemas y de los métodos a emplear.
  - j. Aceptación y uso común:

Se prefiere un método aceptado por la comunidad científica.
  - k. Necesidad de apoyo de herramientas:

Se disponen de herramientas de apoyo en caso necesario.
  - l. Comprobaciones de credibilidad:

Se prefiere un método que incluya comprobaciones de credibilidad.
  - m. Disponibilidad de herramientas:

Se prefiere un método que disponga de herramientas de apoyo.
  - n. Normalización:

Se prefiere un método Normalizado para garantizar la validez de los resultados obtenidos.

Los únicos métodos que cuentan con norma IEC, para sistemas complejos y análisis cuantitativo son: Análisis por Árbol de Fallos, Análisis de Markov y Métodos Estadísticos de Fiabilidad.

El Análisis por Árbol de Fallos tiene una doble aplicación básica; identificar la causa de un fallo conocido y/o analizar los modos de fallo y su modelización, empleando intensidades de fallo constantes, extremo que no se conoce a priori en esta investigación. Por lo tanto, no es la norma apropiada para esta investigación, ya que lo que se investiga justamente es si las intensidades de fallo de los sistemas son realmente constantes o tiene una dependencia temporal o de uso.

El Análisis de Markov es un método probabilístico que permite adaptar la dependencia estadística de las características de fallo o reparación de los componentes individuales del sistema, empleando intensidades de fallo constantes, extremo que no se conoce a priori en esta investigación. Por lo tanto, no es la norma apropiada para esta investigación, como ya se ha indicado anteriormente.

Los Métodos Estadísticos de Fiabilidad se emplean para cuantificar la fiabilidad de un Componente o Sistema, y en particular para el seguimiento de sistemas en operación para determinar la evolución y tendencia de la intensidad de fallo. Son por tanto, los Métodos Estadísticos de Fiabilidad los apropiados para efectuar la investigación propuesta.

### 3.3. Aplicación de la Norma IEC 61703

La norma IEC 61703:2001, Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms (Edition 1.0), ha sido trasladada por AENOR mediante la norma UNE-EN 61703:2003: Expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y de logística de mantenimiento.

Esta norma recoge las expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y de logística de mantenimiento. En esta norma se proporcionan las definiciones relacionadas con la fiabilidad, así como las expresiones matemáticas que se deben emplear en los cálculos de las variables principales. En esta norma se consideran separadamente las siguientes clases de elementos:

- elementos no reparables;
- elementos reparables con tiempo hasta la restauración nulo;
- elementos reparables con tiempo hasta la restauración no nulo.

Para elementos no reparables, elementos reparables con tiempo hasta la restauración nulo y elementos reparables con tiempo hasta la restauración no nulo, se desarrollan y formulan las expresiones matemáticas de:

- a. Fiabilidad;  $R(t)$
- b. Tasa instantánea de fallo;  $\lambda(t)$  (elementos no reparables)
- c. Intensidad instantánea de fallo;  $z(t)$  (elementos reparables)
- d. Tasa media de fallo;  $\bar{\lambda}(t_1, t_2)$  (elementos no reparables)

- e. Intensidad media de fallo;  $\bar{z}(t_1, t_2)$  (elementos reparables)
- f. Tiempo medio hasta el fallo: MTTF
- g. Tiempo medio de disponibilidad: MUT (elementos reparables)
- h. Tiempo medio de funcionamiento entre fallos: MTBF (elementos reparables)

Asimismo, y para los elementos reparables con tiempo hasta la restauración no nulo, se incluyen las expresiones matemáticas para el cálculo de disponibilidades e indisponibilidades instantánea, media y asintótica. También la mantenibilidad, tasa media de reparación, tiempo medio de reparación, etc.

Los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria y escaleras mecánicas se tratan de elementos reparables, dado que casi la totalidad de sus bloques constructivos y componentes de un alto valor económico unitario, son desmontados del tren o de la escalera mecánica en caso de avería, reparados y vueltos a ser utilizados.

La fiabilidad en el sector del ferrocarril de los equipamientos embarcados en un tren se relaciona, no con las horas (h) de funcionamiento de los sistemas, sino con los kilómetros (km) recorridos por el tren, ya que esta es la variable principal de desgaste y utilización y envejecimiento de los sistemas embarcados.

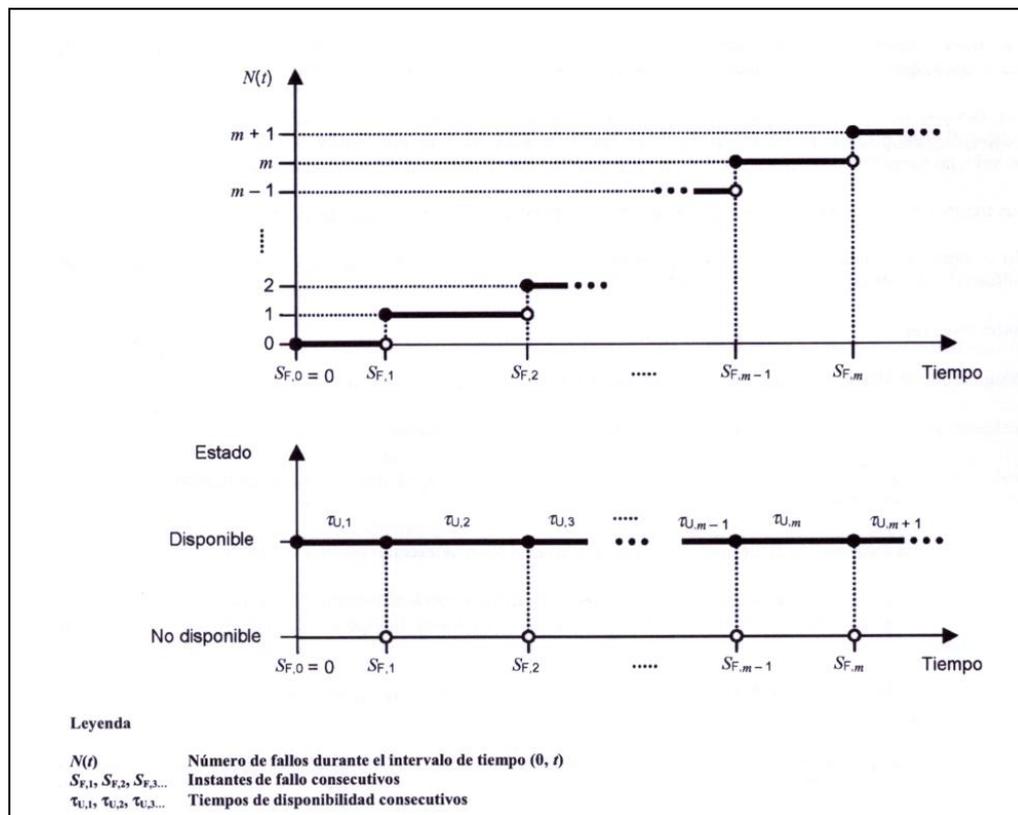
Nótese, por ejemplo, que un tren estacionado 36 horas en un andén en estado de reposo no somete a un gran desgaste al sistema de tracción, ya que casi la totalidad de los componentes de los equipos se encuentran desconectados o en un régimen de trabajo "stand-by". Por lo tanto, la investigación se centrará en determinar la fiabilidad de los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria en función de los kilómetros recorridos y su intensidad de fallo  $z(km)$ , mientras que en las escaleras mecánicas se empleará la variable tiempo  $z(t)$ .

Hay que determinar si el tiempo de restauración del sistema es nulo o no, al objeto de aplicar correctamente las expresiones matemáticas relacionadas con la fiabilidad recogidas en la norma.

Un tren con una avería en el sistema de tracción queda inmovilizado en muchos casos y no recorre kilómetro alguno con el sistema operativo, por lo que debe ser remolcado. En los casos en los que puede funcionar en modo degradado es retirado inmediatamente de la circulación, recorriendo en el caso de trenes los de Metro de Madrid un máximo de 20 km hasta el taller más cercano.

Estos valores son despreciables frente a los más de 40.000 km medios entre fallos de los sistemas, por lo que se debe clasificar a los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria como elementos reparables con kilómetros ("tiempo") hasta la restauración nulo.

En el caso de las escaleras mecánicas un fallo conlleva la paralización de la escalera mecánica de forma inmediata por motivos de seguridad operacional. El tiempo medio de parada es de 2,5 horas en las escaleras mecánicas objeto del estudio, que comparadas con las más de 316 horas de tiempo medio entre fallos puede considerarse como despreciable y clasificar a las escaleras mecánicas como elementos reparables con tiempo hasta la restauración nulo.



[UNE-EN 61703:2003]

Figura 24 – Ejemplo de un sistema con tiempo hasta la restauración nulo

Las expresiones matemáticas adecuadas para elementos reparables con tiempos hasta la restauración nulo vienen desarrolladas en el apartado de la norma 6.2, siendo el aspecto más reseñable, que se debe emplear la intensidad instantánea de fallo  $z(t)$  como magnitud adecuada de representación y cálculo de la fiabilidad, en lugar de la tasa de fallo  $\lambda(t)$  magnitud reservada sólo para elementos no reparables.

### 3.4. Aplicación de la norma IEC 60300-3-2

La norma IEC 60300-3-2:2004, Dependability management - Part 3-2: Application guide - Collection of dependability data from the field (Edition 2.0) se ha trasladado por AENOR mediante la norma UNE-EN 60300-3-2:2008: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-2: Guía de aplicación. Recogida de datos de confiabilidad en la explotación.

Bajo las recomendaciones de esta norma se realiza en la investigación el tratamiento de los datos disponibles de la fiabilidad de los sistemas, al objeto de obtener datos lo más íntegros posibles. La base de datos de averías de trenes de 25 años (1988-2012) cuenta con unos 384.000 registros (filas) y con 72 atributos (columnas), por lo que se disponen de unos 27.648.000 datos. En el caso de las escaleras mecánicas se parte de una base de datos de más de 10 años (2005-2015) con más de 10.000 registros (filas) y con 25 atributos (columnas).

Son datos recogidos en la operación de los sistemas, y según la norma IEC 60300-3-2 se pueden clasificar con la “filosofía” del apartado 12 de la norma como:

- Recogida de datos continua; no hay periodos sin datos.
- Recogida de datos completa; existen datos de todos los ítems.
- Tipo de población finita.
- Sin muestreo; se analizan todos los trenes de cada serie.
- Datos cuantitativos.
- Datos sin censura; son datos completos sin censuras por intervalos, inicio o fin.
- Datos validados en origen; los registros de averías sólo recogen aquellas que realmente han sido clasificadas como tal por los técnicos de mantenimiento.
- Datos sin cribado; no se elimina ningún registro de avería, aunque la distribución parezca inicialmente anómala o fuera de los valores esperados del sistema.

Por lo tanto, se dispone de una inmejorable y completa base de datos de averías, ya que la investigación se realiza sobre datos cuantitativos, continuos, completos, sin censura, sin cribado y validados en origen, sobre una población finita y sin muestreo. La investigación se basa en unos datos de operación de los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria y escaleras mecánicas de excelente calidad, lo que permite adelantar que las hipótesis y resultados que se obtienen tienen un alto grado de integridad.

### 3.5. Aplicación de la norma IEC 60300-3-5

La norma IEC 60300-3-5:2001, Dependability management - Part 3-5: Application guide - Reliability test conditions and statistical test principles (Edition 1.0), se ha trasladado por AENOR como la norma UNE 200001-3-5:2002: Gestión de la confiabilidad. Parte 3-5: Guía de aplicación. Condiciones para los ensayos de fiabilidad y principios para la realización de contrastes estadísticos.

Esta norma establece los métodos y las condiciones para los ensayos de fiabilidad y principios para la realización de contrastes estadísticos. Incluye una detallada guía para la selección de los métodos estadísticos empleados para analizar los datos procedentes de ensayos de fiabilidad de elementos reparables o no reparables.

De acuerdo al apartado 4 de la norma de “Consideraciones Generales” la investigación sobre los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria y escaleras mecánicas se debe efectuar con la guía de esta norma ya que contempla que:

- Se puede aplicar a la fase del ciclo de vida de “explotación”.
- Incluye métodos para sistemas reparables.
- Se puede sustituir el término “tiempo” ( $t$ ), por otra variable de magnitud apropiada para cada sistema, en nuestro caso también la distancia ( $km$ ).

En la norma se establecen los requisitos para una correcta especificación del ensayo de fiabilidad a ejecutar, con objeto de que todas las variables que pueden afectar al ensayo queden determinadas y acotadas de forma previa a la aplicación de los métodos estadísticos de ensayo y contraste.

De acuerdo a la “Categoría de Ensayo” según el apartado 5 de la norma el objetivo de la investigación se clasifica como “Ensayo de Estimación de la Fiabilidad”, al tratarse de cuantificar la fiabilidad de los sistemas de tracción de los trenes en explotación, utilizando valores numéricos.

En el apartado 8.4 se describe la naturaleza estadística de los modos de fallo en elementos reparables como un proceso puntual estocástico. La intensidad de fallo  $z(t)$  se refiere exclusivamente a elementos reparables. Esto significa que la intensidad de fallo de un elemento único reparable se puede estimar empleando los sucesivos tiempos entre fallos. Se estima por el número de fallos por unidad de tiempo u otra variable.

En este caso, los fallos de cada elemento suceden secuencialmente y esto se conoce como un “proceso puntual estocástico”. Es importante mantener la trazabilidad de la secuencia de los tiempos entre fallos. Si los tiempos entre fallos se distribuyen exponencialmente, entonces la intensidad de fallo es constante. Por lo tanto, el tiempo entre fallos se puede modelar por una distribución exponencial. En este caso, el número de fallos por unidad de tiempo se puede modelar por un proceso de Poisson homogéneo (HPP).

En muchos casos en los que existe una tendencia en la intensidad de fallo, se puede aplicar la ley de potencia. Esto conduce a un modelo a partir del cual se puede estimar la tendencia. Si existe una tendencia (intensidad de fallo creciente o decreciente) puede ser de aplicación un proceso de Poisson no homogéneo (NHPP).

Elemento	Valor	Tasa o intensidad	Datos	Modelo	Comentario
No reparable	Tasa de fallo	Constante	Tiempo (de funcionamiento) hasta el fallo; número de fallos	Los tiempos hasta el fallo se distribuyen exponencialmente	
		No constante	Tiempo (de funcionamiento) hasta el fallo; número de fallos	Los tiempos hasta el fallo pueden seguir una distribución de Weibull	
Reparable	Intensidad de fallo	Constante	Tiempo (de funcionamiento) entre fallos; número de fallos	Proceso puntual; los tiempos entre fallos pueden distribuirse exponencialmente	El número de fallos puede seguir un proceso de Poisson homogéneo
		No constante	Tiempo (de funcionamiento) entre fallos consecutivos; número de fallos	Proceso puntual; los tiempos entre fallos pueden seguir una ley potencial	El número de fallos puede seguir un proceso de Poisson no homogéneo

Tabla 7 – Modelos apropiados para análisis de datos según IEC 60300-3-5

Los métodos normalizados existentes para la estimación de la fiabilidad se deben seleccionar según el proceso del diagrama adjunto.

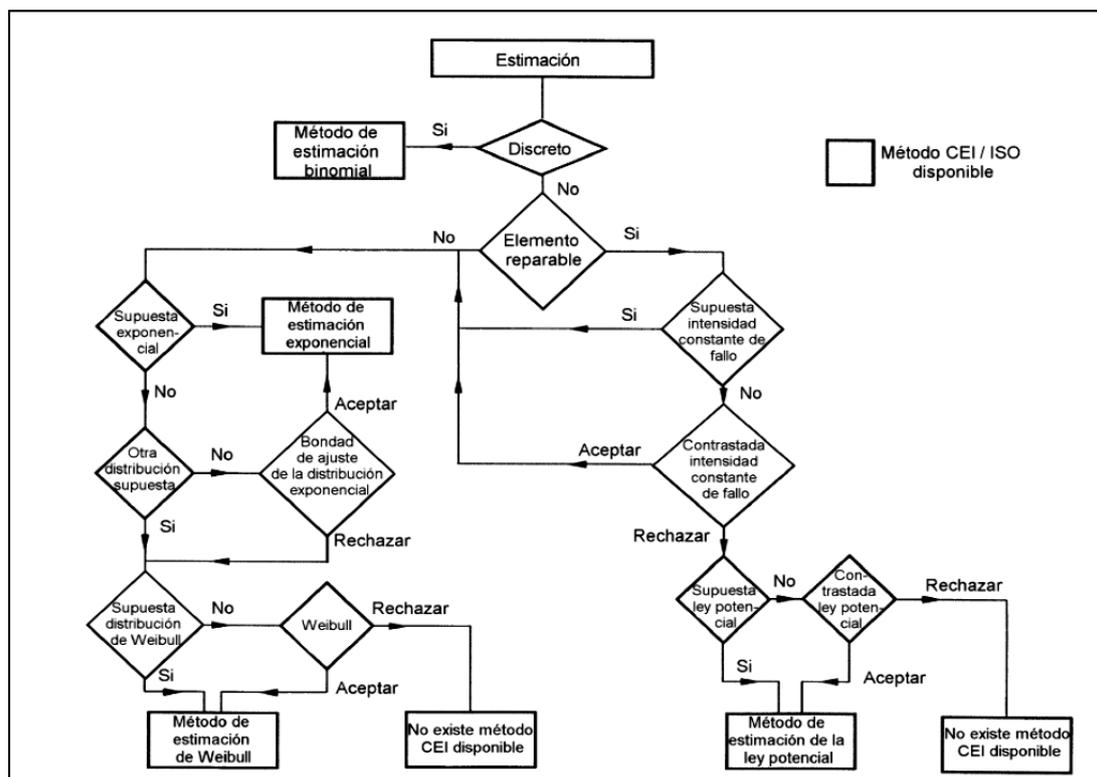


Figura 25 –Métodos disponibles para la estimación de la fiabilidad bajo IEC 60300-3-5

Se adjunta relación de normas para la estimación de la fiabilidad en elementos no reparables (no objeto de esta investigación) según norma IEC 60300-3-5:

- Contrastes de las hipótesis de tasa de fallo constante: IEC 60605-6.
- Estimación puntual e intervalos de confianza para la distribución exponencial: CEI 60605-4.
- Contraste de bondad de ajuste para la distribución de Weibull: IEC 61649.
- Estimación puntual e intervalos de confianza para la distribución de Weibull: IEC 61649.
- Estimación puntual e intervalos de confianza para la distribución binomial: ISO 11453.

Se adjunta relación de normas para la estimación de la fiabilidad en elementos reparables (de aplicación en esta investigación) según norma IEC 60300-3-5:

- Contrastes para la intensidad de fallo constante: IEC 60605-6.
- Estimación puntual e intervalos de confianza para la distribución exponencial: IEC 60605-4.
- Estimación de los parámetros y contraste estadístico del modelo de la ley de Potencia: IEC 61710.

A continuación se analizan los aspectos principales de las normas aplicables para elementos reparables.

### 3.6. Aplicación de la norma IEC 60605-6

Para la norma IEC 60605-6:2007, Equipment reliability testing - Part 6: Tests for the validity and estimation of the constant failure rate and constant failure intensity (Edition 3.0), no hay traslado realizado a la fecha por AENOR.

La norma desarrolla las pruebas para comprobar la hipótesis de tasa de fallo constante  $\lambda(t)$  para elementos no reparables y las pruebas para comprobar la hipótesis de intensidad de fallo constante  $z(t)$  para elementos reparables (objeto de esta investigación).

En su apartado 6.2 se desarrolla el test estadístico  $U$  para analizar si los equipos no reparables objeto de estudio presentan o no tendencia en su tasa de fallo, Figura 26. La norma también incluye tres métodos gráficos de ensayo de tendencia en los apartados 6.3, 6.4 y 6.5 como apoyo al investigador, al objeto de que evalúe si se puede asumir que los elementos no reparables en estudio presentan o no tendencia.

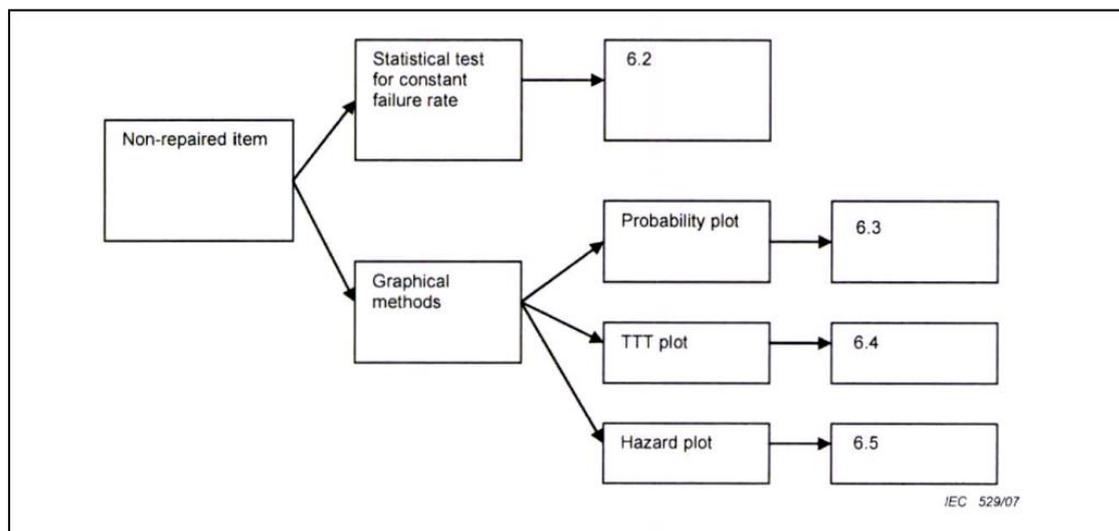


Figura 26 – Pruebas de tendencia para elementos no reparables IEC 60605-6

En el apartado 7.2 de la Norma se desarrolla el procedimiento para comprobar si un elemento reparable tiene una intensidad de fallo  $z(t)$  constante, basado en el cálculo del estadístico  $U$  (test de Laplace), Figura 27.

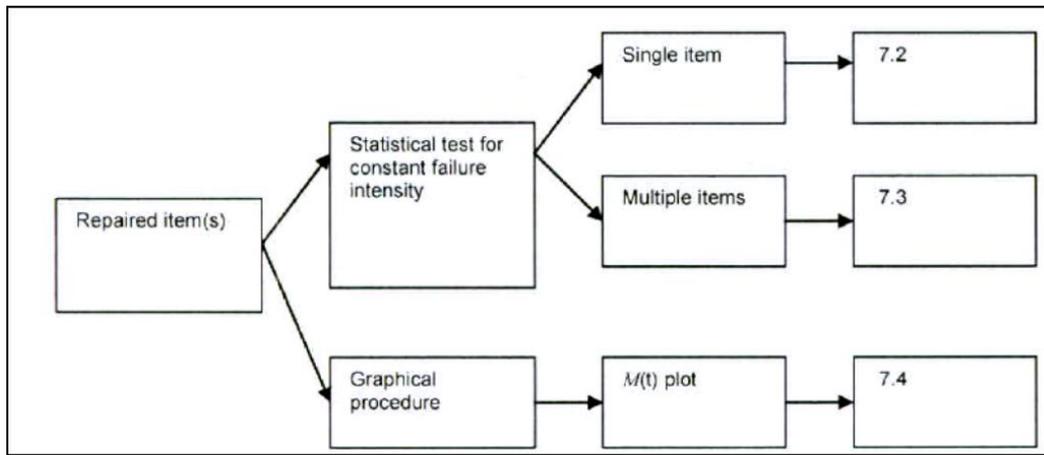


Figura 27 – Pruebas de tendencia para elementos reparables IEC 60605-6

Para ensayo terminado por tiempo;

$$U = \frac{\sum_{i=1}^r T_i - r \frac{T^*}{2}}{T^* \sqrt{\frac{r}{12}}} \quad (64)$$

Para ensayo terminado por fallo;

$$U = \frac{\sum_{i=1}^r T_i - (r-1) \frac{T_r}{2}}{T_r \sqrt{\frac{r-1}{12}}} \quad (65)$$

Siendo:

- $r$  el número total de fallos a considerar
- $T^*$  el tiempo total del ensayo terminado por tiempo
- $T_r$  el tiempo total del ensayo terminado por fallo
- $T_i$  el tiempo acumulado del ensayo a considerar en el fallo  $i$ -enésimo

Con la hipótesis de crecimiento cero (es decir, los tiempos de fallo siguen un proceso homogéneo de Poisson, HPP), el estadístico  $U$  se distribuye aproximadamente según una distribución exponencial tipificada de media 0 y desviación 1. El estadístico  $U$  puede usarse para probar si hay evidencia de crecimiento de la fiabilidad, positivo o negativo, independiente del modelo de crecimiento de la fiabilidad.

Un ensayo bilateral para crecimiento positivo o negativo con el nivel de significación  $\alpha$  tiene los valores críticos  $u_{1-\alpha/2}$  y  $-u_{1-\alpha/2}$ , donde  $u_{1-\alpha/2}$  es el percentil  $(1-\alpha/2) \times 100\%$  de la distribución normal tipificada. Si:

$$-u_{1-\alpha/2} < U < u_{1-\alpha/2} \quad (66)$$

entonces no hay evidencia de crecimiento de la fiabilidad positivo o negativo al nivel de significación  $\alpha$ . En este caso se acepta la hipótesis de distribución exponencial de los tiempos entre fallos sucesivos (o un proceso de Poisson homogéneo HPP) con el nivel de significación  $\alpha$ . Los valores críticos  $u_{1-\alpha/2}$  y  $-u_{1-\alpha/2}$  corresponden a un ensayo unilateral para crecimiento positivo o negativo, respectivamente, con el nivel de significación  $\alpha/2$ . Para los niveles de significación requeridos hay que elegir los valores críticos adecuados de la tabla de percentiles de la distribución normal tipificada:

$\alpha$	Valor de $U_\alpha$
0,025	2,24
0,050	1,96
0,100	1,64

Tabla 8 – Valores críticos estadístico  $U$ 

En el apartado 7.3 de la norma se desarrolla el procedimiento para comprobar si un conjunto elementos reparables de las mismas características tiene una intensidad de fallo constante, basado en el cálculo del estadístico  $U$ :

$$U = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_i} T_{ij} - 0,5(r_1 T_1^* + r_2 T_2^* + \dots + r_k T_k^*)}{\sqrt{\frac{1}{12}(r_1 T_1^{*2} + r_2 T_2^{*2} + \dots + r_k T_k^{*2})}} \quad (67)$$

Siendo:

- $r_i$  el número total de fallos a considerar del ítem  $i$ -enésimo
- $T_i^*$  el tiempo total del ensayo terminado por tiempo del ítem  $i$ -enésimo
- $T_{ij}$  el tiempo acumulado del ensayo a considerar en el fallo  $j$ -enésimo del ítem  $i$ -enésimo.
- $k$  el número total de ítems

Con la hipótesis de crecimiento cero (es decir, los tiempos de fallo siguen un proceso homogéneo de Poisson, HPP), el estadístico  $U$  se distribuye aproximadamente según una distribución exponencial tipificada de media 0 y desviación 1. El estadístico  $U$  puede usarse para probar si hay evidencia de crecimiento de la fiabilidad, positivo o negativo, independiente del modelo de crecimiento de la fiabilidad.

Como en el caso del apartado 7.2 se incluye un ensayo bilateral para crecimiento positivo o negativo con el nivel de significación  $\alpha$  tiene los valores críticos  $u_{1-\alpha/2}$  y  $-u_{1-\alpha/2}$ , donde  $u_{1-\alpha/2}$  es el percentil  $(1-\alpha/2) \times 100\%$  de la distribución normal tipificada.

En el Apartado 7.4 de la norma se desarrolla el procedimiento gráfico denominado “M(t) plot” para comprobar si uno o un conjunto elementos reparables de las mismas características tiene una intensidad de fallo constante. Se trata de un prueba más cualitativa que cuantitativa, por lo en esta investigación se emplearan preferentemente las pruebas de tendencia de los apartados 7.2 y 7.3 de la norma IEC 60605-6.

### 3.7. Aplicación de la norma IEC 60605-4

La norma IEC 60605-4:2001: Equipment reliability testing - Part 4: Statistical procedures for exponential distribution - Point estimates, confidence intervals, prediction intervals and tolerance intervals (Edition 2.0) no cuenta con equivalente trasladado por AENOR.

La introducción modelo HPP se ha efectuado en el apartado 2.7.5. Esta norma desarrolla el procedimiento estadístico para la distribución exponencial y permite estimar el valor de tasa de fallo constante para elementos no reparables y el valor de intensidad de fallo constante para elementos no reparables. También incluye la formulación para el cálculo de los intervalos de confianza, tolerancias, etc.

Esta norma debe aplicar de forma complementaria a la IEC 60605-6, de tal forma que si del resultado de la aplicación del estadístico  $U$  se acepta la hipótesis de distribución exponencial de los tiempos entre fallos sucesivos (o un proceso de Poisson homogéneo HPP), se puede calcular directamente el valor de tasa de fallo constante  $\lambda(t)$  o intensidad de fallo constante  $z(t)$ .

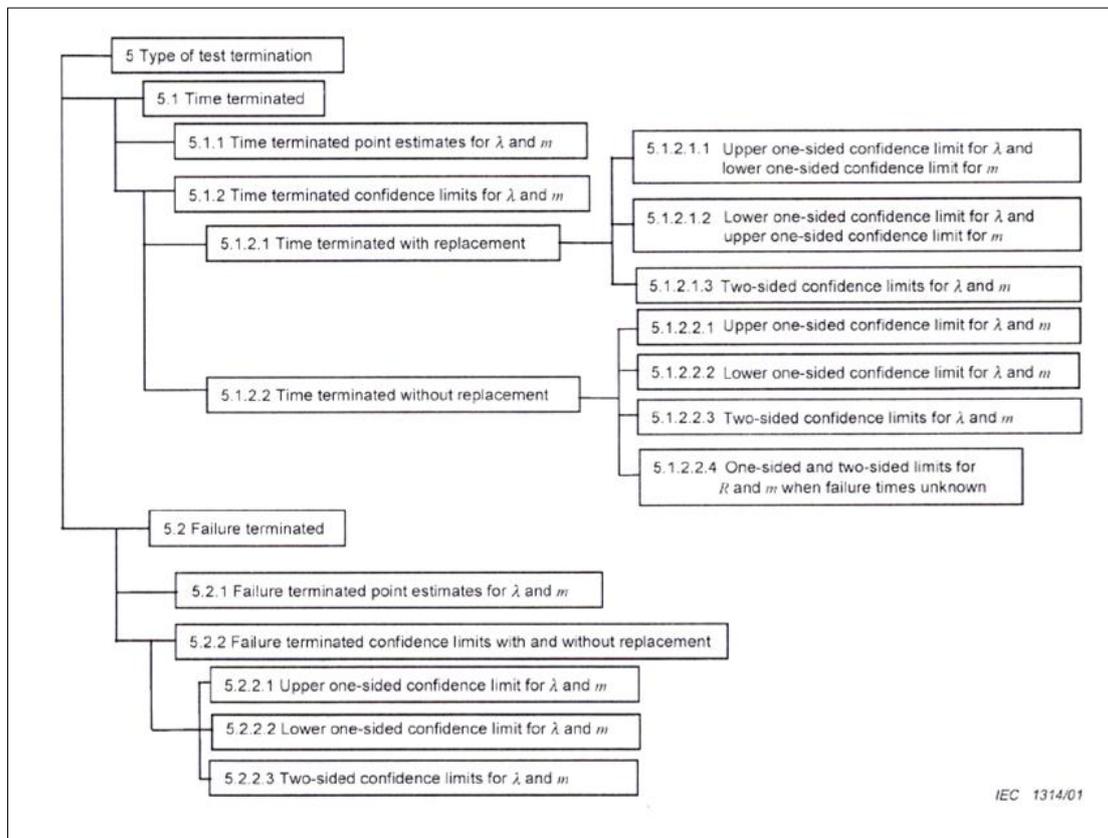


Figura 28 – Estimación de parámetros en distribución exponencial según IEC 60605-4

Para ensayo terminado por tiempo y elementos reparables, la estimación puntual de la intensidad de fallos;

$$\hat{z} = \hat{\lambda} = \frac{r}{T^*} \quad (68)$$

Para ensayo terminado por fallo;

$$\hat{z} = \hat{\lambda} = \frac{r}{T^*} \quad (69)$$

Siendo:

$r$  el número total de fallos a considerar en el ensayo

$T^*$  el tiempo total del ensayo terminado por tiempo o por fallo

Para ensayos terminados por tiempo con reemplazo de elementos (de aplicación en esta investigación), el intervalo de confianza bilateral es;

$$z_{L2} = \lambda_{L2} = \frac{X^2_{\alpha/2} 2r}{2T^*} \quad (70)$$

$$z_{U2} = \lambda_{U2} = \frac{X^2_{1-\frac{\alpha}{2}}(2r+2)}{2T^*} \quad (71)$$

Siendo:

$X^2$  Valor de la tabla de fractiles de la  $X^2$  distribución para un intervalo de confianza del 90%.

### 3.8. Aplicación de la norma IEC 61710

La norma IEC 61710:2013: Power law model - Goodness-of-fit tests and estimation methods (Edition 2.0) ha sido trasladada por AENOR bajo la norma UNE-EN 61710: 2014: Modelo de ley de potencia. Ensayos de bondad de ajuste y métodos de estimación.

La introducción a los modelos NHPP se ha efectuado en el apartado 2.7.6. Esta norma desarrolla el procedimiento estadístico para el modelo de la ley de potencia y permite estimar el valor de la intensidad de fallo para ensayos de uno o varios elementos reparables en ensayos terminados por tiempo o por fallo. También permite la estimación de la intensidad de fallo en ensayos para grupos de fallos en intervalos de tiempo.

Esta norma debe aplicar de forma complementaria a la IEC 60605-6, de tal forma que si del resultado de la aplicación del estadístico  $U$  se rechaza, sí existe una tendencia (intensidad de fallo creciente o decreciente) y puede ser de aplicación el denominado proceso de Poisson no homogéneo (NHPP), y en particular el modelo de la ley de Potencia.

Se recuerda la ley de potencia (ver 2.7.6);

$$E[N(t)] = \lambda t^\beta \quad (52)$$

y función intensidad de fallo;

$$z(t) = \frac{d}{dt} E[N(t)] = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad (53)$$

Siendo;

$E[N(t)]$	<i>el número acumulado de fallos esperado hasta tiempo de fallo <math>T</math></i>
$\lambda$	<i>es el parámetro de escala</i>
$\beta$	<i>es el parámetro de forma</i>
$z(t)$	<i>la intensidad de fallo actual tras <math>T</math> tiempo de ensayo</i>

Los métodos de estimación estadística de la intensidad de fallo difieren según el tipo de ensayo efectuado:

- Uno o múltiples elementos reparables observados en el mismo espacio de tiempo; se aplican los estadísticos del apartado 7.2.1 de la norma.
- Múltiples elementos reparables observados en diferentes intervalos de tiempo; se aplican los estadísticos del apartado 7.2.2 de la norma.
- Grupos de fallos en intervalos de tiempo; se aplican los estadísticos del apartado 7.2.3 de la norma.

Para uno o múltiples elementos reparables observados en el mismo espacio de tiempo, apartado 7.2.1 se calcula el sumatorio;

$$S_1 = \sum_{j=1}^N \ln \left( \frac{T^*}{t_j} \right); \text{ para ensayos terminados a tiempo} \quad (72)$$

$$S_2 = \sum_{j=1}^N \ln \left( \frac{t_N}{t_j} \right); \text{ para ensayos terminados a fallo} \quad (73)$$

Siendo:

$T^*$  el tiempo total del ensayo terminado por tiempo

$t_N$  el tiempo total del ensayo terminado por fallo

$t_j$  el tiempo acumulado del ensayo en el fallo  $j$ -enésimo

Se calcula la estimación no sesgada del parámetro de forma  $\beta$ ;

$$\hat{\beta} = \frac{N-1}{S_1}; \text{ para ensayos terminados a tiempo} \quad (74)$$

$$\hat{\beta} = \frac{N-2}{2}; \text{ para ensayos terminados a fallo} \quad (75)$$

Se calcula la estimación del parámetro de escala  $\lambda$ ;

$$\hat{\lambda} = \frac{N}{k(T^*)^\beta}; \text{ para ensayos terminados a tiempo} \quad (76)$$

$$\hat{\lambda} = \frac{N}{k(t_N)^\beta}; \text{ para ensayos terminados a tiempo} \quad (77)$$

Siendo;

$N$  el número total de fallos acumulados en el ensayo.

$k$  el número total de ítems del ensayo.

La intensidad de fallo estimada, por lo tanto, según la ley de potencia:

$$\hat{z}(t) = \hat{\lambda} \hat{\beta} t^{\hat{\beta}-1} \quad (78)$$

Para múltiples elementos reparables observados en diferentes espacios de tiempo, apartado 7.2.2 se calcula de forma iterativa el parámetro de forma  $\beta$ ;

$$\frac{N}{\hat{\beta}} + \sum_{i=1}^N \ln t_i - \frac{N \sum_{j=1}^k T_j^{\beta} \ln T_j}{\sum_{j=1}^k T_j^{\beta}} = 0 \quad (79)$$

Se calcula la estimación del parámetro de escala  $\lambda$ ;

$$\hat{\lambda} = \frac{N}{\sum_{j=1}^k T_j^{\hat{\beta}}} \quad (80)$$

Siendo;

- $N$  el número total de fallos acumulados en el ensayo.
- $k$  el número total de ítems del ensayo.
- $t_i$  el tiempo al fallo  $t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ .
- $T_j$  el tiempo total de observación  $T_j$  desde el ítem  $j=1, 2, \dots, k$ .

El ensayo de bondad de ajuste para los casos de la norma 7.2.1 y 7.2.2, requiere calcular el estadístico Cramer-von-Mises  $C^2$ , de acuerdo al apartado 7.3.1.1;

$$C^2 = \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left[ \left( \frac{t_j}{T} \right)^{\beta} - \left( \frac{2j-1}{2M} \right) \right]^2 \quad (81)$$

Siendo:

- $M = N$  y  $T = T^*$  para ensayos terminados a tiempo.
- $M = N-1$  y  $T = t_N$  para ensayos terminados a fallo.

A continuación se selecciona el valor crítico  $C^2_{0,90}(M)$  para un nivel de significación del 10% de la tabla que se adjunta;

$$C^2 > C^2_{0,90}(M)$$

Si el estadístico  $C^2$  excede del valor crítico de la tabla  $C^2_{0,90}(M)$ , entonces debe rechazarse la hipótesis de que el modelo de la ley de potencia ajusta adecuadamente los datos del ensayo.

En su anexo C la norma IEC 61710 de 2013 incluye una estimación Bayesiana para el modelo de ley potencial. Los métodos reflejados en el cuerpo principal de esta norma se basan en el planteamiento clásico para realizar estimaciones estadísticas. Esto significa que los parámetros de la ley potencial  $\lambda$  y  $\beta$  se supone que son fijos, pero desconocidos y se emplea un método clásico como el de "máxima verosimilitud" para estimar los valores de ambos parámetros utilizando los datos observados de los tiempos acumulados hasta el fallo de un elemento reparable.

Un planteamiento alternativo es el de la estimación Bayesiana. Este planteamiento trata los parámetros de la ley potencial,  $\lambda$  y  $\beta$  como variables aleatorias no observadas. Esto afecta a las etapas del proceso de estimación. Un enfoque Bayesiano para la estimación del proceso de la ley potencial puede resumirse en los siguientes pasos:

- a. elegir una distribución de probabilidad que refleje el grado de conocimiento de cada uno de los parámetros,  $\lambda$  y  $\beta$  antes de recoger ningún dato. A esta distribución se la denomina la distribución a priori;
- b. recopilar los datos observados de los tiempos de fallo acumulados para el elemento reparable de que se trate;
- c. estimar los parámetros del modelo de ley potencial a partir de la distribución a posteriori que se calcula empleando el teorema de Bayes y que refleja lo que se conoce sobre los parámetros tras la observación de los datos.

### 3.9. Procedimiento metodológico en aplicación de normas IEC

Se adjunta el flujograma del procedimiento metodológico para el análisis de la fiabilidad aplicado a la investigación de elementos reparables, de acuerdo a las normas IEC.

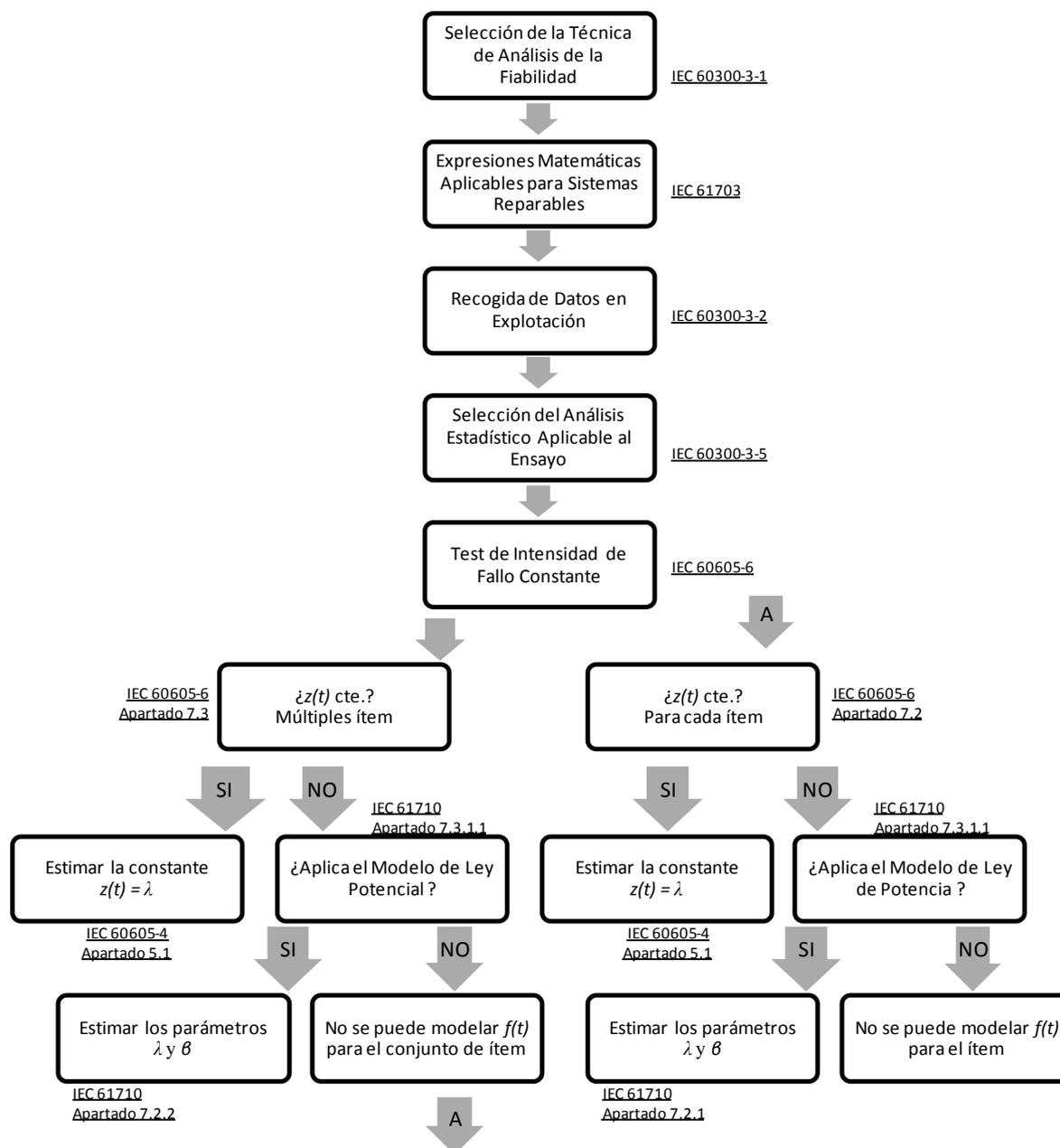


Figura 29 – Procedimiento metodológico para análisis de la fiabilidad según normas IEC

Este flujograma está personalizado al tipo de elementos reparables y datos objeto de la investigación, de los que se disponen los tiempos (y kilómetros) exactos de cada fallo y son ensayos terminados a tiempo (no a fallo).

# 4. SISTEMAS DE TRACCIÓN ELÉCTRICA FERROVIARIA

---

*Las máquinas me sorprenden con mucha frecuencia.*

*-Alan Turing-*

La evolución de las técnicas aplicadas a la tracción eléctrica ferroviaria está ligada al desarrollo e implantación comercial de los componentes de electrónica de potencia; tiristores, GTO's (Gate Turn-Off Thyristor), IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor), que posibilitan el control y regulación de los motores de tracción de los trenes.

Desde el inicio del ferrocarril eléctrico a finales del siglo XIX, hasta mediados de la década de los 70, la técnica básica aplicada fue la reostática, basada en intercalar resistencias para la regulación de los motores de tracción de corriente continua.

Con el desarrollo en los años 70, de tiristores de potencia suficiente para controlar la alimentación de motores de tracción de corriente continua mediante la técnica chopper, se da el primer paso en la evolución de los sistemas de tracción, que se acelera en los años 80 y 90 con la aparición de nuevos semiconductores como los GTO's e IGBT's y la consolidación de sistemas de control basados en microprocesadores, lo que ha permitido la implantación de las técnicas trifásicas con ondulator de corriente y con ondulator de tensión.

En primer lugar se analizaran y presentan de forma resumida, los principios de funcionamiento de las cuatro técnicas de tracción eléctrica ferroviaria con mayor implantación comercial a nivel mundial; reostática, chopper, trifásica – ondulator de corriente y trifásica – ondulator de tensión.

A continuación se presentan los bloques constructivos de implantación en el ferrocarril de los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria.

Finalmente se presentan los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria, implantados en las series de trenes de Metro de Madrid; 5000-1<sup>a</sup> (reostática), 5000-4<sup>a</sup> (chopper), 2000-B (trifásica – ondulator de corriente) y 8000 (trifásica – ondulator de tensión).

## 4.1. Las técnicas de tracción eléctrica ferroviaria

### 4.1.1. Técnica reostática

Se denomina como técnica reostática de tracción a aquellos trenes alimentados en corriente continua, que intercalando resistencias para el control del arranque y el freno, alimentan a motores de tracción de corriente continua.

Un motor de corriente continua está constituido por una parte fija (estator ó carcasa) compuesta por la carcasa y los inductores, y de una parte móvil giratoria (rotor ó inducido) compuesta por el inducido y el colector.

La velocidad de giro del motor es función de la tensión de alimentación, aumentando o disminuyendo, en el mismo sentido que lo hace la intensidad que recorre al inducido. En aplicaciones ferroviarias en los motores de tracción la excitación es generalmente en serie. La corriente atraviesa primero el devanado del inductor y después el devanado del inducido, ó al inversa.

Se utiliza esta excitación cuando es necesaria una gran potencia en el arranque, ya que proporciona una regulación constante de la velocidad, estos motores son susceptibles de convertirse en generadores alimentando únicamente al estator. El principal inconveniente es su exposición al embalamiento cuando disminuye la adherencia rueda-carril.

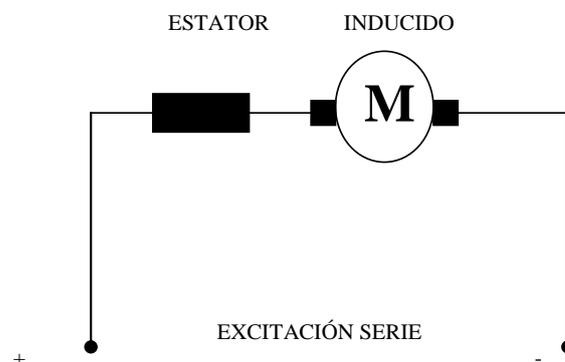


Figura 30 – Motor de corriente continua en excitación serie

La utilización y evolución de esta técnica se mantuvo desde el inicio del tren eléctrico a finales del siglo XIX, hasta los años 70 del siglo pasado, y se basa en ir intercalando resistencias, que se van cortocircuitando, entre la tensión de alimentación y los motores de tracción, de forma que la tensión aplicada a los motores va aumentando progresivamente.

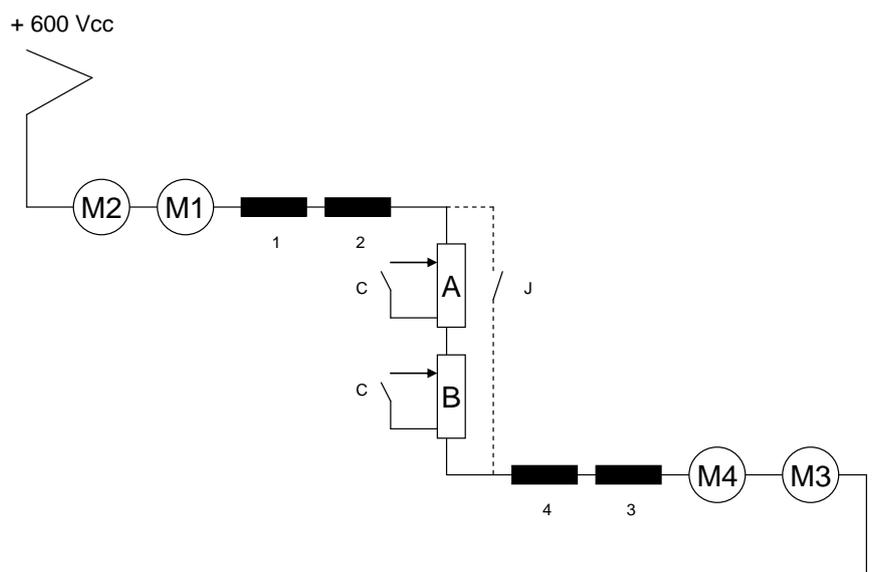


Figura 31 – Configuración simplificada serie de arranque de motores de tracción

En el ejemplo de la Figura 31, los cuatro motores (M1, M2, M3 y M4) se conectan, en principio, en serie con las resistencias A y B. Esta configuración consigue que la tensión en bornes de cada motor, en la primera fase de arranque sea baja. A continuación, y controladas por los relés de aceleración C, las resistencias A y B poco a poco van disminuyendo su resistencia. Finalmente se produce el puenteo total de las resistencias A y B con el contactor J, quedando los cuatro motores en serie alimentados de la tensión principal a 600V, lo que implica que cada motor se le aplican 150 V.

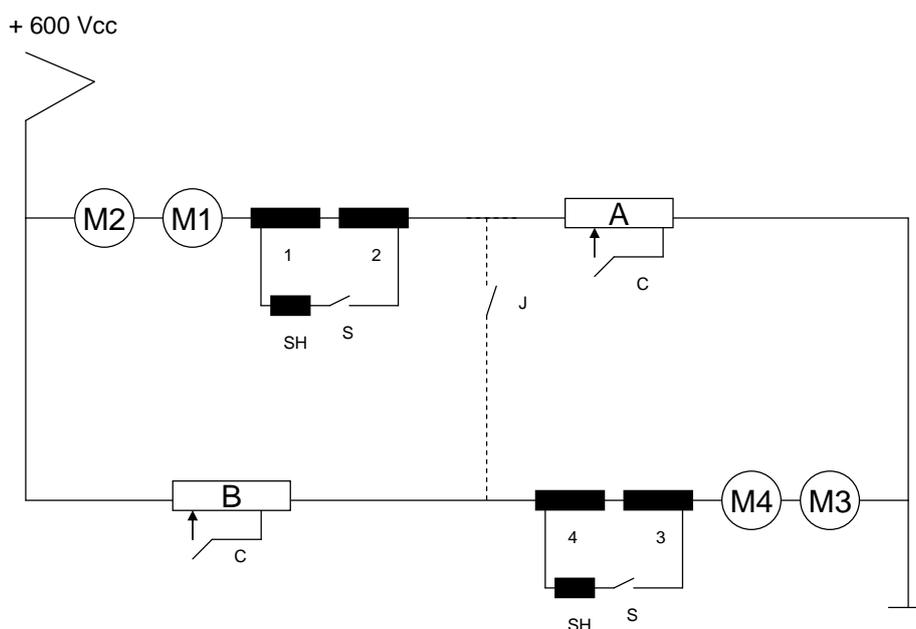


Figura 32 – Configuración simplificada paralelo de motores de tracción

Finalizada la primera etapa, se procede a poner dos motores en paralelo con los otros dos, de nuevo mediante intercalación de resistencias, según el circuito de la Figura 32, para continuar con su proceso de arranque. A continuación, y controladas por los relés de aceleración C, las resistencias A y B poco a poco van disminuyendo su resistencia. Una vez puenteadas de nuevo ambas resistencias, dos motores quedan alimentados de la tensión de 600 V, por lo que a cada motor se le aplican 300 V.

Por último, y una vez configurados en paralelo, se pueden “shuntar” los campos de los motores de tracción, con la debilitación del campo inductor se consigue así mayor aceleración, mediante la bobina SH y el contactor S, representado en la Figura 32.

En los inicios de la técnica reostática, los trenes no incorporaban frenado eléctrico, recurriéndose a frenados mecánicos, normalmente sobre zapatas aplicadas a la propia llanta de la rueda. Dado el importante mantenimiento que esto suponía, se desarrollaron circuitos eléctricos de potencia diseñados de forma que, en la fase de freno, utilizaran los motores de corriente continua como generadores (freno eléctrico), de forma que la energía generada se consume en resistencias de frenado. El circuito en la fase de freno representado en la Figura 33, los motores de tracción actúan como generadores, disipándose la energía en las resistencias de frenado C.

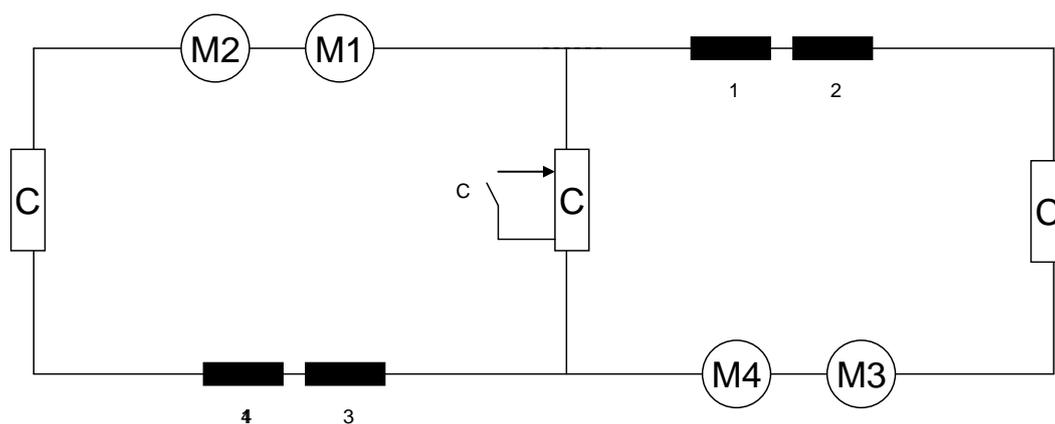


Figura 33 – Configuración simplificada de frenado de motores de tracción

Como puede observarse en los circuitos anteriormente expuestos, la técnica reostática necesita de un gran número de relés y contactores de potencia para las diferentes configuraciones de los esquemas de control de los motores de tracción y de las resistencias de arranque y frenado.

Asimismo es necesario un sistema de control del proceso de arranque y frenado de los motores de tracción que controle todos los relés y contactores, y que técnicamente han ido evolucionado desde sistemas puramente electromecánicos (tambor de levas), a complejos sistemas electrónicos (regulador de marcha/freno + combinador). Esta evolución en los sistemas de control, no cambian la filosofía de intercalación de resistencias en serie con los motores de tracción, pero consiguen que los escalonamientos sean más suaves y que el control de los motores de tracción sea más eficiente.

Estos sistemas de control electrónicos implementan también vigilancias adicionales en los motores de tracción de sobretensión, sobre intensidad, embalamiento, bloqueo, etc., al objeto de mejorar su rendimiento y detectar de forma temprana averías en los circuitos de tracción.

La técnica reostática presenta grandes inconvenientes en su aplicación ferroviaria, por un lado la utilización de motores de corriente continua que conllevan unos altos gastos de mantenimiento, por otro necesita de un gran número de relés, contactores y componentes electromecánicos (combinador) cuya fiabilidad es limitada. Por último, es una técnica poco eficiente en su consumo energético, ya que mucha energía es disipada en las resistencias de arranque y freno.

#### 4.1.2. Técnica Chopper

En los años 70 del siglo pasado y con la aparición de los semiconductores capaces de controlar altas tensiones e intensidades, fundamentalmente los tiristores, se desarrolló la técnica chopper que utiliza dispositivos electrónicos para realizar la variación de tensión de alimentación en los motores de tracción de corriente continua mediante la apertura y cierre controlada de un interruptor electrónico, normalmente implementados por tiristores.

El efecto obtenido en los motores de tracción es una regulación de la tensión continua de alimentación, obtenido como valor medio de la tensión entre los tiempos de cierre y apertura del interruptor electrónico. Este valor medio se puede regular modificando los tiempos de apertura y cierre del interruptor electrónico. Durante el arranque se va adecuando la tensión de los motores de tracción a su fuerza electromotriz instantánea, de tal forma que la intensidad media durante todo el proceso permanece constante.

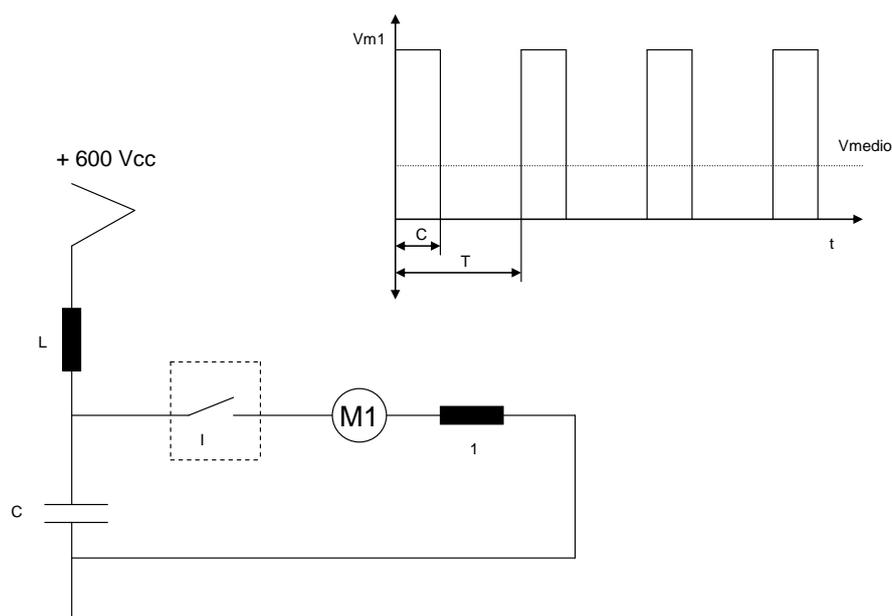


Figura 34 – Esquema básico de la técnica chopper

En la Figura 34 se representa el esquema básico de funcionamiento de la técnica chopper, en la que el control se efectúa mediante el interruptor electrónico I. El tiempo  $C$  que el interruptor está cerrado, el motor de tracción recibe la tensión de alimentación de la red, mientras que cuando está abierto el motor no recibe alimentación alguna. Como resultado para un periodo  $T$ , el motor de tracción recibe una tensión de alimentación equivalente al valor medio  $V_{medio}$ .

La regulación en tensión se consigue modificando el tiempo  $C$  de conducción del interruptor electrónico, a mayor tiempo de conducción mayor  $V_{medio}$  en bornes del motor de tracción. Las frecuencias de trabajo para la regulación de motores de tracción ferroviarios están comprendidas entre unos pocos Hz, hasta 250 Hz.

La red de alimentación no debe recibir armónicos, ni transitorios de tensión o corriente, por lo tanto es necesario disponer de un circuito de aplanamiento ó alisado en la parte de la red, usando para ello un filtro de red formado por una reactancia y un condensador.

En la carga la tensión y la corriente también es pulsatoria, para alisar y que en el motor exista una tensión y una corriente lo más continua posible se suele conectar en serie al motor una reactancia o bobina de aplanamiento, y un diodo de paso libre en paralelo, de tal manera que cuando interruptor abre y deja de suministrar corriente la bobina se encarga de suministrar la corriente necesaria a través del diodo de paso libre, obteniendo así una corriente prácticamente continua en el motor, ver Figura 35.

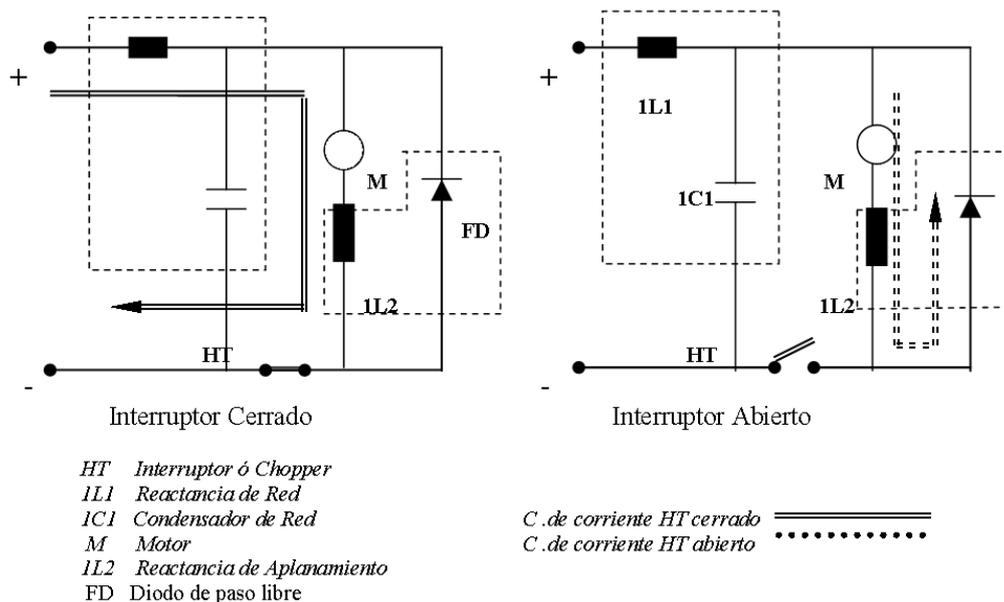


Figura 35 – Circuitos de corriente con interruptor chopper cerrado y abierto

Dependiendo del tiempo de conexión y desconexión del interruptor (HT) o chopper obtendremos un valor de tensión medio a su salida. La regulación de la tensión puede ser a frecuencia constante (variarnos  $T_{con}$  y  $T_{des}$ , manteniendo el  $T_{total}$ ), a frecuencia variable (variarnos  $T_{con}$  y  $T_{des}$  cte. o variarnos  $T_{des}$  y  $T_{con}$  cte.), ver Figura 36.

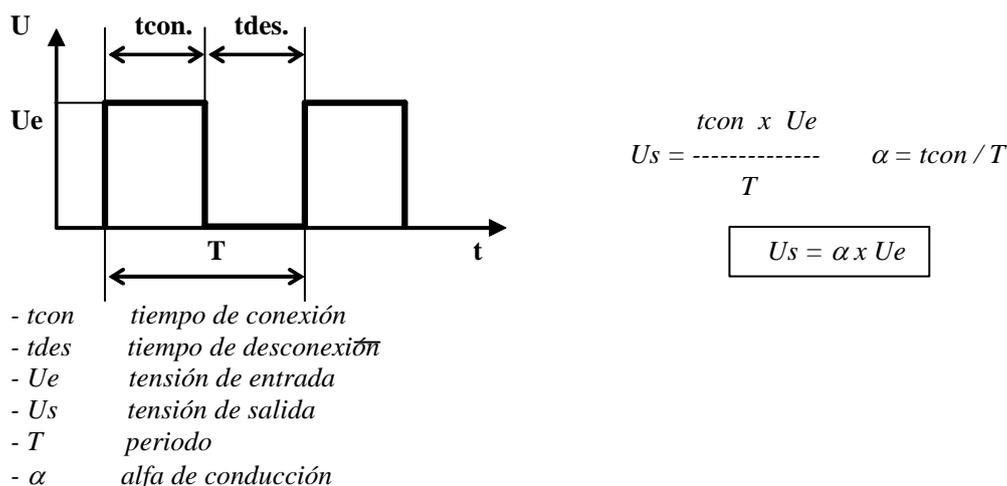


Figura 36 – Tensión de entrada y salida en la técnica chopper

Los elementos usados como interruptores estáticos pueden ser Tiristores, GTO's, IGBT's o Transistores MOSFET, si bien en las aplicaciones ferroviarias está extendido el uso de Tiristores, como en el ejemplo de la Figura 37.

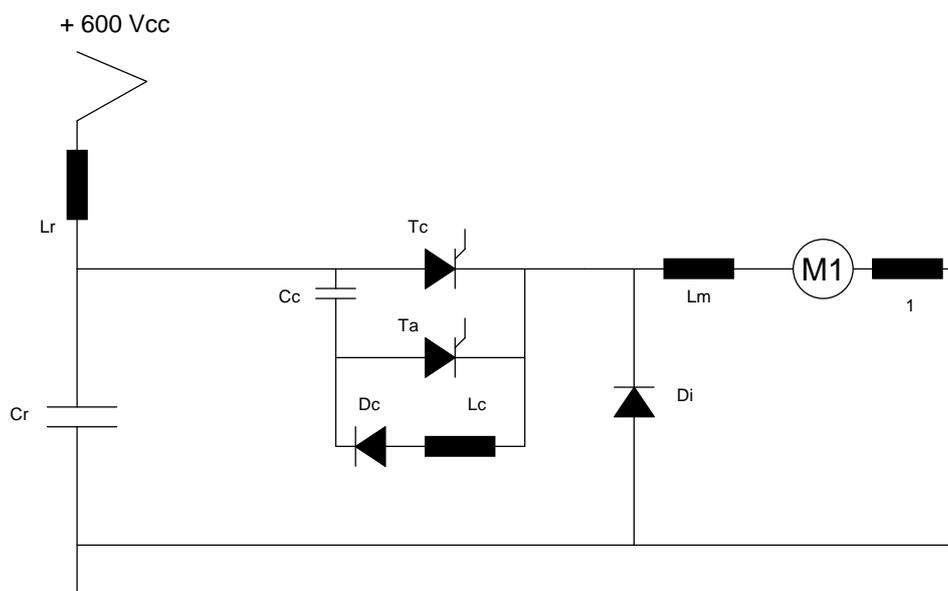


Figura 37 – Esquema eléctrico de la técnica chopper con tiristores

Como se ha señalado la técnica chopper, basada en la conmutación todo/nada de la tensión de alimentación sobre una máquina rotativa básicamente inductiva, genera gran cantidad de armónicos y picos transitorios de tensión y corriente que deben de ser tratados para evitar su transferencia a la red de alimentación. Es por ello, que se debe introducir un filtro LC a la entrada de la alimentación. Asimismo, se suelen emplear inductancias en serie con los motores de tracción, al objeto de limitar los armónicos y picos de tensión y corriente.

Para desconectar el tiristor se utiliza un circuito de apagado aplicando una tensión inversa en extremos del tiristor, formado por un circuito oscilante (L-C-D) y otro tiristor de apagado (LT), que hace las veces de interruptor, ver Figura 38.

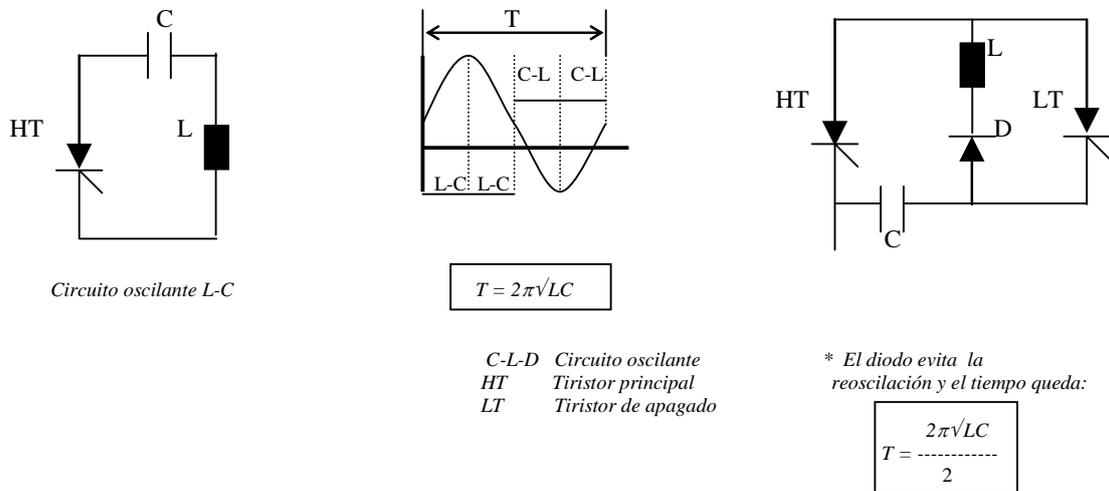


Figura 38 – Circuito de apagado en la técnica chopper con tiristores

La técnica chopper se complementa en la fase de freno, con la configuración de los circuitos de los motores para que actúen como generadores que recuperan energía de tracción devolviendo intensidad a la red; caso de que haya consumidores capaces de recibirla. En el caso de que no existan consumidores en la red, la energía se disipa en resistencias de frenado.

Como resumen, la principal ventaja en comparación con la técnica reostática, es que la técnica chopper no necesita de resistencias de arranque que disipan energía, por lo que su rendimiento y eficiencia energética es muy superior a la reostática, llegando hasta el 25% su mejora.

Con la eliminación de las resistencias de arranque y de los relés, contactores y combinador asociados a su progresiva conexión y desconexión, se elimina unos equipos voluminosos y pesados, fuente de múltiples averías y con altos coste en su mantenimiento. Otra mejora sustancial es la posibilidad de utilización del freno regenerativo en el caso de que la tensión de los motores de tracción actuando como generadores sea cercana o superior a la tensión de la red de alimentación.

#### 4.1.3. Técnica trifásica - ondulador de corriente

En los años 80 del pasado siglo se comenzaron a desarrollar sistemas de tracción para aplicaciones ferroviarias basadas en motores de corriente alterna asíncronos. Un motor de corriente alterna es más simple y robusto que los de corriente continua y está exento prácticamente de mantenimiento. Es un motor menos pesado y voluminoso y con gran capacidad de sobrecarga.

Es por ello que a partir de esa década, prácticamente la totalidad de los trenes eléctricos fabricados se han motorizado con motores trifásicos asíncronos, en la mayoría de los casos con rotores del tipo de jaula de ardilla. Al alimentar en tensión trifásica el estator, primero una bobina crea su campo magnético, luego la segunda, luego la tercera así sucesivamente, es como si el campo magnético se desplazase desde la primera bobina hasta la última, como si fuese un campo magnético giratorio.

La velocidad con que este campo magnético giratorio se desplaza, depende del N° de grupos de bobinas y de la frecuencia de alimentación de la tensión trifásica, esta velocidad se denomina “velocidad de sincronismo”.

Los motores que trabajan a una velocidad inferior a la de sincronismo se les denominan motores asíncronos. Al disminuir la velocidad del rotor respecto a la de sincronismo el par va progresivamente aumentando hasta alcanzar su valor máximo cuando la velocidad del rotor es aproximadamente un 75% de la de sincronismo. A partir de ese momento, si la velocidad del rotor continua decreciendo el par también decrece.

Para mantener un par constante de valor máximo durante el proceso de arranque, se debe variar la frecuencia, al aumentar la frecuencia se produce un aumento en la impedancia de las bobinas, limitando la corriente que pasa por ellas variando así el campo el magnético, para subsanar este problema es preciso aumentar la tensión de alimentación de forma simultánea al aumento de la frecuencia.

La curva de la Figura 39 nos indica la relación del par con la velocidad del motor, cada motor tiene una curva, cuya forma es la misma, la diferencia es la relación (Par-Velocidad) que depende de las características propias de la construcción de motor.

El motor debe de trabajar en la “zona estable” de tal manera que si el tren va traccionando con una velocidad determinada y aparece un tramo de subida, la velocidad del tren disminuye, por lo tanto el rotor disminuirá su velocidad con respecto a la del campo magnético giratorio, aumentando así su deslizamiento, pero según podemos ver en la curva, el par aumentaría compensando la disminución de la velocidad automáticamente. Por el contrario, si el motor se encuentra en la “zona inestable” él mismo caso anterior haría que el par disminuyera y con ello la velocidad entrando así en un momento de caída, que llegaría a parar el motor.

Cuando el tren se dispone a frenar, disminuimos la frecuencia de alimentación, disminuyendo así el campo magnético giratorio, haciendo que el rotor gire a la velocidad de sincronismo, par a cero, como es necesario un par negativo para frenar, seguimos disminuyendo la frecuencia de tal manera que el rotor gire a una velocidad superior a la de sincronismo, aumentando a la vez el par de freno. Si el motor al girar a una velocidad superior a la de sincronismo se convierte en un generador de corriente eléctrica.

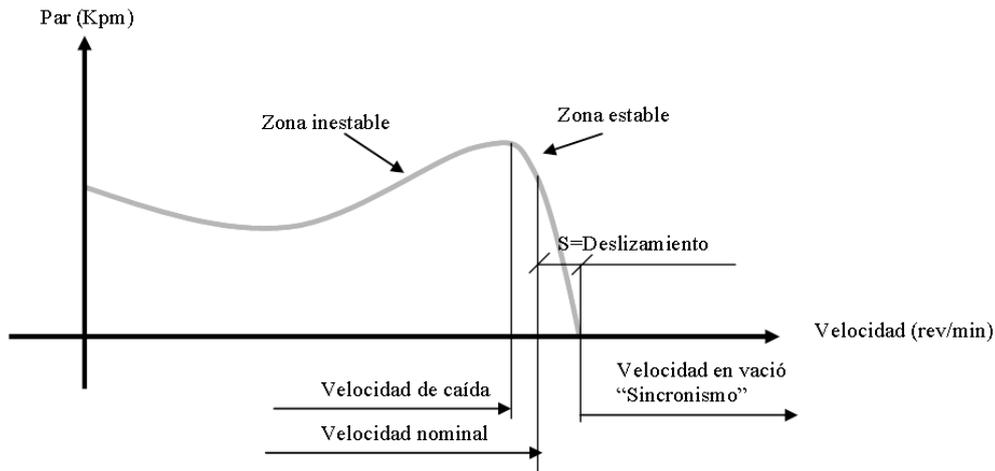


Figura 39 – Curva par/velocidad de un motor de corriente alterna

La utilización de motores de corriente alterna trifásicos asíncronos, conlleva la necesidad de implementar un ondulator para su alimentación, al objeto de controlar el arranque, regulación y parada de los motores de tracción. Asimismo, y al objeto de regular la tensión de entrada al ondulator, es necesario incorporar un convertidor (denominado en el ámbito ferroviario como chopper) CC/CC o CA/CC, dependiendo del tipo de tensión de alimentación de la red.

En la Figura 40 se adjuntan los esquemas de bloques básicos de principio de la técnica trifásica, que inicialmente se desarrollaron con onduladores por fuente de corriente.

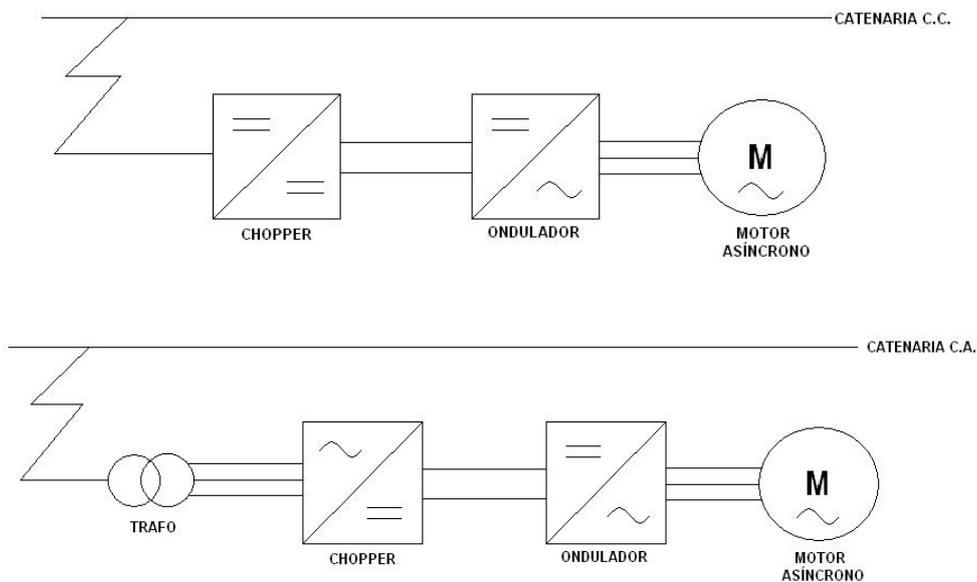


Figura 40 – Esquema de bloques de técnica trifásica – ondulator de corriente

Los principios de funcionamiento bloque chopper, cuya misión es regular la tensión de alimentación que le llega al bloque ondulator, ya han sido descritos en el apartado anterior dedicado a la técnica chopper.

El ondulator tiene la misión de convertir la corriente continua suministrada por el bloque chopper, en trifásica para poder alimentar así a los motores asíncronos siendo capaz de variar su frecuencia de 0 a 180Hz habitualmente. Suele estar formado por un puente trifásico de tiristores, diodos, y unos condensadores que se encargan de realizar la conmutación de fases. El encendido de una fase presupone el apagado de la anterior, por eso se le denomina ondulator de seguimiento de fases.

Es importante señalar que el control del bloque chopper y del bloque ondulator conllevan una complejidad de cálculo difícilmente realizables con electrónica analógica o digital convencional. Se deben gestionar de forma simultánea y en tiempo real la tensión, frecuencia, velocidad e intensidad de cada rama trifásica, lo que conlleva el uso de microprocesadores y software específicamente diseñados para el control eficiente de los motores de tracción de corriente alterna trifásicos asíncronos.

Esta técnica, con la utilización de motores de corriente alterna, mejora notablemente los resultados de las técnicas reostáticas y chopper con motores de corriente continua, ya que los costes de mantenimiento de los motores de corriente alterna son sustancialmente menores respecto a los de corriente continua.

Asimismo la fiabilidad intrínseca de los motores de corriente alterna es muy superior a la de los de corriente continua, al no existir ciertos elementos sometidos a desgastes (escobillas y colectores), y tener mucha menos tendencia al embalamiento o bloqueo que los motores de corriente continua.

El equipamiento eléctrico asociado a esta técnica se reduce aún más respecto de la técnica chopper, con la desaparición de contactores electromecánicos (sentido de marcha, etc.) y la utilización de tiristores, de mayor fiabilidad y menor mantenimiento, como interruptores estáticos para la mayoría de configuraciones de los circuitos de potencia.

#### **4.1.4. Técnica trifásica - ondulator de tensión**

A mediados de la década de los 90 del siglo pasado, con la aparición de los transistores IGBT's de potencia, se inició la implantación comercial de onduladores de tensión directos alimentando los motores de tracción, sin necesidad de utilización del bloque chopper para la regulación de tensión, necesarios en el caso de los onduladores de corriente.

Esta técnica es la que se utiliza en la actualidad para los sistemas de tracción eléctricos en trenes, el ondulator de tensión es un inversor por fuente de tensión con modulación de ancho de pulso PWM (Pulse Width Modulation). El objetivo es controlar la tensión y frecuencia de salida, mediante una rápida conmutación modulada.

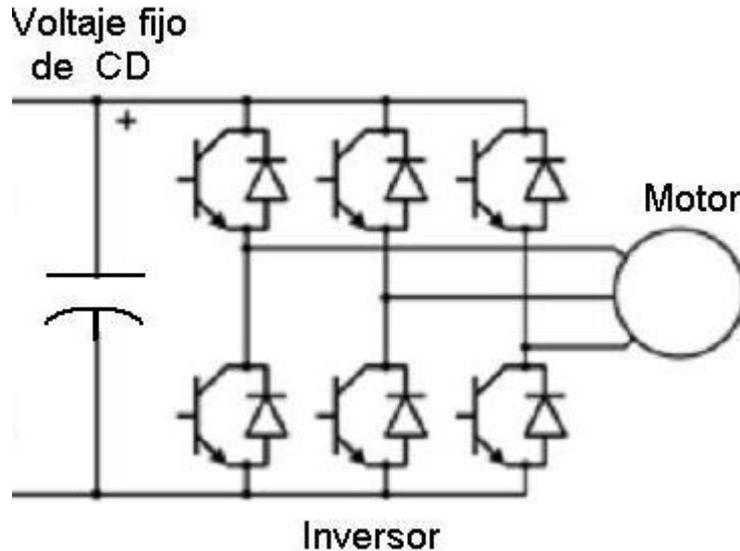


Figura 41 – Esquema básico de un ondulator de tensión (inversor PWM)

El ondulator de tracción ferroviario desde el punto de vista eléctrico se puede dividir en dos partes: inversor (ondulator) y bloque de frenado, ver Figura 42. La parte inversora está formada por tres módulos que constituyen las tres fases R, S, y T. El inversor es del tipo tensión conectado directamente con la catenaria, con salida de tensión y frecuencia variable, y alimenta dos motores de tracción. Cada uno de los dos IGBT contenidos en los módulos inversores representa una semifase (IGBT + diodo anti paralelo) de la fase inversora.

La parte del bloque de frenado está compuesta por un único módulo que contiene en su interior dos ramas diferentes, que disipan la energía de frenado en las dos secciones del reóstato si la red no está en modalidad receptiva. Cada uno de los dos IGBT del módulo de frenado tiene en su interior tanto el diodo en anti paralelo, como el diodo a utilizar para la recirculación de las corrientes de las dos secciones del reóstato de frenado. Las dos ramas del bloque de frenado funcionan con un desfase entre sí de  $180^\circ$ .

Los semiconductores utilizados son módulos de transistores IGBT de alto aislamiento y elevada fiabilidad. El empleo de los IGBT ha permitido una notable reducción de los pesos y volúmenes del equipo de potencia, ya que no es necesario el uso de circuitos de apagado (caso de aplicaciones con tiristores), ni redes de filtro para la supresión de transitorios. La modulación de ancho de pulso tiene la ventaja de que al trabajar a frecuencias altas rescata con mayor fiabilidad la componente fundamental de la señal que queremos obtener, eliminando gran parte de los armónicos no deseados (si no los elimina en algunos casos, si que los minimiza).

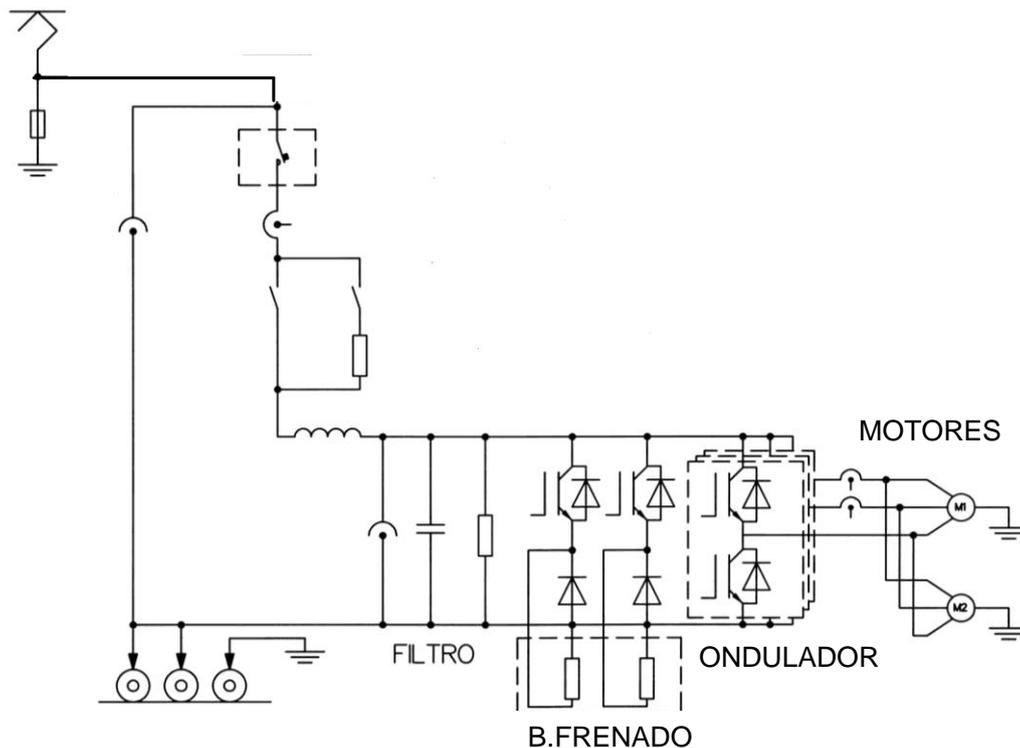


Figura 42 – Esquema básico de un ondulator de tensión (inversor PWM) ferroviario

Este efecto es una gran ventaja, ya que, los motores de corriente alterna sufren en gran medida por el efecto de los armónicos. Los armónicos producen un efecto de frenado sobre el motor durante la marcha de éste, originando envejecimiento, desgaste y calentamiento. Este calentamiento producido por un incremento de la corriente debido a los armónicos produce unas pérdidas innecesarias y por lo tanto un calentamiento de los componentes del circuito. Además en caso de la necesidad de filtrado, éste sería sencillo, ya que, los armónicos estarán muy separados en el espectro de la fundamental.

La conmutación en la rama de los semiconductores se programa mediante la intersección de una onda triangular fija y una señal modelo proporcional a la tensión de salida que se quiere conseguir, que es una senoidal. La tensión de salida presentará una modulación de ancho de pulsos positivos y negativos de tal forma que, si el número de pulso es alto, se obtiene una forma de onda con muy poca distorsión.

La técnica de ondulator directo PWM realiza un control de motor de tracción eficiente, y la frecuencia de conmutación relativamente alta logra unas pérdidas en el motor bajas. La frecuencia de conmutación de los IGBT's establece la habilidad de la PWM para producir las corrientes de motor ideales. Cuanta más alta sea la frecuencia, menor rizado en la corriente del motor y menos pérdidas en el motor.

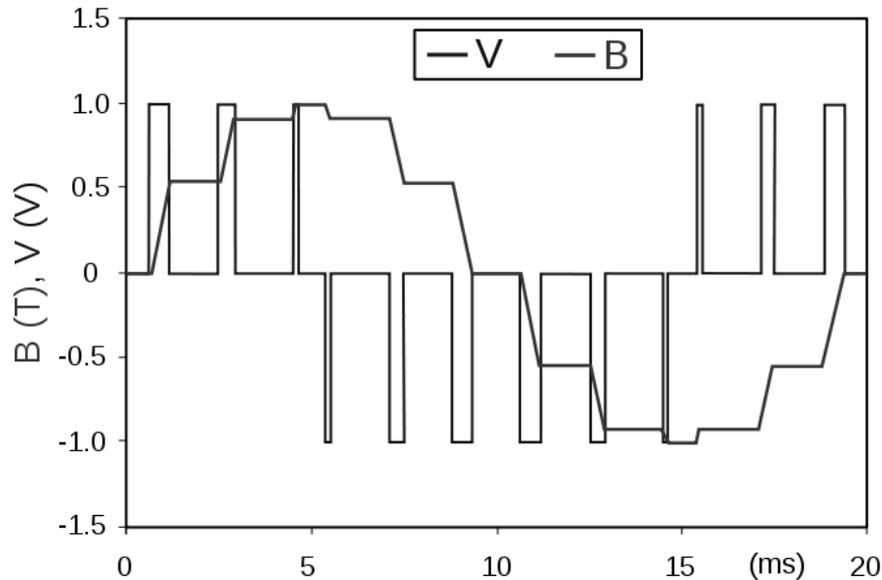


Figura 43 – Tensión (V) modulada PWM y densidad de flujo magnético (B) obtenido en un motor.

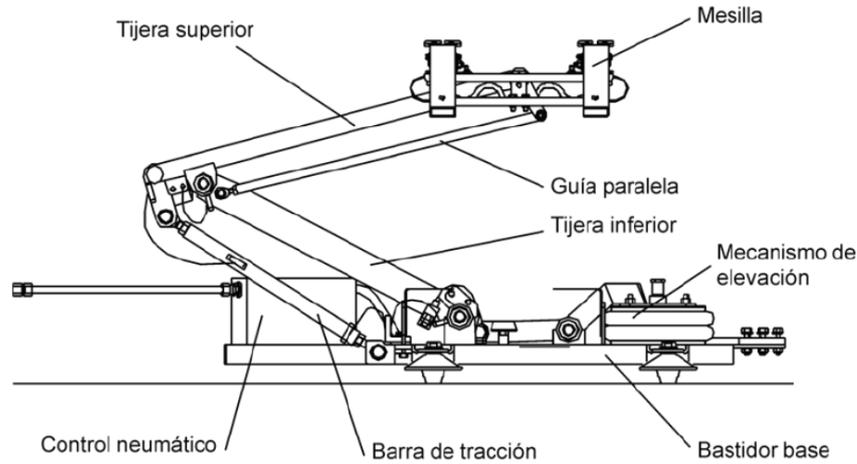
La implementación de onduladores de tensión PWM implementados con transistores IGBT en la tracción eléctrica ferroviaria, ha supuesto una simplificación en los circuitos de electrónica de potencia en comparación a los onduladores de corriente, al no ser necesario el bloque chopper y eliminarse los circuitos de apagado y de filtrado de transitorios necesarios en el caso de utilizar tiristores.

Pese a tratarse actualmente y sin duda alguna, de la mejor técnica de tracción eléctrica ferroviaria disponible, tanto por su fiabilidad, disponibilidad, como su mantenibilidad, presenta dos inconvenientes en su implementación práctica; la aparición de armónicos de gran magnitud que pueden interferir tanto en la red de alimentación, como en el resto de equipos eléctricos y electrónicos embarcados en el tren, y la aparición de tensiones inducidas en el eje de los motores de tracción, que pueden dañar considerablemente los rodamientos de los mismos.

## 4.2. Bloques constructivos de los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria

Se describen de forma sucinta los bloques constructivos que conforman y agrupan los componentes de un sistema de tracción eléctrico ferroviario; pantógrafo, disyuntor, cofre de aparellaje eléctrico, cofre de potencia, regulador de marcha, resistencia y motores de tracción.

- Pantógrafo: La conexión a la red para la alimentación eléctrica del tren la efectúa el pantógrafo, que es el equipo encargado de conectar con el hilo de trabajo electrificado, denominado como catenaria.



[CAF (2003)]

Figura 44 – Elementos constructivos de un pantógrafo

- Disyuntor: Después del pantógrafo, la corriente llega al disyuntor, que es un interruptor que permite el paso de dicha corriente para la alimentación de los motores de tracción, y que la interrumpe cuando se retira el tren del servicio, o cuando se desconecta por telemando eléctrico o cuando salta de forma automática para proteger a los motores de sobre intensidades. El disyuntor se monta en un cofre bajo el bastidor de la caja de los trenes.



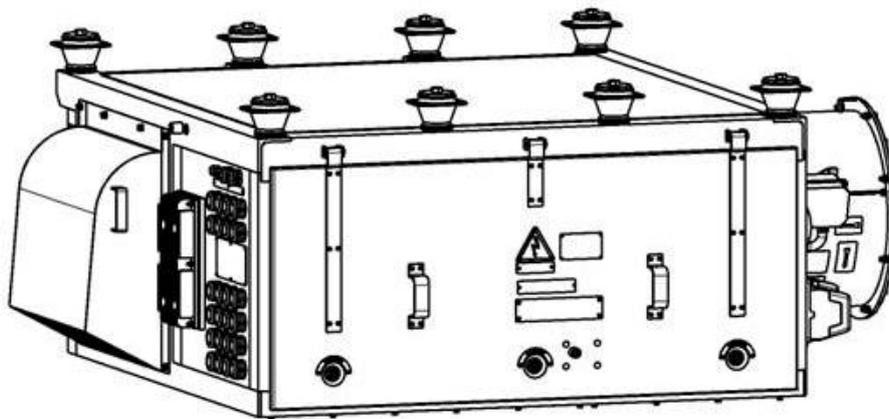
[CAF (2003)]

Figura 45 – Elementos constructivos de un disyuntor

- Cofre de aparellaje eléctrico de tracción: es uno de los bloques que más ha evolucionado con la implantación de las diferentes técnicas de tracción eléctrica ferroviaria. El cofre (o cofres) de aparellaje eléctrico de tracción se monta bajo el bastidor de la caja de los trenes, y en algunas aplicaciones, dependiendo de los componentes que integre (si son disipativos) cuenta con ventilación forzada, para su refrigeración. En la técnica reostática, es necesario un gran número de relés y contactores, ya que se utilizan para la configuración de los motores de corriente continua en marcha (serie/paralelo), freno, sentido de marcha, etc. Asimismo, las órdenes de control de entrada y salida progresiva de las resistencias de marcha, freno y shuntado actúan sobre los contactores que las van intercalando en los procesos de aceleración y deceleración de los motores de tracción.

En la técnica chopper, se reduce la necesidad de este tipo de componentes, ya que no son necesarios los contactores de configuración de motores serie/paralelo, ni los asociados a las resistencias de marcha y shuntado. El resultado es una disminución importante del número de componentes en un 50% aproximadamente.

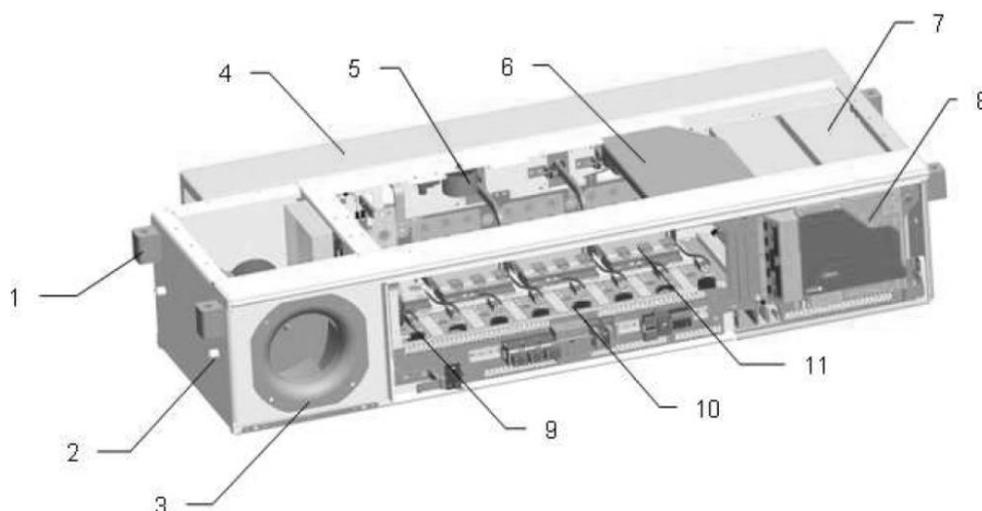
Las técnicas trifásicas, y en especial la de ondulator de tensión, reducen aún más la utilización de aparellaje eléctrico en los circuitos de tracción, ya que por un lado no son necesarios para cambiar el sentido de giro de los motores, y se utilizan interruptores estáticos (tiristores, etc.) para las configuraciones de los circuitos en marcha y freno. El número de relés y contactores en los circuitos de tracción en estas técnicas es más de un 80% inferior al caso de la técnica reostática.



[CAF (1987)]

Figura 46 – Ejemplo de cofre de aparellaje eléctrico de tracción

- Cofre de electrónica de potencia de tracción: En el cofre (o cofres) de electrónica de potencia de tracción se integran todos los componentes electrónicos; tiristores, diodos, resistencias, condensadores, inductancias, etc., necesarios para realizar el control y regulación de los motores de tracción. Este cofre se ubica en los bajos de la caja de los trenes, y necesita de refrigeración, normalmente forzada por aire mediante un ventilador.

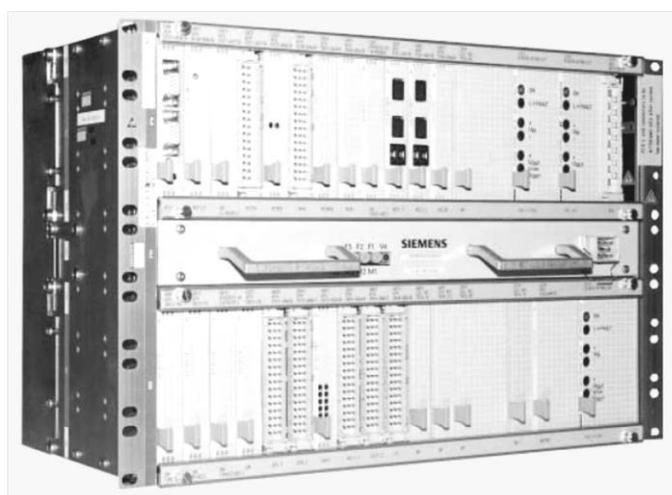


[CAF (2003)]

Figura 47 – Bloques principales del cofre de un ondulator de tensión ferroviario

- **Regulador de marcha:** Para efectuar el control lógico de las secuencias de marcha y freno eléctrico en cualquiera de las técnicas de tracción ferroviarias, es necesario contar un potente sistema de regulación que se implementa sobre una arquitectura software/hardware de tarjetas electrónicas controladas por microprocesadores. Estos equipos se suelen montar en los cofres de aparellaje eléctrico o en el cofre de electrónica de potencia.

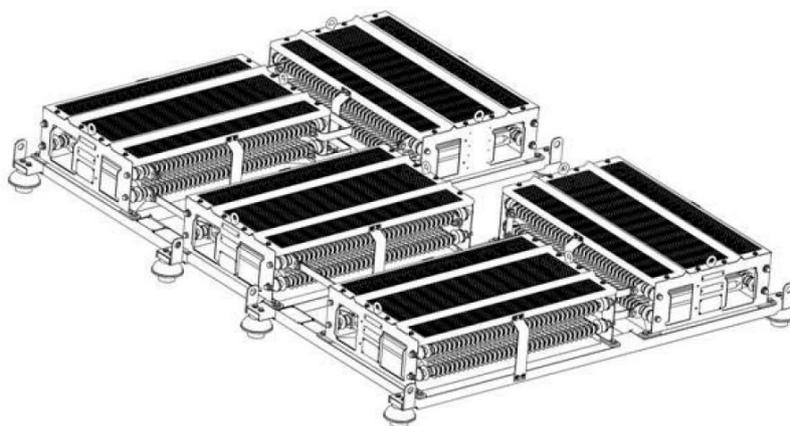
En general, el sistema de regulación de marcha para la tracción ferroviaria es un desarrollo específico, existiendo actualmente en el mercado diversos sistemas comerciales propietarios. También se puede desarrollar el sistema sobre un PLC (Programmable Logic Controller) para aplicaciones generales, si bien presenta muchos inconvenientes para implementar el control de los bloques de potencia chopper y ondulator.



[SIEMENS (2011)]

Figura 48 – Estructura modular por tarjetas electrónicas de un regulador de marcha

- **Resistencias:** Las resistencias de potencia son necesarias en todos los sistemas de tracción ferroviario, para disipar la energía generada en el proceso de frenado eléctrico, actuando los motores de tracción como generadores, si la red de alimentación no es capaz de absorber esta energía. Asimismo, y en el caso de la técnica reostática son necesarias resistencias, para efectuar el arranque de los motores de tracción de corriente continua. Se trata de elementos de gran volumen y peso, y dada su condición disipativa de energía no se alojan en cofres para favorecer la evacuación del calor generado, siendo montados a la intemperie bajo la caja de los trenes.



[CAF (2003)]

Figura 49 – Detalle constructivo de un conjunto de resistencias de frenado

- **Motores de tracción:** En las aplicaciones ferroviarias analizadas, la ubicación de los motores de tracción es en los bogies, existiendo la posibilidad de que se ubiquen en la caja vehículo, transmitiendo el par motor a los bogies mediante un acoplamiento mecánico. Los motores de corriente continua son menos robustos que los motores de corriente alterna y mucho menos eficientes, tanto en coste material como en mantenimiento, porque necesitan un mantenimiento regular del colector y de las escobillas, aspecto muy importante en tracción ferroviaria. Un motor de corriente alterna asíncrono trifásico de jaula, como los empleados en tracción ferroviaria, tiene dos partes principales: un inductor o estator y un inducido o rotor.

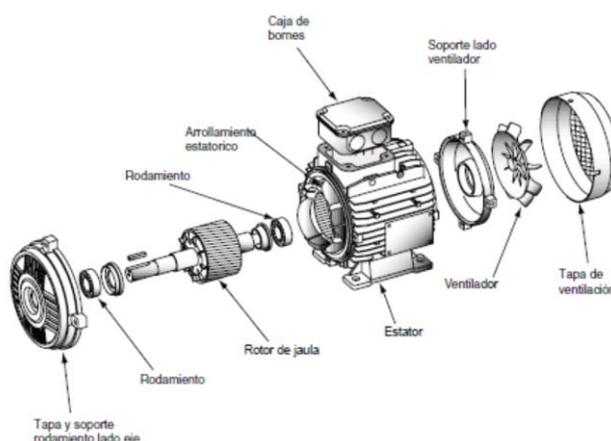
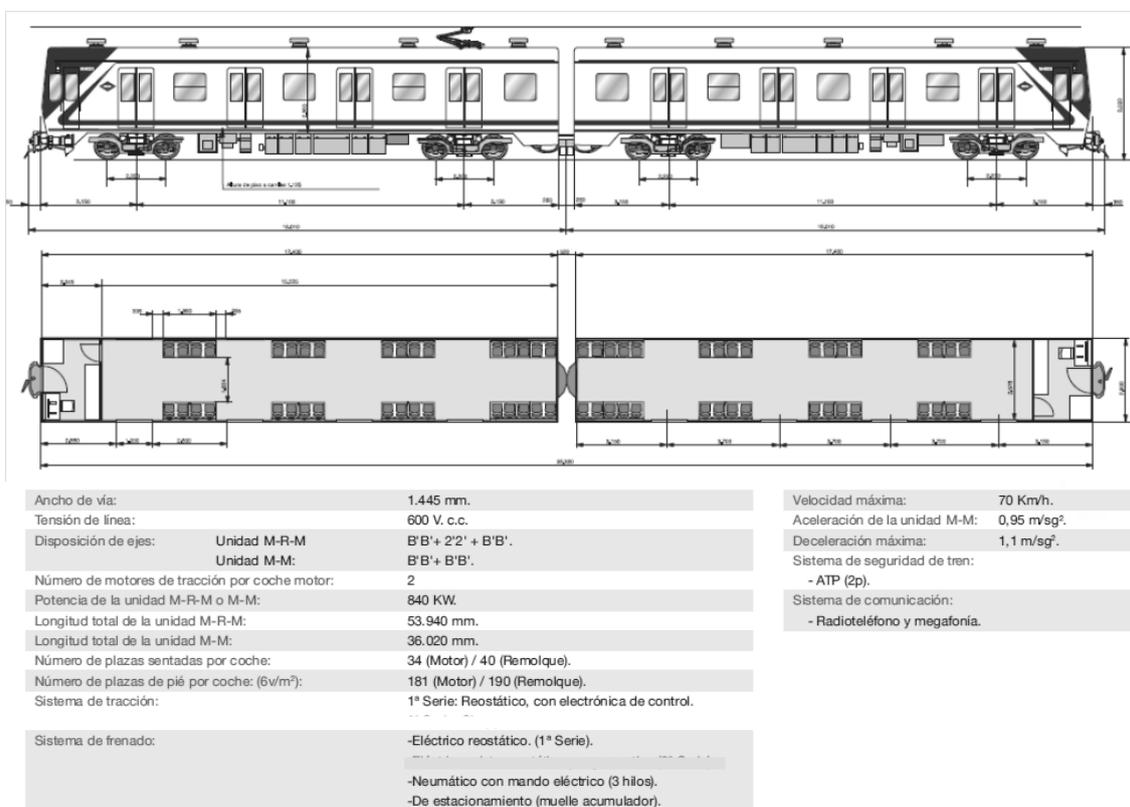


Figura 50 – Detalle constructivo de un motor de corriente alterna con rotor de jaula

### 4.3. Trenes serie 5000-1ª

Estos trenes disponen de un sistema de tracción eléctrica de **técnica reostática**, y son configuración coche motor – coche motor (MM) fabricados en el año 1975, y cuyas características básicas se adjuntan.



#### PESOS DE LOS COCHES SERIE 5000 1ª y 2ª

Pesos (Kgs.)	Motor 1ª S.
Caja	17.200
Bogie sin motor	5.800
Motor	1.600
Total en servicio	32.000

[METRO DE MADRID (2015)]

Figura 51 – Características básicas de los trenes de la serie 5000-1ª

Todas las cajas han sido construidas por CAF, mayoritariamente en Zaragoza, aunque también hay algunas construidas en Beasain y en Irún. La caja es de estructura de acero siendo el forrado interior en paneles estratificados. Los enganches extremos son Scharfenberg automáticos con botoneras laterales, y los intermedios son Scharfenberg semipermanentes. En cuanto al equipo eléctrico de tracción, en la 1ª serie la regulación se efectúa mediante un reóstato con combinador y resistencias. El diseño es de AEG en todos y están fabricados por ésta y por WESA. La generación de energía en baja tensión se efectúa mediante un grupo motor-generador rotativo.

El equipo neumático y de freno es de la Sociedad Española de Frenos, Calefacción y Señales. El compresor de aire es Knorr, alternativo. El freno neumático tiene mando eléctrico mediante tres hilos, y actúa sobre discos calados en el eje. El freno eléctrico es reostático. Los coches 5000 están dotados de equipos de ATP y ATO de Dimetronic, así como de equipos de radiotelefonía y megafonía. Los bogies de los coches 5000 fueron diseñados por la firma francesa MTE, y construidos por ésta en una pequeña cantidad para los coches de la 1ª serie, y por CAF para el resto de los coches 5000.

Se trata de un bogie monomotor, con el motor de tracción ubicado en posición longitudinal. La suspensión primaria es de resortes tipo campana, Kleber o Metalocaucho (existen todavía algunas Clouth), mientras que la suspensión secundaria es neumática Sumiride.

El motor de tracción de CC es de diseño Jeumont-Schneider (fabricado por WESA) en la 1ª serie. La transmisión se efectúa mediante reductores Berliet fabricados por CAF y transmisiones cardan. Las ruedas son elásticas, del tipo Bochum 54, fabricadas por CAF. Los bandajes están fabricados por CAF y por Cockerill (Bélgica). El diámetro máximo es de 860 mm, y el mínimo de 810 mm.

#### 4.4. Trenes serie 5000-4ª

Estos trenes cuentan con un sistema de tracción eléctrico de la **técnica chopper**, y están en configuración coche motor – coche motor (MM) fabricados en el año 1993, y cuyas características básicas se adjuntan se adjuntan.

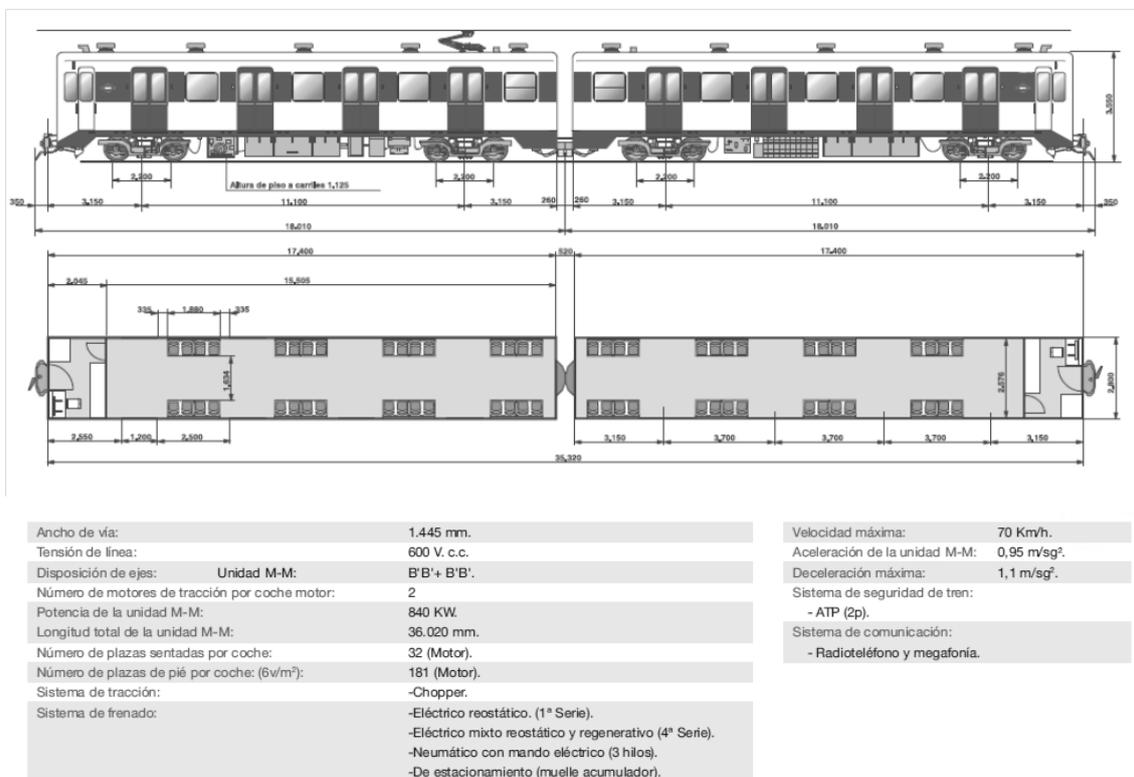
Los trenes de la serie 5000-4ª son constructivamente muy similares a los de la 1ª serie. Todas las cajas han sido construidas por CAF, mayoritariamente en Zaragoza, aunque también hay algunas construidas en Beasain y en Irún. La caja es de estructura de acero siendo el forrado interior en paneles estratificados. Los enganches extremos son Scharfenberg automáticos con botoneras laterales, y los intermedios son Scharfenberg semipermanentes.

En cuanto al equipo eléctrico de tracción, en la 4ª serie la regulación se efectúa mediante un chopper implementado con tiristores. El diseño es de AEG en todos y están fabricados por ésta y por WESA. La generación de energía en baja tensión se efectúa mediante un convertidor estático.

El equipo neumático y de freno es de la Sociedad Española de Frenos, Calefacción y Señales. El compresor de aire es Knorr, alternativo. El freno neumático tiene mando eléctrico mediante tres hilos, y actúa sobre discos calados en el eje. El freno eléctrico es mixto reostático-regenerativo. Los coches 5000 están dotados de equipos de ATP y ATO de Dimetronic, así como de equipos de radiotelefonía y megafonía.

Los bogies de los coches 5000 fueron diseñados por la firma francesa MTE, y construidos por CAF para el resto de los coches 5000. Se trata de un bogie monomotor, con el motor de tracción ubicado en posición longitudinal. La suspensión primaria es de resortes tipo campana, Kleber o Metalocaucho, mientras que la suspensión secundaria es neumática Sumiride.

El motor de tracción de CC es de diseño AEG (fabricado por ésta, WESA y Conelec). La transmisión se efectúa mediante reductores Berliet fabricados por CAF y transmisiones cardan. Las ruedas son elásticas, del tipo Bochum 54, fabricadas por CAF. Los bandajes están fabricados por CAF y por Cockerill (Bélgica). El diámetro máximo es de 860 mm, y el mínimo de 810 mm.



#### PESOS DE LOS COCHES SERIE 5000 4ª

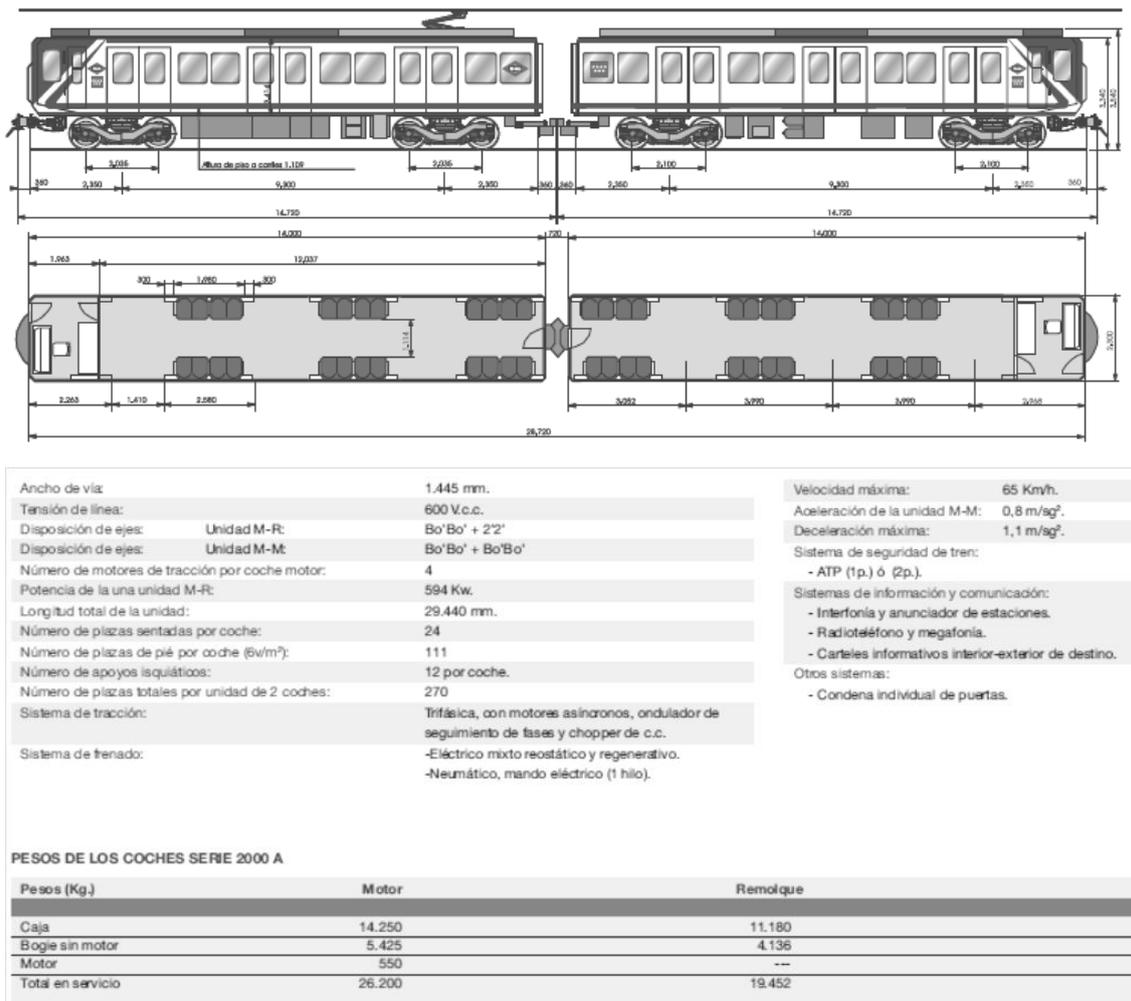
Peso (Kgs.)	Motor 4 S.
Caja	18.700
Bogie sin motor	5.800
Motor	1.100
Total en servicio	32.500

[METRO DE MADRID (2015)]

Figura 52 – Características básicas de los trenes de la serie 5000-4ª

## 4.5. Trenes serie 2000-B

Estos trenes están dotados de un sistema de tracción eléctrica con **técnica trifásica – ondulator de corriente**, en configuración coche motor – coche remolque (MR) fabricados entre los años 1996 y 1998, y cuyas características básicas se adjuntan.



[METRO DE MADRID (2015)]

Figura 53 – Características básicas de los trenes de la serie 2000-B

Las cajas han sido construidas por CAF, mayoritariamente en Zaragoza, aunque también hay algunas construidas en Beasain, además de por Macosa en Barcelona, y por Ateinsa en Madrid. El interiorismo está efectuado a base de paneles de poliéster reforzado con fibra de vidrio. Los enganches extremos son Scharfenberg automáticos con botoneras laterales, y los intermedios son Scharfenberg semipermanentes.

El equipo eléctrico es trifásico, con chopper y ondulator de seguimiento de fases implementado con tiristores. La refrigeración de la electrónica de potencia se efectúa mediante fluidos refrigerantes. El diseño de este equipo es de AEG, fabricado por ésta y por Conelec, así como por las empresas que les han ido sucediendo (ABB, Adtranz y Bombardier). El regulador electrónico de marcha es, el Sibas-16 de Siemens. La energía en baja tensión se genera mediante un convertidor estático, que puede ser AEG o Sepsa.

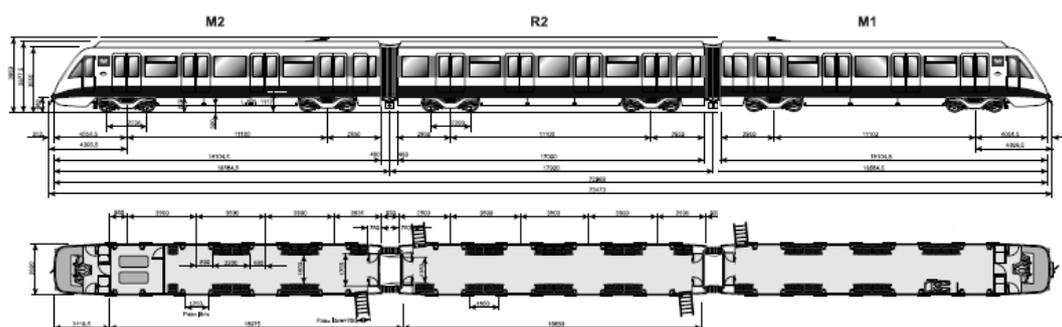
El equipo neumático y de freno es de la Sociedad Española de Frenos. El compresor de aire es Hydrovane, rotativo, o Knorr, alternativo. El freno neumático tiene mando eléctrico mediante un solo hilo, con transmisión de órdenes codificada, y actúa sobre discos calados en el eje en los coches motores y sobre zapatas que actúan sobre la llanta en los coches remolques. El freno eléctrico es mixto reostático-regenerativo.

Los coches están dotados de equipos de ATP y ATO de Dimetronic, así como de equipos de radiotelefonía y megafonía, y anunciador de estaciones. En los coches de la serie 2000, los bogies motores son diferentes de los bogies remolques. Han sido diseñados por CAF y construidos por ésta y por también por Macosa, en los coches fabricados por este constructor.

Los bogies motores poseen dos motores de tracción, longitudinales y abrochados entre sí y al reductor de la transmisión, los cuales pueden ser de los tipos Hurth o Thyssen. La suspensión primaria es de resortes tipo campana, Clouth o Metalocaucho (MTC) mientras que la suspensión secundaria es neumática Sumiride. El motor de tracción de CA es de diseño AEG, fabricado también por CONELEC, ABB, Adtranz y Bombardier.

#### 4.6. Trenes serie 8000

Los trenes de esta serie cuentan con el **sistema de tracción eléctrica con la técnica trifásica – ondulator de tensión**, en configuración coche motor – coche remolque – coche motor (MRM) fabricados en el año 2000, y cuyas características básicas se adjuntan.



Año de fabricación:	2000/2002	Velocidad máxima:	110 Km/h.
Ancho de vía:	1.445 mm.	Aceleración de la unidad M-R-M:	1 m/sg <sup>2</sup> .
Tensión de línea:	1500 V. c.c.(39U) y 1500/600 V.c.c. (8U).	Deceleración máxima:	1,2 m/sg <sup>2</sup> .
Disposición de ejes:	Unidad M-R-M: Bo'Bo' + 2'2' + Bo'Bo'.	Sistema de seguridad de tren:	- ATP (AM y FM) y ATO.
Disposición de ejes:	Unidad M-R-S-M: Bo'Bo' + 2'2' + Bo'Bo' + Bo'Bo'.	Sistemas de información y comunicación:	- Radioteléfono y megafonía. - Interfono y anunciador de estaciones. - Carteles informativos interior-exterior de destino.
Número de motores de tracción por coche motor:	4	Confort:	- Aire acondicionado.
Potencia de un coche motor/de una unidad M-R-M / M-R-S-M:	760/1.520 Kw / 2.280 kw.	Otros sistemas:	- Sistema de "Caja negra". - Pasillo intercomunicador. Videovigilancia. - Condens individual de puertas. - Detección y extinción de incendios. - Bastidor y caja de aluminio. - Videotrenamiento. - Escalera desalojo (evacuación).
Longitud total de la unidad M-R-M / M-R-S-M:	55.049 mm. / 72.969 mm.		
Número de plazas sentadas coche M:	22+1PMR.		
Número de plazas sentadas coche R y S:	28		
Número de plazas de pie por coche M (6v/m <sup>2</sup> ):	171		
Número de plazas de pie por coche R y S (6v/m <sup>2</sup> ):	193		
Número total de plazas por unidad M-R-M / M-R-S-M:	607 + 2 PMR / 828 + 2 PMR.		
Transmisión de órdenes:	Por buses de comunicaciones.		
Sistema de tracción:	Trifásica, con motores asíncronos, ondulator directo. Utilización de IGBT.		
Sistema de frenado:	-Eléctrico mixto reostático y regenerativo. -Neumático, mando eléctrico (1 Hilo). -De estacionamiento (muelle acumulador).		

PESOS DE LOS COCHES SERIE 8000					
Pesos (Kg.)	Coche M1	Coche S2	Coche R2	Coche M2	Total unidad
<b>Subserie línea 8</b>					
Caja	22.281	20.105	18.296	22.235	
Bogie motor compl.	7.530	7.530	---	7.530	
Bogie sin motores	6.390	6.390	5.022	6.390	
<b>Total</b>	<b>37.341</b>	<b>35.165</b>	<b>28.340</b>	<b>37.295</b>	<b>138.141</b>

[METRO DE MADRID (2015)]

Figura 54 – Características básicas de los trenes de la serie 8000

La caja de las unidades 8000 está construida por CAF en aluminio, incluyendo el bastidor, con cuatro puertas por costado para acceso de viajeros, del tipo desplazable deslizante IFE. El accionamiento de las puertas es mediante motores eléctricos. Los coches poseen pasillo de intercirculación Hübner entre todos ellos, formando así una composición de tres coches interiormente continua. También se encuentran dotados de dispositivos anti-climber en los testeros.

El equipo de tracción, diseñado y construido por Bombardier, es trifásico con onduladores PWM directos de red y componentes de potencia IGBT. El control de este equipo se efectúa mediante electrónica de control dotada de microprocesadores. El frenado de servicio es eléctrico mixto reostático y regenerativo, y el freno neumático (que es también el freno de servicio en los remolques), es Knorr, así como el compresor.

Las unidades 8000 se encuentran dotadas de aire acondicionado Merak, con calefacción. Poseen un equipo de control de sistemas auxiliares, un equipo de registro de los parámetros de seguridad durante la marcha, y un sistema de información al viajero y de megafonía, todos ellos de Sepsa. También poseen un sistema de videovigilancia, y en cuanto a las comunicaciones, disponen de un sistema de radiotelefonía digital Tetra fabricado por Amper. Igualmente, se encuentran dotadas de sistemas de protección de tren (ATP) y conducción automática (ATO) suministrados por Dimetronic. El sistema de ATP se basa en criterios de distancia objetivo y no de velocidad objetivo, como ocurría en los trenes de las generaciones anteriores.

Los bogies de los coches 8000 han sido diseñados por CAF, y construidos por ésta y por Alstom. Existen bogies motores y remolques, que son iguales salvo en lo relativo a los dispositivos de motorización y transmisión. El bastidor del bogie de los coches 8000 tiene forma de H abierta por los cabeceros, con los largueros principales en forma de ala de gaviota. La suspensión primaria es de campanas de caucho, y la secundaria es neumática Knorr. Las ruedas son enterizas insonorizadas, con un diámetro máximo de 860 mm y mínimo de 790 mm.

El bogie motor posee dos motores de tracción, trifásicos asíncronos, con rotor en jaula de ardilla, construidos por Siemens. Estos motores de tracción van ubicados en posición longitudinal, abrochados entre sí y a los reductores de la transmisión. Estos tienen ataque cónicohipoide y han sido fabricados por Flender.

## 5. ESCALERAS MECÁNICAS

---

*Si quieres subir una escalera larga, no mires hacia ella, mira cada peldaño.*

*-Leonardo Boff-*

**L**a escalera mecánica se define como una escalera motorizada, inclinada, en continuo movimiento, utilizada para subir o bajar personas en la que la superficie de transporte (por ejemplo escalones) permanece horizontal.

En el espacio europeo las escaleras mecánicas cuentan con diferentes normas técnicas para su fabricación, instalación y mantenimiento, emitidas por el CEN/CENELEC y trasladadas por AENOR al estado español. Las normas centrales que se deben de tener en cuenta en esta materia son:

- UNE-EN 115-1:2009+A1:2010: Seguridad de escaleras mecánicas y andenes móviles. Parte 1: Construcción e instalación.
- UNE-EN 115-2:2011: Seguridad de escaleras mecánicas y andenes móviles. Parte 2: Reglas para la mejora de la seguridad de las escaleras mecánicas y de los andenes móviles existentes.
- UNE-CEN/TS 115-4: Seguridad de escaleras mecánicas y andenes móviles. Parte 4: Interpretaciones relativas a las normas de la familia EN 115.
- UNE-EN 13015:2002+A1: Mantenimiento de ascensores y escaleras mecánicas. Reglas para instrucciones de mantenimiento.
- UNE-EN 12015:2014: Compatibilidad electromagnética. Norma de familia de productos para ascensores, escaleras mecánicas y andenes móviles. Emisión.
- UNE-EN 12016:2014: Compatibilidad electromagnética. Norma de familia de productos para ascensores, escaleras mecánicas y andenes móviles. Inmunidad.

Estas normas no son de obligado cumplimiento en el Estado español, ya que el Reglamento de Aparatos de Elevación y Manutención de los mismos, Real Decreto 2291/1985, de 8 de noviembre, nunca ha desarrollado la Instrucción Técnica Complementaria de escaleras mecánicas, si bien casi el 100% de los fabricantes se acogen a ellas para su diseño y comercialización. A falta de reglamentación específica en España es de aplicación a las escaleras mecánicas el Real Decreto 1644/2008, de 10 de octubre, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas.

La norma UNE-EN 115-1:2009+A1:2010 analiza los peligros en el uso de una escalera mecánica, al objeto de justificar los requisitos de diseño en su apartado 5:

- 5.1 Generalidades.
- 5.2 Estructura portante.
- 5.3 Escalones, placas, banda.
- 5.4 Maquinaria de Accionamiento.
- 5.5 Balaustrada.
- 5.6 Pasamanos.
- 5.7 Rellanos.
- 5.8 Recintos para la maquinaria, estaciones de accionamiento y retorno.
- 5.9 Protección contra incendios.
- 5.10 Transporte.
- 5.11 Instalaciones y aparatos eléctricos.
- 5.12 Protección contra fallos eléctricos.

La norma incluye un apartado para la verificación de los requisitos de seguridad y/o medidas de protección y otro para las prescripciones de utilización. Los anexos informativos A al K incluyen detalles técnicos para el diseño y cálculo constructivo de una escalera mecánica.

La norma UNE-EN 115-2:2011 tiene como objeto mejorar la seguridad en las escaleras mecánicas fabricadas con anterioridad a la entrada en vigor de la norma UNE-EN 115-1:2009+A1:2010, ya que las normas anteriores eran mucho menos restrictivas que esta última. Esta norma propone un procedimiento para evaluar y tomar acciones correctoras en las escaleras fabricadas con anterioridad al 2010:

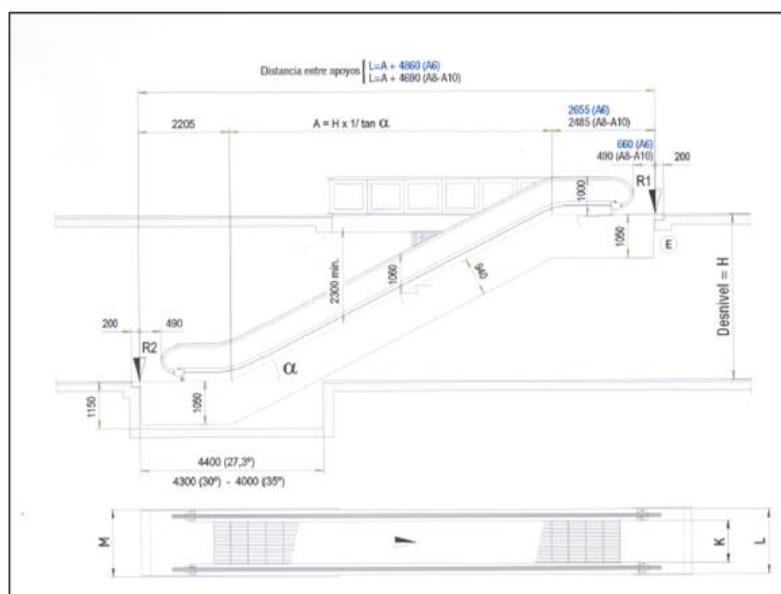
- categoriza varios peligros y situaciones peligrosas, cada uno de los cuales ha sido analizado mediante una evaluación de riesgos (véase en particular el anexo A);
- pretende facilitar acciones correctoras para mejorar progresiva y selectivamente, paso a paso, la seguridad de todas las escaleras mecánicas y andenes móviles existentes hacia el estado del arte actual de seguridad;
- permite que cada escalera mecánica y andén móvil sea auditado y que las medidas de seguridad sean identificadas e implementadas en un proceso, paso a paso y de manera selectiva, de acuerdo a la frecuencia y severidad de cada riesgo elemental;
- lista de los riesgos altos, medios y bajos y las acciones correctivas que se pueden aplicar en pasos separados para reducir los riesgos.

La norma UNE-CEN/TS 115-4:2015 recoge las interpretaciones a la Norma EN 115-1:2008+A1:2010. Las interpretaciones (aclaraciones) tienen como objetivo mejorar la comprensión de los capítulo(s) a los que se están refiriendo y facilitar el entendimiento común entre los fabricantes, instaladores de aparatos de elevación, organismos notificados, organismos de inspección y las autoridades nacionales. Las interpretaciones no tienen el mismo estatus que las normas a las que están vinculados. Sin embargo, la aplicación de interpretaciones debería dar la confianza a las partes interesadas que la norma en cuestión no se ha aplicado erróneamente.

La norma UNE-EN 13015:2002+A1 especifica los elementos necesarios para la preparación de instrucciones para las operaciones de mantenimiento, que se proporcionan para nuevas instalaciones de ascensores de pasajeros, de pasajeros y mercancías, de sólo accesibles para mercancías, mini-cargas, escaleras mecánicas y andenes móviles. Esta norma europea no cubre las instrucciones para el montaje y el desmontaje o cualquier comprobación legal y ensayos basados en reglamentaciones nacionales. En resumen es una guía para elaborar las instrucciones de mantenimiento de ascensores y escaleras mecánicas.

## 5.1. Las escaleras mecánicas TNE

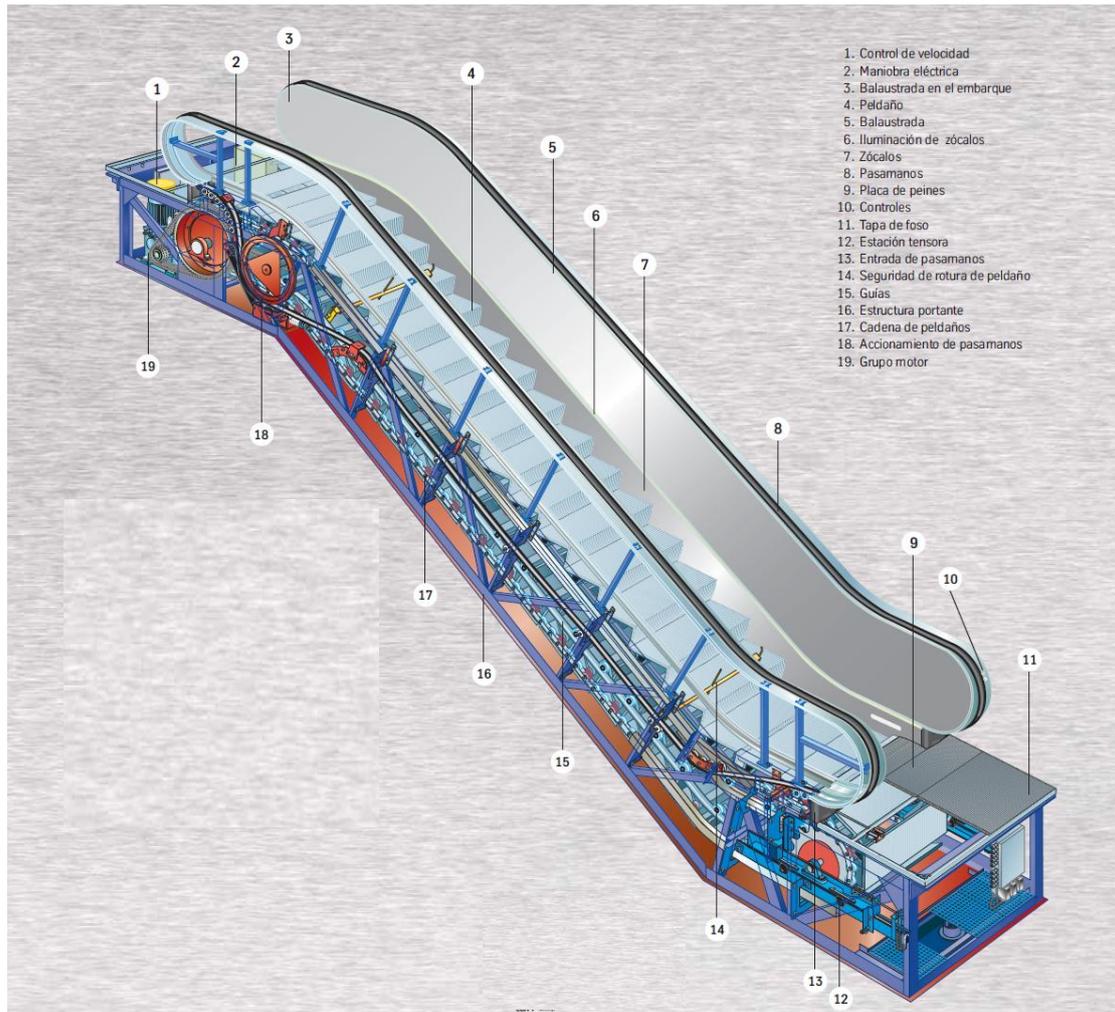
Las escaleras mecánicas modelo TNE20XX son del fabricante THYSSEN, y se comercializan bajo el nombre comercial "Avante". Se instalaron en el Metro de Madrid en el año 2005 y las características dimensionales básicas se recogen la figura adjunta.



Ancho de peldaño	Dimensiones (mm-pies)		
	K	L	M
A6	600-1' 11 <sup>5/8</sup> ''	1126-3' 8 <sup>5/16</sup> ''	1190-3' 10 <sup>7/8</sup> ''
A8	800-2' 7 <sup>7/16</sup> ''	1330-4' 4 <sup>3/8</sup> ''	1390-4' 6 <sup>3/4</sup> ''
A10	1000-3' 3 <sup>3/8</sup> ''	1534-5' 0 <sup>3/8</sup> ''	1590-5' 2 <sup>5/8</sup> ''

[ThyssenKrupp (2005)]

Figura 55 – Dimensiones constructivas de escaleras mecánicas TNE



[ThyssenKrupp (2005)]

Figura 56 – Bloques constructivos de escaleras mecánicas TNE

Los bloques constructivos de la escalera mecánica TNE son los siguientes:

- Estructura de soporte: La estructura de soporte está compuesta por un bastidor soldado de perfiles abiertos de acero. Las piezas laterales están unidas por travesaños y una chapa de acero soldada estanca al aceite de 4 mm de espesor (5 mm para una estructura de soporte galvanizada). Está diseñada para una carga de tráfico de 5000 N/m<sup>2</sup>. El pandeo máximo bajo carga de tráfico es 1/1000 máx. de la distancia de soporte.
- Accionamiento: El accionamiento de bajo nivel de ruido de la escalera mecánica está situado compactamente en la estación inversora superior antes del giro de los peldaños. Todo el accionamiento, incluidos el freno y el control de velocidad, es de fácil acceso sin retirar ningún peldaño. La banda de peldaños puede moverse manualmente girando el volante de inercia. Una gran abertura en el volante de inercia con un ventilador integrado permite una buena refrigeración del motor. El motor especial de 400V<sub>CA</sub> de la escalera mecánica con engranaje reductor de montaje sobre brida está instalado verticalmente.

Un engranaje de cadena acciona el eje principal. Dependiendo de la altura de desplazamiento, se utiliza una cadena doble 1 1/4" o 1 1/2". Las cadenas de accionamiento están diseñadas con un sistema de protección de cinco pliegues mínimo contra la rotura.

- Banda de peldaños: En las áreas de entrada y salida de la escalera mecánica los peldaños están guiados de forma que los bordes delanteros de los peldaños salientes y los bordes traseros de los peldaños entrantes tengan una trayectoria horizontal mínima de 0,8 m. El radio de la curva de enlace superior e inferior entre la sección inclinada y la horizontal de la escalera mecánica es de 1050 mm. Las cadenas de precisión de rodillos se fabrican especialmente para escaleras mecánicas. Después de su fabricación las cadenas se sumergen en aceite protector para evitar la corrosión. El paso de la cadena es de 135 mm, cada tercer bulón de cadena toma la forma de un bulón de peldaño. La cadena y los bulones de peldaño son de acero templado. El gran diámetro del bulón de cadena de 14,63 mm asegura una presión superficial muy pequeña para una mayor vida útil de la cadena. Los peldaños están fabricados de aluminio fundido a presión.
- Estación tensora: La estación tensora de la cadena está situada en la estación inversora inferior dentro de la estructura de soporte. Es fácilmente accesible para trabajos de mantenimiento a través de la tapa desmontable. Las ruedas para el retorno de las cadenas están fijadas de forma permanente a un eje compartido. Este eje está montado en un raíl tensor, que permite un movimiento horizontal por medio de cuatro rodillos.
- Zócalo: El zócalo rígido en ambos lados de la banda de peldaños evita con eficacia la entrada de cuerpos extraños entre los peldaños y la banda de peldaños. Un perfil en C adicional detrás del zócalo incrementa la rigidez. El espacio se mantiene en una anchura muy reducida de un máximo de 3 mm a lo largo de toda su longitud. Para reducir la fricción entre los zapatos del usuario y el material del zócalo, éste está revestido con detonación de baja fricción.
- Balaustradas: Las balaustradas están fabricadas de cristal de seguridad templado transparente rígido de una hoja de 10 mm de grosor. La balaustrada tiene una altura constante de 1000 mm. Las curvas de entrada del pasamanos son semicirculares. Los perfiles de aluminio mantienen el cristal en su lugar con seguridad a lo largo de todo el borde inferior con una distribución uniforme de la presión.
- Pasamanos: Los pasamanos son de caucho negro de fácil cuidado. Están montados con cable de acero de bajo estiramiento y una capa deslizante de poliéster. Están fabricados con un método de producción continuo de forma que la pieza vulcanizada en la junta del pasamanos no es visible. La carga de rotura del pasamanos está adaptada a la altura de desplazamiento de la escalera mecánica es por lo menos de 25 kN.

- 
- Equipo eléctrico: Toda las instalaciones eléctricas están situadas dentro de la estructura de soporte de acuerdo con los reglamentos VDE. La tensión de alimentación debe ser conectada al controlador en la estación de accionamiento por el cliente.
  - Maniobra eléctrica: PLC con display de diagnóstico numérico.
  - Sistema de Seguridad de Movimiento: Compuesto por los siguientes elementos formando una “cadena de seguridades”:
    - Botones de parada de emergencia.
    - Contactos de la placa de peines.
    - Detectores de entrada del pasamanos.
    - Sincronismo del pasamanos.
    - Control de la longitud del pasamanos.
    - Indicador de velocidad.
    - Protección completa del motor.
    - Controlador con protección 30mA.
    - Relé de secuencia de fase.
    - Control de la cadena de accionamiento.
    - Protección del desplazamiento de los peldaños.
    - Indicador de falta de peldaño.
    - Contacto tensado cadena de peldaños.
    - Control de freno.
    - Detector de deflectores.
    - Cepillos del zócalo.
    - Contactos de las tapas de foso.

## 6. ESTUDIO NORMATIVO DE LA FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS REPARABLES

---

*Seguir las normas es siempre mucho más sencillo: te evitas los remordimientos y las culpabilidades, te ahorras las inseguridades y, encima, puedes sentirte orgullosa de lo que has hecho.*

- Matilde Asensi-

Después de profundizar en los diferentes métodos estadísticos desarrollados para el análisis de la fiabilidad de los elementos reparables en el apartado 2, Estado de Arte, se ha contrastado la existencia de una normativa europea que se enmarca dentro de las prácticas más extendidas y aceptadas por la comunidad científica internacional. No obstante, estas normas europeas contemplan tan sólo una parte muy limitada de los modelos desarrollados.

Como se ha indicado, en los métodos estadísticos desarrollados en las normas IEC, la  $z(t)$  de los sistemas reparables se puede estimar empleando un SP. Si no hay tendencia, las normas IEC asumen que se distribuyen exponencialmente y el número de fallos por unidad de tiempo se puede modelar por un HPP, entonces  $z(t)$  es constante. Para los casos en los que existe una tendencia en  $z(t)$  es de aplicación un NHPP de “reparación mínima” (“como viejo”), y se proponer modelar mediante la PLP.

Los estándares IEC no soportan el modelado RP “reparación perfecta” (“como nuevo”) cuando no hay tendencia en  $z(t)$  y los tiempos entre fallos no se distribuyen exponencialmente, advirtiendo de que la no existencia de tendencia contrastada mediante el estadístico  $U$  no garantiza que el tiempo entre fallos se distribuyan exponencialmente. Tampoco prevé el modelado con un NHPP alternativo a la PLP, del que se han publicado numerosas aportaciones para su mejora (Attardi (2005), Bettini (2007)).

Dado que las normas analizadas en el apartado 3 se han contrastado que son de plena aplicación a esta investigación, es razonable iniciar la misma ensayando y aplicando las normas según se describe en el procedimiento metodológico en aplicación de normas IEC, ver 3.9. Los procedimientos a emplear en una empresa ferroviaria deben estar preferentemente normalizados por organismos internacionales independientes, al objeto de poder efectuar una demostración objetiva de la seguridad de sus procesos de mantenimiento, ver norma EN 50126-1 (1999) para la especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad (RAMS).

Se han utilizado también las recomendaciones de la norma IEC 6300-3-1 (2003) para la selección de las técnicas de análisis y la norma IEC 61703 (2001) para la adopción de las expresiones matemáticas.

La norma IEC 60300-3-5 (2001) recoge los métodos estadísticos y procedimientos de análisis aplicables a equipos reparables. La intensidad de fallo  $z(t)$  de un elemento reparable se puede estimar empleando los sucesivos tiempos entre fallos (TBF), mediante un Proceso Estocástico (SP). Si no hay tendencia y los tiempos entre fallos se distribuyen exponencialmente, entonces  $z(t)$  es constante y en este caso se puede modelar mediante un Proceso de Poisson Homogéneo (HPP).

En los casos en los que existe una tendencia en  $z(t)$ , se modela con un Proceso de Poisson No Homogéneo (NHPP) y la norma recoge aplicar la Ley de Potencia (PLP). La norma IEC 60605-6 (2007) desarrolla los contrastes para comprobar la existencia o no de tendencia en  $z(t)$  mediante el estadístico  $U$ , tanto para un sistema reparable, como para un conjunto idéntico de sistemas reparables. En el caso de no existir tendencia, se procede a la estimación puntual de parámetros e intervalos de confianza, supuesta una distribución exponencial con la norma IEC 60605-4 (2001). Si existe tendencia en  $z(t)$ , se realiza la estimación de los parámetros del modelo de PLP con la norma IEC 61710 (2013). Esta investigación se ha efectuado sobre:

- a) El sistema de tracción eléctrica de 36 trenes de la serie 5000-4<sup>a</sup>.
- b) El sistema de tracción eléctrica de 88 trenes de la serie 2000-B.
- c) El sistema de tracción eléctrica de 23 trenes de la serie 8000.
- d) 40 escaleras mecánicas del modelo TNE.

No ha sido posible efectuar los ensayos de los trenes de la serie 5000-1<sup>a</sup> que disponen de un sistema de tracción eléctrica de técnica reostática porque sólo se disponen de los datos de averías desde el año 1988 y dado que esta serie se puso en circulación en el año 1975, no es posible realizar los estudios estadísticos al carecer de una parte de los datos fundamentales de su comportamiento al inicio de su vida útil.

Los sistemas de tracción de los trenes están compuestos por elementos reparables, ya que en el caso de que se averíe, por ejemplo un motor de tracción, este es desmontado para su reparación en un taller, y montaje de un motor útil. Los sistemas de tracción son eminentemente eléctricos y electrónicos.

Las escaleras mecánicas también está compuestas por elementos reparables que si fallan son cambiados por otros repuestos útiles, siendo en este caso los predominantes los componentes electromecánicos. Se ha analizado que la naturaleza de la reparación efectuada generalmente a estos sistemas es el cambio del componente averiado por otro, concluyendo que esta reparación debe reponer el sistema a su estado operativo inicial, como una "reparación perfecta", siendo los modelos RP (incluido el HPP) los más adecuados a priori, ver Figura adjunta.

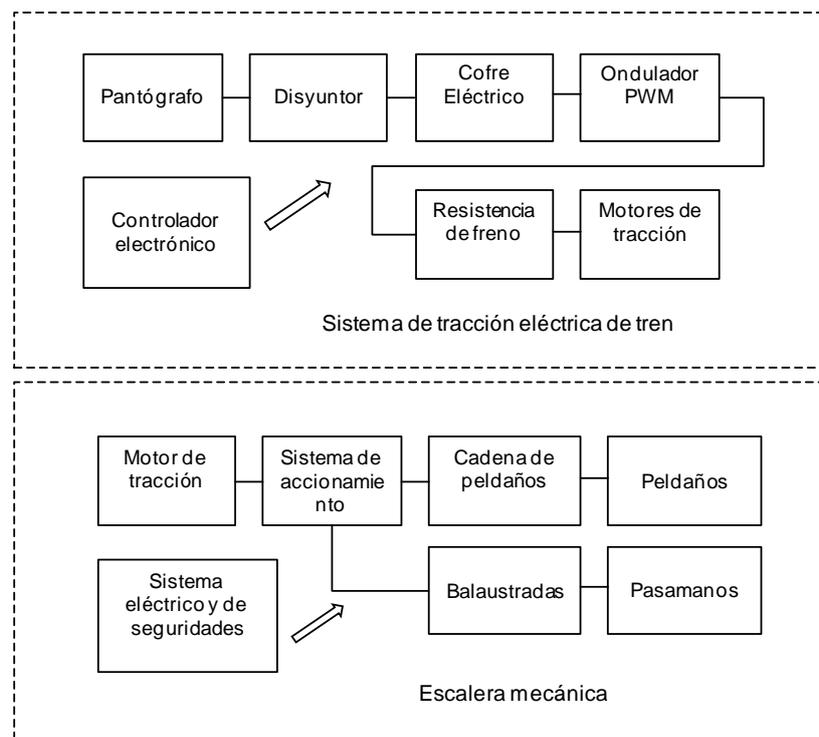


Figura 57 – Bloques de reparación de un sistema de tracción eléctrica y una escalera mecánica

Entre los estudios sobre la fiabilidad de sistemas reparables ferroviarios con modelos alternativos a los SP destacan, Anderson (1993) en locomotoras, Yongqin (1996) en sistema ATP, Bozzo (2003), Sagareli (2004) y Chen (2007) en sistemas de tracción AC. Para estudios con aplicación de modelos SP ver, Panja (2007) en señalización y Luo (2010) en control de freno.

## 6.1. Preparación y tratamiento de los datos

Para el tratamiento de los datos de campo se ha aplicado la norma IEC 60300-3-2 (2004). Respecto el tipo y tratamiento de los datos, se cuenta con datos continuos y completos para una población finita y sin muestreo. Son datos cuantitativos, sin censura y truncados por tiempo, validados en origen y sin cribado; no se elimina ningún registro de fallo, aunque la distribución parezca inicialmente anómala o fuera de los valores esperados del sistema.

Para los sistemas de tracción eléctrica se ha empleado la variable kilómetros ( $km$ ), en vez de la variable tiempo ( $t$ ) para el estudio de la fiabilidad, dado que los sistemas de tracción están sometidos en su completa operación sólo cuando el tren recorre kilómetros, no por el propio paso del tiempo. Por ejemplo, Anderson (1993) emplea los kilómetros en su estudio, ya que los sistemas de tracción son sometidos a uso y desgaste por el kilometraje recorrido traccionando.

En el sistema de tracción eléctrica de 36 trenes de la serie 5000-4<sup>a</sup> los registros de fallos corresponden al periodo del 1993-2008, es decir 16 años de explotación comercial. El kilometraje acumulado por cada tren supera 1.500.000 km. El número total de registro de fallos en los sistemas de tracción de los 36 trenes en el periodo de estudio es de 3.112.

El sistema de tracción eléctrica de 88 trenes de la serie 2000-B cuenta con los registros de fallos que corresponden al periodo del 1998-2012, es decir 15 años de explotación comercial. El kilometraje acumulado por cada tren supera 1.100.000 km. El número total de registro de fallos en los sistemas de tracción de los 88 trenes en el periodo de estudio es de 4.349.

TREN	TOTAL KILÓMETROS	Nº TOTAL FALLOS	TREN	TOTAL KILÓMETROS	Nº TOTAL FALLOS
1	1.558.028	95	19	1.573.678	69
2	1.596.175	97	20	1.587.731	67
3	1.603.409	121	21	1.651.900	75
4	1.633.340	77	22	1.601.105	84
5	1.610.401	107	23	1.594.275	88
6	1.682.072	103	24	1.547.130	60
7	1.672.608	84	25	1.596.740	78
8	1.630.363	99	26	1.491.402	90
9	1.593.031	73	27	1.615.831	100
10	1.643.983	126	28	1.621.377	62
11	1.637.886	118	29	1.574.576	72
12	1.626.085	73	30	1.551.079	100
13	1.653.920	111	31	1.557.868	68
14	1.634.162	67	32	1.529.434	66
15	1.631.779	92	33	1.572.606	79
16	1.647.438	96	34	1.568.278	80
17	1.682.277	64	35	1.574.030	85
18	1.589.800	79	36	1.622.617	107

Tabla 9 – Resumen de datos de los fallos de los sistemas de tracción en trenes 5000-4<sup>a</sup>

En el sistema de tracción eléctrica de 23 trenes de la serie 8000, los registros de fallos corresponden al periodo del 2002-2012, es decir más de 10 años de explotación comercial. El kilometraje acumulado por cada tren supera 1.500.000 km. El número total de registro de fallos en los sistemas de tracción de los 23 trenes en el periodo de estudio es de 945.

Las 40 escaleras mecánicas de la serie TNE objeto de estudio tienen también idéntico diseño técnico y constructivo, así como el mismo contexto operacional. Los registros de fallos corresponden al periodo del 2005-2014. Las horas de funcionamiento acumuladas por cada escalera superan las 68.000 horas. El número total de registro de fallos de las 40 escaleras mecánicas en el periodo de estudio es de 8.837. Puede observarse que se cuenta con una importante y detallada base de datos, que permite asegurar que los resultados que se obtienen en los análisis estadísticos tienen un alto grado de integridad.

TREN	TOTAL KILÓMETROS	Nº TOTAL FALLOS	TREN	TOTAL KILÓMETROS	Nº TOTAL FALLOS
1	1.331.755	89	45	1.330.827	45
2	1.447.380	52	46	1.340.990	46
3	1.425.548	54	47	1.344.022	40
4	1.444.476	75	48	1.378.652	53
5	1.418.379	58	49	1.382.629	46
6	1.439.461	60	50	1.372.734	52
7	1.433.915	82	51	1.381.469	41
8	1.436.241	65	52	1.349.300	74
9	1.334.124	81	53	1.393.412	36
10	1.433.524	70	54	1.482.212	38
11	1.440.680	57	55	1.554.419	45
12	1.476.449	50	56	1.557.902	78
13	1.412.099	47	57	1.495.762	47
14	1.399.773	50	58	1.459.192	58
15	1.443.421	55	59	1.533.332	64
16	1.455.118	60	60	1.523.618	60
17	1.350.482	117	61	1.540.811	31
18	1.395.945	63	62	1.548.215	23
19	1.403.692	57	63	1.546.300	51
20	1.357.921	45	64	1.464.034	28
21	1.420.499	53	65	1.472.349	37
22	1.360.205	41	66	1.490.458	58
23	1.418.130	44	67	1.274.676	61
24	1.372.824	62	68	1.290.777	43
25	1.406.302	39	69	1.220.408	41
26	1.416.129	44	70	1.221.997	42
27	1.420.175	36	71	1.273.293	40
28	1.355.824	46	72	1.282.785	53
29	1.360.641	49	73	1.223.953	24
30	1.393.116	52	74	1.196.502	26
31	1.349.288	37	75	1.244.863	38
32	1.367.785	48	76	1.190.913	31
33	1.388.835	59	77	1.225.567	29
34	1.405.714	46	78	1.231.449	19
35	1.371.400	85	79	1.207.841	36
36	1.373.322	43	80	1.179.894	48
37	1.352.884	49	81	1.202.763	29
38	1.320.162	39	82	1.210.903	22
39	1.357.668	78	83	1.197.757	34
40	1.392.882	32	84	1.179.014	36
41	1.372.955	48	85	1.191.428	52
42	1.365.268	51	86	1.201.216	50
43	1.374.335	33	87	1.153.607	50
44	1.370.362	57	88	1.233.622	36

Tabla 10 – Resumen de datos de los fallos de los sistemas de tracción en trenes 2000-B

TREN	TOTAL KILÓMETROS	Nº TOTAL FALLOS
1	1.627.107	27
2	1.568.891	64
3	1.617.751	43
4	1.697.485	30
5	1.705.437	25
6	1.732.867	31
7	1.581.330	41
8	1.727.224	65
9	1.768.675	31
10	1.692.871	45
11	1.657.216	49
12	1.648.334	37

TREN	TOTAL KILÓMETROS	Nº TOTAL FALLOS
13	1.817.021	32
14	1.770.916	70
15	1.717.176	40
16	1.702.712	42
17	1.739.525	49
18	1.830.987	34
19	1.793.792	38
20	1.805.476	57
21	1.801.005	32
22	1.680.121	29
23	1.795.483	34

Tabla 11 – Resumen de datos de los fallos de los sistemas de tracción en trenes 8000

ESCALERA	TOTAL HORAS	Nº TOTAL FALLOS
1	72.620	202
2	72.620	166
3	72.000	151
4	72.000	174
5	71.640	389
6	71.640	144
7	71.860	214
8	71.440	273
9	71.440	301
10	71.300	169
11	71.100	193
12	70.880	283
13	70.800	335
14	70.800	255
15	70.800	326
16	70.500	275
17	70.460	171
18	70.480	128
19	70.380	152
20	70.320	201

ESCALERA	TOTAL HORAS	Nº TOTAL FALLOS
21	70.120	186
22	69.920	259
23	69.760	256
24	69.640	306
25	69.500	292
26	69.480	347
27	69.360	124
28	69.340	289
29	69.280	293
30	69.200	109
31	69.080	197
32	68.980	131
33	68.360	281
34	68.120	280
35	68.080	286
36	67.100	126
37	67.100	172
38	67.100	63
39	67.100	183
40	67.100	155

Tabla 12 – Resumen de datos de los fallos en escaleras mecánicas TNE

Se intenta, en primer lugar, modelar la fiabilidad de los sistemas de tracción de los trenes y de las escaleras mecánicas, mediante la estimación de parámetros para múltiples ítems, al objeto de que una única estimación sea capaz de explicar el comportamiento de los fallos de la totalidad de cada sistema. Si se fracasa, se realiza el análisis ítem a ítem, es decir a cada tren o escalera mecánica de una forma independiente, al objeto de modelar la fiabilidad obtenida en cada tren o escalera mecánica en concreto, como proponen los estándares de IEC, procedimiento también descrito por Rigdon y Basu (2000).

El procedimiento metodológico para el análisis de la fiabilidad aplicado a la investigación de elementos reparables, se detalla en el apartado 3.9 de esta tesis.

## 6.2. Calcular el estadístico $U$ para test de tendencia de $z(t)$ para múltiples ítems

Se efectúa bajo la norma IEC 60605-6 (2007) en su apartado 7.3, con  $r_i$  número total de fallos a considerar del ítem  $i$ -enésimo,  $T_i^*$  tiempo (o km) total del ensayo terminado por tiempo ítem  $i$ -enésimo,  $T_{ij}$  tiempo (o km) acumulado del ensayo a considerar en el fallo  $j$ -enésimo del ítem  $i$ -enésimo y  $k$  número total de ítems;

$$U = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_i} T_{ij} - 0,5(r_1 T_1^* + r_2 T_2^* + \dots + r_k T_k^*)}{\sqrt{\frac{1}{12}(r_1 T_1^{*2} + r_2 T_2^{*2} + \dots + r_k T_k^{*2})}} \quad (67)$$

El estadístico  $U$  puede usarse para probar si hay evidencia de crecimiento de la fiabilidad, positivo o negativo, independiente del modelo de crecimiento de la fiabilidad. Un ensayo bilateral para crecimiento positivo o negativo con el nivel de significación  $\alpha$  tiene los valores críticos  $u_{1-\alpha/2}$  y  $-u_{1-\alpha/2}$ , donde  $u_{1-\alpha/2}$  es el percentil  $(1-\alpha/2) \cdot 100\%$  de la distribución normal tipificada. Si  $-u_{1-\alpha/2} < U < u_{1-\alpha/2}$ ; entonces no hay evidencia de crecimiento de la fiabilidad positivo o negativo a nivel de significación  $\alpha$ . En este caso se acepta la hipótesis de distribución exponencial de los tiempos entre fallos sucesivos del HPP con el nivel de significación  $\alpha$ . Los valores críticos  $u_{1-\alpha/2}$  y  $-u_{1-\alpha/2}$  corresponden a un ensayo unilateral para crecimiento positivo o negativo, respectivamente, con el nivel de significación  $\alpha/2$ .

Para los niveles de significación requeridos hay que elegir los valores críticos adecuados de la tabla de percentiles de la distribución normal tipificada de la Tabla 8, que en nuestro caso es 1,64.

Con la hipótesis de crecimiento cero (es decir, los tiempos de fallo siguen un HPP), el estadístico  $U$  (test de Laplace) se distribuye aproximadamente según una distribución tipificada de media 0 y desviación 1. La norma incluye el procedimiento gráfico  $M(t)$ .

Existen otros test de tendencia para evaluar  $z(t)$ , ver por ejemplo el estudio de Wang (2005); Crow/AMSAA, Lewis-Robinson, etc., no estando recogidos en la norma. También se han desarrollado múltiples gráficos de tendencia y test no paramétricos publicados alternativos al  $M(t)$ , destacando el de Nelson (2003).

SISTEMA	$U$	$U_{crítico}$	TENDENCIA
Tracción 5000-4ª	<b>16,88</b>	1,64	Muy Creciente
Tracción 2000-B	<b>1,75</b>	1,64	Ligeramente Creciente
Tracción 8000	<b>- 5,81</b>	1,64	Decreciente
Escaleras Mecánicas TNE	<b>7,64</b>	1,64	Creciente

Tabla 13 – Resultados del test de tendencia  $U$  al conjunto de items de cada sistema

El valor de  $U= 16,88$  obtenido sobre los sistemas de tracción de los trenes 5000-4ª supera el valor crítico para  $\alpha = 10\%$ , toma un alto valor positivo, por lo que se rechaza la hipótesis de  $z(km)$  constante, existiendo una tendencia creciente de los fallos. Este valor es acorde con el comportamiento general de los sistemas electromecánicos, de los que está compuesto el sistema de tracción chopper de estos trenes, ya que los fallos tienden a aumentar por desgaste mecánico de elementos como los disyuntores, relés, contactores, motores de tracción CC, etc.

El valor de  $U= 1,75$  obtenido sobre los sistemas de tracción de los trenes 2000-B supera el valor crítico para  $\alpha = 10\%$ , toma un alto valor positivo, por lo que se rechaza la hipótesis de  $z(km)$  constante, existiendo una tendencia ligeramente creciente de los fallos. Este valor es acorde con el comportamiento general de los sistemas electrónicos y eléctricos, de los que está compuesto el sistema de tracción trifásico – ondulator de corriente de estos trenes.

El valor de  $U= -5,81$  obtenido sobre los sistemas de tracción de trenes 8000 supera el valor crítico para  $\alpha = 10\%$ , toma un alto valor negativo, por lo que se rechaza la hipótesis de  $z(km)$  constante, existiendo una tendencia decreciente de los fallos. Este valor es acorde con el comportamiento general de los sistemas mayoritariamente electrónicos, de los que está compuesto el sistema de tracción trifásico – ondulator de tensión de los trenes, ya que los fallos tienden a decrecer durante la operación de los sistemas, al eliminarse los elementos que presentan fallos y tratarse de sistemas sin afección por envejecimiento o desgaste de componentes. El ejemplo más claro de sistemas que presentan crecimiento de su fiabilidad durante el periodo de operación son los sistemas basados en software, ver apartado 2.4.

En el caso de las escaleras mecánicas TNE el valor obtenido de  $U= 7,64$  también supera el valor crítico para  $\alpha = 10\%$ , y toma un alto valor positivo por lo que se rechaza la hipótesis de  $z(t)$  constante, existiendo una tendencia creciente de los fallos. En este caso este valor creciente responde al comportamiento general esperado de los sistemas electromecánicos sometidos a desgaste.

Comprobada la existencia de tendencia en todos los conjuntos de items de sistemas objeto de estudio, se debe aplicar el modelo PLP según se desarrolla en el siguiente apartado.

### 6.3. Aplicar el modelo de PLP

La norma IEC 61710 (2013) para múltiples ítems en sus apartados 7.2.2 y 7.3.1.1, emplea la fórmula adjunta para estimar puntualmente de forma iterativa  $\hat{\beta}$ , con  $N$  el número total de fallos acumulados en el ensayo,  $k$ ,  $t_i$  el tiempo (o km) al fallo  $t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$  y  $T_j$  el tiempo (o km) total de observación  $T_j$  desde el ítem  $j=1, 2, \dots, k$ ;

$$\frac{N}{\hat{\beta}} + \sum_{i=1}^N \ln t_i - \frac{N \sum_{j=1}^k T_j^{\hat{\beta}} \ln T_j}{\sum_{j=1}^k T_j^{\hat{\beta}}} = 0 \quad (79)$$

Se calcula la estimación del parámetro de escala  $\lambda$ ;

$$\hat{\lambda} = \frac{N}{\sum_{j=1}^k T_j^{\hat{\beta}}} \quad (80)$$

Se ha calculado de forma iterativa  $\hat{\beta}$  y a continuación se ha calculado  $\hat{\lambda}$ , con lo resultados de la tabla adjunta.

SISTEMA	$\beta$	$\lambda$	TENDENCIA
Tracción 5000-4ª	<b>1,235</b>	<b>1,87E-06</b>	Muy Creciente
Tracción 2000-B	<b>0,928</b>	<b>1,00E-04</b>	Ligeramente Creciente
Tracción 8000	<b>0,782</b>	<b>5,51E-04</b>	Decreciente
Escaleras Mecánicas TNE	<b>1,055</b>	<b>1,71E-03</b>	Creciente

Tabla 14 – Resultados de la estimación de parámetros de cada sistema con el modelo PLP

Los valores obtenidos en los sistemas de tracción de trenes y en las escaleras mecánicas,  $z(km)$  y  $z(t)$  son por lo tanto, según el modelo PLP (53);

$$\hat{z}(km) = 0,00000187 \times 1,235 km^{1,235-1} \quad ; \text{Sistemas tracción trenes 5000-4ª}$$

$$\hat{z}(km) = 0,0001 \times 0,928 km^{0,928-1} \quad ; \text{Sistemas tracción trenes 2000-B}$$

$$\hat{z}(km) = 0,000551 * 0,782 km^{0,782-1} \quad ; \text{Sistemas tracción trenes 8000}$$

$$\hat{z}(t) = 0,00171 * 1,055 t^{1,055-1} \quad ; \text{Escaleras mecánicas TNE}$$

La prueba de bondad de ajuste recogida en la norma IEC 61710 (2013), es el estadístico Cramer-von-Mises  $C^2$ , siendo  $M=N$  y  $T=T^*$  para ensayos terminados a tiempo, y  $M = N-1$  y  $T=t_N$  para ensayos terminados a fallo.

$$C^2 = \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left[ \left( \frac{t_j}{T} \right)^\beta - \left( \frac{2j-1}{2M} \right) \right]^2 \quad (81)$$

A continuación se selecciona el valor crítico  $C^2_{0,90}(M)$  para un nivel de significación del 10% de la tabla que de  $C^2 > C^2_{0,90}(M)$ , ver apéndices. Si  $C^2$  excede del valor crítico de la tabla  $C^2_{0,90}(M)$ , entonces debe rechazarse la hipótesis de que el modelo de la PLP ajusta adecuadamente los datos del ensayo. En nuestros estudios los resultados son los adjuntos.

SISTEMA	$C^2$	$C^2_{0,90}(M)$	HIPÓTESIS PLP
Tracción 5000-4ª	2,108	0,173	<b>Se Rechaza</b>
Tracción 2000-B	9,153	0,173	<b>Se Rechaza</b>
Tracción 8000	0,728	0,173	<b>Se Rechaza</b>
Escaleras Mecánicas TNE	4,089	0,173	<b>Se Rechaza</b>

Tabla 15 – Resultados de las prueba de bondad de ajuste de cada sistema con el modelo PLP

$C^2$  excede claramente el valor crítico de la tabla  $C^2_{0,90}(M)$  en todos los casos, por lo que se rechaza la hipótesis de que el modelo de la PLP ajusta adecuadamente los datos de los estudios. Reseñar el estudio de Krasich (2012) sobre la influencia de tiempo entre el último fallo y el final del ensayo, en las estimaciones de parámetros para múltiples ítems. El modelo de PLP es rechazado, como ya se preveía, dada la dispersión de datos de fallos de los sistemas de tracción de cada tren y de cada escalera mecánica. Las normas IEC indican que en este caso se debe proceder a intentar modelar la fiabilidad de cada ítem, en nuestro caso cada sistema de tracción de cada tren y cada escalera mecánica.

La norma incluye los métodos de cálculo de los intervalos de confianza de  $\hat{\beta}$  y  $\hat{\lambda}$ , sin embargo no contempla test de hipótesis de los parámetros calculados para su contraste estadístico. Para ampliar conocimientos ver Harris (1971), Crow (1975), Crow (1993), Rigdon and Basu (2000), Frenkel y otros (2003), Lisnianski y otros (2010), Blischke y Murthy (2011).

Existen otras pruebas de bondad de ajuste aplicables a la forma exponencial de  $\hat{\beta}$ ; Kuiper  $V$ , Anderson-Darling  $A^2$ , Kolmogorov-Smirnov modificado  $K-S$ , etc. Interesante aportación de Smith (1980) respecto al ensayo chi-cuadrado.

#### 6.4. Aplicar el test de tendencia $U$ para $z(t)$ en cada ítem

Recogido en la norma IEC 60605-6 (2007), apartado 7.2., está basado en el cálculo del estadístico  $U$ , en nuestros estudios para ensayo terminado por tiempo se emplea;  $r$  el número total de fallos a considerar,  $T^*$  el tiempo (o km) total del ensayo terminado por tiempo, y  $T_i$  el tiempo (o km) acumulado del ensayo a considerar fallo  $i$ -enésimo:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^r T_i - r \frac{T^*}{2}}{T^* \sqrt{\frac{r}{12}}} \quad (64)$$

TREN	$U$	$U_{crítico}$	TENDENCIA
1	<b>3,28</b>	1,64	Creciente
2	<b>0,17</b>	1,64	Constante
3	<b>4,09</b>	1,64	Creciente
4	<b>0,77</b>	1,64	Constante
5	<b>4,02</b>	1,64	Creciente
6	<b>3,53</b>	1,64	Creciente
7	<b>2,48</b>	1,64	Creciente
8	<b>3,27</b>	1,64	Creciente
9	<b>- 0,48</b>	1,64	Constante
10	<b>8,19</b>	1,64	Creciente
11	<b>4,73</b>	1,64	Creciente
12	<b>4,02</b>	1,64	Creciente
13	<b>5,75</b>	1,64	Creciente
14	<b>1,84</b>	1,64	Creciente
15	<b>6,27</b>	1,64	Creciente
16	<b>1,50</b>	1,64	Constante
17	<b>2,20</b>	1,64	Creciente
18	<b>5,63</b>	1,64	Creciente
19	<b>1,54</b>	1,64	Constante
20	<b>- 1,26</b>	1,64	Constante
21	<b>- 0,57</b>	1,64	Constante
22	<b>2,75</b>	1,64	Creciente
23	<b>2,06</b>	1,64	Creciente
24	<b>2,19</b>	1,64	Creciente
25	<b>4,68</b>	1,64	Creciente
26	<b>3,60</b>	1,64	Creciente
27	<b>1,79</b>	1,64	Creciente
28	<b>3,20</b>	1,64	Creciente
29	<b>1,60</b>	1,64	Constante
30	<b>0,79</b>	1,64	Constante
31	<b>2,88</b>	1,64	Creciente
32	<b>1,72</b>	1,64	Creciente
33	<b>3,21</b>	1,64	Creciente
34	<b>2,81</b>	1,64	Creciente
35	<b>0,93</b>	1,64	Constante
36	<b>2,90</b>	1,64	Creciente

Tabla 16 – Resultados del test de tendencia  $U$  de cada sistema de tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup>

TREN	$U$	$U_{crítico}$	TENDENCIA
1	-2,04	1,64	Decreciente
2	-4,23	1,64	Decreciente
3	-1,22	1,64	Constante
4	-2,35	1,64	Decreciente
5	-2,97	1,64	Decreciente
6	-1,22	1,64	Constante
7	-1,27	1,64	Constante
8	1,51	1,64	Constante
9	6,67	1,64	Creciente
10	-1,56	1,64	Constante
11	-1,29	1,64	Constante
12	1,25	1,64	Constante
13	-2,61	1,64	Decreciente
14	-2,89	1,64	Decreciente
15	-1,92	1,64	Decreciente
16	0,94	1,64	Constante
17	3,83	1,64	Creciente
18	2,70	1,64	Creciente
19	-0,52	1,64	Constante
20	2,87	1,64	Creciente
21	2,33	1,64	Creciente
22	-2,02	1,64	Decreciente
23	-1,07	1,64	Constante
24	-0,39	1,64	Constante
25	0,15	1,64	Constante
26	-2,62	1,64	Decreciente
27	0,36	1,64	Constante
28	-1,36	1,64	Constante
29	2,64	1,64	Creciente
30	2,46	1,64	Creciente
31	0,37	1,64	Constante
32	-1,46	1,64	Constante
33	-2,41	1,64	Decreciente
34	3,59	1,64	Creciente
35	-1,25	1,64	Constante
36	-1,61	1,64	Constante
37	-1,88	1,64	Decreciente
38	2,01	1,64	Creciente
39	-0,44	1,64	Constante
40	-0,89	1,64	Constante
41	0,55	1,64	Constante
42	-0,40	1,64	Constante
43	-3,51	1,64	Decreciente
44	2,24	1,64	Creciente

Tabla 17 – Resultados del test de tendencia  $U$  de cada sistema de tracción de trenes 2000-B (I)

TREN	$U$	$U_{crítico}$	TENDENCIA
45	-1,65	1,64	Decreciente
46	-3,33	1,64	Decreciente
47	-1,28	1,64	Constante
48	-0,92	1,64	Constante
49	-1,19	1,64	Constante
50	-1,83	1,64	Decreciente
51	-1,71	1,64	Decreciente
52	3,58	1,64	Creciente
53	1,46	1,64	Constante
54	0,63	1,64	Constante
55	1,93	1,64	Creciente
56	0,35	1,64	Constante
57	1,34	1,64	Constante
58	2,09	1,64	Creciente
59	2,11	1,64	Creciente
60	4,54	1,64	Creciente
61	-1,44	1,64	Constante
62	0,53	1,64	Constante
63	0,25	1,64	Constante
64	0,91	1,64	Constante
65	0,45	1,64	Constante
66	0,69	1,64	Constante
67	-0,20	1,64	Constante
68	-1,75	1,64	Decreciente
69	-0,47	1,64	Constante
70	0,33	1,64	Constante
71	3,33	1,64	Creciente
72	-0,08	1,64	Constante
73	0,28	1,64	Constante
74	3,12	1,64	Creciente
75	3,63	1,64	Creciente
76	3,48	1,64	Creciente
77	0,91	1,64	Constante
78	0,02	1,64	Constante
79	0,63	1,64	Constante
80	2,34	1,64	Creciente
81	2,09	1,64	Creciente
82	-0,10	1,64	Constante
83	-0,06	1,64	Constante
84	0,30	1,64	Constante
85	0,30	1,64	Constante
86	1,39	1,64	Constante
87	0,92	1,64	Constante
88	0,20	1,64	Constante

Tabla 18 – Resultados del test de tendencia  $U$  de cada sistema de tracción de trenes 2000-B (II)

TREN	$U$	$U_{crítico}$	TENDENCIA
1	<b>0,99</b>	1,64	Constante
2	<b>0,13</b>	1,64	Constante
3	<b>-1,47</b>	1,64	Constante
4	<b>-0,81</b>	1,64	Constante
5	<b>0,43</b>	1,64	Constante
6	<b>-4,10</b>	1,64	Decreciente
7	<b>0,32</b>	1,64	Constante
8	<b>-1,49</b>	1,64	Constante
9	<b>-1,11</b>	1,64	Constante
10	<b>-1,28</b>	1,64	Constante
11	<b>-4,79</b>	1,64	Decreciente
12	<b>-1,23</b>	1,64	Constante
13	<b>0,01</b>	1,64	Constante
14	<b>-1,17</b>	1,64	Constante
15	<b>-3,60</b>	1,64	Decreciente
16	<b>0,41</b>	1,64	Constante
17	<b>-2,21</b>	1,64	Decreciente
18	<b>0,68</b>	1,64	Constante
19	<b>-4,26</b>	1,64	Decreciente
20	<b>-3,03</b>	1,64	Decreciente
21	<b>-0,95</b>	1,64	Constante
22	<b>1,62</b>	1,64	Constante
23	<b>0,84</b>	1,64	Constante

Tabla 19 – Resultados del test de tendencia  $U$  de cada sistema de tracción de trenes 8000

ESCALERA	$U$	$U_{crítico}$	TENDENCIA
1	1,22	1,64	Constante
2	0,31	1,64	Constante
3	-1,60	1,64	Constante
4	-5,69	1,64	Decreciente
5	4,28	1,64	Creciente
6	-1,63	1,64	Constante
7	1,52	1,64	Constante
8	-0,21	1,64	Constante
9	-2,02	1,64	Decreciente
10	1,15	1,64	Constante
11	1,16	1,64	Constante
12	3,20	1,64	Creciente
13	2,54	1,64	Creciente
14	2,48	1,64	Creciente
15	4,97	1,64	Creciente
16	3,40	1,64	Creciente
17	0,02	1,64	Constante
18	0,00	1,64	Constante
19	2,24	1,64	Creciente
20	-3,91	1,64	Decreciente
21	1,81	1,64	Creciente
22	-2,41	1,64	Decreciente
23	7,16	1,64	Creciente
24	-0,66	1,64	Constante
25	4,65	1,64	Creciente
26	3,71	1,64	Creciente
27	0,43	1,64	Constante
28	-0,51	1,64	Constante
29	0,17	1,64	Constante
30	4,33	1,64	Creciente
31	-0,36	1,64	Constante
32	0,04	1,64	Constante
33	-5,34	1,64	Decreciente
34	-0,94	1,64	Constante
35	4,22	1,64	Creciente
36	0,09	1,64	Constante
37	6,28	1,64	Creciente
38	4,23	1,64	Creciente
39	5,55	1,64	Creciente
40	2,08	1,64	Creciente

Tabla 20 – Resultados del test de tendencia  $U$  de cada escalera mecánica TNE

En los sistemas de tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup> y para un nivel de significación  $\alpha=0,1$  el valor crítico de  $U_\alpha$  es 1,64, y se observa que la  $z(km)$  de 10 de los 36 sistemas de tracción de trenes no presentan tendencia, por lo que en estos casos la norma asimila (aunque advierte que puede no ser así) la hipótesis de distribución exponencial de los tiempos entre fallos sucesivos en un HPP, proponiendo la estimación puntual de  $\hat{\lambda}$  constante. En los otros 26 trenes, en la aplicación del estadístico  $U$  se rechaza que no haya tendencia, resultando todas las  $z(t)$  crecientes, siendo de aplicación el modelo NHPP.

En los sistemas de tracción de trenes 2000-B y para un nivel de significación  $\alpha=0,1$  el valor crítico de  $U_\alpha$  es 1,64, y se observa que la  $z(km)$  de 50 de los 88 sistemas de tracción de trenes no presentan tendencia, por lo que en estos casos la norma asimila (aunque advierte que puede no ser así) la hipótesis de distribución exponencial de los tiempos entre fallos sucesivos en un HPP, proponiendo la estimación puntual de  $\hat{\lambda}$  constante. En los otros 38 trenes, en la aplicación del estadístico  $U$  se rechaza que no haya tendencia, resultando en 21 las  $z(t)$  crecientes y en 17 las  $z(t)$  decrecientes, siendo de aplicación el modelo NHPP.

En los sistemas de tracción de trenes 8000 y para un nivel de significación  $\alpha=0,1$  el valor crítico de  $U_\alpha$  es 1,64, y se observa que la  $z(km)$  de 17 de los 23 sistemas de tracción de trenes no presentan tendencia, por lo que en estos casos la norma asimila (aunque advierte que puede no ser así) la hipótesis de distribución exponencial de los tiempos entre fallos sucesivos en un HPP, proponiendo la estimación puntual de  $\hat{\lambda}$  constante. En los otros 6 trenes, en la aplicación del estadístico  $U$  se rechaza que no haya tendencia, resultando en todos las  $z(t)$  decrecientes, siendo de aplicación el modelo NHPP.

En las escaleras mecánicas TNE y para un nivel de significación  $\alpha=0,1$  el valor crítico de  $U_\alpha$  es 1,64, y se observa que la  $z(km)$  de 18 de las 40 escaleras mecánicas TNE no presentan tendencia, por lo que en estos casos la norma asimila (aunque advierte que puede no ser así) la hipótesis de distribución exponencial de los tiempos entre fallos sucesivos en un HPP, proponiendo la estimación puntual de  $\hat{\lambda}$  constante. En las otras 22 escaleras, en la aplicación del estadístico  $U$  se rechaza que no haya tendencia, resultando en 17 las  $z(t)$  crecientes y en 5 las  $z(t)$  decrecientes, siendo de aplicación el modelo NHPP.

SISTEMA	ITEMS	SIN TENDENCIA	TENDENCIA CRECIENTE	TENDENCIA DECRECIENTE
Tracción 5000-4 <sup>a</sup>	<b>36</b>	10	26	0
Tracción 2000-B	<b>88</b>	50	21	17
Tracción 8000	<b>23</b>	17	0	6
Escaleras Mecánicas TNE	<b>40</b>	18	17	5

Tabla 21 – Resumen de resultados del test de tendencia  $U$  de cada ítem por sistema

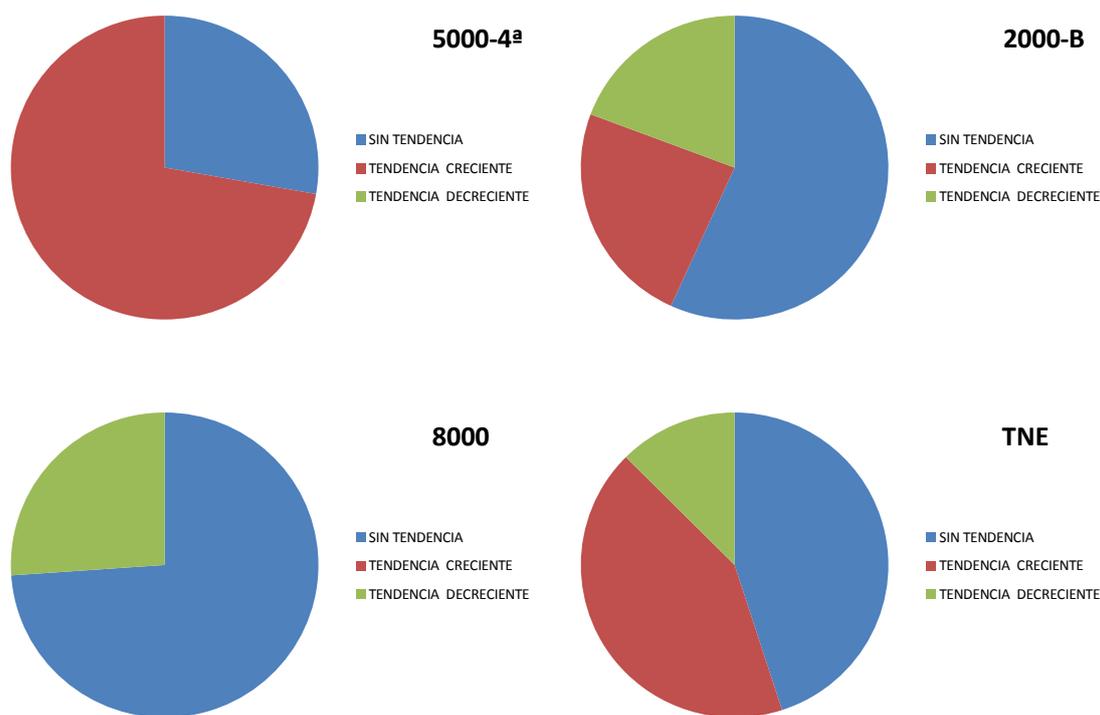


Figura 58 – Distribución de resultados del test de tendencia  $U$  de cada ítem por sistema

En la figura adjunta se observa el porcentaje de distribución de tendencia de cada ítem por sistema objeto de estudio:

- En los sistemas de tracción de los trenes 5000-4ª mayoritariamente la tendencia es creciente en fallos y algunos ítems no presentan tendencia.
- En los sistemas de tracción de los trenes 2000-B los ítems sin tendencia son los más comunes, seguidos por ítems con tendencia creciente de fallos, y en menor proporción con tendencia decreciente de fallos.
- En los sistemas de tracción de los trenes 8000 los ítems sin tendencia son mayoritarios, con un número destacable de ítems con tendencia decreciente de fallos.
- En las escaleras mecánicas TNE los ítems sin tendencia son los más comunes, con casi la misma proporción por ítems con tendencia creciente de fallos, y en menor grado con tendencia decreciente de fallos.

Los resultados sugieren que la reparación efectuada a los sistemas de tracción de trenes 2000-B y 8000 se aproxima a una “reparación perfecta”, compatible con sistemas eléctricos y electrónicos de los que están formados, ya que una vez sustituido el componente averiado requieren de mínimas intervenciones. En algún ítem se observa incluso crecimiento de la fiabilidad, situación muy habitual en el software, ver Pham (2007). Sin embargo los sistemas de tracción de trenes 5000-4ª y las escaleras mecánicas presentan unos resultados más difusos, ya que si bien los componentes electromecánicos averiados son sustituidos, estos sistemas requieren otro tipo de tareas de mantenimiento; ajustes, lubricaciones y limpiezas que son más necesarias.

Asimismo los componentes mecánicos están sometidos a un desgaste progresivo, por lo que la decisión del momento adecuado de su sustitución es más compleja. Estas causas generan una dispersión en los resultados obtenidos en cada escalera, que limitan generalizar el comportamiento de la reparación efectuada como “nueva” o como “vieja”.

### 6.5. Estimar $\lambda$ constante para cada ítem sin tendencia

Se aplica la norma IEC 60605-4 (2001), apartado 5.1 con modelo propuesto HPP. Para ensayo terminado por tiempo (o kilómetros) y elementos reparables, la estimación de  $\hat{\lambda}$  se realiza para el punto de fin del ensayo con  $r$  el número total de fallos a considerar en el ensayo y  $T^*$  el tiempo (o km) total del ensayo terminado por fallo;

$$\hat{z} = \hat{\lambda} = \frac{r}{T^*} \quad (69)$$

Ya se ha indicado que este modelado, parte de la base de que exista una distribución exponencial de los tiempos entre fallos TBF, por lo que estos resultados deben entenderse como una estimación de  $\hat{\lambda}$  en el momento de la finalización del ensayo, no siendo tampoco adecuada su extensión para proyecciones del modelo a futuro.

Si bien la norma no lo contempla, en este estudio se ha decidido realizar el test  $K-S$  con el 5,0% de nivel de significación para comprobar si los TBF se distribuyen exponencialmente y es de aplicación el modelo HPP. El criterio es; rechazar  $H_0$  con un 5% de nivel de significación si  $D > D_{crítico}$ , con  $D_{crítico} = 1.36/\sqrt{n}$ .

TREN	$\lambda$	$D_{crítica}$	$D$	$H_0$
2	6,08E-05	0,1381	0,3093	Se Rechaza
4	4,71E-05	0,1550	0,2727	Se Rechaza
9	4,58E-05	0,1592	0,2877	Se Rechaza
16	5,83E-05	0,1388	0,3542	Se Rechaza
19	4,38E-05	0,1637	0,2029	Se Rechaza
20	4,22E-05	0,1662	0,3433	Se Rechaza
21	4,54E-05	0,1570	0,3200	Se Rechaza
29	4,57E-05	0,1603	0,2500	Se Rechaza
30	6,45E-05	0,1360	0,4400	Se Rechaza
35	5,40E-05	0,1475	0,2588	Se Rechaza

Tabla 22 – Estimación de  $\hat{\lambda}$  constantes de ítems de cada sistema de tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup>

TREN	$\lambda$	$D_{crítica}$	$D$	$H_0$
3	<b>3,79E-05</b>	0,1851	0,2250	<b>Se Rechaza</b>
6	<b>4,17E-05</b>	0,1756	0,3167	<b>Se Rechaza</b>
7	<b>5,72E-05</b>	0,1502	0,3658	<b>Se Rechaza</b>
8	<b>4,53E-05</b>	0,1687	0,2923	<b>Se Rechaza</b>
10	<b>4,88E-05</b>	0,1626	0,5000	<b>Se Rechaza</b>
11	<b>3,96E-05</b>	0,1801	0,3158	<b>Se Rechaza</b>
12	<b>3,39E-05</b>	0,1923	0,2200	<b>Se Rechaza</b>
16	<b>4,12E-05</b>	0,1756	0,3833	<b>Se Rechaza</b>
19	<b>4,06E-05</b>	0,1801	0,2456	<b>Se Rechaza</b>
23	<b>3,10E-05</b>	0,2050	0,2380	<b>Se Rechaza</b>
24	<b>4,52E-05</b>	0,1727	0,3226	<b>Se Rechaza</b>
25	<b>2,77E-05</b>	0,2178	0,2308	<b>Se Rechaza</b>
27	<b>2,53E-05</b>	0,2267	0,2222	<b>Se Acepta</b>
28	<b>3,39E-05</b>	0,2005	0,2391	<b>Se Rechaza</b>
31	<b>2,74E-05</b>	0,2236	0,1892	<b>Se Acepta</b>
32	<b>3,51E-05</b>	0,1963	0,2083	<b>Se Rechaza</b>

Tabla 23 – Estimación de  $\hat{\lambda}$  constantes de items de cada sistema de tracción de trenes 2000-B (I)

TREN	$\lambda$	$D_{crítica}$	$D$	$H_0$
35	6,20E-05	0,1475	0,3846	Se Rechaza
36	3,13E-05	0,2074	0,2244	Se Rechaza
39	5,75E-05	0,1540	0,3846	Se Rechaza
40	2,30E-05	0,2404	0,1562	Se Acepta
41	3,50E-05	0,1963	0,1458	Se Acepta
42	3,74E-05	0,1904	0,2941	Se Rechaza
47	2,98E-05	0,2150	0,2750	Se Rechaza
48	3,84E-05	0,1868	0,3396	Se Rechaza
49	3,33E-05	0,2005	0,2609	Se Rechaza
53	2,58E-05	0,2267	0,0841	Se Acepta
54	2,56E-05	0,2206	0,4326	Se Rechaza
56	5,01E-05	0,1540	0,4231	Se Rechaza
57	3,14E-05	0,1984	0,2766	Se Rechaza
61	2,01E-05	0,2443	0,2798	Se Rechaza
62	1,49E-05	0,2836	0,2000	Se Acepta
63	3,30E-05	0,1904	0,2686	Se Rechaza
64	1,91E-05	0,2570	0,3214	Se Rechaza
65	2,51E-05	0,2236	0,2994	Se Rechaza
66	3,89E-05	0,1786	0,3448	Se Rechaza
67	4,79E-05	0,1741	0,4098	Se Rechaza
69	3,36E-05	0,2124	0,4390	Se Rechaza
70	3,44E-05	0,2099	0,2381	Se Rechaza
72	4,13E-05	0,1868	0,2264	Se Rechaza
73	1,96E-05	0,2776	0,1667	Se Acepta
77	2,37E-05	0,2525	0,1837	Se Acepta
78	1,54E-05	0,3120	0,2105	Se Acepta
79	2,98E-05	0,2267	0,2222	Se Acepta
82	1,82E-05	0,2900	0,1971	Se Acepta
83	2,84E-05	0,2332	0,3529	Se Rechaza
84	3,05E-05	0,2267	0,2222	Se Acepta
85	4,36E-05	0,1886	0,3846	Se Rechaza
86	4,16E-05	0,1923	0,3800	Se Rechaza
87	4,33E-05	0,1923	0,2600	Se Rechaza
88	2,92E-05	0,2267	0,2778	Se Rechaza

Tabla 24 – Estimación de  $\hat{\lambda}$  constantes de items de cada sistema de tracción de trenes 2000-B (II)

TREN	$\lambda$	$D_{crítica}$	$D$	$H_0$
1	1,66E-05	0,2617	0,2589	Se Acepta
2	4,08E-05	0,1700	0,3281	Se Rechaza
3	2,66E-05	0,2074	0,4651	Se Rechaza
4	1,77E-05	0,2483	0,3000	Se Rechaza
5	1,47E-05	0,2720	0,1999	Se Acepta
7	2,59E-05	0,2124	0,3171	Se Rechaza
8	3,76E-05	0,1687	0,4154	Se Rechaza
9	1,75E-05	0,2443	0,1935	Se Acepta
10	2,66E-05	0,2027	0,3111	Se Rechaza
12	2,24E-05	0,2236	0,2973	Se Rechaza
13	1,76E-05	0,2404	0,1872	Se Acepta
14	3,95E-05	0,1626	0,2286	Se Rechaza
16	2,47E-05	0,2099	0,4524	Se Rechaza
18	1,86E-05	0,2332	0,3235	Se Rechaza
21	1,78E-05	0,2404	0,3125	Se Rechaza
22	1,73E-05	0,2525	0,1919	Se Acepta
23	1,89E-05	0,2332	0,2647	Se Rechaza

Tabla 25 – Estimación de  $\hat{\lambda}$  constantes de items de cada sistema de tracción de trenes 8000

ESCALERA	$\lambda$	$D_{crítica}$	$D$	$H_0$
1	2,78E-03	0,0957	0,1872	Se Rechaza
2	2,29E-03	0,1056	0,0689	Se Acepta
3	2,10E-03	0,1107	0,2171	Se Rechaza
6	2,01E-03	0,1133	0,1725	Se Rechaza
7	2,98E-03	0,0930	0,2085	Se Rechaza
8	3,82E-03	0,0823	0,1695	Se Rechaza
10	2,37E-03	0,1046	0,1761	Se Rechaza
11	2,71E-03	0,0979	0,1288	Se Rechaza
17	2,43E-03	0,1040	0,2665	Se Rechaza
18	1,82E-03	0,1202	0,2045	Se Rechaza
24	4,39E-03	0,0777	0,2339	Se Rechaza
27	1,79E-03	0,1221	0,1723	Se Rechaza
28	4,17E-03	0,0800	0,2487	Se Rechaza
29	4,23E-03	0,0795	0,1714	Se Rechaza
31	2,85E-03	0,0969	0,1828	Se Rechaza
32	1,90E-03	0,1188	0,2083	Se Rechaza
34	4,11E-03	0,0813	0,1838	Se Rechaza
36	1,88E-03	0,1212	0,1777	Se Rechaza

Tabla 26 – Estimación de  $\hat{\lambda}$  constantes de items de cada escalera mecánica TNE

Realizado el test  $K-S$  con el 5,0% de nivel de significación, en los TBF de los sistemas estudiados se rechaza mayoritariamente que tengan una distribución exponencial en los 95 ítems ensayados. Por lo tanto, la norma IEC 60605-4 (2001) fracasa de forma generalizada, no planteando modelos alternativos al HPP.

SISTEMA	ITEMS	SIN TENDENCIA	SE RECHAZA MODELO HPP	SE ACEPTA MODELO HPP
Tracción 5000-4ª	36	<b>10</b>	10	<b>0</b>
Tracción 2000-B	88	<b>50</b>	38	<b>12</b>
Tracción 8000	23	<b>17</b>	12	<b>5</b>
Escaleras Mecánicas TNE	40	<b>18</b>	17	<b>1</b>

Tabla 27 – Resumen de aceptación y rechazo del modelo HPP por sistema e ítems

Hay que señalar el alto grado de dispersión de las  $z(km)$  contantes obtenidas entre los ítems de cada sistema, resultado inesperados (en teoría) en sistemas de tracción iguales, en tren iguales y en contextos operacionales iguales, con valores extremos 4,17 veces entre extremos. También es destacable el alto grado de dispersión de las  $z(t)$  contantes obtenidas, con valores de  $z(t)$  de hasta 2,46 veces superior/inferior entre extremos, siendo las escaleras mecánicas constructivamente iguales, aunque los modelos HPP se hayan rechazado mayoritariamente. Estas diferencias se analizarán más adelante.

Como ejemplo de ítem con modelo aceptado, en la Figura 59 se puede observar como los TBF del tren 53 de la serie 2000-B presentan una distribución que puede ser aceptada como exponencial ya que  $D = 0,0841 < D_{crítico} = 0,2267$ .

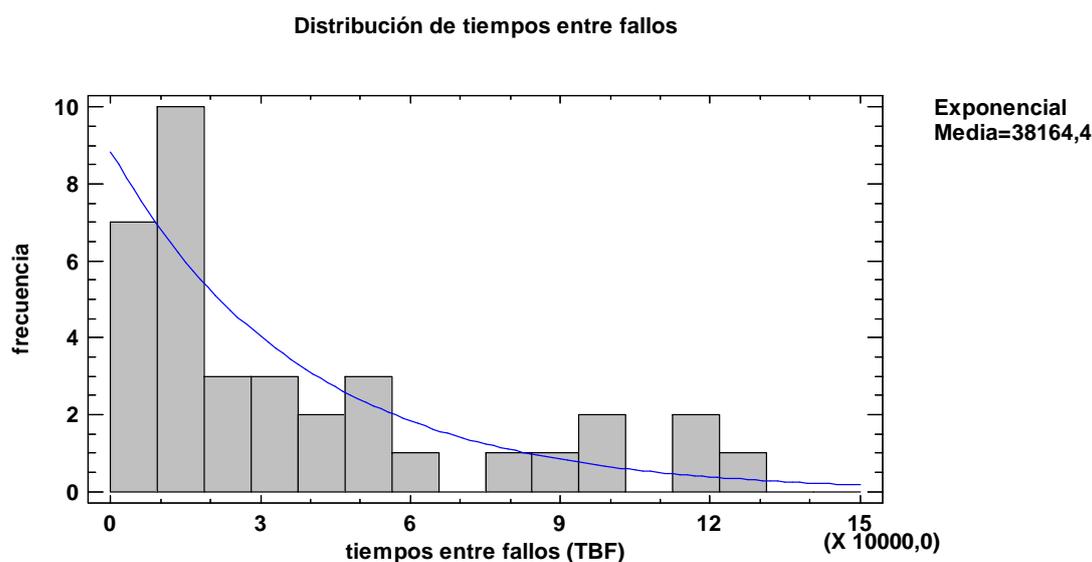


Figura 59 – Distribución de los TBF del tren 53 de la serie 2000-B

Por lo tanto los únicos ítems en los que se puede aceptar que su fiabilidad puede ser modelada mediante un proceso de Poisson homogéneo HPP son los 18 ítems de la Tabla 28, sobre los que se ha calculado intervalo de confianza bilateral que recoge la norma IEC 60605-4 (2001).

SISTEMA	ITEM	$\lambda$	$\lambda_{L2} (90\%)$	$\lambda_{U2} (90\%)$
Tracción 2000-B	27	<b>2,53E-05</b>	1,88E-05	3,35E-05
Tracción 2000-B	31	<b>2,74E-05</b>	1,98E-05	3,61E-05
Tracción 2000-B	40	<b>2,30E-05</b>	1,68E-05	3,08E-05
Tracción 2000-B	41	<b>3,50E-05</b>	2,71E-05	4,45E-05
Tracción 2000-B	53	<b>2,58E-05</b>	1,92E-05	3,41E-05
Tracción 2000-B	62	<b>1,49E-05</b>	1,02E-05	2,10E-05
Tracción 2000-B	73	<b>1,96E-05</b>	1,35E-05	2,76E-05
Tracción 2000-B	77	<b>2,37E-05</b>	1,69E-05	3,23E-05
Tracción 2000-B	78	<b>1,54E-05</b>	1,01E-05	2,26E-05
Tracción 2000-B	79	<b>2,98E-05</b>	2,21E-05	3,94E-05
Tracción 2000-B	82	<b>1,82E-05</b>	1,23E-05	2,59E-05
Tracción 2000-B	84	<b>3,05E-05</b>	2,27E-05	4,03E-05
Tracción 8000	1	<b>1,66E-05</b>	1,17E-05	2,29E-05
Tracción 8000	5	<b>1,47E-05</b>	1,02E-05	2,05E-05
Tracción 8000	9	<b>1,75E-05</b>	1,27E-05	2,37E-05
Tracción 8000	13	<b>1,76E-05</b>	1,28E-05	2,37E-05
Tracción 8000	22	<b>1,73E-05</b>	1,24E-05	2,35E-05
Escaleras Mecánicas TNE	2	<b>2,29E-03</b>	2,00E-03	2,60E-03

Tabla 28 –  $\hat{\lambda}$  de ítems con modelo HPP aceptado con valores del intervalo de confianza bilateral

Para estos ítems el modelo HPP de intensidad de fallo  $z(t)$ , función de fiabilidad  $R(t)$ , función de densidad de probabilidad del fallo  $f(t)$  se formula;

$$z(t) = \lambda \quad (49)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (50)$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (51)$$

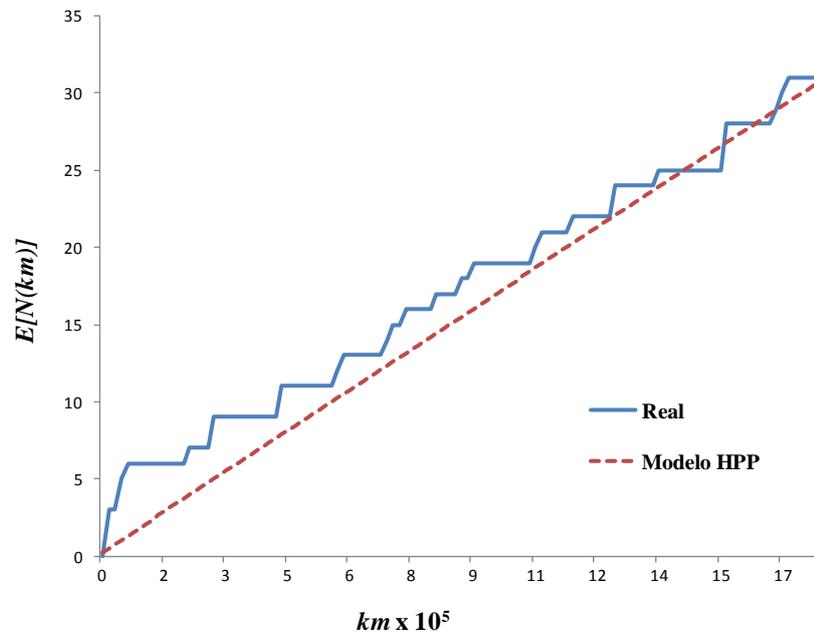


Figura 60 – Fallos acumulados por el tren 9 de la serie 8000 (sin tendencia)

Como ejemplo, en la Figura 60 se representa los valores reales en explotación de fallos acumulados y la estimación  $E[N(km)] = t\lambda$  efectuada por el modelo de HPP del sistema de tracción del tren 9 de la serie 8000, siendo un modelo aceptado con distribución exponencial en los TBF.

Al objeto de reseñar la dispersión de los resultados obtenidos de la estimación de  $\hat{\lambda}$  se representa como ejemplo en la Figura 61 los resultados de 12 sistemas de tracción de la serie 2000-B cuyo modelo HPP ha sido aceptado con la representación del intervalo de confianza bilateral.

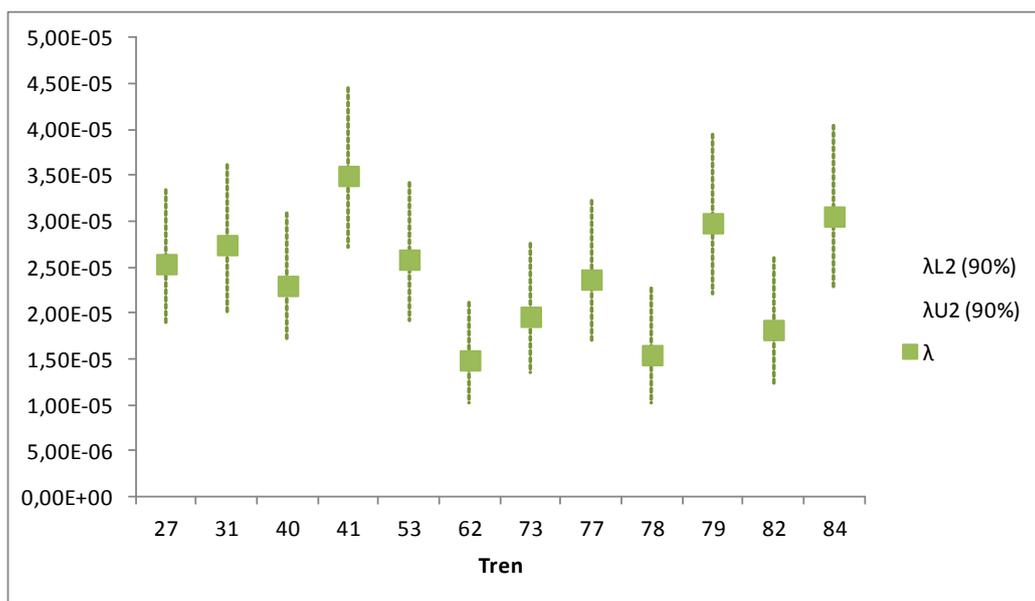


Figura 61 – Gráfica de dispersión de  $\hat{\lambda}$  de sistemas de tracción serie 2000-B con modelo HPP aceptado

Para distribuciones distintas a la exponencial en datos de TBF se deben emplear modelos RP y comprobar su bondad de ajuste, por lo tanto 77 ítems sin tendencia en el fallo de este estudio no pueden ser modelados HPP. Otra alternativa al modelado RP es el propuesto por Tang (2014) mediante la superposición de  $\lambda$  constantes, recordando que la norma IEC 60605-4 (2001) fracasa de forma generalizada, no planteando modelos alternativos al HPP

Como ejemplo de ítem con modelo no aceptado, en la Figura 61 se puede observar como los TBF del tren 54 de la serie 2000-B presentan una distribución que no puede ser aceptada como exponencial, ya que  $D = 0,4326 > D_{crítico} = 0,2206$ .

Distribución de tiempos entre fallos

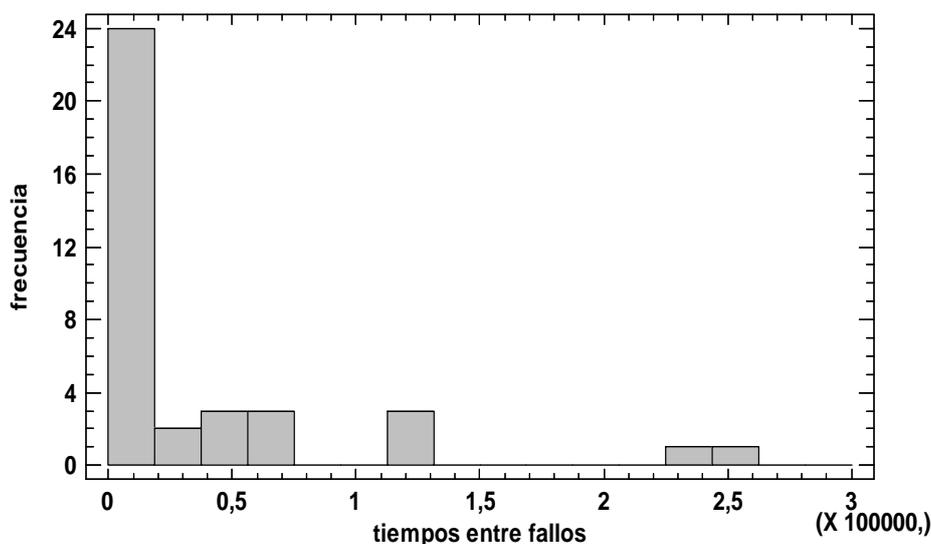


Figura 62 – Distribución de los TBF del tren 54 de la serie 2000-B

## 6.6. Aplicar el modelo PLP a cada ítem con tendencia

Se emplea la norma IEC 61710 (2013) para cada ítem, apartados 7.2.1 y 7.3.1.1. Es necesario estimar  $\beta$  y  $\lambda$  aplicable a los sistemas de tracción de los trenes con tendencia creciente o decreciente de fallos y las escaleras mecánicas con tendencia creciente o decreciente, de acuerdo al estadístico  $U$ , siendo  $T^*$  el tiempo (o km) total del ensayo terminado por tiempo y  $t_j$  el tiempo (o km) acumulado del ensayo en el fallo  $j$ -ésimo;

$$S_1 = \sum_{j=1}^N \ln \left( \frac{T^*}{t_j} \right) \quad (72)$$

A continuación se calcula la estimación no sesgada de  $\hat{\beta}$  y  $\hat{\lambda}$  para ensayos terminados a tiempo, con  $N$  el número total de fallos acumulados en el ensayo y  $k$  el número total de ítems del ensayo;

$$\hat{\beta} = \frac{N-1}{S_1}; \quad \hat{\lambda} = \frac{N}{k(T^*)^\beta} \quad (74), (76)$$

Es necesario efectuar el ensayo de bondad de ajuste, al objeto de comprobar si el modelo de fiabilidad de cada ítem se ajusta adecuadamente a los datos de explotación, según apartado 7.3.1.1 de la norma IEC 61710 (2013). Se calcula el estadístico  $C^2$  con  $M=N$  y  $T=T^*$  para ensayos terminados a tiempo (o km).

$$C^2 = \frac{1}{12M} + \sum_{j=1}^M \left[ \left( \frac{t_j}{T} \right)^\beta - \left( \frac{2j-1}{2M} \right) \right]^2 \quad (81)$$

TREN	$\lambda$	$\beta$	$C^2_{0,90}(M)$	$C^2$	Hipótesis	TENDENCIA
1	4,83E-07	1,34	0,1730	0,4030	Se Rechaza	Creciente
3	1,03E-06	1,30	0,1730	0,8720	Se Rechaza	Creciente
5	1,12E-07	1,45	0,1730	0,5632	Se Rechaza	Creciente
6	4,60E-06	1,18	0,1730	0,8285	Se Rechaza	Creciente
7	1,10E-07	1,43	0,1730	0,2163	Se Rechaza	Creciente
8	1,09E-06	1,28	0,1730	0,3862	Se Rechaza	Creciente
10	4,57E-10	1,84	0,1730	2,0219	Se Rechaza	Creciente
11	5,92E-08	1,50	0,1730	0,5030	Se Rechaza	Creciente
12	1,37E-07	1,40	0,1730	0,6644	Se Rechaza	Creciente
13	5,93E-09	1,65	0,1730	0,5791	Se Rechaza	Creciente
14	2,49E-06	1,20	0,1730	0,1767	Se Rechaza	Creciente
15	5,05E-09	1,65	0,1730	1,9157	Se Rechaza	Creciente
17	2,89E-07	1,34	0,1730	0,1305	Se Acepta	Creciente
18	6,57E-11	1,95	0,1730	0,4100	Se Rechaza	Creciente
22	2,56E-07	1,37	0,1730	0,4013	Se Rechaza	Creciente
23	2,83E-06	1,21	0,1730	0,0751	Se Acepta	Creciente
24	4,57E-06	1,15	0,1730	0,4288	Se Rechaza	Creciente
25	3,52E-05	1,02	0,1730	2,6578	Se Rechaza	Creciente
26	2,18E-06	1,23	0,1730	0,6311	Se Rechaza	Creciente
27	1,13E-04	0,96	0,1730	0,5118	Se Rechaza	Creciente
28	3,44E-07	1,33	0,1730	0,4447	Se Rechaza	Creciente
31	2,27E-05	1,05	0,1730	0,8780	Se Rechaza	Creciente
32	7,41E-06	1,12	0,1730	0,2423	Se Rechaza	Creciente
33	2,64E-07	1,37	0,1730	0,4137	Se Rechaza	Creciente
34	1,66E-07	1,40	0,1730	0,0994	Se Acepta	Creciente
36	7,45E-06	1,15	0,1730	0,4504	Se Rechaza	Creciente

Tabla 29 – Estimación de  $\hat{\beta}$  y  $\hat{\lambda}$  de modelo PLP de cada sistema de tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup>

TREN	$\lambda$	$\beta$	$C^2_{0,90}(M)$	$C^2$	Hipótesis	TENDENCIA
1	1,51E-04	0,94	0,1730	1,4101	Se Rechaza	Decreciente
2	1,32E-01	0,42	0,1720	0,1938	Se Rechaza	Decreciente
4	8,43E-03	0,64	0,1730	0,4611	Se Rechaza	Decreciente
5	8,89E-03	0,62	0,1720	0,3194	Se Rechaza	Decreciente
9	1,72E-11	2,07	0,1730	1,4757	Se Rechaza	Creciente
13	4,12E-03	0,66	0,1720	0,0984	Se Acepta	Decreciente
14	1,33E-02	0,58	0,1720	0,3840	Se Rechaza	Decreciente
15	1,57E-02	0,58	0,1720	0,3168	Se Rechaza	Decreciente
17	8,72E-05	1,00	0,1730	2,1963	Se Rechaza	Creciente
18	2,78E-06	1,20	0,1730	0,5578	Se Rechaza	Creciente
20	1,02E-07	1,41	0,1720	0,2521	Se Rechaza	Creciente
21	7,09E-07	1,28	0,1720	0,1319	Se Acepta	Creciente
22	2,38E-03	0,69	0,1720	0,1214	Se Acepta	Decreciente
26	1,08E-02	0,59	0,1720	0,1114	Se Acepta	Decreciente
29	1,24E-06	1,24	0,1720	0,4690	Se Rechaza	Creciente
30	3,76E-06	1,16	0,1720	0,4516	Se Rechaza	Creciente
33	9,51E-03	0,62	0,1720	0,2265	Se Rechaza	Decreciente
34	9,74E-09	1,57	0,1720	0,3576	Se Rechaza	Creciente
37	1,22E-03	0,75	0,1720	0,0994	Se Acepta	Decreciente
38	3,39E-07	1,32	0,1720	0,1008	Se Acepta	Creciente
43	3,13E-02	0,49	0,1720	0,1305	Se Acepta	Decreciente
44	4,61E-06	1,16	0,1720	0,4436	Se Rechaza	Creciente
45	1,17E-03	0,75	0,1720	0,0244	Se Acepta	Decreciente
46	3,48E-03	0,67	0,1720	0,2576	Se Rechaza	Decreciente
50	6,38E-04	0,80	0,1720	0,1124	Se Acepta	Decreciente
51	1,87E-03	0,71	0,1720	0,0304	Se Acepta	Decreciente
52	4,96E-06	1,17	0,1730	1,1086	Se Rechaza	Creciente
55	7,01E-07	1,26	0,1720	0,1454	Se Acepta	Creciente
58	7,75E-06	1,12	0,1720	0,3132	Se Rechaza	Creciente
59	5,31E-06	1,14	0,1730	0,3882	Se Rechaza	Creciente
60	7,22E-10	1,77	0,1730	0,2855	Se Rechaza	Creciente
68	2,09E-03	0,71	0,1720	0,0581	Se Acepta	Decreciente
71	9,33E-08	1,41	0,1720	0,6682	Se Rechaza	Creciente
74	5,62E-11	1,92	0,1720	0,1409	Se Acepta	Creciente
75	1,29E-10	1,88	0,1720	0,2236	Se Rechaza	Creciente
76	1,06E-07	1,39	0,1720	0,8840	Se Rechaza	Creciente
80	5,72E-09	1,63	0,1720	0,5777	Se Rechaza	Creciente
81	1,09E-05	1,06	0,1720	0,6158	Se Rechaza	Creciente

Tabla 30 – Estimación de  $\hat{\beta}$  y  $\hat{\lambda}$  de modelo PLP de cada sistema de tracción de trenes 2000-B

TREN	$\lambda$	$\beta$	$C^2_{0,90}(M)$	$C^2$	Hipótesis	TENDENCIA
6	<b>6,99E-02</b>	<b>0,42</b>	0,1720	0,1150	Se Acepta	Decreciente
11	<b>8,07E-03</b>	<b>0,61</b>	0,1720	0,2592	Se Rechaza	Decreciente
15	<b>1,78E-02</b>	<b>0,54</b>	0,1720	0,2333	Se Rechaza	Decreciente
17	<b>2,24E-03</b>	<b>0,70</b>	0,1720	0,3179	Se Rechaza	Decreciente
19	<b>3,31E-02</b>	<b>0,49</b>	0,1720	0,1562	Se Acepta	Decreciente
20	<b>4,31E-03</b>	<b>0,66</b>	0,1720	0,3379	Se Rechaza	Decreciente

Tabla 31 – Estimación de  $\hat{\beta}$  y  $\hat{\lambda}$  de modelo PLP de cada sistema de tracción de trenes 8000

ESCALERA	$\lambda$	$\beta$	$C^2_{0,90}(M)$	$C^2$	Hipótesis	TENDENCIA
4	<b>8,96E-02</b>	<b>0,68</b>	0,1730	0,3902	Se Rechaza	Decreciente
5	<b>4,05E-04</b>	<b>1,23</b>	0,1730	0,4353	Se Rechaza	Creciente
9	<b>1,36E-02</b>	<b>0,89</b>	0,1730	0,1063	Se Acepta	Decreciente
12	<b>1,19E-04</b>	<b>1,31</b>	0,1730	0,8665	Se Rechaza	Creciente
13	<b>7,83E-04</b>	<b>1,16</b>	0,1730	0,8656	Se Rechaza	Creciente
14	<b>1,06E-03</b>	<b>1,11</b>	0,1730	0,5999	Se Rechaza	Creciente
15	<b>6,80E-05</b>	<b>1,38</b>	0,1730	0,5764	Se Rechaza	Creciente
16	<b>1,31E-03</b>	<b>1,10</b>	0,1730	0,6620	Se Rechaza	Creciente
19	<b>2,62E-04</b>	<b>1,19</b>	0,1730	0,3233	Se Rechaza	Creciente
20	<b>1,78E-02</b>	<b>0,84</b>	0,1730	0,5616	Se Rechaza	Decreciente
21	<b>3,24E-04</b>	<b>1,19</b>	0,1730	0,3756	Se Rechaza	Creciente
22	<b>1,09E-02</b>	<b>0,90</b>	0,1730	0,2920	Se Rechaza	Decreciente
23	<b>1,43E-04</b>	<b>1,29</b>	0,1730	4,1181	Se Rechaza	Creciente
25	<b>2,53E-04</b>	<b>1,25</b>	0,1730	0,3159	Se Rechaza	Creciente
26	<b>2,65E-04</b>	<b>1,26</b>	0,1730	0,2267	Se Rechaza	Creciente
30	<b>3,00E-05</b>	<b>1,36</b>	0,1730	0,7175	Se Rechaza	Creciente
33	<b>6,41E-02</b>	<b>0,75</b>	0,1730	0,4746	Se Rechaza	Decreciente
35	<b>2,97E-04</b>	<b>1,24</b>	0,1730	0,4820	Se Rechaza	Creciente
37	<b>5,69E-06</b>	<b>1,55</b>	0,1730	0,4477	Se Rechaza	Creciente
38	<b>3,48E-06</b>	<b>1,50</b>	0,1730	0,8181	Se Rechaza	Creciente
39	<b>1,81E-04</b>	<b>1,24</b>	0,1730	2,6884	Se Rechaza	Creciente
40	<b>1,45E-03</b>	<b>1,04</b>	0,1730	0,5052	Se Rechaza	Creciente

Tabla 32 – Estimación de  $\hat{\beta}$  y  $\hat{\lambda}$  de modelo PLP de cada escalera mecánica TNE

Escasos ítems de los sistemas de tracción de trenes o de las escaleras mecánicas, ajusta su fiabilidad al modelo PLP. Sólo los sistemas de tracción de 18 trenes y la escalera mecánica 9 tienen una distribución de fallos que se acepta según modelo PLP. Se ha comprobado que para periodos de ensayos a tiempo o kilómetros muy largos y que acumulan un número elevado de fallos, el modelo de PLP fracasa en casi la totalidad de los ítems estudiados, ya que coexisten en el mismo ítem, periodos de  $z(t)$  constante, crecientes y decrecientes.

SISTEMA	ITEMS	CON TENDENCIA	SE RECHAZA MODELO PLP	SE ACEPTA MODELO PLP
Tracción 5000-4 <sup>a</sup>	36	<b>26</b>	23	<b>3</b>
Tracción 2000-B	88	<b>38</b>	25	<b>13</b>
Tracción 8000	23	<b>6</b>	4	<b>2</b>
Escaleras Mecánicas TNE	40	<b>22</b>	21	<b>1</b>

Tabla 33 – Resumen de aceptación y rechazo del modelo PLP por sistema e ítems

Por lo tanto, de los 92 sistemas ensayados los únicos ítems en los que se puede aceptar que su fiabilidad puede ser modelada mediante PLP son los 19 sistemas de la Tabla 34.

SISTEMA	ITEM	$\lambda$	$\beta$	TENDENCIA
Tracción 5000-4 <sup>a</sup>	17	<b>2,89E-07</b>	<b>1,34</b>	Creciente
Tracción 5000-4 <sup>a</sup>	23	<b>2,83E-06</b>	<b>1,21</b>	Creciente
Tracción 5000-4 <sup>a</sup>	34	<b>1,66E-07</b>	<b>1,40</b>	Creciente
Tracción 2000-B	13	<b>4,12E-03</b>	<b>0,66</b>	Decreciente
Tracción 2000-B	21	<b>7,09E-07</b>	<b>1,28</b>	Creciente
Tracción 2000-B	22	<b>2,38E-03</b>	<b>0,69</b>	Decreciente
Tracción 2000-B	26	<b>1,08E-02</b>	<b>0,59</b>	Decreciente
Tracción 2000-B	37	<b>1,22E-03</b>	<b>0,75</b>	Decreciente
Tracción 2000-B	38	<b>3,39E-07</b>	<b>1,32</b>	Creciente
Tracción 2000-B	43	<b>3,13E-02</b>	<b>0,49</b>	Decreciente
Tracción 2000-B	45	<b>1,17E-03</b>	<b>0,75</b>	Decreciente
Tracción 2000-B	50	<b>6,38E-04</b>	<b>0,80</b>	Decreciente
Tracción 2000-B	51	<b>1,87E-03</b>	<b>0,71</b>	Decreciente
Tracción 2000-B	55	<b>7,01E-07</b>	<b>1,26</b>	Creciente
Tracción 2000-B	68	<b>2,09E-03</b>	<b>0,71</b>	Decreciente
Tracción 2000-B	74	<b>5,62E-11</b>	<b>1,92</b>	Creciente
Tracción 8000	6	<b>6,99E-02</b>	<b>0,42</b>	Decreciente
Tracción 8000	19	<b>3,31E-02</b>	<b>0,49</b>	Decreciente
Escaleras Mecánicas TNE	9	<b>1,36E-02</b>	<b>0,89</b>	Decreciente

Tabla 34 - Parámetros  $\hat{\beta}$  y  $\hat{\lambda}$  de ítems con modelo PLP aceptado

En la Figura 63 se representa  $E[N(km)]$  con los valores reales en explotación y la estimación efectuada por el modelo de PLP con tendencia decreciente del sistema de tracción del tren 6 de la serie 8000, siendo uno de los ítems en el que existe un alto grado de ajuste entre el modelo y los datos, y la prueba de bondad de ajuste con el estadístico  $C^2$  es aceptada.

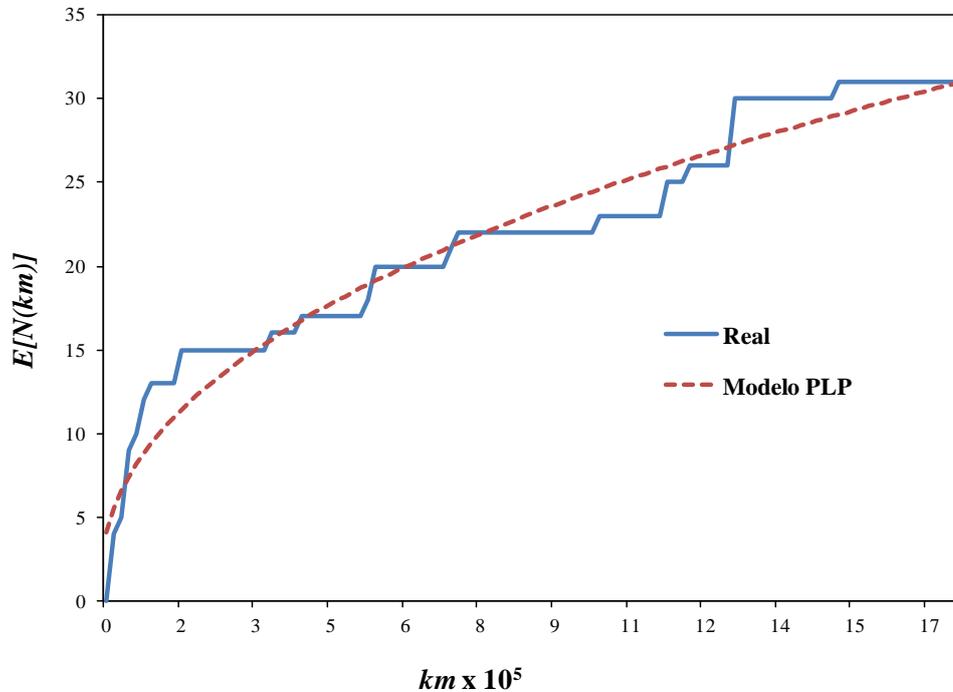


Figura 63 – Fallos acumulados por el tren 6 de la serie 8000 (tendencia decreciente)

En la Figura 64 se representa  $E[N(km)]$  con los valores reales en explotación y la estimación efectuada por el modelo de PLP con tendencia creciente del sistema de tracción del tren 17 de la serie 5000-4ª, siendo uno de los ítems en el que existe un alto grado de ajuste entre el modelo y los datos, y la prueba de bondad de ajuste con el estadístico  $C^2$  es aceptada. Se recuerda la ley de potencia aceptada para estos 19 ítems;

$$E[N(t)] = \lambda t^\beta \quad (52)$$

y función intensidad de fallo;

$$z(t) = \frac{d}{dt} E[N(t)] = \lambda \beta t^{\beta-1} \quad (53)$$

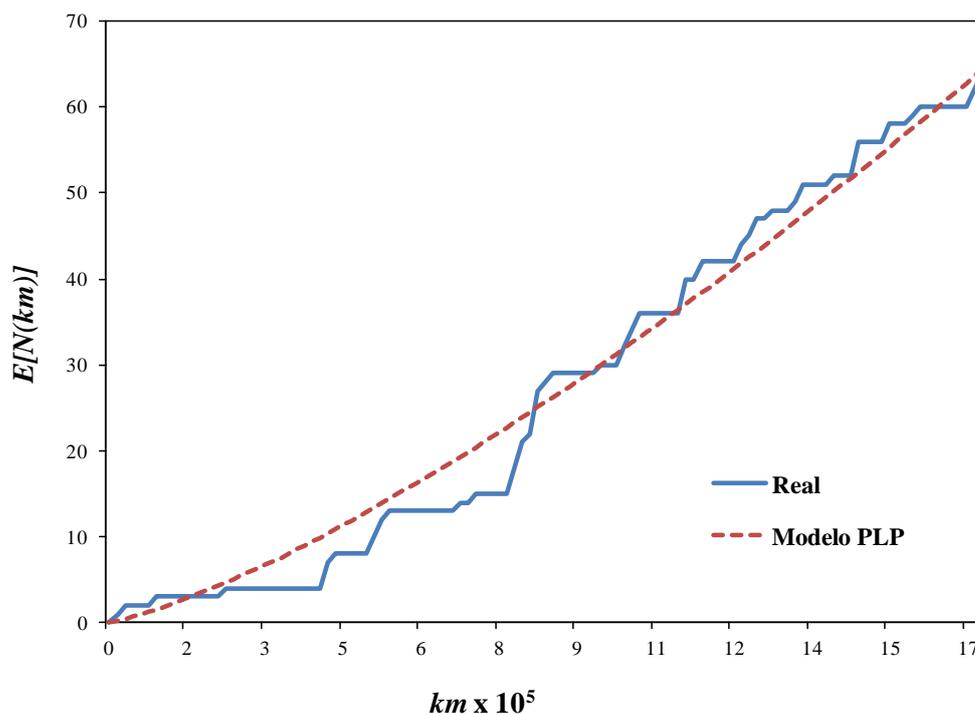


Figura 64 – Fallos acumulados por el tren 17 de la serie 5000-4ª (tendencia creciente)

La norma no recoge un modelo NHPP alternativo a PLP para los 73 ítems con modelo rechazado. Estas altas tasas de fracaso han llevado a desarrollar múltiples modelos que respondan adecuadamente a los resultados de ensayos en explotación, como son los modelos SP complejos y otros, ver Ruggeri (2006) y Weckman (2001) como ejemplos aplicados a flotas de transporte.

## 6.7. Resumen de resultados del estudio normativo IEC de la fiabilidad

- Se cuenta con una completa base de datos, lo que permite asegurar que los resultados que se obtienen en los ensayos tienen un alto grado de integridad.
- Aplicando el test de tendencia  $U$  para múltiples ítems bajo la norma IEC 60605-6 (2007) en su apartado 7.3, se obtiene:
  - Los sistemas de tracción de los trenes 5000-4ª presentan una tendencia de alto crecimiento de los fallos acorde con el comportamiento general de los sistemas electromecánicos.
  - Los sistemas de tracción de los trenes 2000-B presentan una tendencia ligeramente creciente de los fallos que responde al comportamiento de sistemas eminentemente electrónicos y eléctricos.
  - Los sistemas de tracción de los trenes 8000 presentan una tendencia decreciente de los fallos compatibles con sistemas electrónicos y software.
  - Las escaleras mecánicas TNE presentan una tendencia crecimiento de los fallos acorde con el comportamiento general de los sistemas electromecánicos.

- Al aplicar el modelo PLP para múltiples ítems con la norma IEC 61710 (2013) en sus apartados 7.2.2 y 7.3.1.1, se rechaza la hipótesis del modelo. El modelo de PLP es rechazado en los cuatro sistemas objeto de ensayo, dada la dispersión de datos de fallos de los sistemas de tracción de cada tren y de cada escalera mecánica.
- A continuación se aplica el test de tendencia  $U$  en cada ítem recogido en la norma IEC 60605-6 (2007), apartado 7.2:
  - En los sistemas de tracción de los trenes 5000-4<sup>a</sup> mayoritariamente la tendencia es creciente en fallos y algunos ítems no presentan tendencia.
  - En los sistemas de tracción de los trenes 2000-B los ítems sin tendencia son los más comunes, seguidos por ítems con tendencia creciente de fallos, y en menor proporción con tendencia decreciente de fallos.
  - En los sistemas de tracción de los trenes 8000 los ítems sin tendencia son mayoritarios, con un número destacable de ítems con tendencia decreciente de fallos.
  - En las escaleras mecánicas TNE los ítems sin tendencia son los más comunes, con casi la misma proporción por ítems con tendencia creciente de fallos, y en menor grado con tendencia decreciente de fallos.
- Para cada uno de los 95 ítems sin tendencia de fallo se estima  $\lambda$  constante con la norma IEC 60605-4 (2001), apartado 5.1 modelo propuesto HPP. En este estudio se ha decidido comprobar si los TBF se distribuyen exponencialmente y es correcta la aplicación el modelo HPP:
  - 77 ítems sin tendencia en el fallo no pueden ser modelados HPP, ya que sus TBF no se distribuyen exponencialmente.
  - Para 18 ítems sin tendencia en el fallo se acepta el modelo mediante un proceso de Poisson homogéneo HPP.
  - El modelo HPP para ítems sin tendencia de fallo fracasa de forma generalizada.
- Por último se aplicar el modelo de PLP a cada ítem de los 92 con tendencia de fallo la según norma IEC 61710 (2013), apartados 7.2.1 y 7.3.1.1.:
  - 73 ítems con tendencia en el fallo no pueden ser modelados PLP.
  - Para 19 ítems con tendencia en el fallo se acepta el modelo mediante un proceso de Poisson no homogéneo NHPP con ley de potencia PLP.
  - El modelo PLP para ítems con tendencia de fallo fracasa de forma generalizada.
- Dado que sólo se han podido modelar la fiabilidad 37 de los 187 ítems, de los cuatro sistemas reparables objeto de este estudio mediante la aplicación de las normas IEC, se ha procedido a efectuar un estudio complementario de otros modelos no contemplados en las norma IEC, al objeto de contrastar su validez y comparar los resultados que se obtienen con modelos alternativos.

# 7. ESTUDIO COMPLEMENTARIO DE LA FIABILIDAD DE LOS SISTEMAS REPARABLES

---

*La rueda más estropeada del carro es la que hace más ruido.*

- Esopo-

**E**l fracaso masivo de los modelos de las normas IEC y las importantes variaciones de las  $z(km)$  obtenidas en los sistemas de tracción de los trenes y las escaleras mecánicas con  $z(t)$  sin tendencia, y las diferencias, a su vez, con los sistemas de tracción de trenes con tendencia decreciente o creciente y las escaleras mecánicas con tendencia decreciente o creciente, plantean la necesidad de intentar profundizar e identificar en las potenciales causas técnicas u operacionales que hacen que cada tren o escalera tenga un valor diferenciado de  $z(t)$ , siendo los sistemas de tracción y escaleras entre sí tecnológicamente iguales y los contextos de operación idénticos.

De forma subjetiva, todos tenemos la percepción de que series fabricadas de forma idéntica de sistemas reparables complejos (por ejemplo, los automóviles), tienen una fiabilidad en su explotación diferentes, y en algunos casos con valores dispares, y los datos obtenidos en este estudio corroboran esta percepción subjetiva, a la que se debe tratar de dar una explicación científica. Se han efectuado, de forma exploratoria, diferentes ensayos para el modelado de los sistemas reparables objeto de estudio y se presentan en la tesis los resultados más reseñables.

## 7.1. Selección de modelos alternativos a los estándares IEC

Dada la profusión de modelos desarrollados y publicados de potencial aplicación de estos estudios para sistemas reparables alternativos a los normalizados por IEC, ver 2.7., y la compleja aparamenta matemática necesaria para la aplicación de gran parte de ellos, se ha sondeado el mercado del software de apoyo, resultado el programa más conveniente para esta investigación STATGRAPHICS Centurion, ya que incluye métodos estadísticos para sistemas reparables que no corresponden a los recogidos en las normas IEC, y nos permiten establecer análisis complementarios, e incluso comparar los resultados obtenidos aplicando diferentes metodologías, con los resultados de los ensayos efectuados bajo las normas IEC. Asimismo STATGRAPHICS Centurion también incorpora potentes herramientas de análisis multivariante de aplicación en la última fase de este estudio.

La versión empleada es STATGRAPHICS Centurion XVI (16.2.04), y para el análisis de la fiabilidad cuenta con modelos para elementos no reparables y para elementos reparables. Para elementos reparables tiene con dos menús de análisis, el denominado “Sistemas Compuestos (intervalos)”, para los análisis de los que no se disponen de los tiempos exactos de los fallos (sólo los intervalos), y el “Sistemas Compuestos (tiempos)”, una pésima traducción de “Repairable Systems (Times)”, para los análisis de los que se disponen de los tiempos exactos de los fallos, de aplicación a este estudio.

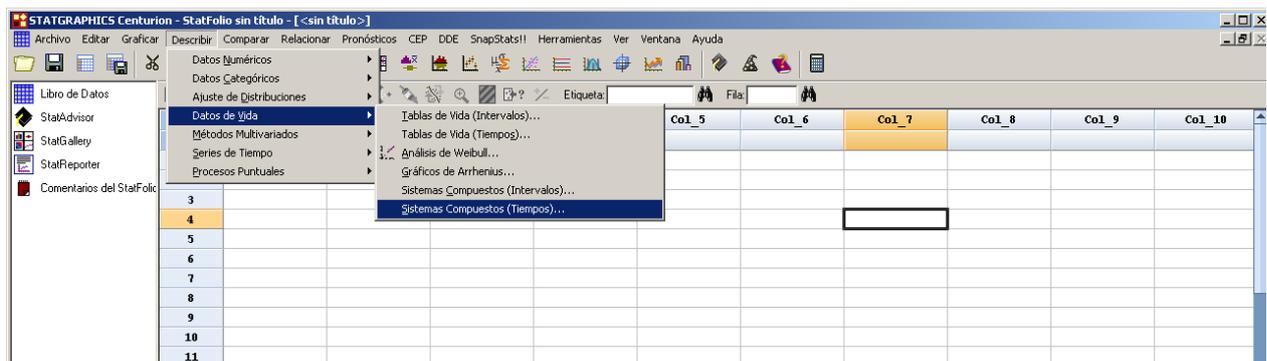


Figura 65 – Menú de análisis de sistemas reparables (Tiempos) de STATGRAPHICS Centurion

En primer lugar se deben cargar en el Libro de Datos los tiempos (o kilómetros) de los fallos de cada ítem del sistema a ensayar. Una vez seleccionado el menú “Sistemas Compuestos (intervalos)” STATGRAPHICS permite efectuar los ensayos de uno o varios ítems, con ensayo terminado a tiempo o terminado a fallo. Como ya se ha expuesto en nuestro estudio los ensayos son terminados a tiempo.

Los métodos estadísticos y herramientas para el análisis de la fiabilidad de sistemas reparables con datos exactos de fallo y terminados a tiempo (o a fallo) que incluye STATGRAPHICS Centurion XVI (16.2.04) son:

– Test de Tendencia:

- Test de Laplace, también denominado estadístico  $U$  (el empleado por en las normas IEC).
- Test MIL-HDBK-189 también conocido como AMSAA/Crow (Army Materiel Systems Analysis Activity).
- Test RAT (Reverse Arrangement Test).

– Modelos:

- Proceso de Poisson homogéneo HPP
- Proceso de Poisson no homogéneo NHPP: Función Potencia, Función Exponencial de 1º, 2º y 3º orden y Modelo IBM (ver 2.7.6.).
- Procesos de Renovación RP: incluye 27 distribuciones de ensayo para el mejor ajuste de los TBF.

- Prueba de Bondad de Ajuste:
  - Chi-cuadrado  $\chi^2$ .
  - Kolmogorov-Smirnov  $K-S$ .
  - Kolmogorov-Smirnov modificada  $D$ .
  - Kuiper  $V$ .
  - Cramer-von-Mises  $C^2$ .
  - Watson  $U^2$ .
  - Anderson-Darling  $A^2$ .
- Métodos de análisis gráfico (no paramétricos):
  - Gráfico de Fallos.
  - Gráfico acumulativo de fallos.
  - Gráfico de tasa de fallos.
  - Diagrama de dispersión de TBF.
  - Gráfico de percentiles de TBF.
  - Gráfico de cuantiles de TBF.
  - Gráfico de Distribución de TBF.
- Gráficos:
  - $R(t)$ , función de fiabilidad (o supervivencia).
  - $f(t)$ , función de densidad de probabilidad del fallo (PDF).
  - $F(t)$ , función acumulada de la probabilidad de fallo (CDF).

## 7.2. Análisis de los TBF y la naturaleza de los fallos

En primer lugar se han centrado los análisis en la búsqueda de patrones en los TBF de los sistemas, observando una tendencia generalizada a la acumulación de varios fallos consecutivos durante cortos periodos temporales, a los que preceden y anteceden largos periodos temporales sin fallos acumulados. La norma IEC 60300-3-5 (2001) señala que estimación gráfica de  $z(km)$  instantánea es la pendiente a la tangente de la curva  $E[N(km)]$  en cualquier punto, véase Figura 66, en la que se observan los fallos consecutivos y su influencia en la  $z(km)$  instantánea representada.

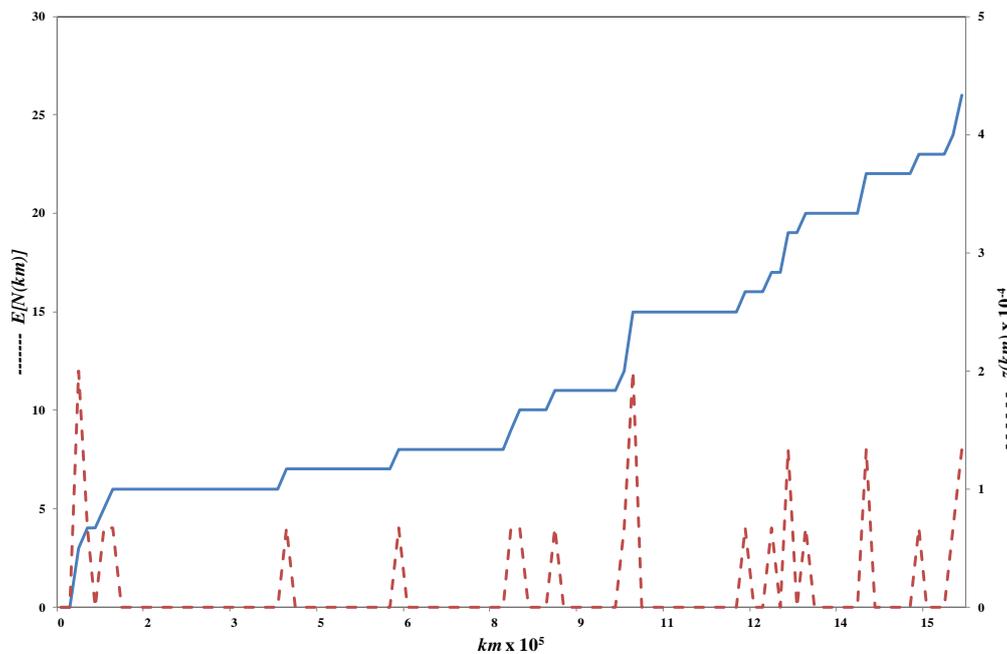


Figura 66 – Construcción gráfica de la estimación de  $z(km)$  instantánea del tren 1 de la serie 8000

Este fenómeno es bien conocido por los responsables de mantenimiento de sistemas reparables, ver Hatton (1999) y Karanikas (2013). Los **fallos repetitivos** que un sistema reparable acumula durante su larga vida de operación, son una situación que tiene su origen en diferentes causas de difícil diagnóstico y solución en los sistemas complejos:

- Factores operacionales: se pueden superar las condiciones ambientales de diseño (temperatura, vibraciones, etc.), y una vez que desaparecen son difícilmente reproducibles.
- Factores humanos: falta de formación y/o equipos de diagnóstico del personal de mantenimiento al reparar el fallo. También existen errores y falsas maniobras en el personal de operación, que generan e inducen fallos en la operación de los sistemas.
- Factores técnicos: falsos contactos en cableados y conectores, componentes electrónicos con pérdidas temporales de parámetros, tolerancias y ajustes críticos en componentes mecánicos, etc.

Ya se ha comprobado que para los sistemas sin tendencia en los fallos, no es de aplicación mayoritariamente el modelo HPP, ya que los TBF no responden a una distribución exponencial (ver 6.5) y que para los sistemas con tendencia no es mayoritariamente de aplicación el modelo PLP (ver 6.6) como consecuencia de los cambios de pendiente de los TBF. Se han analizado los datos de los TBF de cada sistema, cuyos parámetros más destacables se presentan en la tabla adjunta.

Parámetro	Tracción 5000-4ª	Tracción 2000-B	Tracción 8000	Escaleras Mecánicas TNE
Valores	3.112	4.349	945	8.837
Promedio (km, t)	18.343	26.807	41.030	315
Desviación estándar (km, t)	27.029	42.089	61.965	529
Coefficiente de variación	147%	157%	151%	168%
Densidad máxima (km, t)	13.000	22.000	28.000	300
% Valores < Densidad máxima	61,92%	65,11%	61,79%	69,66%
Mejor Distribución (Test K-S)	Logística Generalizada	Logística Generalizada	Logística Generalizada	Log-normal 3 parámetros

Tabla 35 - Parámetros básicos de los TBF de los sistemas

En los datos se observa que existe una gran concentración de TBF cercanos al origen, y que son los fallos repetitivos. Una vez superado un plazo de kilómetros (u horas) cercanos a la reparación, los fallos presentan una distribución que va disminuyendo en su densidad, no correspondiéndose en ningún caso a una distribución exponencial.

La interpretación práctica de estos valores es que después de una reparación, existe una alta probabilidad de que un fallo ocurra en las primeras fases de operación, y que superado ese plazo, la probabilidad de que el fallo acontezca disminuye de forma notable, ver Figura 67.

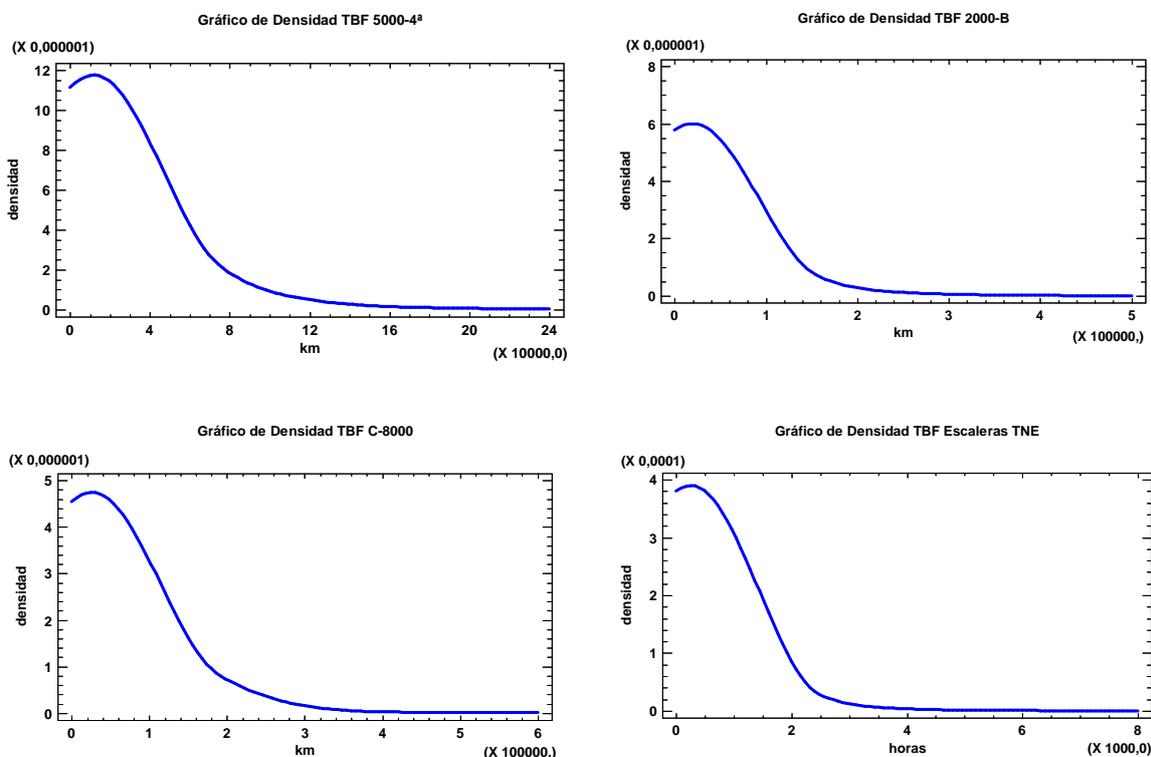


Figura 67 – Gráficos de densidad de los TBF de los sistemas de tracción y escaleras mecánicas

El fracaso masivo de los modelos HPP y PLP en los sistemas ensayados tiene como causa raíz los episodios de fallos repetitivos acumulados durante largos periodos de operación, al no tener los TBF una distribución exponencial. Es por ello que se propone continuar los ensayos en los sistemas sin tendencia en los fallos con modelos RP y en los items con tendencia con modelos NHPP alternativos al PLP, y para que estos modelos se puedan aplicar hay que analizar la posible dependencia de los TBF.

Se debe descartar la existencia de correlación en los TBF para asegurar que los datos son independientes. Se han analizado y valorado las potenciales variables que pudieran estar en el origen de los TBF en los sistemas de tracción, resultando 12 variables a estudio; equipamiento del tren, reformas en el tren, kilometraje, años de operación, fecha de fabricación, orden de fabricación, personal de conducción, sistema de gestión del mantenimiento, plan de mantenimiento, personal de mantenimiento, condiciones ambientales y línea de circulación. Aplicado ensayos de correlación de Pearson, se ha descartado influencia sobre los TBF.

De las 12 variables de aplicación a los sistemas tracción de los trenes se presentan sólo los resultados de las 2 variables con rangos apreciables; fecha de fabricación y orden de fabricación. Las otras 10 variables presentan unos rangos muy cercanos y/o idénticos, por lo que los ensayos de correlación conducen directamente a rechazar esta hipótesis, ya que los rangos de los TBF son de gran magnitud, los resultados se pueden observar en las tablas adjuntas. Se descarta la influencia de la estacionalidad/temperatura, ya que la temperatura en los túneles es muy estable durante todo el año, con un rango máximo de entre 20°C y 30°C.

TREN	Nº TBF	Promedio TBF	Orden Fabricación	Fecha Fabricación
1	95	15.557	1	01/03/1993
2	97	16.040	2	01/03/1993
3	121	13.194	3	01/03/1993
4	77	20.950	4	01/03/1993
5	107	14.862	5	01/04/1993
6	103	16.331	6	01/04/1993
7	84	19.456	7	01/04/1993
8	99	16.468	8	01/04/1993
9	73	20.713	9	01/05/1993
10	126	12.973	10	01/05/1993
11	118	13.801	11	01/05/1993
12	73	22.275	12	01/05/1993
13	111	14.900	13	01/06/1993
14	67	24.126	14	01/06/1993
15	92	17.630	15	01/06/1993
16	96	17.091	16	01/06/1993
17	64	26.286	17	01/06/1993
18	79	20.124	18	01/06/1993
19	69	22.459	19	07/06/1993
20	67	22.336	20	01/07/1993
21	75	21.789	21	01/07/1993
22	84	19.061	22	01/07/1993
23	88	17.792	23	01/07/1993
24	60	25.078	24	01/07/1993
25	78	20.381	25	01/07/1993
26	90	16.571	26	01/07/1993
27	100	16.158	27	01/09/1993
28	62	25.918	28	01/09/1993
29	72	21.869	29	01/09/1993
30	100	15.416	30	01/10/1993
31	68	22.910	31	01/10/1993
32	66	22.540	32	01/11/1993
33	79	19.259	33	01/11/1993
34	80	19.520	34	01/11/1993
35	85	18.518	35	01/12/1993
36	107	15.165	36	01/12/1993
<b>Correlaciones Pearson Nº TBF</b>			<b>-0,3760</b>	<b>-0,2971</b>
<b>Correlaciones Pearson Promedio TBF</b>			<b>0,3182</b>	<b>0,2416</b>

Tabla 36 - Correlaciones de los TBF con variables de contexto en trenes 5000-4ª

TREN	Nº TBF	Promedio TBF	Orden Fabricación	Fecha Fabricación
1	89	14.760	1	02/12/1997
2	52	26.669	2	04/12/1997
3	54	26.226	3	05/12/1997
4	75	18.833	4	18/12/1997
5	58	23.954	5	23/12/1997
6	60	23.793	6	18/12/1997
7	82	17.487	7	26/12/1997
8	65	22.096	8	26/12/1997
9	81	16.471	9	30/12/1997
10	70	20.267	10	30/12/1997
11	57	22.421	11	27/01/1998
12	50	29.049	12	27/01/1998
13	47	27.321	13	30/01/1998
14	50	27.210	14	19/02/1998
15	55	26.244	15	03/02/1998
16	60	24.134	16	12/02/1998
17	117	11.418	17	19/02/1998
18	63	20.567	18	19/02/1998
19	57	22.607	19	27/02/1998
20	45	30.059	20	03/03/1998
21	53	26.802	21	24/02/1998
22	41	29.166	22	20/03/1998
23	44	32.077	23	03/03/1998
24	62	21.477	24	20/03/1998
25	39	35.872	25	17/03/1998
26	44	28.078	26	24/03/1998
27	36	38.705	27	17/03/1998
28	46	28.703	28	31/03/1998
29	49	26.375	29	07/04/1998
30	52	26.791	30	20/03/1998
31	37	32.276	31	14/04/1998
32	48	28.496	32	24/03/1998
33	59	21.448	33	21/04/1998
34	46	30.559	34	31/03/1998
35	85	15.562	35	30/04/1998
36	43	29.864	36	16/04/1998
37	49	26.781	37	30/04/1998
38	39	33.228	38	12/05/1998
39	78	17.288	39	07/04/1998
40	32	42.893	40	19/05/1998
41	48	27.539	41	14/04/1998
42	51	26.440	42	21/05/1998
43	33	38.912	43	26/05/1998
44	57	24.041	44	21/04/1998
45	45	28.227	45	26/05/1998
46	46	27.990	46	09/06/1998
47	40	32.478	47	11/06/1998
48	53	25.390	48	30/04/1998
49	46	27.192	49	18/06/1998

Tabla 37- Correlaciones de los TBF con variables de contexto en trenes 2000-B (I)

TREN	Nº TBF	Promedio TBF	Orden Fabricación	Fecha Fabricación
50	52	25.795	50	25/06/1998
51	41	32.357	51	05/05/1998
52	74	16.886	52	30/06/1998
53	36	38.164	53	30/06/1998
54	38	38.244	54	30/07/1998
55	45	33.712	55	16/07/1998
56	78	19.668	56	22/07/1998
57	47	30.940	57	30/07/1998
58	58	25.002	58	04/08/1998
59	64	23.842	59	22/09/1998
60	60	25.394	60	29/09/1998
61	31	49.178	61	30/09/1998
62	23	64.769	62	28/10/1998
63	51	28.250	63	30/10/1998
64	28	48.201	64	18/03/1999
65	37	39.093	65	26/03/1999
66	58	24.899	66	31/03/1999
67	61	20.155	67	24/06/1999
68	43	29.851	68	30/06/1999
69	41	29.290	69	30/06/1999
70	42	28.665	70	21/07/1999
71	40	31.609	71	28/07/1999
72	53	22.931	72	30/07/1999
73	24	48.997	73	29/02/2000
74	26	46.019	74	29/02/2000
75	38	32.538	75	29/03/2000
76	31	38.417	76	29/03/2000
77	29	38.006	77	26/04/2000
78	19	63.985	78	26/04/2000
79	36	32.874	79	30/05/2000
80	48	24.102	80	30/05/2000
81	29	40.701	81	30/06/2000
82	22	53.144	82	30/06/2000
83	34	34.348	83	26/07/2000
84	36	31.822	84	26/07/2000
85	52	22.912	85	28/09/2000
86	50	24.024	86	28/09/2000
87	50	22.918	87	27/10/2000
88	36	34.267	88	27/10/2000
<b>Correlaciones Pearson Nº TBF</b>			<b>-0,5196</b>	<b>-0,4794</b>
<b>Correlaciones Pearson Promedio TBF</b>			<b>0,4488</b>	<b>0,3939</b>

Tabla 38 - Correlaciones de los TBF con variables de contexto en trenes 2000-B (II)

TREN	Nº TBF	Promedio TBF	Orden Fabricación	Fecha Fabricación
1	27	64.630	1	14/05/2002
2	64	26.244	2	13/06/2002
3	43	39.495	3	20/05/2002
4	30	58.167	4	29/05/2002
5	25	70.420	5	18/06/2002
6	31	49.172	6	06/06/2002
7	41	42.939	7	13/06/2002
8	65	27.340	8	23/05/2002
9	31	53.723	9	15/06/2002
10	45	35.129	10	25/06/2002
11	49	34.659	11	19/06/2002
12	37	45.012	12	26/06/2002
13	32	53.072	13	26/06/2002
14	70	24.645	14	28/06/2002
15	40	38.496	15	09/07/2002
16	42	39.333	16	26/07/2002
17	49	35.207	17	29/08/2002
18	34	52.268	18	26/09/2002
19	38	39.039	19	28/09/2002
20	57	29.218	20	10/12/2002
21	32	53.524	21	13/12/2002
22	29	58.562	22	18/02/2003
23	34	52.808	23	17/03/2003
<b>Correlaciones Pearson Nº TBF</b>			<b>-0,0206</b>	<b>-0,1553</b>
<b>Correlaciones Pearson Promedio TBF</b>			<b>-0,0809</b>	<b>0,1340</b>

Tabla 39 - Correlaciones de los TBF con variables de contexto en trenes 8000

Las escaleras mecánicas del estudio son iguales tecnológicamente en su construcción, existiendo ligeras diferencias en su tamaño y contexto operacional, sometiéndose a estudio las cinco (5) variables; fecha de fabricación, orden de fabricación, sentido de marcha, longitud y tránsito. Se descarta la influencia de la estacionalidad/temperatura, ya que la temperatura en los vestíbulos y andenes es muy estable durante todo el año, con un rango máximo de entre 20°C y 30°C.

EEMM	Nº TBF	Promedio TBF	Orden Fabricación	Fecha Fabricación	Sentido	Longitud	Tránsito
1	202	359,50	1	21/12/2004	3	6,5	14.247
2	166	436,02	2	21/12/2004	3	6,88	15.763
3	151	475,36	3	21/01/2005	3	8,65	2.101
4	174	403,79	4	21/01/2005	3	6,3	3.349
5	389	184,01	5	08/02/2005	3	9,6	5.083
6	144	496,94	6	08/02/2005	3	3,35	6.165
7	214	331,40	7	28/01/2005	3	11,9	9.462
8	273	257,95	8	18/02/2005	3	11,9	7.510
9	301	236,21	9	18/02/2005	3	9,6	10.230
10	169	417,16	10	25/02/2005	3	6,3	9.771
11	193	366,74	11	07/03/2005	1	11,9	9.767
12	283	245,30	12	18/03/2005	3	7,33	7.612
13	335	211,28	13	22/03/2005	3	8,64	7.612
14	255	277,02	14	22/03/2005	3	7,3	10.873
15	326	217,18	15	22/03/2005	3	8,62	10.873
16	275	255,56	16	06/04/2005	1	8,95	11.835
17	171	396,73	17	08/04/2005	3	8,4	1.785
18	128	549,06	18	07/04/2005	3	8,4	8.503
19	152	462,76	19	12/04/2005	1	11,9	10.455
20	201	348,16	20	15/04/2005	1	9,6	13.218
21	186	376,77	21	25/04/2005	3	9,98	6.721
22	259	268,11	22	05/05/2005	3	16,73	6.721
23	256	270,86	23	13/05/2005	3	9,81	5.421
24	306	227,52	24	19/05/2005	1	9,43	6.573
25	292	237,26	25	26/05/2005	1	6,5	15.763
26	347	198,10	26	27/05/2005	1	6,88	14.247
27	124	555,48	27	02/06/2005	1	9,98	7.212
28	289	235,22	28	03/06/2005	1	8,64	14.352
29	293	236,31	29	06/06/2005	1	3,35	5.644
30	109	633,58	30	10/06/2005	1	10,54	262
31	197	350,05	31	16/06/2005	1	7,3	6.751
32	131	526,56	32	21/06/2005	1	9,81	7.905
33	281	241,07	33	22/07/2005	1	16,73	7.212
34	280	239,07	34	03/08/2005	1	8,5	13.209
35	286	238,04	35	05/08/2005	3	7,5	13.742
36	126	532,06	36	23/09/2005	1	3,16	7.249
37	172	387,09	37	23/09/2005	3	3,16	8.110
38	63	1051,11	38	23/09/2005	1	6,63	5.838
39	183	361,75	39	23/09/2005	3	6,63	1.211
40	155	432,39	40	23/09/2005	1	6,63	1.230
<b>Correlaciones Pearson Nº TBF</b>			<b>-0,1604</b>	<b>-0,1783</b>	<b>0,1074</b>	<b>0,1856</b>	<b>0,3547</b>
<b>Correlaciones Pearson Promedio TBF</b>			<b>0,2078</b>	<b>0,2397</b>	<b>-0,1858</b>	<b>-0,1822</b>	<b>-0,3347</b>

Tabla 40 - Correlaciones de los TBF con variables de contexto en escaleras mecánicas TNE

Del total de los ensayos, sólo se observa una débil correlación negativa entre el número de TBF (nº de fallos) y el orden/fecha de fabricación de los sistemas de tracción de los trenes 2000-B. A la vista de los valores de correlación de Pearson que se han obtenido, se descarta la influencia en los TBF de cada sistema de tracción y escalera de las variables estudiadas. Bredrup (1986) ya planteaba hace décadas la existencia de importantes diferencias entre las  $z(t)$  obtenidas en sistemas idénticos, y analiza la influencia de naturaleza de los fallos; operacionales, hardware, software, etc.

También se ha efectuado un estudio de correlación sobre los TBF de cada subsistema que componen los sistemas de tracción y las escaleras mecánicas, y su influencia en el los TBF de cada sistema, así como cuando no se ha podido establecer el origen del fallo en ninguna parte concreta del sistema, es decir no se efectúa ninguna reparación (sólo comprobaciones), y en esta caso se clasifica como “sin anomalía aparente”.

Subsistemas	Leyenda
11	Pantógrafo
12	Protecciones
13	Reg. Marcha
21	Relés y Reactancias
22	Interruptor Principal
23	Cofre electrónica de potencia
31	Contactores
32	Vigilancia 50 Hz
33	Resistencias de Freno
41	Canalizaciones
42	Aparatos de cabina
43	Motores de Tracción
99	Sin anomalía aparente

Tabla 41 – Leyenda de los subsistemas que componen los sistemas de tracción de trenes

TREN	Nº TBF												
	TOTAL	11	12	13	21	22	23	31	33	41	42	43	99
1	94	1	0	6	2	7	13	6	4	2	6	0	47
2	97	3	0	7	0	2	11	7	5	4	10	1	47
3	121	1	0	11	1	1	12	12	2	0	10	4	67
4	77	0	0	7	2	6	2	9	6	5	12	2	26
5	107	0	0	5	1	5	10	10	1	3	15	1	56
6	103	0	0	6	0	9	10	13	0	3	8	0	54
7	84	2	0	3	1	8	11	5	7	4	7	1	35
8	99	0	0	3	0	7	14	13	7	1	11	2	41
9	73	0	0	4	1	5	9	6	8	2	5	1	32
10	126	0	0	7	0	11	21	8	5	2	9	0	63
11	118	2	0	5	1	8	16	3	4	4	11	0	64
12	73	1	0	3	2	4	6	6	1	5	7	0	38
13	111	1	0	10	3	6	12	7	2	5	19	1	45
14	67	1	0	3	0	4	9	8	1	2	7	2	30
15	92	2	0	4	0	4	7	7	2	1	10	2	53
16	96	2	0	10	0	3	7	7	5	2	9	0	51
17	64	3	0	7	1	6	4	4	3	1	5	1	29
18	79	0	0	3	0	5	6	8	4	0	12	2	39
19	69	0	1	4	0	4	1	7	2	2	13	2	33
20	67	1	0	3	2	9	9	4	0	1	5	1	32
21	75	0	0	7	0	5	4	7	4	4	8	1	35
22	85	2	0	3	0	17	5	4	10	2	9	0	33
23	88	1	0	7	2	8	15	7	3	1	7	1	36
24	60	0	0	4	0	4	11	2	1	1	7	0	30
25	78	2	0	5	0	11	7	1	0	3	8	0	41
26	90	0	0	5	0	10	15	2	3	5	14	1	35
27	100	2	0	7	1	6	14	8	6	2	11	0	43
28	62	1	0	1	0	6	3	6	4	0	3	3	35
29	72	1	0	5	0	5	7	9	4	0	2	1	38
30	100	2	0	2	0	9	5	8	0	1	8	0	65
31	68	0	0	6	0	5	8	3	2	2	7	1	34
32	66	0	1	6	0	5	7	5	3	1	10	0	28
33	79	0	0	4	0	4	17	3	1	2	7	1	40
34	80	1	0	3	0	7	5	7	9	4	14	0	30
35	85	1	0	10	0	4	4	3	3	1	9	2	48
36	107	1	0	8	0	9	15	10	2	5	14	0	43
<b>Correlaciones Pearson Nº TBF</b>		<b>0,13</b>	<b>-0,26</b>	<b>0,46</b>	<b>0,13</b>	<b>0,16</b>	<b>0,61</b>	<b>0,45</b>	<b>0,05</b>	<b>0,23</b>	<b>0,50</b>	<b>-0,10</b>	<b>0,84</b>

Tabla 42 - Correlaciones de los TBF total y subsistemas en trenes 5000-4<sup>a</sup>

La correlación con los fallos “sin anomalía aparente” (99), es obvio que debe ser muy alta, ya que este grupo acumula el 48,07% del total del nº de fallos.

TREN	Nº TBF													
	TOTAL	11	12	13	21	22	23	31	32	33	41	42	43	99
1	89	8	0	8	0	6	1	3	4	6	0	9	13	31
2	52	1	1	4	0	2	5	3	1	5	2	6	6	16
3	54	1	0	6	0	4	1	2	4	4	1	7	9	15
4	75	5	1	3	1	1	2	7	4	10	0	4	7	30
5	58	0	1	1	0	0	1	2	5	3	0	6	9	30
6	60	1	1	2	0	0	2	1	0	8	0	17	10	18
7	82	2	0	6	0	6	3	4	3	5	1	16	8	28
8	65	1	4	7	1	3	6	2	2	8	0	7	13	11
9	81	0	1	13	0	8	10	6	3	7	0	7	9	17
10	70	2	0	5	0	3	2	1	2	10	0	6	12	27
11	57	1	2	6	0	0	3	1	1	10	0	7	9	17
12	50	5	2	5	0	1	5	4	1	2	0	11	5	9
13	47	2	0	4	0	1	5	2	1	3	0	8	9	12
14	50	2	0	1	0	1	2	0	1	7	0	9	4	23
15	55	1	1	5	0	2	1	2	1	4	1	2	11	24
16	60	2	1	5	0	8	7	2	0	5	0	4	1	25
17	117	1	5	12	0	12	6	11	9	10	0	11	5	35
18	63	2	0	4	0	3	6	6	6	12	1	4	3	16
19	57	3	1	4	0	1	4	1	0	7	0	11	11	14
20	45	0	0	10	0	9	3	1	0	3	0	7	3	9
21	53	1	3	4	0	1	8	5	2	8	0	6	3	12
22	41	0	1	3	0	0	5	2	0	6	0	2	7	15
23	44	0	4	4	0	0	0	1	3	8	0	5	5	14
24	62	2	0	0	0	2	5	2	1	10	0	13	3	24
25	39	0	1	5	0	1	4	2	1	4	0	9	1	11
26	44	2	0	0	0	3	1	2	0	2	0	8	9	17
27	36	0	0	3	0	3	3	0	0	8	0	4	7	8
28	46	1	0	11	1	2	0	3	0	5	0	6	6	11
29	49	0	5	2	0	4	1	5	7	3	0	8	3	11
30	52	2	1	4	0	3	4	3	1	5	0	7	12	10
31	37	0	0	2	0	0	2	0	0	5	0	11	8	9
32	48	1	0	5	0	1	2	7	0	3	0	4	7	18
33	59	2	1	2	0	5	2	1	2	6	0	7	1	30
34	46	0	0	1	0	5	3	2	0	1	0	5	15	14
35	85	2	0	6	0	16	5	7	2	10	1	15	5	16
36	43	1	0	0	0	2	1	2	3	4	0	4	12	14
37	49	0	2	1	0	5	1	2	0	5	0	14	6	13
38	39	0	0	7	1	4	1	3	3	2	0	9	4	5
39	78	4	1	4	1	5	1	11	1	6	0	1	9	34
40	32	0	0	1	0	1	5	2	1	6	0	6	3	7
41	48	1	0	6	0	2	2	2	0	6	0	7	3	19
42	51	1	3	4	0	3	3	0	1	3	0	9	9	15
43	33	1	0	2	0	2	1	1	1	2	0	2	6	15
44	57	0	0	5	0	3	10	3	2	9	0	7	9	9
45	45	2	0	1	0	4	1	4	0	6	0	3	12	12
46	46	1	0	2	0	2	3	1	0	5	0	9	10	13
47	40	0	0	2	0	2	3	1	3	3	1	10	5	10
48	53	2	0	6	0	2	5	2	0	8	0	8	4	16
49	46	2	0	4	0	0	2	4	2	5	0	5	11	11

Tabla 43 - Correlaciones de los TBF total y subsistemas en trenes 2000-B (I)

TREN	Nº TBF													
	TOTAL	11	12	13	21	22	23	31	32	33	41	42	43	99
50	52	0	0	2	0	0	0	0	7	6	0	8	6	23
51	41	0	0	2	0	4	3	1	0	4	0	11	8	8
52	74	2	1	11	0	8	2	9	0	10	0	5	9	17
53	36	0	2	2	1	7	0	2	0	4	0	3	4	11
54	38	0	0	6	0	1	2	3	2	4	0	1	4	15
55	45	2	0	5	0	3	3	2	2	4	0	6	11	7
56	78	1	1	14	0	3	2	0	2	10	1	4	9	31
57	47	1	0	7	0	0	1	0	0	8	0	5	13	12
58	58	1	2	2	0	3	2	7	4	10	2	0	10	15
59	64	2	3	11	0	2	3	6	2	6	0	11	5	13
60	60	1	1	11	0	8	2	3	1	2	0	5	5	21
61	31	1	0	3	0	0	0	0	0	0	3	3	6	15
62	23	1	1	4	0	5	0	0	0	4	0	1	3	4
63	51	1	0	4	0	2	0	5	6	3	0	8	9	13
64	28	1	0	1	0	0	3	1	2	0	0	8	9	3
65	37	1	1	4	0	2	3	1	1	2	0	8	2	12
66	58	2	5	3	0	1	3	3	1	2	1	9	14	14
67	61	2	0	3	0	0	7	3	1	14	0	7	8	16
68	43	0	1	2	0	0	7	4	1	3	0	7	5	13
69	41	1	0	4	0	2	6	6	2	2	0	2	5	11
70	42	2	0	2	1	2	0	0	2	5	0	14	4	10
71	40	0	0	5	1	2	9	1	1	2	0	7	9	3
72	53	3	0	3	0	5	3	3	1	6	0	7	6	16
73	24	1	0	5	0	0	0	1	0	1	0	7	0	9
74	26	0	1	0	0	2	2	0	0	3	0	8	6	4
75	38	1	1	2	1	1	1	8	1	5	0	8	4	5
76	31	2	1	3	1	4	4	2	1	3	0	6	2	2
77	29	3	0	2	1	1	1	0	0	6	0	5	5	5
78	19	2	0	2	0	0	1	1	0	2	0	4	0	7
79	36	1	1	4	0	3	1	3	1	2	0	6	6	8
80	48	2	2	2	0	11	2	3	1	5	0	6	6	8
81	29	5	0	3	0	2	2	3	1	4	0	3	1	5
82	22	3	0	2	0	0	2	3	2	0	0	6	2	2
83	34	2	2	5	0	2	0	1	0	4	0	3	3	12
84	36	2	1	2	1	1	0	3	7	2	0	5	1	11
85	52	0	1	5	0	1	3	0	8	5	0	6	2	21
86	50	1	1	3	0	5	2	4	0	9	0	5	8	12
87	50	2	1	7	0	2	0	1	1	4	0	10	11	11
88	36	1	0	2	0	2	2	0	1	8	0	8	2	10
<b>Correlaciones Pearson Nº TBF</b>	<b>0,27</b>	<b>0,30</b>	<b>0,53</b>	<b>-0,08</b>	<b>0,51</b>	<b>0,31</b>	<b>0,54</b>	<b>0,40</b>	<b>0,59</b>	<b>0,12</b>	<b>0,28</b>	<b>0,35</b>	<b>0,77</b>	

Tabla 44 - Correlaciones de los TBF total y subsistemas en trenes 2000-B (II)

En los sistemas de tracción de trenes 2000-B, la correlación con los fallos “sin anomalía aparente” (99), también es razonable que sea alta, ya que este grupo acumula el 31,13% del total del nº de fallos.

TREN	Nº TBF													
	TOTAL	11	12	13	21	22	23	31	32	33	41	42	43	99
1	27	1	1	6	0	1	3	1	1	0	2	3	6	2
2	64	0	2	10	2	10	24	1	0	0	0	2	6	7
3	43	0	2	1	0	0	15	0	1	0	0	8	7	9
4	30	3	0	2	1	1	6	0	2	0	1	3	2	9
5	25	2	0	1	0	4	7	1	0	0	0	2	2	6
6	31	0	1	1	1	1	10	0	0	0	0	5	3	9
7	41	0	1	3	0	1	8	0	3	0	1	6	6	12
8	65	1	0	19	1	5	11	0	0	0	1	5	4	18
9	31	0	0	3	0	2	5	0	3	0	0	4	5	9
10	45	1	1	9	0	5	12	0	0	0	0	2	8	7
11	49	0	0	1	0	0	9	0	0	0	0	6	18	15
12	37	1	0	1	0	5	13	0	2	0	1	2	5	7
13	32	1	1	3	0	5	7	0	0	0	0	2	5	8
14	70	0	1	0	0	0	34	0	2	0	0	3	10	20
15	40	2	0	4	0	0	5	0	0	0	1	7	7	14
16	42	0	0	6	0	2	15	0	0	0	0	6	7	6
17	49	2	1	4	2	0	2	0	0	0	0	12	4	22
18	34	2	0	2	0	0	16	0	0	0	0	4	5	5
19	38	4	0	4	0	2	14	0	1	0	0	2	2	9
20	57	6	0	4	0	0	18	0	1	0	0	5	9	14
21	32	5	0	0	1	0	11	0	2	0	0	2	4	7
22	29	2	1	12	0	0	6	0	0	0	1	2	3	2
23	34	2	0	2	0	1	8	0	1	0	0	7	5	8
<b>Correlaciones Pearson Nº TBF</b>		<b>-0,14</b>	<b>0,24</b>	<b>0,35</b>	<b>0,31</b>	<b>0,24</b>	<b>0,68</b>	<b>-0,08</b>	<b>-0,10</b>	<b>NA</b>	<b>-0,20</b>	<b>0,20</b>	<b>0,47</b>	<b>0,69</b>

Tabla 45 - Correlaciones de los TBF total y subsistemas en trenes 8000

En los sistemas de tracción de trenes 8000, la correlación con el subsistema 23 (Cofre electrónica de potencia) es esperada al acumular el 27,41 % del nº total de fallos. Respecto a la correlación con los fallos “sin anomalía aparente” (99), la correlación también es alta al ser el 23,80 % del nº total de fallos.

ESCALERA	Nº TBF										
	TOTAL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	99
1	202	3	31	40	0	3	31	10	5	1	78
2	166	0	25	28	1	11	21	8	10	0	62
3	151	3	44	25	0	2	14	5	8	0	50
4	174	5	21	30	0	4	7	42	1	1	63
5	389	3	64	83	0	6	92	12	3	3	123
6	144	4	20	31	0	6	13	12	6	1	51
7	214	8	38	65	0	19	11	5	5	1	62
8	273	7	52	69	0	6	40	14	6	3	76
9	301	7	45	66	0	12	59	14	7	3	88
10	169	1	26	37	0	8	27	12	3	0	55
11	193	4	32	30	0	14	27	26	4	1	55
12	283	9	58	25	1	8	66	31	7	4	74
13	335	13	60	28	1	19	63	26	15	6	104
14	255	1	55	38	1	8	40	35	10	3	64
15	326	7	91	35	5	10	45	12	6	3	112
16	275	2	45	49	0	18	31	11	8	1	110
17	171	0	33	53	0	2	28	9	4	1	41
18	128	0	16	30	1	1	22	8	7	1	42
19	152	3	12	38	0	8	19	4	2	1	65
20	201	19	22	69	0	12	26	6	6	2	39
21	186	1	54	25	4	4	27	14	4	3	50
22	259	3	64	28	1	13	44	18	7	10	71
23	256	4	44	26	1	13	68	16	6	0	78
24	306	2	67	57	1	33	13	16	18	0	99
25	292	4	55	44	0	6	29	15	18	2	119
26	347	12	49	56	0	5	44	10	13	0	158
27	124	3	24	9	0	7	14	6	10	0	51
28	289	7	58	56	1	20	42	15	16	1	73
29	293	8	38	61	0	15	53	17	19	0	82
30	109	5	21	11	0	3	6	16	6	0	41
31	197	5	39	25	0	17	32	22	2	0	55
32	131	6	10	31	0	13	6	12	5	1	47
33	281	5	27	75	1	7	33	19	13	6	95
34	280	18	35	62	0	19	18	15	18	4	91
35	286	17	43	21	0	17	77	8	13	17	73
36	126	4	35	9	1	3	28	4	0	0	42
37	172	2	50	7	1	15	45	2	1	0	49
38	63	7	16	6	1	11	4	2	1	0	15
39	183	5	59	9	1	16	16	5	3	0	69
40	155	3	46	18	0	15	23	4	9	1	36
<b>Correlaciones Pearson Nº TBF</b>		<b>0,53</b>	<b>0,46</b>	<b>0,79</b>	<b>-0,14</b>	<b>0,53</b>	<b>0,70</b>	<b>0,52</b>	<b>0,84</b>	<b>0,50</b>	<b>0,92</b>

Subsistemas	Leyenda
1	BALAUSTRADA
2	CADENAS Y ESTACION TENSORA
3	EQUIPO ELÉCTRICO
4	MOTOR
5	PASAMANOS
6	PELDAÑOS
7	PLC/COMUNICACIONES
8	S. SEGURIDADES
9	ZOCALO
99	SIN ANORMALIDAD APARENTE

Tabla 46 - Correlaciones de los TBF total y subsistemas en escaleras mecánicas TNE

En las escaleras mecánicas TNE, la correlación de los subsistemas cadenas y estación tensora, equipo eléctrico, pasamanos y sistema de seguridades es alta. Respecto a la correlación con los fallos “sin anomalía aparente” (99), la correlación es muy alta al ser el 31,78 % del nº total de fallos.

Es necesario analizar si los fallos con reparación “sin anomalía aparente”, tiene algún grado de correlación con los fallos cuyos TBF son muy cortos, es decir son fallos repetitivos, ya que a priori, parece que se trata de una relación de causa-efecto. Es decir, que cuando se produce un fallo y la reparación se completa como “sin anomalía aparente”, es cuando se repite el fallo al poco espacio de tiempo o kilómetros de operación. El método empleado para este análisis es desagregar y comparara los TBF en dos grupos, el primero corresponde a los TBF de los fallos “sin anomalía aparente” y el segundo el resto de los TBF en los cuales si se ha efectuado una reparación.

Parámetro	TBF totales	TBF sin anomalía	TBF con reparación
Valores	3112	1496	1616
Promedio (km)	18.343	18.245	18.434
Desviación estándar (km)	27.029	27.736	26.365
Coefficiente de variación	147%	152%	143%
Densidad máxima (km)	13.000	13.000	13.000
% Valores < Densidad máxima	61,92%	62,56%	61,38%
Mejor Distribución (Test K-S)	Logística Generalizada	Log-Logística 3 parámetros	Log-Logística 3 parámetros

Tabla 47 – Parámetros básicos de los grupos de TBF de los trenes 5000-4<sup>a</sup>

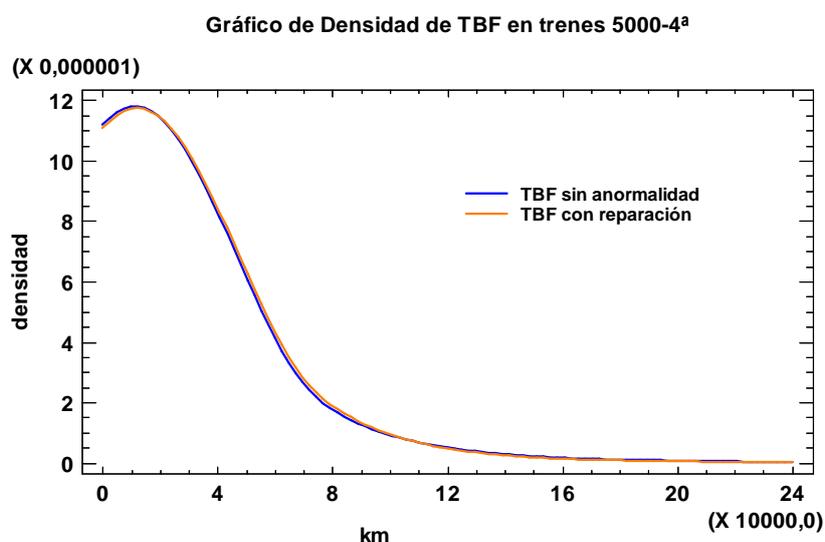


Figura 68 – Gráfico de densidad de los grupos de TBF de los sistemas de tracción en trenes 5000-4<sup>a</sup>

En los datos de los sistemas de tracción de los trenes 5000-4ª se observa que existe una gran concentración de TBF cercanos al origen, que son los fallos repetitivos, tanto en los TBF del grupo “sin anomalía aparente”, como en los TBF del grupo “con reparación”. Las densidades de los TBF de ambos grupos son casi idénticas entre sí, y también con respecto al total de los TBF de este sistema, ver Figura 68. En los sistemas de tracción de los trenes 5000-4ª no se puede afirmar que los fallos repetitivos tengan su origen en reparaciones “sin anomalía aparente”.

Parámetro	TOTAL TBF	TBF sin anomalía	TBF con reparación
Valores	4349	1254	3095
Promedio (km)	26.807	24.286	27.795
Desviación estándar (km)	42.089	39.034	43.196
Coefficiente de variación	157%	161%	155%
Densidad máxima (km)	22.000	18.500	22.500
% Valores < Densidad máxima	65,11%	65,78%	64,52%
Mejor Distribución (Test K-S)	Logística Generalizada	Log-Logística 3 parámetros	Log-Logística 3 parámetros

Tabla 48 – Parámetros básicos de los grupos de TBF de los trenes 2000-B

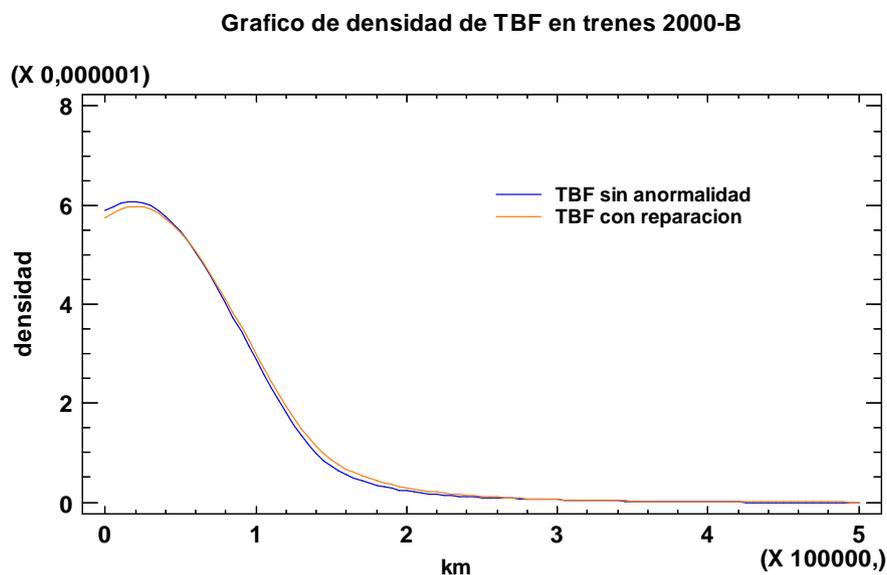


Figura 69 – Gráfico de densidad de los grupos de TBF de los sistemas de tracción en trenes 2000-B

En los sistemas de tracción de trenes 2000-B las densidades de los TBF de ambos grupos son casi idénticas entre sí, y también con respecto al total de los TBF de este sistema, ver Figura 69. En este sistema tampoco se puede afirmar que los fallos repetitivos tengan su origen en reparaciones “sin anomalía aparente”.

Parámetro	TOTAL TBF	TBF sin anormalidad	TBF con reparación
Valores	945	225	720
Promedio (km)	41.030	34.934	42.935
Desviación estándar (km)	61.965	64.701	61.006
Coefficiente de variación	151%	185%	142%
Densidad máxima (km)	28.000	21.000	29.000
% Valores < Densidad máxima	61,79%	64,44%	60,00%
Mejor Distribución (Test K-S)	Logística Generalizada	Log-normal 3 parámetros	Log-Logística 3 parámetros

Tabla 49 – Parámetros básicos de los grupos de TBF de los trenes 8000

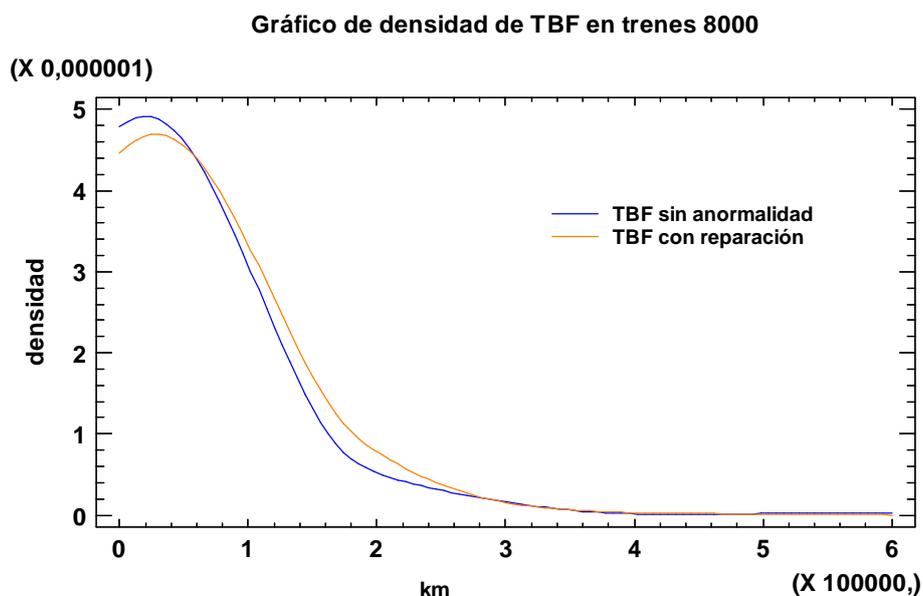


Figura 70 – Gráfico de densidad de los grupos de TBF de los sistemas de tracción en trenes 8000

En los sistemas de tracción de trenes 8000 las densidades de los TBF de ambos grupos son muy similares, y también con respecto al total de los TBF de este sistema, ver Figura 70. En este sistema tampoco se puede afirmar que los fallos repetitivos tengan su origen en reparaciones “sin anormalidad aparente”, dado que si bien existe una densidad en los TBF “sin anormalidad” con su máximo más cerca del origen que la densidad de los TBF con reparación, las diferencias son poco significativas.

Parámetro	TOTAL TBF	TBF sin anormalidad	TBF con reparación
Valores	8.837	2808	6.029
Promedio ( $t$ )	315	315	314
Desviación estándar ( $t$ )	529	545	521
Coefficiente de variación	168%	173%	166%
Densidad máxima ( $t$ )	300	300	300
% Valores < Densidad máxima	69,66%	70,08%	69,49%
Mejor Distribución (Test K-S)	Log-normal 3 parámetros	Log-Logística 3 parámetros	Log-Logística 3 parámetros

Tabla 50 – Parámetros básicos de los grupos de TBF de las escaleras mecánicas TNE

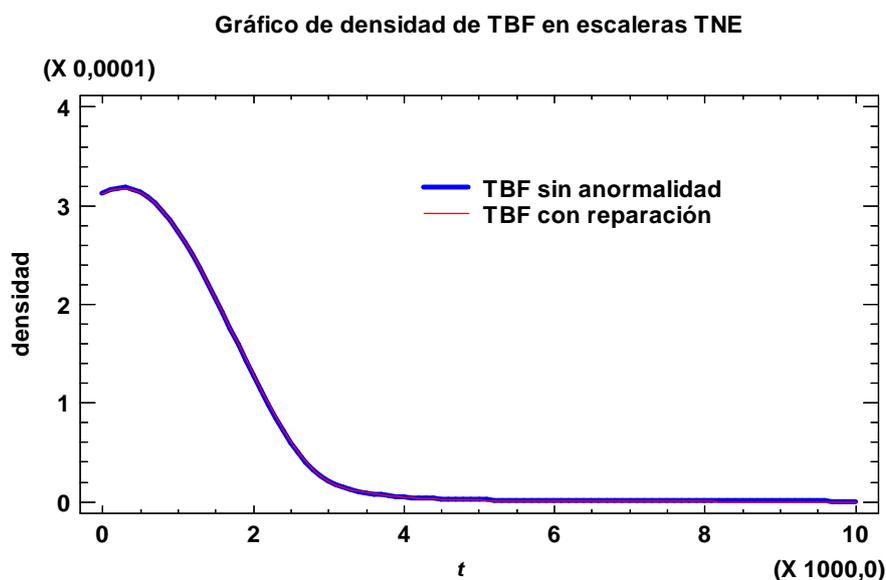


Figura 71 – Gráfico de densidad de los grupos de TBF de las escaleras mecánicas TNE

En los datos de TBF de las escaleras mecánicas TNE se observa que existe una gran concentración de TBF cercanos al origen, que son los fallos repetitivos, tanto en los TBF del grupo “sin anormalidad aparente”, como en los TBF del grupo “con reparación”. Las densidades de los TBF de ambos grupos son idénticas entre sí, y también con respecto al total de los TBF de este sistema, ver Figura 71. En las escaleras mecánicas no se puede afirmar que los fallos repetitivos tengan su origen en reparaciones “sin anormalidad aparente”.

A la vista de los resultados obtenidos en los cuatro sistemas reparables, no se puede afirmar que exista una relación causa-efecto entre un fallo que, después de la revisión del sistema, el técnico de mantenimiento clasifica como “sin anomalía aparente” y la potencial repetición del fallo, ya que los grupos de TBF “sin anomalía aparente” y “con reparación” presentan casi idénticas distribuciones en todos los sistemas.

A continuación se ha intentado fijar un valor crítico de TBF para la identificación de los episodios con “acumulación de fallos supuestamente anormales” y tipificar estos TBF como fallos repetitivos. Las distribuciones que mejor representan los conjuntos de los TBF por sistema son la logística generalizada para los tres (3) sistemas de tracción de trenes y la log-normal 3 parámetros para las escaleras mecánicas. Al ajustar un valor crítico de TBF para el área de la cola inferior  $< 15\%$ , el TBF resultante es muy cercano a cero o negativo. La interpretación de estos resultados es que cualquier TBF por pequeño que sea,  $TBF \rightarrow 0$ , se encuentra dentro de los rangos esperados de su distribución, por lo que no se puede considerar que estos TBF sean atípicos.

Otro enfoque es intentar fijar un valor crítico de número de fallos por intervalo de  $km$  o  $t$  para la identificación de los episodios con “acumulación de fallos supuestamente anormales” y tipificar éstos como fallos repetitivos. Si, por ejemplo, en los sistemas de tracción de los trenes agrupamos los fallos de cada tren en intervalos de 15.000 km, obtenemos una métrica de “agrupación” por intervalo que se representa el histograma de la Figura adjunta para trenes 5000-4<sup>a</sup>.



Figura 72 – Histograma de fallos acumulados en sistemas de los tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup>

Los intervalos de 15.000 km presentan una distribución del número de fallos acumulados que en el caso de los sistemas de tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup> se ajusta más adecuadamente a una log-normal 3 parámetros. Si marcamos el límite del área de la cola superior en un 15%, el valor crítico es aproximadamente de 2 fallos.

KM	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	1	1	0	6	2	2	0	0	0	1	0	0	0	2	2	
15.000	1	2	3	1	0	4	0	3	1	1	1	0	2	0	0	0	1	0	7	0	0	0	1	0	1	3	1	2	0	0	0	1	0	0	1		
30.000	2	4	2	1	1	0	0	3	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	2	0	2	1	0	0	1	3
45.000	0	0	0	1	2	2	0	0	0	0	1	1	3	0	1	0	0	0	2	3	1	1	1	0	1	1	3	0	1	0	3	0	2	2	2	2	
60.000	0	1	1	0	0	1	1	1	1	0	2	0	0	1	2	1	0	0	0	0	2	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	
75.000	2	2	0	1	0	0	0	2	1	0	2	0	0	2	0	0	0	2	0	0	2	1	0	0	0	2	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	
90.000	1	0	1	0	0	2	0	2	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	2	1	0	3	0	
105.000	0	3	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	
120.000	0	1	0	0	1	1	1	1	2	0	0	0	0	1	3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	
135.000	0	0	2	1	2	0	0	0	3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2	1	1	1	0	0	0	1	0	0	2	1	0	1	1	0	1	2	
150.000	1	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	1	0	0	0	4	0	0	1	1	0	0	2	0	0	0	0	
165.000	0	3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	
180.000	0	1	0	0	0	2	2	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	
195.000	0	4	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	2	1	0	0	2	0	0	1	0	0	1	
210.000	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
225.000	0	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	2	0	0	0	0	2	1	0	
240.000	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	
255.000	2	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	
270.000	0	1	1	2	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	
285.000	0	1	0	2	0	0	0	4	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
300.000	0	2	1	1	0	0	0	3	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
315.000	3	1	0	0	0	1	0	0	0	3	0	0	1	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
330.000	0	0	4	1	2	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0	0	2	2	2	0	2	0	2	
345.000	0	1	1	0	2	2	0	0	0	1	2	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	
360.000	1	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	4	0	0	0	1	4	1	0	0	1	0	0	1	0	0	2	1	0	0	
375.000	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	
390.000	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	
405.000	0	0	0	0	0	2	0	3	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	
420.000	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	3	0	2	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
435.000	0	4	0	0	0	0	2	1	1	5	1	4	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	4	1	0	5	0	0	0	0	0	0	
450.000	1	0	2	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	2	1	0	4	1	1	0	2	0	0	
465.000	0	0	1	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	3	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	
480.000	0	0	3	0	0	4	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	2	0	0	1	0	0	8	0	0	2	0	0	1	1	1	0	1	
495.000	0	0	5	2	2	0	0	1	2	1	0	4	1	1	0	0	0	1	0	1	0	2	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	5	1	0	
510.000	0	0	2	0	0	0	1	1	0	1	0	3	0	0	0	2	0	1	1	0	1	1	0	1	1	0	2	0	0	0	1	0	0	2	1	0	
525.000	0	1	1	2	0	0	1	2	0	0	0	0	1	0	1	2	2	1	0	4	2	3	2	0	0	2	5	0	0	1	0	1	0	1	0	1	
540.000	3	2	2	2	2	0	0	4	1	4	1	0	0	0	17	1	0	2	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	4	0	1	
555.000	2	0	1	5	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	2	5	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	0	3	
570.000	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	6	1	0	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	
585.000	1	1	0	0	0	0	2	1	1	0	0	0	2	1	2	1	0	0	3	2	0	0	0	1	1	0	1	1	0	8	0	1	3	1	0	0	
600.000	0	0	1	1	2	0	0	1	1	0	0	0	1	2	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	2	2	0	
615.000	0	0	1	1	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	
630.000	0	0	0	0	1	0	0	3	0	3	0	1	1	0	3	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	2	0	0	1	0	0	3	0	0	
645.000	1	3	0	1	0	0	2	2	1	3	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	
660.000	0	0	0	0	3	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	
675.000	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	
690.000	0	1	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	7	0	0	2		
705.000	1	1	0	0	0	0	4	0	1	0	0	0	4	0	0	1	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	5	1	0	0	3	2	1	2	
720.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0	1	2	0	0	0	1	2	1	0	0	1	0	0	0	0	3	1	4	0	1	2	0	0	0	
735.000	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	5	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	1	6	0	1	1	0	2	4	
750.000	3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	2	2	0	1	7	1	1	0	1	3	0		
765.000	2	5	0	1	0	1	1	0	1	0	1	4	0	1	0	0	0	2	2	2	0	3	0	1	0	0	0	1	0	0	0						

En la Tabla 51 se han destacado los intervalos con una acumulación de fallos igual o superior a 2, que corresponden a 693 de un total de 4.068. No se ha podido observar ninguna distribución dependiente de:

- El tren.
- El intervalo de km.
- Intervalos previos o posteriores con acumulación (o no) de fallos.
- Número de fallos acumulados en el intervalo.

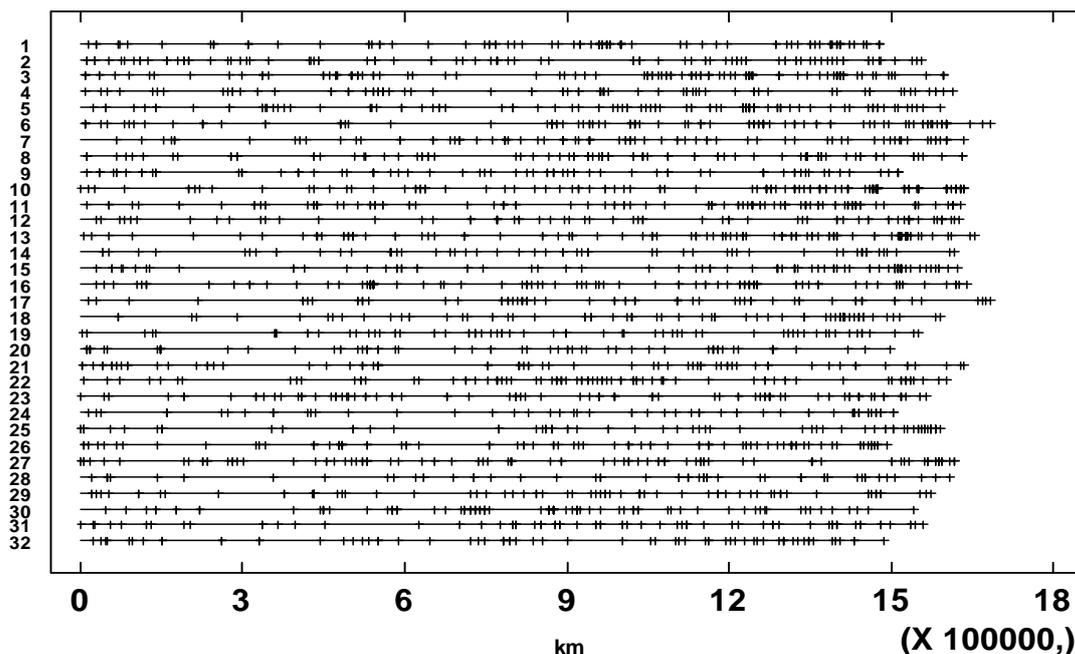


Figura 73 – Gráfico de fallos en 32 sistemas de los sistemas tracción de trenes 5000-4ª

En el gráfico de la Figura 73 se representan los fallos de los sistemas de tracción de 32 trenes 5000-4ª, sin aparente patrón reconocible.

En los sistemas de tracción de trenes 2000-B se han establecido intervalos de 15.000 km para realizar la acumulación de fallos, y así tipificar la naturaleza de estos intervalos, siendo la distribución que ajusta más adecuadamente el histograma de la Figura 74 la log-normal 3 parámetros. Si marcamos el límite del área de la cola superior en un 15%, el valor crítico es aproximadamente de 2 fallos, que corresponden a 747 intervalos de un total de 6.864. En la Tabla 52 se han destacado los intervalos con una acumulación de fallos igual o superior a 2 sin evidencia de dependencia o patrón aparente.



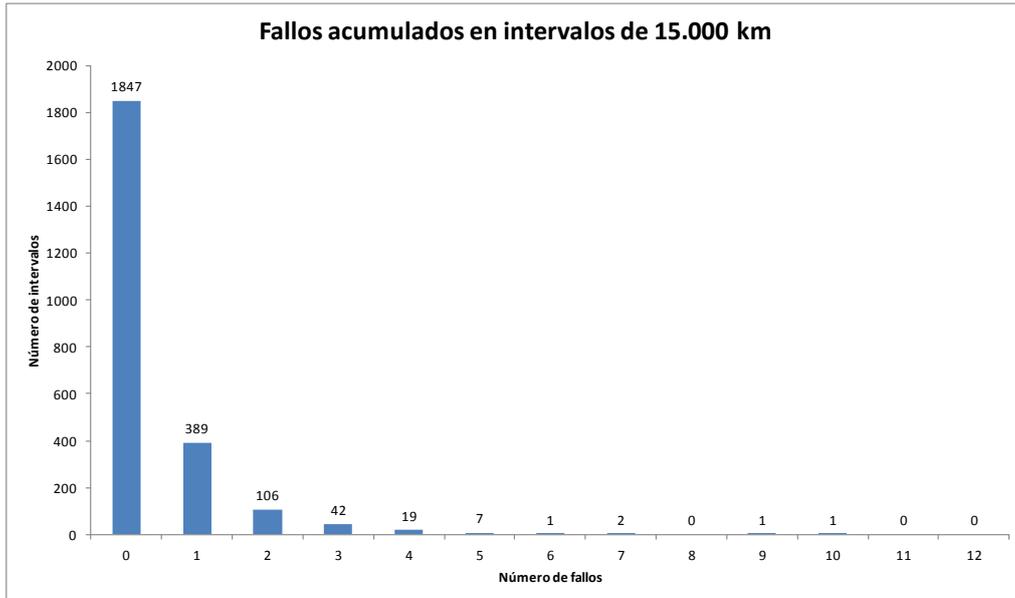


Figura 75 – Histograma de fallos acumulados en sistemas de los tracción de trenes 8000

En la Tabla 53 se han destacado los intervalos con una acumulación de fallos igual o superior a 2 sin evidencia de dependencia o patrón aparente en los sistemas de tracción de trenes 8000. En el gráfico de la Figura 76 se representan los fallos de los 23 sistemas de tracción en trenes 8000.



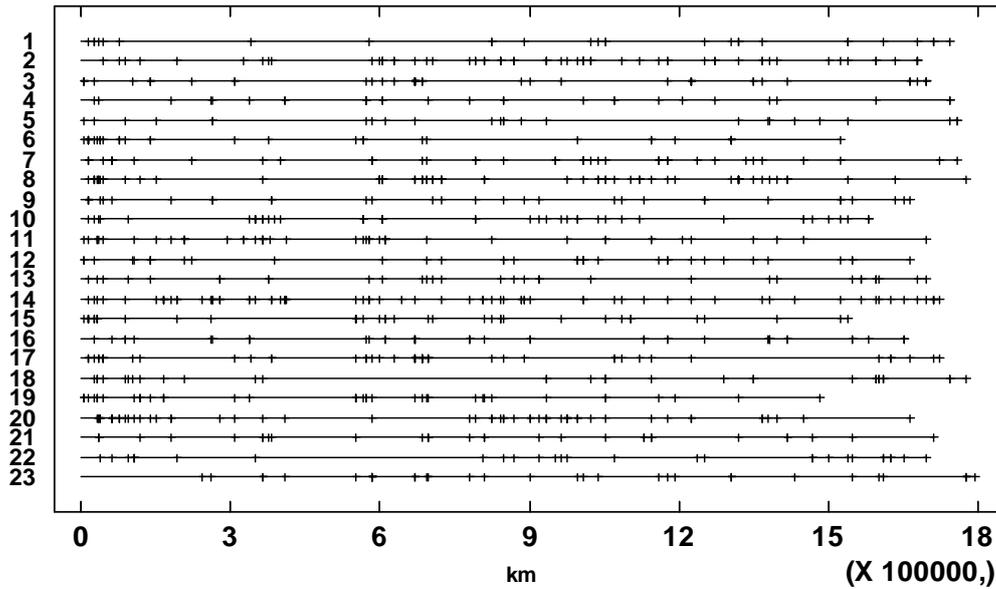


Figura 76 – Gráfico de fallos de los 23 sistemas de los sistemas tracción de trenes 8000

En las escaleras mecánicas TNE se han establecido intervalos de 300 horas para realizar la acumulación de fallos, y así tipificar la naturaleza de estos intervalos, ver el histograma de la Figura 77.

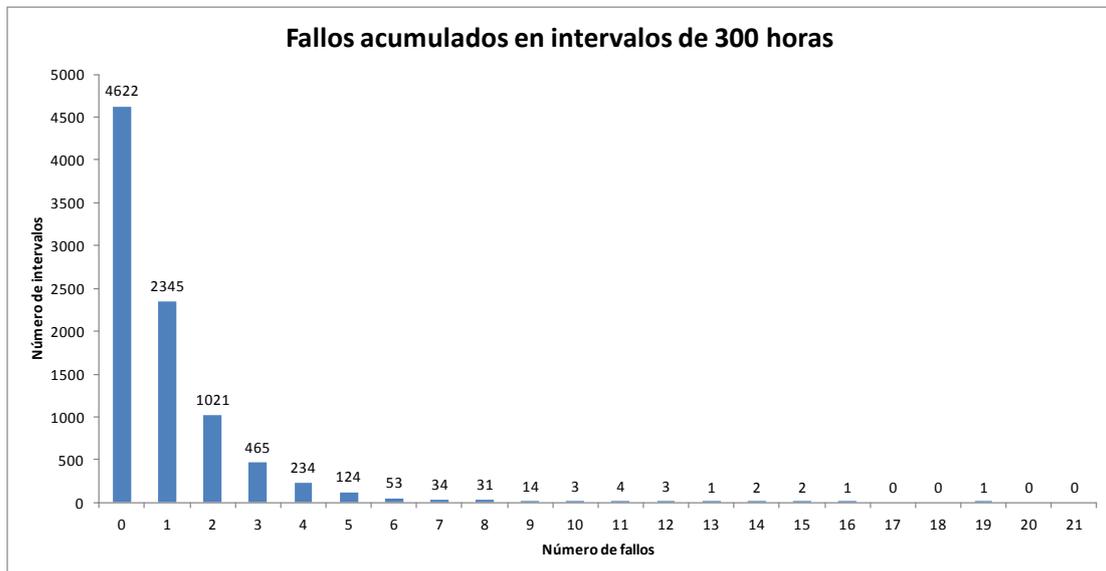


Figura 77 – Histograma de fallos acumulados en escaleras mecánicas TNE

Si marcamos el límite del área de la cola superior en un 15%, el valor crítico es aproximadamente de 2 fallos, que corresponden a 1.993 intervalos de un total de 8.960. En la Tabla 54 se han destacado los intervalos con una acumulación de fallos igual o superior a 2 sin evidencia de dependencia o patrón aparente en las escaleras mecánicas. En el gráfico de la Figura 78 se representan los fallos de 32 escaleras mecánicas TNE.



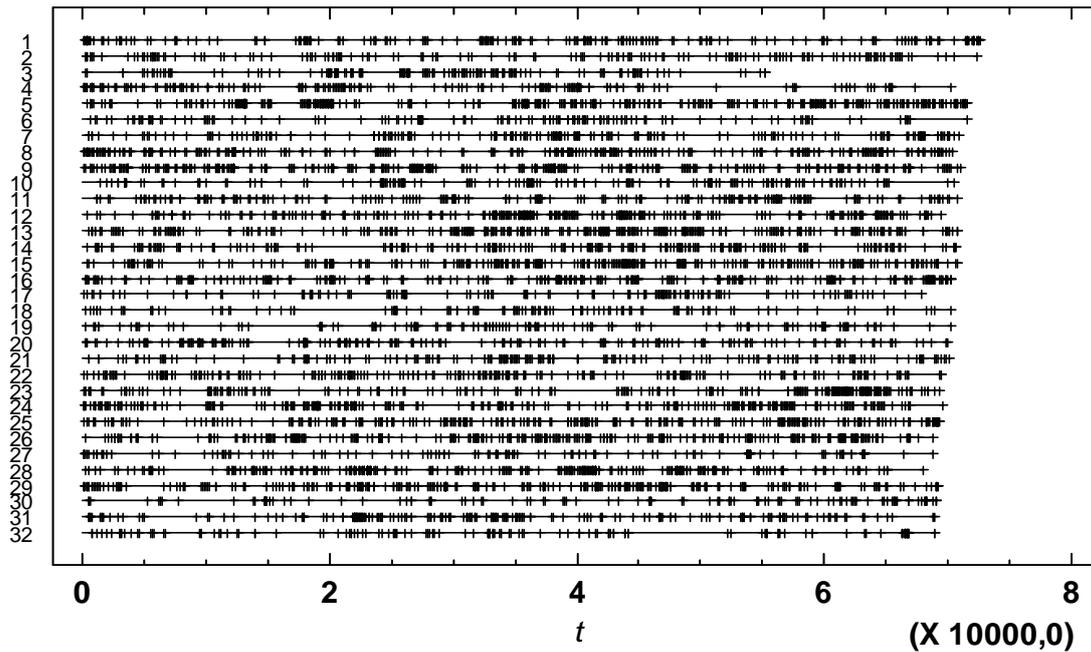


Figura 78 – Gráfico de fallos de 32 escaleras mecánicas TNE

No se ha evidenciado patrón estadísticamente reconocible en los fallos repetitivos, siendo episodios con una distribución idéntica respecto de  $km$  o  $t$  y sin asociación aparente entre tipos de fallos o reparación efectuada, resultando en la práctica los fallos primarios y los supuestos secundarios, indistinguibles. La concentración de fallos en ciertos periodos es cualitativamente observable, y no se ha podido descartar la hipótesis de que un fallo  $f_i$  tengan un comportamiento independiente del fallo cercano  $f_{i-1}$  que le precede, pero tampoco se ha podido demostrar lo contrario.

### 7.3. Aplicar modelos RP a cada ítem sin tendencia

Como se ha desarrollado en 2.7.7, los modelos RP son de aplicación cuando los TBF son independientes e idénticamente distribuidos (i.i.d.), tratándose como procesos de “reparación perfecta”. La demostración de independencia en los TBF en estos ensayos se ha tratado en el apartado anterior 7.2, concluyendo que no hay evidencia de dependencia de los TBF en ninguno de los cuatro (4) sistemas. Existe una amplia publicación de aplicaciones de modelos RP a sistemas reparables complejos en diferentes campos industriales, ver ejemplos y procedimientos aplicados en:

- Kumar y otros (1992), load haul dump machines.
- Barabady and Kumar (2008), mining equipment.
- Hoseinie y otros (2011), hydraulic system.
- Hoseinie y otros (2012), drum shearer machine.

- Hussin y otros (2013), offshore gas compression train system.
- Qurashi and Hamdi (2016), thermal electricity generation.

Para comprobar si los TBF están idénticamente distribuidos se debe seleccionar y aplicar uno (o varios) test de tendencia; gráficos, paramétricos o no paramétricos, como los ya indicados en 2.7.2 y 2.7.5. En este estudio ya se ha aplicado el test de Laplace según normas IEC, ver 6.4. Complementariamente se ha contrastado estos resultados de tendencia con el Military Handbook Test;

$$U = 2 \sum_{i=1}^{n-1} \ln \frac{T_n}{T_i} \quad (82)$$

con  $n$  el número total de fallos,  $T_n$  es el tiempo del fallo  $n$ -enésimo y  $T_i$  el tiempo del fallo  $i$ -enésimo con test truncado por fallo. La hipótesis nula del Military Handbook Test es la distribución chi-cuadrado con  $2(n-1)$  grados de libertad. Si la hipótesis nula es rechazada con un 5% de nivel de significación, entonces los datos demuestran tendencia. Los resultados son coincidentes con los del test de Laplace del apartado 6.4, sin diferencias de relevancia a citar.

Si no se rechaza la hipótesis de que los TBF son independientes, para aquellos sistemas que no presentan tendencia se puede aceptar que los TBF son independientes e idénticamente distribuidos (i.i.d.), y por lo tanto son de aplicación los modelos RP de “reparación perfecta”. Se han aplicado modelos RP a los items sin tendencia:

- 10 sistemas de tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup>.
- 50 sistemas de tracción de trenes 2000-B.
- 17 sistemas de tracción de trenes 8000.
- 18 escaleras mecánicas TNE.
- 

Con ayuda de STATGRAPHICS Centurion se han ensayado un total de 25 distribuciones para el ajuste de los TBF, ver menú de distribuciones en la Figura 79.

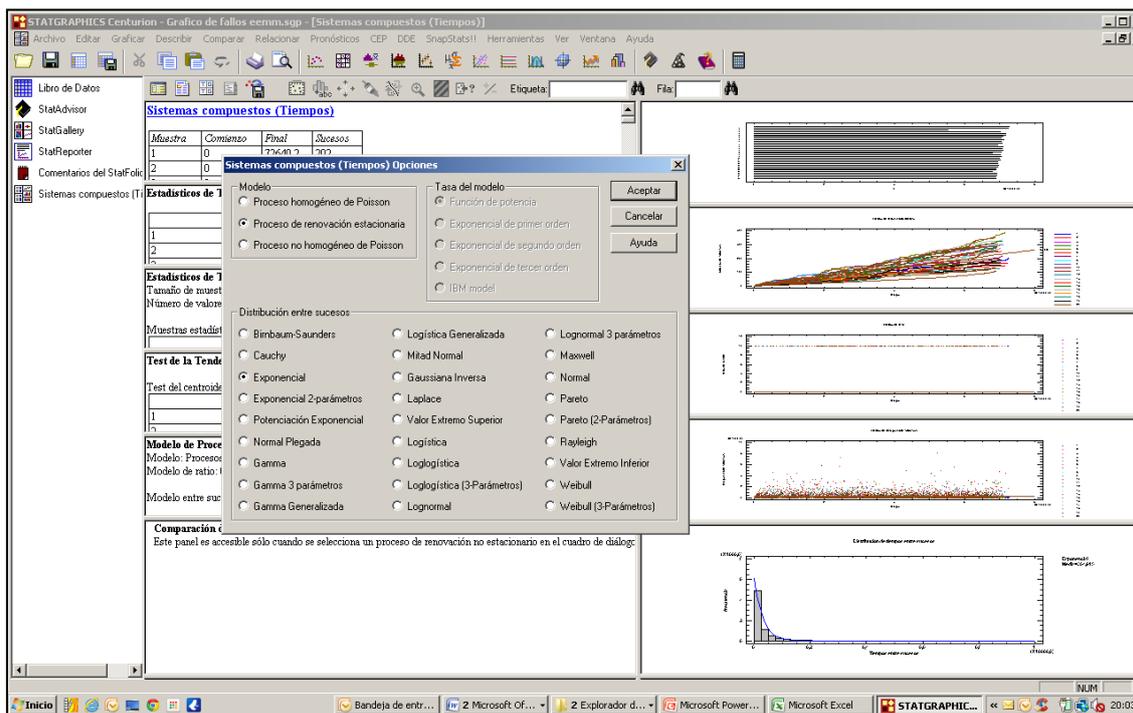


Figura 79 – Menú de selección de distribuciones STATGRAPHICS Centurion para ajuste de los TBF

En la Tabla 55 se listan las distribuciones ensayadas sobre los TBF, con indicación de número de parámetros estimados en cada caso.

Distribución	Parámetros Estimados
Cauchy	2
Exponencial	1
Exponencial (2 Parámetros)	2
Gamma	2
Gamma (3-Parámetros)	3
Gamma Generalizada	3
Gaussiana Inversa	2
Laplace	2
Logística	2
Logística Generalizada	3
Loglogística	2
Loglogística (3-Parámetros)	3
Lognormal	2
Lognormal (3-Parámetros)	3
Maxwell	2
Mitad Normal (2-Parámetros)	2
Normal	2
Normal Plegada	2
Pareto	1
Pareto (2-Parámetros)	2
Potenciación Exponencial	3
Rayleigh	2
Valor Extremo Más Grande	2
Weibull	2
Weibull (3-Parámetros)	3

Tabla 55 – Tabla de distribuciones ensayadas sobre los TBF para los modelos RP

Se recuerda que el modelo HPP es una particularización de los modelos RP cuando la distribución aceptada para los TBF es la exponencial (1 parámetro). Este modelo es el recogido en la norma IEC 60605-4 (2001), apartado 5.1 y ya ha sido ensayado en el apartado 6.5.

En este estudio se ha decidido realizar el test  $K-S$  con el 5,0% de nivel de significación para comprobar si los TBF se pueden aceptar que responden a alguna distribución de las señaladas. El criterio de “hipótesis nula” es; rechazar  $H_0$  con un 5,0% de nivel de significación si  $D > D_{crítico}$ , con  $D_{crítico} = 1.36/\sqrt{n}$ , siendo un criterio habitual en los este tipo de estudios de fiabilidad con modelos RP.

TREN	Mejor Distribución	$\lambda$	$D_{crítica}$	$D_{max}$	$H_0$
2	Logística Generalizada	<b>6,82E-05</b>	0,1381	0,1694	Se Rechaza
4	Logística Generalizada	<b>5,28E-05</b>	0,1550	0,2028	Se Rechaza
9	Logística Generalizada	<b>5,18E-05</b>	0,1592	0,1600	Se Rechaza
16	Logística Generalizada	<b>6,32E-05</b>	0,1388	0,2032	Se Rechaza
19	Logística Generalizada	<b>4,92E-05</b>	0,1637	0,1483	Se Acepta
20	Logística Generalizada	<b>4,91E-05</b>	0,1662	0,1828	Se Rechaza
21	Logística Generalizada	<b>5,14E-05</b>	0,1570	0,1628	Se Rechaza
29	Logística Generalizada	<b>5,01E-05</b>	0,1603	0,1752	Se Rechaza
30	Logística Generalizada	<b>7,33E-05</b>	0,1360	0,2506	Se Rechaza
35	Logística Generalizada	<b>6,05E-05</b>	0,1475	0,2050	Se Rechaza

Tabla 56 – Estimación de  $\hat{\lambda}$  constantes para modelos RP en sistemas de tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup>

TREN	Mejor Distribución	$\lambda$	$D_{crítica}$	$D_{max}$	$H_0$
3	Logística Generalizada	<b>4,27E-05</b>	0,1851	0,2206	Se Rechaza
6	Logística Generalizada	<b>4,83E-05</b>	0,1756	0,1911	Se Rechaza
7	Logística Generalizada	<b>6,31E-05</b>	0,1502	0,1937	Se Rechaza
8	Logística Generalizada	<b>4,84E-05</b>	0,1687	0,1560	Se Acepta
10	Logística Generalizada	<b>5,81E-05</b>	0,1626	0,2750	Se Rechaza
11	Logística Generalizada	<b>5,01E-05</b>	0,1801	0,1607	Se Acepta
12	Logística Generalizada	<b>3,69E-05</b>	0,1923	0,1464	Se Acepta
16	Logística Generalizada	<b>4,66E-05</b>	0,1756	0,2012	Se Rechaza
19	Logística Generalizada	<b>4,65E-05</b>	0,1801	0,1409	Se Acepta
23	Logística Generalizada	<b>3,47E-05</b>	0,2050	0,2130	Se Rechaza
24	Logística Generalizada	<b>5,21E-05</b>	0,1727	0,1816	Se Rechaza
25	Logística Generalizada	<b>3,16E-05</b>	0,2178	0,2222	Se Rechaza
27	Logística Generalizada	<b>2,74E-05</b>	0,2267	0,1150	Se Acepta
28	Logística Generalizada	<b>3,98E-05</b>	0,2005	0,1915	Se Acepta
31	Logística Generalizada	<b>3,35E-05</b>	0,2236	0,1294	Se Acepta
32	Logística Generalizada	<b>3,77E-05</b>	0,1963	0,1170	Se Acepta
35	Logística Generalizada	<b>5,13E-05</b>	0,1475	0,2457	Se Rechaza
36	Logística Generalizada	<b>3,70E-05</b>	0,2074	0,2061	Se Acepta
39	Logística Generalizada	<b>6,40E-05</b>	0,1540	0,2094	Se Rechaza
40	Logística Generalizada	<b>2,46E-05</b>	0,2404	0,1382	Se Acepta
41	Logística Generalizada	<b>3,90E-05</b>	0,1963	0,1739	Se Acepta
42	Logística Generalizada	<b>4,31E-05</b>	0,1904	0,2019	Se Rechaza
47	Logística Generalizada	<b>3,32E-05</b>	0,2150	0,1516	Se Acepta
48	Logística Generalizada	<b>4,55E-05</b>	0,1868	0,1807	Se Acepta
49	Logística Generalizada	<b>4,03E-05</b>	0,2005	0,1445	Se Acepta
53	Logística Generalizada	<b>2,76E-05</b>	0,2267	0,1550	Se Acepta
54	Logística Generalizada	<b>3,16E-05</b>	0,2206	0,3118	Se Rechaza

Tabla 57 – Estimación de  $\hat{\lambda}$  constantes para modelos RP en sistemas de tracción de trenes 2000-B (I)

TREN	Mejor Distribución	$\lambda$	$D_{crítica}$	$D_{max}$	$H_0$
56	Logística Generalizada	6,29E-05	0,1540	0,2938	Se Rechaza
57	Logística Generalizada	3,54E-05	0,1984	0,1545	Se Acepta
61	Logística Generalizada	2,28E-05	0,2443	0,2333	Se Acepta
62	Logística Generalizada	1,68E-05	0,2836	0,2149	Se Acepta
63	Logística Generalizada	3,94E-05	0,1904	0,1473	Se Acepta
64	Logística Generalizada	2,48E-05	0,2570	0,2383	Se Acepta
65	Logística Generalizada	2,94E-05	0,2236	0,2694	Se Rechaza
66	Logística Generalizada	4,55E-05	0,1786	0,1838	Se Rechaza
67	Logística Generalizada	5,73E-05	0,1741	0,2400	Se Rechaza
69	Logística Generalizada	4,04E-05	0,2124	0,2770	Se Rechaza
70	Logística Generalizada	3,82E-05	0,2099	0,1728	Se Acepta
72	Logística Generalizada	4,71E-05	0,1868	0,1991	Se Rechaza
73	Logística Generalizada	2,17E-05	0,2776	0,1783	Se Acepta
77	Logística Generalizada	2,98E-05	0,2525	0,2034	Se Acepta
78	Logística Generalizada	1,69E-05	0,3120	0,1293	Se Acepta
79	Logística Generalizada	3,26E-05	0,2267	0,2041	Se Acepta
82	Logística Generalizada	1,89E-05	0,2900	0,1610	Se Acepta
83	Logística Generalizada	3,26E-05	0,2332	0,1894	Se Acepta
84	Logística Generalizada	3,38E-05	0,2267	0,1944	Se Acepta
85	Logística Generalizada	5,13E-05	0,1886	0,2457	Se Rechaza
86	Logística Generalizada	4,88E-05	0,1923	0,2328	Se Rechaza
87	Logística Generalizada	4,88E-05	0,1923	0,1488	Se Acepta
88	Logística Generalizada	3,21E-05	0,2267	0,2072	Se Acepta

Tabla 58 – Estimación de  $\hat{\lambda}$  constantes para modelos RP en sistemas de tracción de trenes 2000-B (II)

TREN	Mejor Distribución	$\lambda$	$D_{crítica}$	$D_{max}$	$H_0$
1	Logística Generalizada	1,71E-05	0,2617	0,2155	Se Acepta
2	Logística Generalizada	4,12E-05	0,1700	0,1837	Se Rechaza
3	Logística Generalizada	2,99E-05	0,2074	0,2507	Se Rechaza
4	Logística Generalizada	1,79E-05	0,2483	0,1810	Se Acepta
5	Logística Generalizada	1,59E-05	0,2720	0,2192	Se Acepta
7	Logística Generalizada	2,51E-05	0,2124	0,2090	Se Acepta
8	Logística Generalizada	4,31E-05	0,1687	0,2183	Se Rechaza
9	Logística Generalizada	1,95E-05	0,2443	0,1892	Se Acepta
10	Logística Generalizada	3,33E-05	0,2027	0,2463	Se Rechaza
12	Logística Generalizada	2,42E-05	0,2236	0,1702	Se Acepta
13	Logística Generalizada	2,04E-05	0,2404	0,2243	Se Acepta
14	Logística Generalizada	4,30E-05	0,1626	0,1373	Se Acepta
16	Logística Generalizada	2,85E-05	0,2099	0,2568	Se Rechaza
18	Logística Generalizada	2,24E-05	0,2332	0,2345	Se Rechaza
21	Logística Generalizada	1,95E-05	0,2404	0,1759	Se Acepta
22	Logística Generalizada	1,93E-05	0,2525	0,2121	Se Acepta
23	Logística Generalizada	2,02E-05	0,2332	0,1761	Se Acepta

Tabla 59 – Estimación de  $\hat{\lambda}$  constantes para modelos RP en sistemas de tracción de trenes 8000

ESCALERA	Mejor Distribución	$\lambda$	$D_{crítica}$	$D_{max}$	$H_0$
1	Log-normal 3 parámetros	<b>2,23E-03</b>	0,0957	0,0629	Se Acepta
2	Log-normal 3 parámetros	<b>2,17E-03</b>	0,1056	0,0535	Se Acepta
3	Log-normal 3 parámetros	<b>1,39E-03</b>	0,1107	0,1089	Se Acepta
6	Log-normal 3 parámetros	<b>1,39E-03</b>	0,1133	0,1146	Se Rechaza
7	Log-normal 3 parámetros	<b>2,05E-03</b>	0,0930	0,0833	Se Acepta
8	Log-normal 3 parámetros	<b>3,38E-03</b>	0,0823	0,0725	Se Acepta
10	Log-normal 3 parámetros	<b>1,93E-03</b>	0,1046	0,0692	Se Acepta
11	Log-normal 3 parámetros	<b>2,34E-03</b>	0,0979	0,0847	Se Acepta
17	Log-normal 3 parámetros	<b>1,55E-05</b>	0,1040	0,5227	Se Rechaza
18	Log-normal 3 parámetros	<b>1,52E-03</b>	0,1202	0,0560	Se Acepta
24	Log-normal 3 parámetros	<b>3,96E-03</b>	0,0777	0,1068	Se Rechaza
27	Log-normal 3 parámetros	<b>1,00E-03</b>	0,1221	0,1117	Se Acepta
28	Log-normal 3 parámetros	<b>3,60E-03</b>	0,0800	0,1048	Se Rechaza
29	Log-normal 3 parámetros	<b>3,54E-03</b>	0,0795	0,0774	Se Acepta
31	Log-normal 3 parámetros	<b>1,91E-03</b>	0,0969	0,0758	Se Acepta
32	Log-normal 3 parámetros	<b>1,36E-03</b>	0,1188	0,0659	Se Acepta
34	Log-normal 3 parámetros	<b>3,98E-03</b>	0,0813	0,0796	Se Acepta
36	Log-normal 3 parámetros	<b>1,55E-03</b>	0,1212	0,0923	Se Acepta

Tabla 60 – Estimación de  $\hat{\lambda}$  constantes para modelos RP en escaleras mecánicas TNE

La distribución logística generalizada es la que mejor ajusta a los TBF en los tres (3) sistemas de tracción de trenes. En el caso de las escaleras mecánicas es la distribución log-normal 3 parámetros la que mejor se ajusta a los datos de TBF. En la Tabla 61 se resumen los valores de aceptación y rechazo,  $H_0$  con un 5% de nivel de significación si  $D > D_{crítico}$ , con  $D_{crítico} = 1.36/\sqrt{n}$ , para los modelos RP de cada ítem.

SISTEMA	ÍTEM SIN TENDENCIA	MEJOR DISTRIBUCIÓN	SE RECHAZA MODELO RP	SE ACEPTA MODELO RP
Tracción 5000-4ª	<b>10</b>	Logística Generalizada	9	<b>1</b>
Tracción 2000-B	<b>50</b>	Logística Generalizada	20	<b>30</b>
Tracción 8000	<b>17</b>	Logística Generalizada	6	<b>11</b>
Escaleras Mecánicas TNE	<b>18</b>	Log-normal 3 parámetros	4	<b>14</b>

Tabla 61 – Resumen de aceptación y rechazo del modelo RP por sistema e ítems

Estos niveles de aceptación de los modelos RP mejoran sustancialmente los niveles de aceptación de los modelos HPP (ver apartado 6.5), pasando de 18 ítems con modelo HPP aceptado a los 56 ítems con modelo RP aceptado.

Mayoritariamente los TBF de los items no tienen una distribución exponencial. Las funciones que mejor se adaptan a la distribución de los TBF son la logística generalizada y la log-normal 3 parámetros. Ambas distribuciones presentan una función de densidad con una media  $\mu$  muy próxima a cero y un pronunciado coeficiente de asimetría  $\gamma$ , lo que ratifica la existencia de un volumen alto de fallos que se agrupan con un TBF muy próximos a cero, motivados por los episodios de fallos repetitivos, ver ejemplos de modelos aceptados en Figuras 80 y 81.

Histograma y distribución de TBF

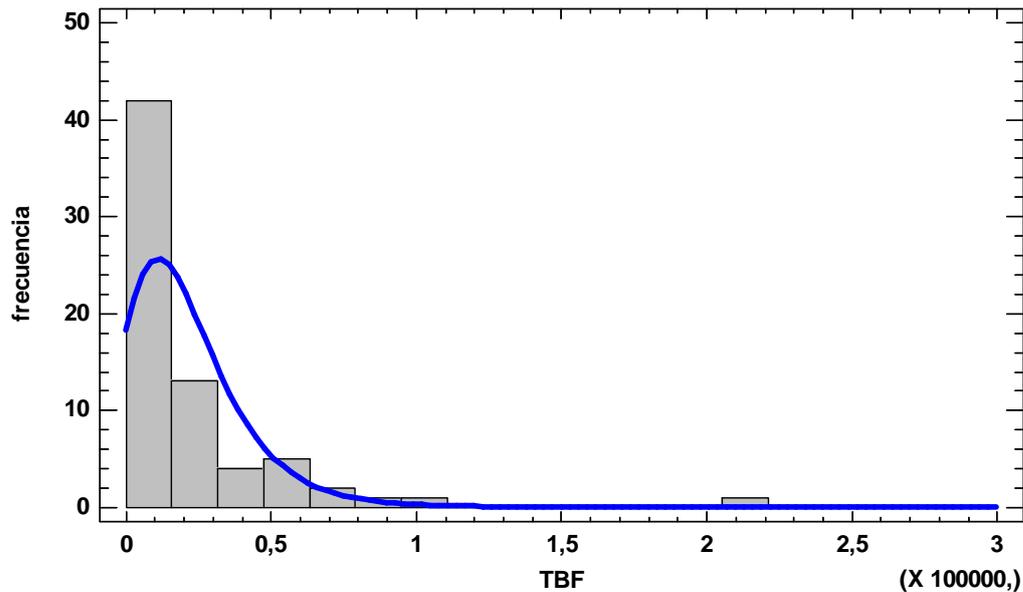


Figura 80 – Histograma de los TBF y distribución logística generalizada en tren 19 de 5000-4ª

Histograma y distribución de TBF

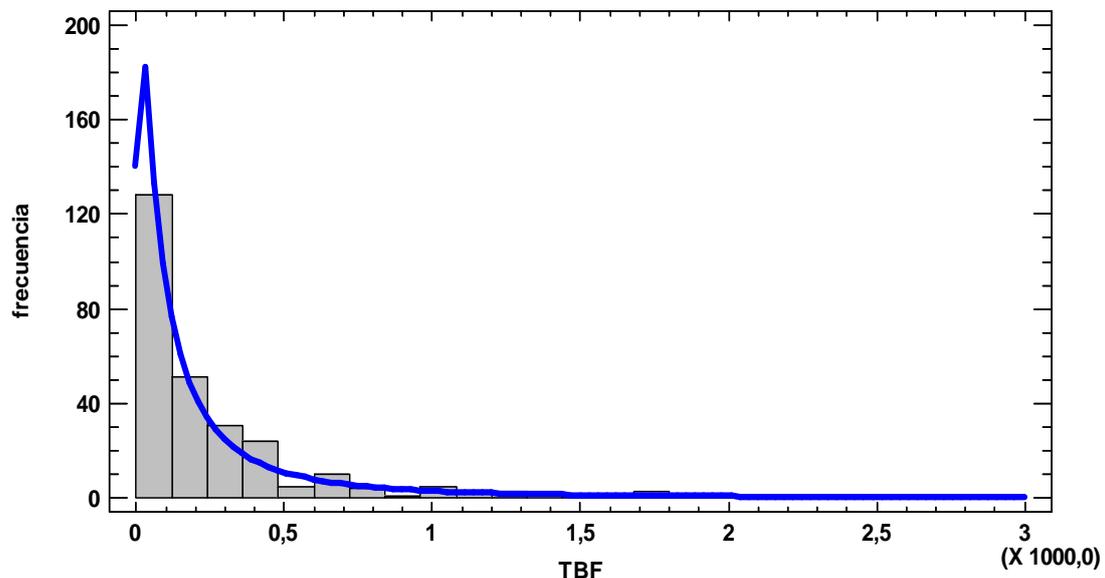


Figura 81 – Histograma de los TBF y distribución log-normal 3 parámetros de la escalera mecánica 8

Por lo tanto los ítems en los que se puede aceptar que su fiabilidad permite ser modelada mediante un modelo RP son los 56 ítems de las Tablas 62 y 63.

SISTEMA	ITEM	Mejor Distribución	$\lambda$
Tracción 5000-4ª	19	Logística Generalizada	<b>4,92E-05</b>
Tracción 2000-B	8	Logística Generalizada	<b>4,84E-05</b>
Tracción 2000-B	11	Logística Generalizada	<b>5,01E-05</b>
Tracción 2000-B	12	Logística Generalizada	<b>3,69E-05</b>
Tracción 2000-B	19	Logística Generalizada	<b>4,65E-05</b>
Tracción 2000-B	27	Logística Generalizada	<b>2,74E-05</b>
Tracción 2000-B	28	Logística Generalizada	<b>3,98E-05</b>
Tracción 2000-B	31	Logística Generalizada	<b>3,35E-05</b>
Tracción 2000-B	32	Logística Generalizada	<b>3,77E-05</b>
Tracción 2000-B	36	Logística Generalizada	<b>3,70E-05</b>
Tracción 2000-B	40	Logística Generalizada	<b>2,46E-05</b>
Tracción 2000-B	41	Logística Generalizada	<b>3,90E-05</b>
Tracción 2000-B	47	Logística Generalizada	<b>3,32E-05</b>
Tracción 2000-B	48	Logística Generalizada	<b>4,55E-05</b>
Tracción 2000-B	49	Logística Generalizada	<b>4,03E-05</b>
Tracción 2000-B	53	Logística Generalizada	<b>2,76E-05</b>
Tracción 2000-B	57	Logística Generalizada	<b>3,54E-05</b>
Tracción 2000-B	61	Logística Generalizada	<b>2,28E-05</b>
Tracción 2000-B	62	Logística Generalizada	<b>1,68E-05</b>
Tracción 2000-B	63	Logística Generalizada	<b>3,94E-05</b>
Tracción 2000-B	64	Logística Generalizada	<b>2,48E-05</b>
Tracción 2000-B	70	Logística Generalizada	<b>3,82E-05</b>
Tracción 2000-B	73	Logística Generalizada	<b>2,17E-05</b>
Tracción 2000-B	77	Logística Generalizada	<b>2,98E-05</b>
Tracción 2000-B	78	Logística Generalizada	<b>1,69E-05</b>
Tracción 2000-B	79	Logística Generalizada	<b>3,26E-05</b>
Tracción 2000-B	82	Logística Generalizada	<b>1,89E-05</b>
Tracción 2000-B	83	Logística Generalizada	<b>3,26E-05</b>
Tracción 2000-B	84	Logística Generalizada	<b>3,38E-05</b>
Tracción 2000-B	87	Logística Generalizada	<b>4,88E-05</b>
Tracción 2000-B	88	Logística Generalizada	<b>3,21E-05</b>
Tracción 8000	1	Logística Generalizada	<b>1,71E-05</b>
Tracción 8000	4	Logística Generalizada	<b>1,79E-05</b>
Tracción 8000	5	Logística Generalizada	<b>1,59E-05</b>
Tracción 8000	7	Logística Generalizada	<b>2,51E-05</b>
Tracción 8000	9	Logística Generalizada	<b>1,95E-05</b>
Tracción 8000	12	Logística Generalizada	<b>2,42E-05</b>
Tracción 8000	13	Logística Generalizada	<b>2,04E-05</b>
Tracción 8000	14	Logística Generalizada	<b>4,30E-05</b>
Tracción 8000	21	Logística Generalizada	<b>1,95E-05</b>
Tracción 8000	22	Logística Generalizada	<b>1,93E-05</b>
Tracción 8000	23	Logística Generalizada	<b>2,02E-05</b>

Tabla 62 –  $\hat{\lambda}$  de ítems con modelo RP aceptado (I)

SISTEMA	ITEM	Mejor Distribución	$\lambda$
Escaleras Mecánicas TNE	1	Log-normal 3 parámetros	<b>2,23E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	2	Log-normal 3 parámetros	<b>2,17E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	3	Log-normal 3 parámetros	<b>1,39E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	7	Log-normal 3 parámetros	<b>2,05E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	8	Log-normal 3 parámetros	<b>3,38E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	10	Log-normal 3 parámetros	<b>1,93E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	11	Log-normal 3 parámetros	<b>2,34E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	18	Log-normal 3 parámetros	<b>1,52E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	27	Log-normal 3 parámetros	<b>1,00E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	29	Log-normal 3 parámetros	<b>3,54E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	31	Log-normal 3 parámetros	<b>1,91E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	32	Log-normal 3 parámetros	<b>1,36E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	34	Log-normal 3 parámetros	<b>3,98E-03</b>
Escaleras Mecánicas TNE	36	Log-normal 3 parámetros	<b>1,55E-03</b>

Tabla 63 –  $\hat{\lambda}$  de items con modelo RP aceptado (II)

Para estos items el modelo RP de intensidad de fallo  $z(t)$ , función de fiabilidad  $R(t)$ , función de densidad de probabilidad del fallo  $f(t)$  se formula;

$$z(t) = \lambda \tag{49}$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \tag{50}$$

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{51}$$

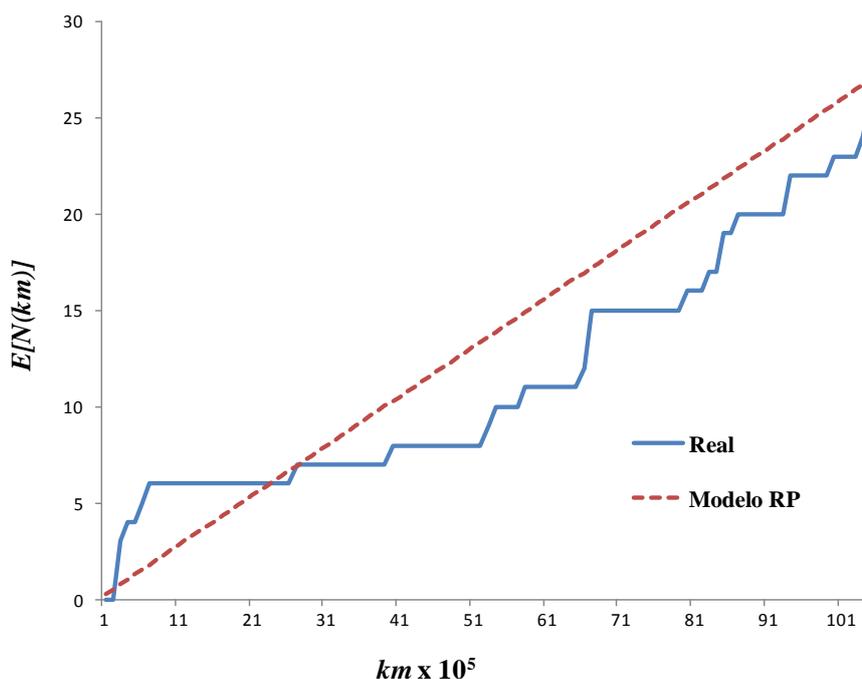


Figura 82 – Fallos acumulados por el tren 1 de la serie 8000

Como ejemplo, en la Figura 82 se representa los valores reales en explotación de fallos acumulados y la estimación  $E[N(km)] = \lambda t$  efectuada por el modelo de RP en el sistema de tracción 1 de los trenes 8000.

Estos resultados permiten estimar  $\hat{\lambda}$  para ítems sin tendencia en TBF mediante modelos RP con un nivel de rechazo moderado. En los cuatro (4) sistemas ensayados se han aceptado el modelo RP en 56 ítems de un total de 95 ítems, mejorando los resultados de ensayo del modelo HPP que sólo ha permitido modelar 18 ítems.

#### 7.4. Aplicar modelos NHPP a cada ítem con tendencia

A los ítems que presentan tendencia en los TBF se han ensayado los modelos NHPP alternativos a PLP adjuntos:

$$\text{Función potencia; } z(t) = \lambda t^\beta \quad (57)$$

$$\text{Función exponencial; } z(t) = e^{\lambda + \beta t} \quad (58)$$

$$\text{Modelo IBM; } z(t) = \lambda + \beta \sigma e^{-\sigma t} \quad (59)$$

$$\text{Función exponencial 2º Orden; } z(t) = e^{\lambda + \beta t + \sigma t^2} \quad (83)$$

$$\text{Función exponencial 3º Orden; } z(t) = e^{\lambda + \beta t + \sigma t^2 + \delta t^3} \quad (84)$$

Si no se rechaza la hipótesis de que los TBF son independientes, ver apartado 7.2, para aquellos sistemas que presentan tendencia se puede aceptar que los TBF son independientes y por lo tanto son de aplicación los modelos NHPP citados. Se han aplicado modelos NHPP a los ítems con tendencia:

- 26 sistemas de tracción de trenes 5000-4ª.
- 38 sistemas de tracción de trenes 2000-B.
- 6 sistemas de tracción de trenes 8000.
- 22 escaleras mecánicas TNE.

Con ayuda de STATGRAPHICS Centurion se han ensayado los modelos NHPP, ver menú de distribuciones en la Figura 83.

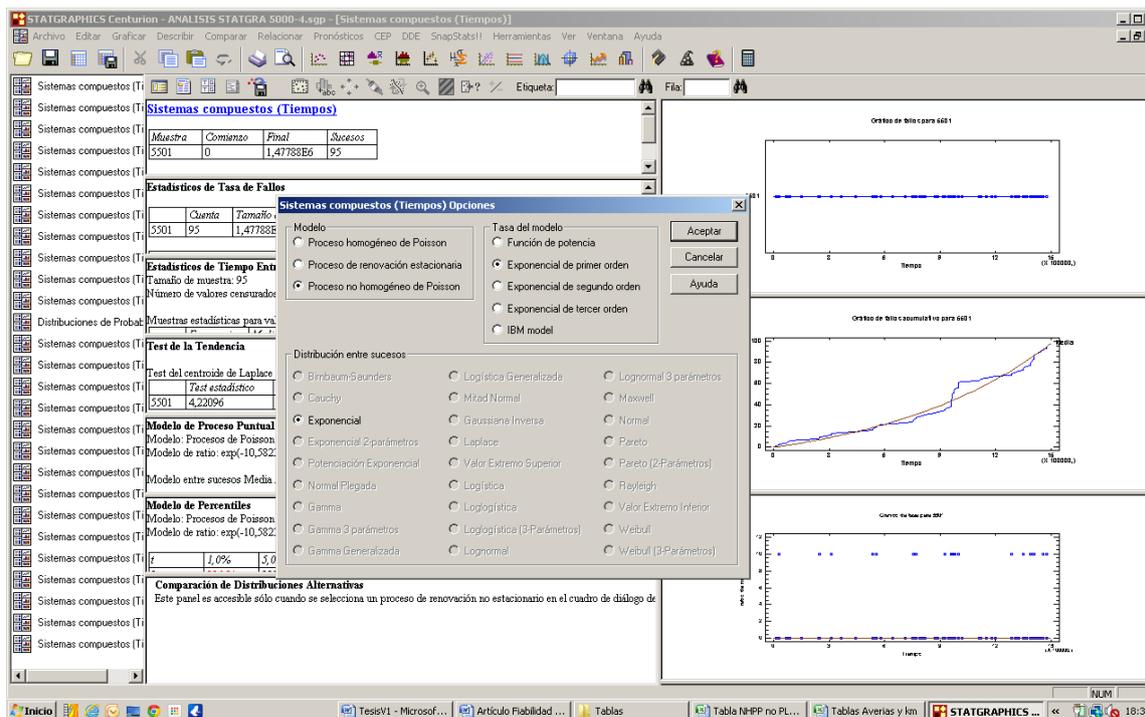


Figura 83 – Menú de selección de modelos NHPP en STATGRAPHICS Centurion

Estos 5 modelos no están contemplados en la norma IEC 61710 (2013), que sólo incluye el modelo PLP ya ensayado, ver apartado 6.6.

Como en el caso de los ensayos de modelos RP, en este estudio se ha decidido realizar el test  $K-S$  con el 5,0% de nivel de significación para comprobar si los TBF se pueden aceptar que responden a algún modelo de los ensayados. El criterio de “hipótesis nula” es; rechazar  $H_0$  con un 5,0% de nivel de significación si  $D > D_{crítico}$ , con  $D_{crítico} = 1.36/\sqrt{n}$  siendo un criterio habitual en los este tipo de estudios de fiabilidad con modelos NHPP.

TREN	Potencia	Exp. 1º Orden	Exp. 2º Orden	Exp. 3º Orden	IBM
1	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
3	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
5	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
6	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
7	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
8	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
10	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
11	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
12	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
13	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
14	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
15	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
17	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
18	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
22	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
23	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
24	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
25	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
26	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
27	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
28	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
31	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
32	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
33	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
34	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
36	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza

Tabla 64 – Resultados de aceptación de modelos NHPP en sistemas de tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup>

TREN	Potencia	Exp. 1º Orden	Exp. 2º Orden	Exp. 3º Orden	IBM
1	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
2	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Acepta
4	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
5	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
9	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
13	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
14	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
15	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
17	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
18	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
20	Se Acepta	Se Acepta	Se Acepta	Se Acepta	Se Acepta
21	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
22	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
26	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
29	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
30	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
33	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
34	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
37	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
38	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
43	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
44	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
45	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
46	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
50	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
51	Se Acepta	Se Acepta	Se Acepta	Se Rechaza	Se Rechaza
52	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
55	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Acepta	Se Rechaza	Se Rechaza
58	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
59	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
60	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
68	Se Acepta	Se Acepta	Se Acepta	Se Acepta	Se Rechaza
71	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
74	Se Acepta	Se Acepta	Se Acepta	Se Acepta	Se Rechaza
75	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Acepta	Se Rechaza
76	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
80	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
81	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Acepta	Se Acepta	Se Acepta

Tabla 65 – Resultados de aceptación de modelos NHPP en sistemas de tracción de trenes 2000-B

TREN	Potencia	Exp. 1º Orden	Exp. 2º Orden	Exp. 3º Orden	IBM
6	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
11	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
15	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
17	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
19	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
20	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza

Tabla 66 – Resultados de aceptación de modelos NHPP en sistemas de tracción de trenes 8000

ESCALERA	Potencia	Exp. 1º Orden	Exp. 2º Orden	Exp. 3º Orden	IBM
4	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
5	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
9	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
12	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
13	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
14	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
15	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
16	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
19	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
20	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
21	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
22	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
23	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
25	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
26	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
30	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
33	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
35	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
37	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
38	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
39	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza
40	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza	Se Rechaza

Tabla 67 – Resultados de aceptación de modelos NHPP en sistemas de tracción de trenes 8000

En la Tabla 68 se resumen los valores de aceptación y rechazo,  $H_0$  con un 5% de nivel de significación si  $D > D_{crítico}$ , con  $D_{crítico} = 1.36/\sqrt{n}$ , para los modelos NHPP de cada ítem.

SISTEMA	ITEMS CON TENDENCIA	SE RECHAZAN MODELOS NHPP	SE ACEPTA ALGÚN MODELO NHPP
Tracción 5000-4ª	<b>26</b>	26	<b>0</b>
Tracción 2000-B	<b>38</b>	30	<b>8</b>
Tracción 8000	<b>6</b>	6	<b>0</b>
Escaleras Mecánicas TNE	<b>22</b>	22	<b>0</b>

Tabla 68 – Resumen de aceptación y rechazo del modelo NHPP por sistema e ítems

Estos niveles de aceptación de los modelos NHPP empeoran los niveles de aceptación de los modelos PLP (ver apartado 6.6), pasando de 19 ítems con modelo PLP aceptado a los 8 ítems con modelo NHPP aceptado, de un total de 92 ítems.

Como ya se ha indicado, mayoritariamente los TBF de los ítems no tienen una distribución exponencial y todos los modelos NHPP requieren que los TBF tengan una distribución exponencial. Se recuerda que el modelo PLP es uno de los modelos NHPP.

Esta circunstancia explica el rechazo masivo de los modelos NHPP en los ítems ensayados, ya que como se ha detallado en el apartado 7.2, los TBF no responden generalmente a una distribución exponencial, con independencia de la existencia, o no, de tendencia en los fallos.

Por lo tanto los ítems en los que se puede aceptar que su fiabilidad puede ser modelada mediante un modelo NHPP alternativo al PLP son los 8 ítems de la Tabla 69.

SISTEMA	ITEM	Mejor Modelo NHPP	$\lambda$	$\beta$	$\sigma$	$\delta$	Tendencia
Tracción 2000-B	2	IBM	<b>3,53E-05</b>	<b>3,00</b>	<b>0,83</b>		Decreciente
Tracción 2000-B	20	Potencia	<b>2,00E-07</b>	<b>0,39</b>			Creciente
Tracción 2000-B	51	Potencia	<b>1,30E-03</b>	<b>-0,29</b>			Decreciente
Tracción 2000-B	55	Exponencial 2º orden	<b>-10,78</b>	<b>-2,59E-07</b>	<b>6,39E-13</b>		Creciente
Tracción 2000-B	68	Potencia	<b>1,77E-03</b>	<b>-0,31</b>			Decreciente
Tracción 2000-B	74	Potencia	<b>3,03E-10</b>	<b>0,84</b>			Creciente
Tracción 2000-B	75	Exponencial 2º orden	<b>-11,61</b>	<b>-3,80E-07</b>	<b>5,14E-12</b>	<b>-2,94E-18</b>	Creciente
Tracción 2000-B	81	Exponencial 3º orden	<b>10,07</b>	<b>5,60E-06</b>	<b>-5,45E-12</b>		Creciente

Tabla 69 – Parámetros de ítems con modelo NHPP aceptado

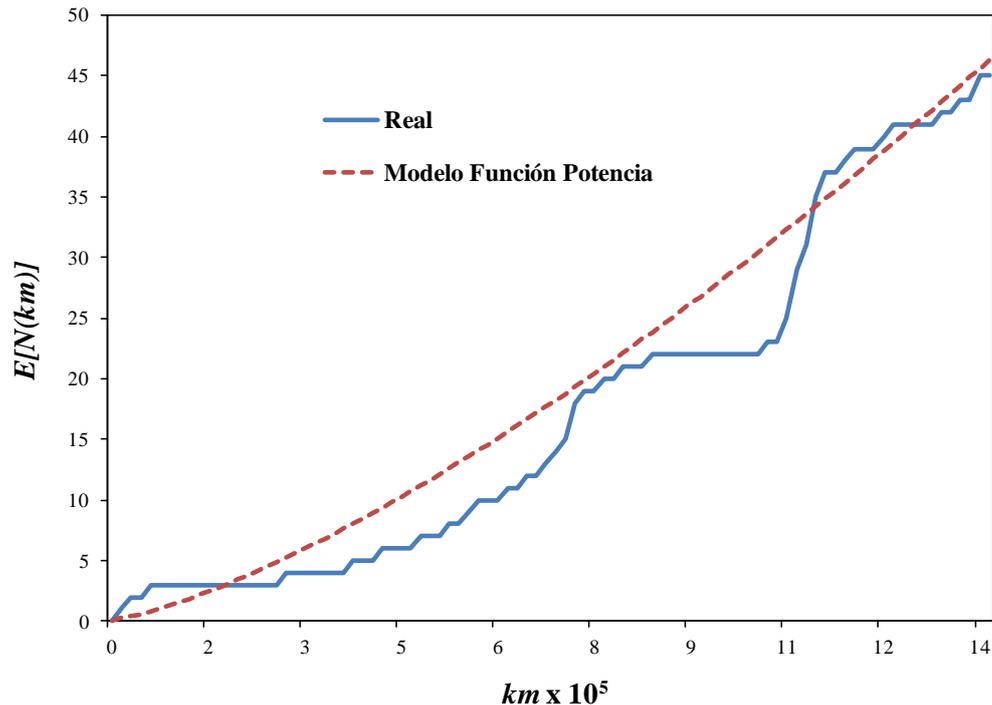


Figura 84 – Fallos acumulados por el tren 20 de la serie 2000-B

Como ejemplo de modelo aceptado, en la Figura 84 se representa los valores reales en explotación de fallos acumulados y la estimación  $E[N(km)] = \frac{\lambda}{\beta+1} t^{\beta+1}$  efectuada por el modelo Función Potencia NHPP en el sistema de tracción 20 de los trenes 2000-B.

## 7.5. Aplicación de modelos de “reparación imperfecta” y otros

Los modelos de las normas IEC, HPP y PLP han fracasado masivamente en este estudio, como consecuencia del impacto de los episodios de fallos repetitivos en los TBF, tanto en los ítems que han demostrado tendencia, como en lo que no.

Los modelos RP presentados para los ítems sin tendencia en los TBF, requieren de un completo análisis de independencia, al objeto de que no se pueda rechazar que los TBF son i.i.d., y su aceptación en los ensayos ha resultado moderada. Otros modelos NHPP han sido ensayados para los ítems con tendencia en los TBF, y han fracasado también. Se ha constatado, por consiguiente, las limitaciones prácticas de que los datos se ajusten a los modelos de “reparación mínima” y “reparación perfecta”.

Los datos pueden desafiar los modelos simples señalados, y desde hace décadas se han desarrollado innumerables modelos de fiabilidad, y los más importantes los resumimos a continuación (ver detalles en el apartado 2.7.8):

- Modelo de proceso de Poisson de ramificación (Branching Poisson Process, BPP):
- Modelo de proceso de renovación superpuesto (Superimposed Renewal Process, SRP).

- Modelos de proceso de renovación modulado (Modulated Renewal Process, MRP).
- Modelo exponencial por tramos (Piecewise Exponential Model, PEXP).
- Modelo Brown-Proschan (BP).
- Modelo Block-Borges-Savits (BBS).
- Método de factor de mejora (Improvement factor method).
- Procesos de edad virtual ("virtual age")/ Procesos de renovación generalizados (GRP).
- Modelos de procesos de renovación con tendencia (Trend Renewal Process, TRP).
- Modelos de intensidad proporcional (Proportional Intensity, PI)
- Modelos de fragilidad para datos correlacionados.
- Modelos de predicción basados en el análisis de series de tiempo.
- Modelos de ecuaciones diferenciales.
- Procesos de desgaste y daño acumulado.
- Modelo Monte Carlo.
- No paramétricos.
- Modelos de predicción basados en redes neuronales.
- Modelos con dependencia multivariantes.

Estos modelos se han desarrollado para intentar ajustarse adecuadamente sobre unos datos de TBF que presentan comportamientos complejos. Se presenta una agrupación de modelos, atendiendo a las tres líneas básicas de estudio existentes:

1. Modelar los fallos repetitivos y/o tendencias superpuestas: Parten de un modelo simple HPP, NHPP o RP, y se intentan modelar los fallos repetitivos o tendencias superpuestas con la "interferencia" de otros procesos estocásticos o distribuciones conocidas de los TBF. A este grupo pertenecen los modelos:
  - Modelo de proceso de Poisson de ramificación (Branching Poisson Process, BPP):
  - Modelo de proceso de renovación superpuesto (Superimposed Renewal Process, SRP).
  - Modelos de proceso de renovación modulado (Modulated Renewal Process, MRP).
  - Modelo exponencial por tramos (Piecewise Exponential Model, PEXP).
  - Modelo Brown-Proschan (BP).
  - Modelo Block-Borges-Savits (BBS).

- Método de factor de mejora (Improvement factor method).
- Procesos de edad virtual (“virtual age”)/ Procesos de renovación generalizados (GRP).
- Modelos de procesos de renovación con tendencia (Trend Renewal Process, TRP).
- Modelo Monte Carlo.

La gran limitación de estos modelos es que los datos deben cumplir los requisitos matemáticos específicos del modelo, por ejemplo en el modelo BPP, los fallos repetitivos deben responder a unas distribuciones de TBF concretas. Es por ello que las posibilidades de rechazo del modelo obtenido en las pruebas de bondad de ajuste son altas.

2. Identificar la variable y/o variables que provocan dependencia: Estos modelos abandonan la suposición del carácter aleatorio de los fallos. No son independientes y por tanto se abandona su modelado mediante procesos estocásticos. Los TBF tiene dependencia de una o varias variables, y una vez identificadas se puede modelar la fiabilidad del sistema, mediante la formulación adecuada de estas variables. A este grupo pertenecen los modelos:

- Modelos de intensidad proporcional (Proportional Intensity, PI)
- Modelos de fragilidad para datos correlacionados.
- Modelos con dependencia multivariantes.

En este caso la dificultad estriba en identificar la o las variables independientes generatrices de la dependencia de los TBF. En todo caso, son modelos que requieren de un gran volumen de datos tanto de los fallos, como de las condiciones de operación de los sistemas (temperaturas, tensiones, presiones, etc.).

3. Ajustar los datos mediante ecuaciones matemáticas: Esta alternativa no busca una explicación estadística “a priori” o de dependencia de los datos, busca modelos matemáticos que se ajusten a los datos, sin necesidad de soporte del porqué del comportamiento de los TBF. Se agrupan bajo esta clasificación los modelos:

- Modelos de predicción basados en el análisis de series de tiempo.
- Modelos de ecuaciones diferenciales.
- Procesos de desgaste y daño acumulado.
- No paramétricos.
- Modelos de predicción basados en redes neuronales.

Estos modelos aunque están orientados a los “datos”, éstos deben ajustarse en algún grado a la fórmula matemática que los representa y su evolución temporal presenta limitaciones en sus intervalos de confianza futuros. Es decir, pueden explicar adecuadamente el comportamiento pasado de los TBF, pero no garantizan una ajustada estimación futura de los fallos.

Todos estos modelos tienen una serie de limitaciones para los ingenieros de mantenimiento: la existencia de una multitud de modelos plausibles para ensayar, la necesidad de un complejo aparato matemático, y la falta de implementación y soporte de software para estos modelos en el contexto del análisis de datos estadísticos y de contraste.

En los ensayos efectuados en este estudio sobre cuatros (4) sistemas reparables y de 187 ítems en total, y dado el nivel de rechazos de los modelos ya ensayados, a continuación se deberían probar modelos BPP, MRP, BP, BBS, TRP, GRP, PI..., pero en la práctica la posibilidad de éxito es muy limitada:

- ¿Qué modelo o modelos se eligen ensayar?, la existencia de múltiples modelos válidos potenciales a ensayar, complican y desorientan sobre la correcta selección del tipo y modelo exacto más adecuado a ensayar para cada colección de datos de cada ítem.
- ¿Cómo se realizan los ensayos? el obligatorio empleo de una compleja aparatamenta matemática de cálculo, genera razonables dudas de la correcta aplicación del modelo ya que en muchos casos se debe asumir la aceptación previa de no rechazo de las hipótesis que deben cumplir los datos; distribuciones, correlaciones, etc., máxime si el modelo no cuenta con una contrastada prueba de bondad de ajuste.
- ¿Cuánto tiempo de cálculo requieren los ensayos?, una casi nula implementación en el software estadístico y de fiabilidad de estos modelos, obliga al empleo de cientos de horas (no disponibles) en cada modelo para la preparación de los datos, realizar los ensayos de aceptación o rechazo de las hipótesis de partida, efectuar los cálculos, aplicar los estimadores por máxima verosimilitud (MLE) para cada parámetro del modelo, intervalos de confianza, pruebas de bondad de ajuste, etc.

Se resalta la necesidad de que la comunidad científica oriente sus esfuerzos en seleccionar el o los modelos de mayor prestigio y aceptación internacional para su aplicación a los sistemas reparables complejos en los que fracasan los modelos NHPP y RP. Y son imprescindible para un análisis regulado de los sistemas que son auditados externamente por requisitos de seguridad, presentes en múltiples sectores industriales; aeronáutico, ferrocarril, químico, nuclear, etc.

En nuestros estudios sobre los cuatro (4) sistemas reparables, los TBF de los ítems no han permitido, siquiera, efectuar una discriminación matemáticamente aceptable entre los supuestos TBF primarios y los TBF repetitivos (o secundarios). Tampoco existen cambios de tendencia en los fallos con patrones observables, ni distribuciones en los TBF que sugieran, “a priori”, la posibilidad de éxito de alguno de los modelos desarrollados para intentar modelar sistemas con existencia de fallos repetitivos y/o tendencias superpuestas.

Asimismo los estudios de dependencia de los TBF no han podido demostrar la existencia de ninguna variable de los sistemas que demuestre correlación con los fallos. No es posible por lo tanto, abordar un modelado con éxito de variables dependientes.

En el caso del modelado mediante ecuaciones matemáticas requieren de potentes motores de modelado y es necesario emplear herramientas de auto-correlación, correlación parcial y análisis espectral para examinar las propiedades subyacentes de los datos, tales como la existencia de no estacionalidad, tendencia, etc.

Por todo ello, y dadas las limitaciones ya descritas para el ensayo de modelos publicados de “reparación imperfecta” y otros, se presentan los resultados de esta modesta contribución mediante el ensayo de varios modelos con sencillas ecuaciones matemáticas, como un ejercicio práctico, y al objeto de medir el ajuste a los datos reales y presentar unas conclusiones sobre los mismos.

Los modelos elegidos son la estimación de  $E[N(t)]$  mediante regresión simple (método de mínimos cuadrados). Con ayuda de STATGRAPHICS Centurion se han ensayado 27 modelos de regresiones simples, con o sin transformación previa de valores del eje  $X$  (kilómetros u horas) y del eje  $Y$  ( $E[N(t)]$ ) de la Tabla 70, siendo el coeficiente  $\beta_0 = 0$ , ya que  $E[N(0)] = 0$ . Para cada ítem se selecciona el modelo de regresión que mejor se adapta a los datos, seleccionando el que presente un % más alto de coeficiente de determinación  $R^2$  ajustado en un rango que va de 0 a 100%.

La prueba de bondad de ajuste propuesta por STATGRAPHICS Centurion se integra dentro del análisis de análisis de la varianza ANOVA mediante la descomposición de la variabilidad de la variable dependiente  $Y$  dentro de un modelo de suma de cuadrados y de suma de cuadrados del error o residuos. Es de particular interés en éste análisis la Prueba F y su P-value asociado para probar la significancia estadística del modelo ajustado. Un pequeño P-Value (menor a 0.05 si se opera con un nivel de significación de 5%) indica que la relación estadística de la forma especificada existe entre  $Y$  y  $X$ .

Modelo	Ecuación	Transformación en Y	Transformación en X
Lineal	$y = \beta_0 + \beta_1 x$	ninguna	ninguna
Raíz cuadrada de Y	$y = (\beta_0 + \beta_1 x)^2$	raíz cuadrada	ninguna
Exponencial	$y = e^{(A_0 + A_1 x)}$	logaritmo	ninguna
Inverso de Y	$y = (\beta_0 + \beta_1 x)^{-1}$	inverso	ninguna
Y Cuadrática	$y = \sqrt{\beta_0 + \beta_1 x}$	cuadrado	ninguna
Raíz cuadrada de X	$y = \beta_0 + \beta_1 \sqrt{x}$	ninguna	raíz cuadrada
Raíz cuadrada doble	$y = (\beta_0 + \beta_1 \sqrt{x})^2$	raíz cuadrada	raíz cuadrada
Y Logarítmico- X Cuadrática	$y = e^{(A_0 + A_1 \sqrt{x})}$	logaritmo	raíz cuadrada
Y Inversa- raíz cuadrada de X	$y = (\beta_0 + \beta_1 \sqrt{x})^{-1}$	inverso	raíz cuadrada
Y cuadrática- raíz cuadrada de X	$y = \sqrt{\beta_0 + \beta_1 \sqrt{x}}$	raíz cuadrada	raíz cuadrada
X Logarítmico	$y = \beta_0 + \beta_1 \ln(x)$	ninguna	Logaritmo
Raíz cuadrada de Y- logaritmo de X	$y = (\beta_0 + \beta_1 \ln(x))^2$	raíz cuadrada	Logaritmo
Multiplicativo	$y = \beta_0 x^A$	logaritmo	Logaritmo
Y Inverso, X logarítmico	$y = \frac{1}{\beta_0 + \beta_1 \ln(x)}$	inverso	Logaritmo
Y cuadrática - logaritmo de X	$y = \sqrt{\beta_0 + \beta_1 \ln(x)}$	cuadrado	Logaritmo
Inverso de X	$y = \beta_0 + \beta_1 / x$	ninguna	inverso
Raíz cuadrada de Y -inverso de X	$y = (\beta_0 + \beta_1 / x)^2$	raíz cuadrada	inverso
Curva S	$y = e^{(A_0 + A_1/x)}$	logaritmo	inverso
Doble inverso	$y = [\beta_0 + \beta / x]^{-1}$	inverso	inverso
Y cuadrática- inverso de X	$y = \sqrt{\beta_0 + \beta_1 / x}$	cuadrado	inversa
X Cuadrática	$y = \beta_0 + \beta_1 x^2$	ninguna	cuadrado
Raíz cuadrada de Y- cuadrado de X	$y = (\beta_0 + \beta_1 x^2)^2$	raíz cuadrada	cuadrado
Y Logarítmico- X Cuadrático	$y = e^{(A_0 + A_1 x^2)}$	logaritmo	cuadrado
Y Inverso, X cuadrático	$y = (\beta_0 + \beta_1 x^2)^{-1}$	inverso	cuadrático
Doble cuadrático	$y = \sqrt{\beta_0 + \beta_1 x^2}$	cuadrado	cuadrado
Logístico	$y = \frac{e^{(A_0 + A_1 x)}}{1 + e^{(A_0 + A_1 x)}}$	$y/(1-y)$	ninguna
Log probit	$y = \varphi(\beta_0 + \beta_1 \ln(x))$	$\varphi^{-1}(y)$ (inv. normal)	Logaritmo

Tabla 70 – Modelos de regresión simple de STATGRAPHICS para estimación de  $E[N(t)]$ 

En la Tabla 71 se presentan los resultados de aplicar los modelos de regresión simple en  $E[N(t)]$  de los sistemas de tracción de los trenes 5000-4<sup>a</sup>, en los que se observa unos modelos de limitado ajuste a los fallos. En 9 ítems el modelo de regresión simple que mejor ajusta es lineal (sin tendencia en los fallos), cuando en los ensayos de tendencia de Laplace  $U$  y MIL-HDBK-189 de estos ítems han resultado positivos. Asimismo en cada ítem la prueba de bondad de ajuste con un nivel de significación de 5% admite entre 6 y 9 modelos de regresión simple y cuya tendencia no es coincidente en algunos casos, lo que cuestiona los resultados y las limitaciones de estos sencillos modelos.

TREN	TENDENCIA TEST $U$	MEJOR MODELO REGRESIÓN SIMPLE	PARÁMETRO $\beta$ DEL MODELO	TENDENCIA MODELO REGRESIÓN	Nº DE MODELOS ACEPTADOS ( $H_0$ con 5% nivel de significación)
1	Creciente	Cuadrado de x	4,41E-11	Creciente	6
2	Constante	Lineal	5,89E-05	Constante	6
3	Creciente	Cuadrado de x	5,18E-11	Creciente	6
4	Constante	Lineal	4,60E-05	Constante	6
5	Creciente	Cuadrado de x	4,61E-11	Creciente	6
6	Creciente	Lineal	4,92E-05	Constante	6
7	Creciente	Cuadrado de x	3,70E-11	Creciente	6
8	Creciente	Cuadrado de x	4,30E-11	Creciente	6
9	Constante	Lineal	4,72E-05	Constante	6
10	Creciente	Cuadrado de x	3,83E-11	Creciente	9
11	Creciente	Cuadrado de x	4,68E-11	Creciente	6
12	Creciente	Lineal	3,32E-05	Constante	6
13	Creciente	Cuadrado de x	3,99E-11	Creciente	6
14	Creciente	Lineal	3,65E-05	Constante	6
15	Creciente	Cuadrado de x	2,91E-11	Creciente	6
16	Constante	Lineal	5,52E-05	Constante	6
17	Creciente	Cuadrado de x	2,83E-11	Creciente	6
18	Creciente	Cuadrado de x	2,97E-11	Creciente	6
19	Constante	Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	3,61E-03	Creciente	9
20	Constante	Lineal	4,54E-05	Constante	6
21	Constante	Lineal	4,66E-05	Constante	6
22	Creciente	Cuadrado de x	3,90E-11	Creciente	9
23	Creciente	Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	3,84E-03	Creciente	9
24	Creciente	Lineal	3,32E-05	Constante	6
25	Creciente	Lineal	3,33E-05	Constante	9
26	Creciente	Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	3,88E-03	Creciente	9
27	Creciente	Lineal	5,58E-05	Constante	9
28	Creciente	Cuadrado de x	2,58E-11	Creciente	6
29	Constante	Lineal	4,22E-05	Constante	6
30	Constante	Cuadrado Doble	4,73E-09	Constante	6
31	Creciente	Cuadrado de x	3,05E-11	Creciente	6
32	Creciente	Lineal	3,93E-05	Constante	6
33	Creciente	Lineal	4,15E-05	Constante	6
34	Creciente	Lineal	4,46E-05	Constante	6
35	Constante	Cuadrado Doble	2,84E-09	Constante	6
36	Creciente	Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	4,01E-03	Creciente	9

Tabla 71 – Modelos de regresión simple estimados de  $E[N(t)]$  en trenes 5000-4<sup>a</sup>

Para los items sin tendencia en los fallos el modelo de regresión simple más aceptado y de mayor ajuste es el lineal, con  $E[N(t)] = \beta_1 km$ . Como ejemplo, en la Figura 85 se representa el modelo para el sistema de tracción 20 de trenes 5000-4<sup>a</sup>.

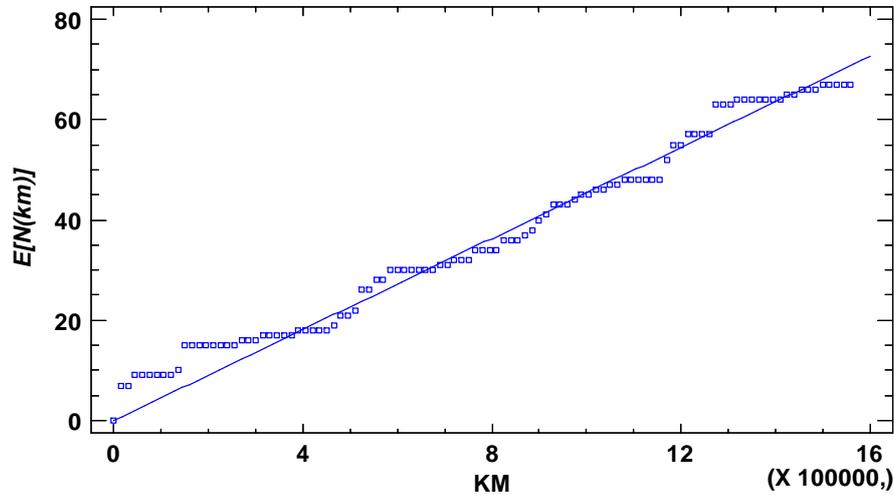


Figura 85 – Modelo de regresión simple lineal del tren 20 de la serie 5000-4<sup>a</sup>

Para los items con tendencia creciente en los fallos el modelo de regresión simple más aceptado y de mayor ajuste es el cuadrado de  $x$ , con  $E[N(t)] = \beta_1 km^2$ . Como ejemplo, en la Figura 86 se representa el modelo para el sistema de tracción 1 de trenes 5000-4<sup>a</sup>.

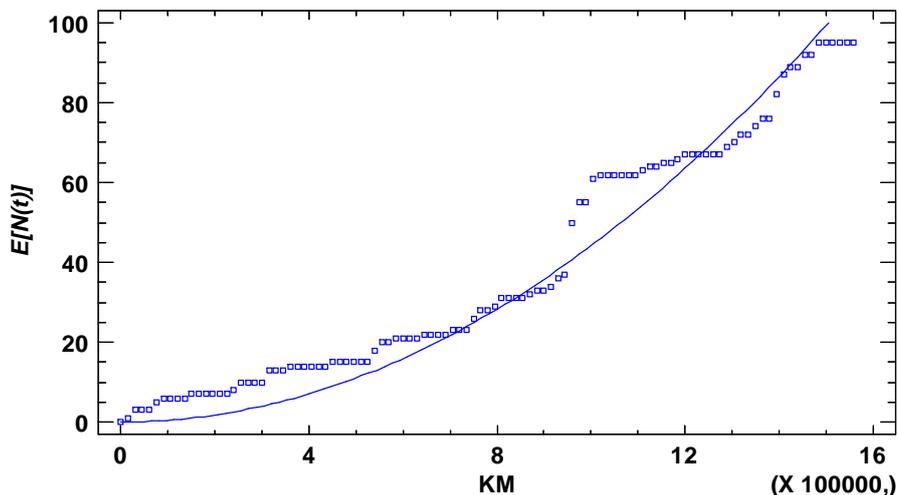


Figura 86 – Modelo de regresión simple cuadrado de  $x$  del tren 1 de la serie 5000-4<sup>a</sup>

Como contraste para confirmar la debilidad de los modelos de regresión simple, se presentan los resultados obtenidos sobre las escaleras mecánicas TNE.

ESCALERAS	TENDENCIA TEST $U$	MEJOR MODELO REGRESIÓN SIMPLE	PARÁMETRO	TENDENCIA MODELO REGRESIÓN	Nº DE MODELOS ACEPTADOS ( $H_0$ con 5% nivel de significación)
1	Constante	Lineal	2,65E-03	Constante	9
2	Constante	Lineal	2,20E-03	Constante	6
3	Constante	Lineal	2,30E-03	Constante	6
4	Decreciente	Raíz Cuadrada de X	6,25E-01	Decreciente	9
5	Creciente	Lineal	4,81E-03	Constante	6
6	Constante	Lineal	2,21E-03	Constante	6
7	Constante	Lineal	2,86E-03	Constante	6
8	Constante	Lineal	3,72E-03	Constante	9
9	Decreciente	Lineal	4,47E-03	Constante	6
10	Constante	Lineal	2,33E-03	Constante	6
11	Constante	Lineal	2,62E-03	Constante	6
12	Creciente	Cuadrado Doble	1,54E-05	Constante	6
13	Creciente	Lineal	4,54E-03	Constante	6
14	Creciente	Lineal	3,36E-03	Constante	6
15	Creciente	Cuadrado de X	7,95E-08	Creciente	6
16	Creciente	Lineal	3,48E-03	Constante	6
17	Constante	Lineal	2,50E-03	Constante	9
18	Constante	Lineal	1,88E-03	Constante	6
19	Creciente	Lineal	2,01E-03	Constante	6
20	Decreciente	Lineal	3,27E-03	Constante	6
21	Creciente	Cuadrado Doble	6,79E-06	Constante	6
22	Decreciente	Lineal	4,02E-03	Constante	9
23	Creciente	Cuadrado de X	5,10E-08	Creciente	9
24	Constante	Lineal	4,43E-03	Constante	6
25	Creciente	Lineal	3,67E-03	Constante	9
26	Creciente	Lineal	4,59E-03	Constante	9
27	Constante	Lineal	1,75E-03	Constante	9
28	Constante	Lineal	4,43E-03	Constante	6
29	Constante	Lineal	4,32E-03	Constante	9
30	Creciente	Lineal	1,22E-03	Constante	6
31	Constante	Cuadrado Doble	9,26E-06	Constante	6
32	Constante	Lineal	1,87E-03	Constante	6
33	Decreciente	Raíz Cuadrada de X	9,83E-01	Decreciente	6
34	Constante	Lineal	4,41E-03	Constante	6
35	Creciente	Lineal	3,74E-03	Constante	6
36	Constante	Lineal	1,86E-03	Constante	9
37	Creciente	Cuadrado de X	3,98E-08	Creciente	9
38	Creciente	Cuadrado de X	1,34E-08	Creciente	6
39	Creciente	Cuadrado de X	4,19E-08	Creciente	6
40	Creciente	Lineal	2,12E-03	Constante	9

Tabla 72 – Modelos de regresión simple estimados de  $E[N(t)]$  en escaleras mecánicas TNE

Los resultados no muestran una gran robustez, ya que para cada ítem los modelos de regresión simple aceptados con un nivel de significación de 5% son múltiples y en algunos casos con un ajuste de la tendencia de los fallos divergente. En 15 ítems el modelo de regresión simple que mejor ajusta es lineal (sin tendencia en los fallos), cuando en los ensayos de tendencia de Laplace  $U$  y MIL-HDBK-189 de estos ítems han resultado positivos. Asimismo en cada ítem la prueba de bondad de ajuste con un nivel de significación de 5% admite entre 6 y 9 modelos de regresión simple y cuya tendencia no es coincidente en algunos casos, lo que cuestiona los resultados y las limitaciones de estos sencillos modelos.

Para los ítems sin tendencia en los fallos el modelo de regresión simple más aceptado y de mayor ajuste es el lineal. Para los ítems con tendencia creciente en los fallos el modelo de regresión simple más aceptado y de mayor ajuste es el cuadrado de  $x$ .

Para los ítems con tendencia decreciente en los fallos el modelo de regresión simple más aceptado y de mayor ajuste es la raíz cuadrada de  $x$ , con  $E[N(t)] = \beta_1 \sqrt{km}$ . Como ejemplo, en la Figura 87 se representa el modelo para la escalera mecánica TNE número 33.

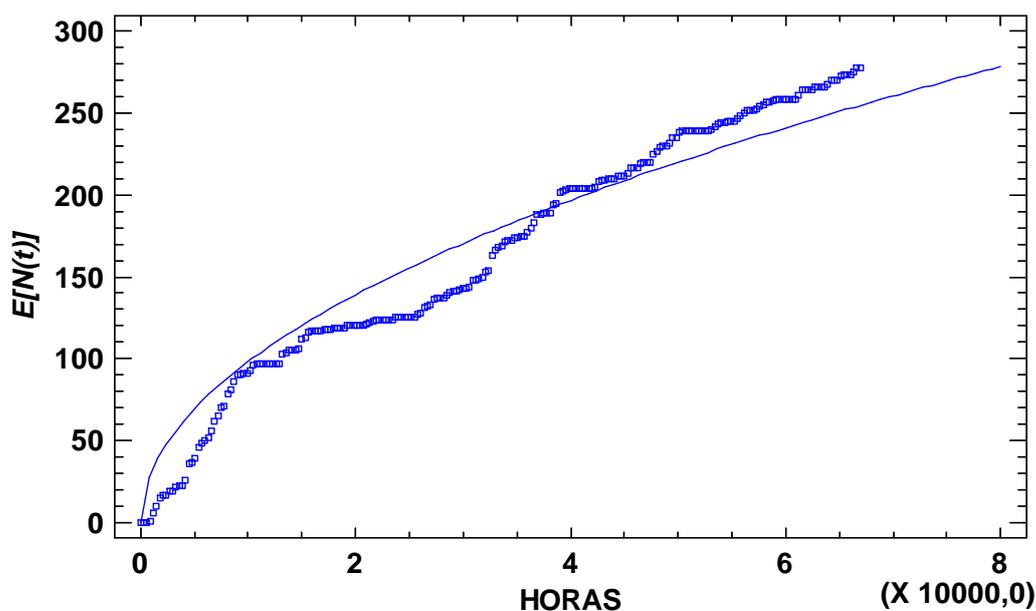


Figura 87 – Modelo de regresión simple raíz cuadrada de  $x$  de la escalera mecánica TNE número 33

Muchos autores consideran este tipo de modelos orientados a datos poco ortodoxos, ya que se limitan a intentar ajustar los datos a una ecuación matemática, pero sin explicación/formulación alguna de la naturaleza de los fallos y/o su potencial causa origen. Esta circunstancia se ha comprobado en los ensayos presentados con estas simples ecuaciones matemáticas.

## 7.6. Resumen de resultados del estudio complementario de la fiabilidad

- Los métodos estadísticos para el análisis complementario de la fiabilidad de sistemas reparables se ha efectuado con el soporte de las herramientas de STATGRAPHICS Centurion XVI, aplicando modelos RP para los items sin tendencia en los fallos y modelos NHPP (adicionales al PLP de las normas IEC) para los items con tendencia en los fallos.
- Se ha efectuado un análisis de los TBF de los sistemas objeto de estudio al objeto de caracterizar la naturaleza de los fallos, resultando:
  - Los TBF presentan una tendencia generalizada a la acumulación de varios fallos consecutivos durante cortos periodos temporales, a los que preceden y anteceden largos periodos temporales sin fallos acumulados. Son los denominados “fallos repetitivos” (recurrent failures).
  - Los fallos repetitivos que un sistema reparable acumula durante su larga vida de operación, son una situación que tiene su origen en diferentes factores operacionales, humanos y técnicos.
  - Los TBF no se ajustan a una distribución exponencial. En los datos se observa que existe una gran concentración de TBF cercanos al origen, y que son los fallos repetitivos. Una vez superado un plazo de kilómetros (u horas) cercanos a la reparación, los fallos presentan una distribución que va disminuyendo en su densidad, no correspondiéndose en ningún caso a una distribución exponencial.
  - Se ha analizado la posible dependencia de los TBF de diferentes variables operativas, técnicas y humanas, y no se ha podido rechazar la hipótesis de su independencia.
  - No se puede afirmar que exista una relación causa-efecto entre un fallo que, después de la revisión del sistema, el técnico de mantenimiento clasifica como “sin anomalía aparente” y la potencial repetición del fallo, no se evidencia correlación alguna.
  - Cualquier TBF por pequeño que sea,  $TBF \rightarrow 0$ , se encuentra dentro de los rangos esperados de su distribución. No se puede establecer un valor crítico de TBF para la identificación de los episodios con “acumulación de fallos supuestamente anormales” y tipificar estos TBF como fallos repetitivos.
  - No se ha evidenciado patrón estadísticamente reconocible en los fallos repetitivos, siendo episodios con una distribución idéntica respecto de  $km$  o  $t$  y sin asociación aparente entre tipos de fallos o reparación efectuada, resultando en la práctica los fallos primarios y los supuestos secundarios, indistinguibles.

- Si no se rechaza la hipótesis de que los TBF son independientes, para aquellos sistemas que no presentan tendencia se puede aceptar que los TBF son independientes e idénticamente distribuidos (i.i.d.), y por lo tanto son de aplicación los modelos RP de “reparación perfecta”. Se han aplicado modelos RP a los items sin tendencia:
  - 10 sistemas de tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup>.
  - 50 sistemas de tracción de trenes 2000-B.
  - 17 sistemas de tracción de trenes 8000.
  - 18 escaleras mecánicas TNE.
- Se han ensayado 25 distribuciones para los TBF en los modelos RP:
  - La distribución logística generalizada la que mejor ajusta a los TBF en los tres (3) sistemas de tracción de trenes.
  - En el caso de las escaleras mecánicas es la distribución log-normal 3 parámetros la que mejor se ajusta a los datos de TBF
  - En los cuatro (4) sistemas ensayados se han aceptado el modelo RP en 56 items de un total de 95 items, mejorando los resultados de ensayo del modelo HPP que sólo ha permitido modelar 18 items. Estos resultados permiten estimar  $\hat{\lambda}$  para items sin tendencia en TBF mediante modelos RP con un nivel de rechazo moderado.
- Si no se rechaza la hipótesis de que los TBF son independientes, para aquellos sistemas que presentan tendencia se pueden ensayar modelos HNPP alternativos al PLP. Se han aplicado modelos NHPP a los items con tendencia:
  - 26 sistemas de tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup>.
  - 38 sistemas de tracción de trenes 2000-B.
  - 6 sistemas de tracción de trenes 8000.
  - 22 escaleras mecánicas TNE.
- Se han ensayado 5 modelos NHPP alternativos al PLP a los TBF con tendencia:
  - En los cuatro (4) sistemas ensayados se han aceptado modelos NHPP en 8 items de un total de 92 items. Estos niveles de aceptación de los modelos NHPP empeoran los niveles de aceptación de los modelos PLP, pasando de 19 items con modelo PLP aceptado a los 8 items con modelo NHPP aceptado.
  - Mayoritariamente los TBF de los items no tienen una distribución exponencial y todos los modelos NHPP requieren que los TBF tengan una distribución exponencial.
- Se ha constatado, por consiguiente, las limitaciones prácticas de que los datos se ajusten a los modelos de “reparación mínima” NHPP y “reparación perfecta” HPP y RP.

- Se presenta una agrupación de modelos “reparación imperfecta” y otros, atendiendo a las tres líneas básicas de estudio siguientes:
  - Modelos basados en procesos estocásticos para fallos repetitivos y/o tendencias superpuestas. La gran limitación de estos modelos es que los datos deben cumplir los estrictos requisitos matemáticos específicos del modelo.
  - Modelos con dependencia en los TBF de una o varias variables, y una vez identificadas se puede modelar la fiabilidad del sistema, mediante la formulación adecuada de estas variables. La gran dificultad estriba en identificar la o las variables independientes generatrices de la dependencia de los TBF
  - Modelos de ajuste de los datos mediante ecuaciones matemáticas, estos modelos están orientados a los “datos” y no explican la naturaleza de los fallos y/o su potencial causa origen, lo que plantea dudas sobre la fiabilidad de las predicciones y la ortodoxia de los métodos.
- Los modelos de “reparación imperfecta” y otros tienen una serie de limitaciones en su aplicación para los ingenieros de mantenimiento:
  - la existencia de una multitud de modelos plausibles para ensayar.
  - la necesidad de un complejo aparato matemático.
  - la falta de implementación y soporte de software para estos modelos en el contexto del análisis de datos estadísticos y de contraste.
- Los TBF de los items de los estudios no han permitido, siquiera, efectuar una discriminación matemáticamente aceptable entre los supuestos TBF primarios y los TBF repetitivos (o secundarios). Tampoco existen cambios de tendencia en los fallos con patrones observables, ni distribuciones en los TBF. La posibilidad de éxito es casi nula para modelos basados en procesos estocásticos para fallos repetitivos y/o tendencias superpuestas.
- Asimismo los estudios de dependencia de los TBF no han podido demostrar la existencia de ninguna variable de los sistemas que demuestre correlación con los fallos. No es posible por lo tanto, abordar un modelado con éxito de variables dependientes sobre los TBF.
- En el caso del modelado mediante ecuaciones matemáticas requieren de potentes motores de modelado y es necesario emplear herramientas de auto-correlación, correlación parcial y análisis espectral para examinar las propiedades subyacentes de los datos, tales como la existencia de no estacionalidad, tendencia, etc. Se presentan los resultados mediante el ensayo de varios modelos para la estimación de  $E[N(t)]$  mediante regresión simple (método de mínimos cuadrados):
  - Para los items sin tendencia en los fallos el modelo de regresión simple más aceptado y de mayor ajuste es el lineal.

- 
- Para los ítems con tendencia creciente en los fallos el modelo de regresión simple más aceptado y de mayor ajuste es el cuadrado de  $x$ .
  - Para los ítems con tendencia decreciente en los fallos el modelo de regresión simple más aceptado y de mayor ajuste es la raíz cuadrada de  $x$ .
  - Los resultados no muestran una gran robustez, ya que para cada ítem los modelos de regresión simple aceptados con un nivel de significación de 5% son múltiples y en algunos casos con un ajuste de la tendencia de los fallos divergente. Asimismo en cada ítem la prueba de bondad de ajuste con un nivel de significación de 5% admite entre 6 y 9 modelos de regresión simple y cuya tendencia no es coincidente en algunos casos, lo que cuestiona los resultados obtenidos mediante de estos sencillos modelos.

# 8. PROPUESTAS DE ANÁLISIS MULTIVARIANTE

---

*El azar no existe; Dios no juega a los dados.*

*- Albert Einstein-*

Las diferencias de fiabilidad en sistemas idénticos operando en contextos de operación iguales, se han manifestado en los cuatro (4) sistemas objeto de los múltiples ensayos efectuados en los Apartados 6 y 7, obteniéndose, por ejemplo, en los 88 sistemas de tracción de trenes 2000-B fiabilidades con tendencia creciente, constante y decreciente. Los valores de fiabilidad de los sistemas de tracción de trenes 2000-B con tendencia constante con modelo aceptado, tiene un rango de 2,35 veces el valor superior, respecto al menor.

Los resultados presentados en los ensayos efectuados muestran una evidente dispersión en la fiabilidad de cada ítem de un sistema, por lo que se propone completar el análisis de la fiabilidad de los sistemas reparables, mediante propuestas aplicación técnicas multivariantes, al objeto de facilitar la toma de decisiones de los responsables de mantenimiento, que se enfrentan a una flota/conjunto de sistemas con fiabilidades distintas e incluso dispares.

## 8.1. Representación gráfica tridimensional de $z(t)$ del sistema reparable

Esta gráfica permite realizar una primera identificación cualitativa de las diferencias existentes entre las  $z(t)$  de los ítems objeto de estudio de cada sistema reparable. Tang (2002) propone realizar un diagrama de dispersión de las  $\lambda_i$  que se obtengan, al objeto de observar y analizar gráficamente estas diferencias.

Se presentan los 4 gráficos de los sistemas ensayados con modelos obtenidos en Apartado 6, tanto aceptados como no aceptados, al objeto de que la representación cualitativa incluya todos los ítems del sistema y el gráfico resultante genere una perspectiva completa de las tendencias de cada sistema:

- El sistema de tracción eléctrica de 36 trenes de la serie 5000-4<sup>a</sup>:
  - 10 ítems sin tendencia de fallos.
  - 26 ítems con tendencia creciente de fallos.
- El sistema de tracción eléctrica de 88 trenes de la serie 2000-B:
  - 17 ítems con tendencia decreciente de fallos.
  - 50 ítems sin tendencia de fallos.
  - 21 ítems con tendencia creciente de fallos.

- El sistema de tracción eléctrica de 23 trenes de la serie 8000:
  - 6 items con tendencia decreciente de fallos.
  - 17 items sin tendencia de fallos.
- 40 escaleras mecánicas del modelo TNE.
  - 5 items con tendencia decreciente de fallos.
  - 18 items sin tendencia de fallos.
  - 17 items con tendencia creciente de fallos.

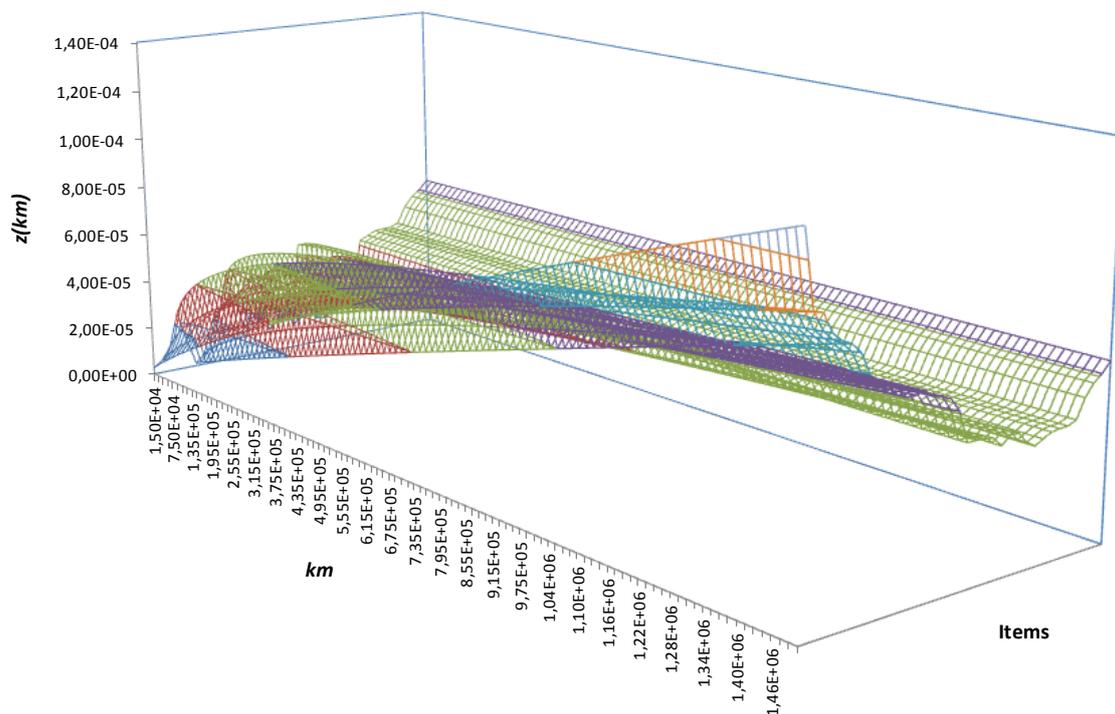


Figura 88 – Representación gráfica 3D de  $z(km)$  del sistema de tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup>

Esta gráfica (Figura 88) muestra las diferencias de las  $z(km)$  obtenidas para cada sistema de tracción de trenes 5000-4<sup>a</sup>. En primer plano se representan las  $z(km)$  variables correspondientes a los sistemas de tracción de los 26 trenes con modelo PLP creciente, en segundo plano se han representado los 10 trenes con modelo HPP, ordenados de forma ascendente (de menor  $\lambda_i$  a mayor  $\lambda_i$ ).

La gráfica revela la dispersión de los  $z(km)$  de los ítems y como los valores van divergiendo con el paso de los kilómetros. Hasta los 700.000 km aproximadamente todos los trenes se mantienen en unos márgenes próximos en su  $z(km)$ , pero a los 1.500.000 km los trenes con tendencia creciente en sus fallos presentan valores de  $z(km)$  que triplican a los trenes con tendencia constante de fallos.

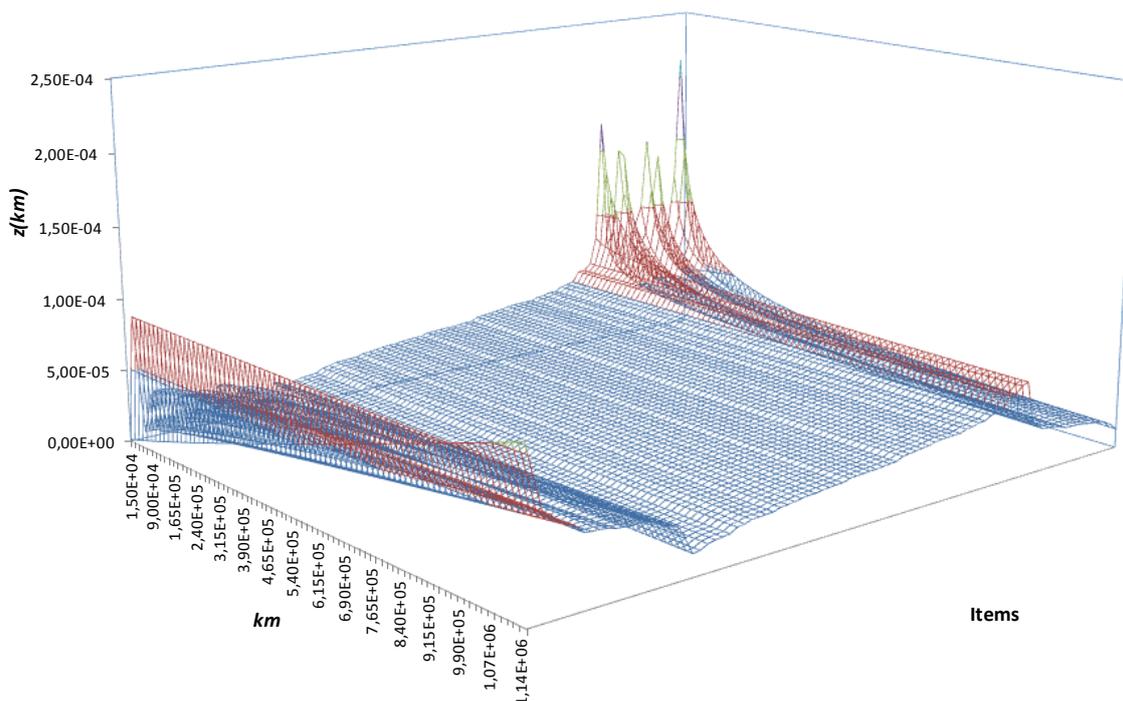


Figura 89 – Representación gráfica 3D de  $z(km)$  del sistema de tracción de trenes 2000-B

La gráfica (Figura 89) muestra las diferencias de las  $z(km)$  obtenidas para cada sistema de tracción de trenes 2000-B. En primer plano se representan las  $z(km)$  variables correspondientes a los sistemas de tracción de los 21 trenes con modelo PLP creciente, en segundo plano se han representado los 50 trenes con modelo HPP, ordenados de forma ascendente (de menor  $\lambda_i$  a mayor  $\lambda_i$ ). En el fondo se representan los sistemas de tracción de los 17 trenes con modelo PLP decreciente.

La gráfica revela la dispersión de los  $z(km)$  de los items y cómo los valores van divergiendo con el paso de los kilómetros. Existe un grupo de sistemas de tracción con tendencia creciente de fallos que, aproximadamente a los 500.000 km su  $z(km)$  ya presenta valores altos y que con el paso de los kilómetros empeoran. Asimismo hay un grupo de sistemas de tracción con tendencia decreciente de fallos, que en los kilómetros iniciales tuvieron una  $z(km)$  alta, pero con el paso de los kilómetros ha ido descendiendo hasta valores inferiores, en la mayoría de los casos, a los que presentan los items sin tendencia en su fallo.

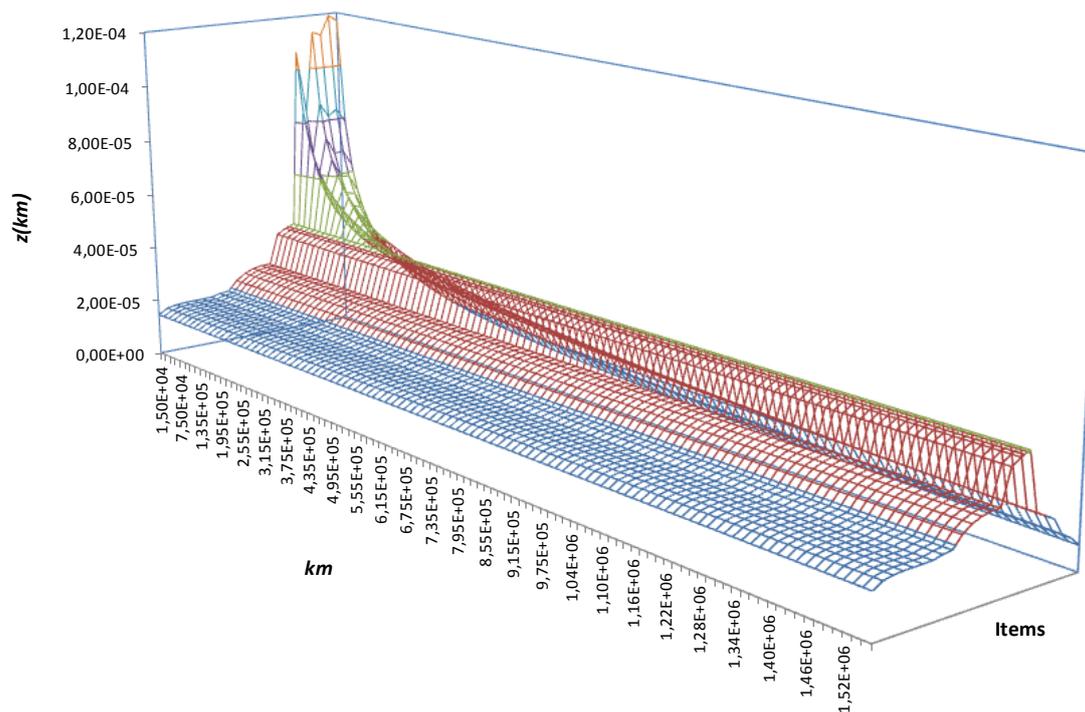


Figura 90 – Representación gráfica 3D de  $z(km)$  del sistema de tracción de trenes 8000

En este caso la gráfica (Figura 90) muestra las  $z(km)$  obtenidas para cada sistema de tracción de trenes 8000. En primer plano se representan las  $z(km)$  constantes de los 17 trenes con modelo HPP, ordenados de forma ascendente (de menor  $\lambda_i$  a mayor  $\lambda_i$ ). En el fondo se representan los sistemas de tracción de los 6 trenes con modelo PLP decreciente.

Al igual que en los anteriores sistemas, la gráfica revela la dispersión de los  $z(km)$  de los items y cómo los valores van divergiendo con el paso de los kilómetros. Existe un grupo de sistemas de tracción sin tendencia de fallos, cuya  $z(km)$  es alta de forma constante. Asimismo, hay un grupo de sistemas de tracción con tendencia decreciente de fallos, que en los kilómetros iniciales tuvieron una  $z(km)$  alta, pero con el paso de los kilómetros ha ido descendiendo, hasta valores inferiores en la mayoría de los casos, a los que presentan los items sin tendencia en su fallo.

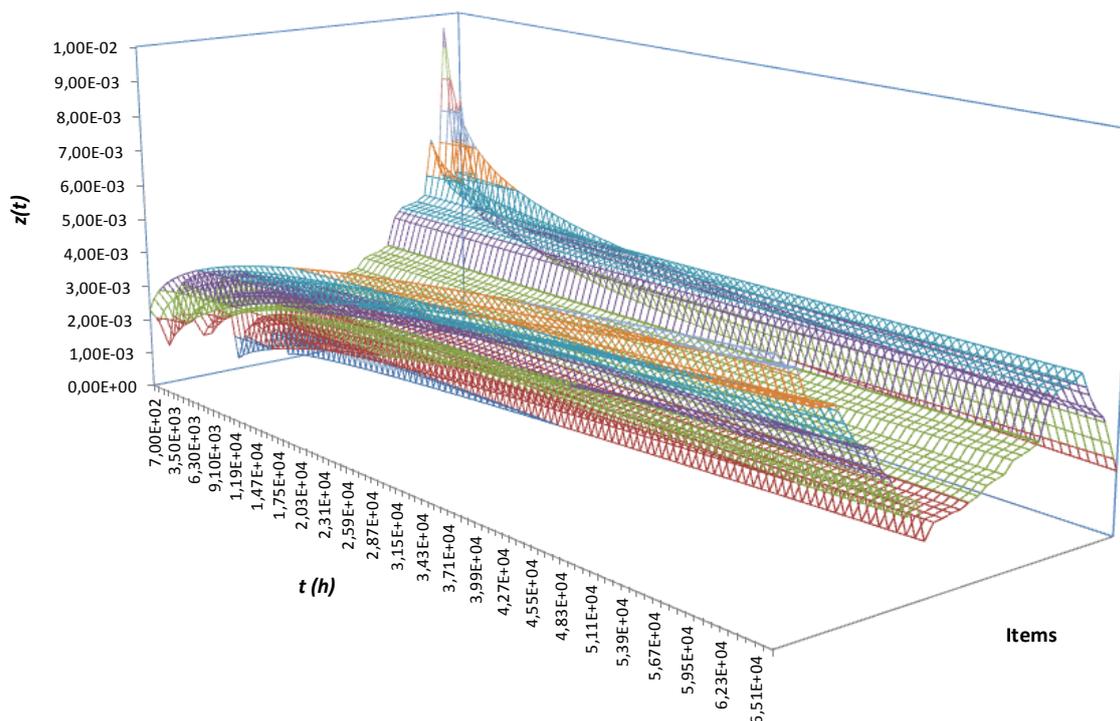


Figura 91 – Representación gráfica 3D de  $z(t)$  de las escaleras mecánicas TNE

La gráfica (Figura 91) muestra las diferencias de las  $z(t)$  obtenidas para cada escalera mecánica TNE. En primer plano se representan las  $z(t)$  variables correspondientes a las 17 escaleras mecánicas con modelo PLP creciente, en segundo plano se han representado las 18 escaleras mecánicas con modelo HPP, ordenados de forma ascendente (de menor  $\lambda_i$  a mayor  $\lambda_i$ ). En el fondo se representan los sistemas las 5 escaleras mecánicas con modelo PLP decreciente.

La gráfica revela la dispersión de los  $z(t)$  de los items y cómo los valores van divergiendo con el paso de las horas. Existe un grupo de escaleras mecánicas con tendencia creciente de fallos que, casi desde el inicio de su operación su  $z(t)$  ya presenta valores altos y que con el paso de las horas empeoran. Asimismo hay un grupo de escaleras mecánicas con tendencia decreciente de fallos, que en las horas iniciales tuvieron una  $z(t)$  alta, pero con el paso de las horas de operación han ido descendiendo hasta valores inferiores, en la mayoría de los casos, a los que presentan los items sin tendencia en su fallo.

Con estas gráfica se observa claramente que los sistemas de tracción de los trenes y las escaleras mecánicas requieren de un mantenimiento diferenciado sobre los ítems que presentan  $z(t)$  crecientes o altos; mayores consistencias de mantenimiento preventivo, mejor atención y recursos en el mantenimiento correctivo, reinversión, etc.

## 8.2. Potenciales aplicaciones multivariante para el análisis de fiabilidad de sistemas reparables

El análisis multivariante es el conjunto de métodos estadísticos cuya finalidad es analizar simultáneamente conjuntos de datos multivariantes, en el sentido de que hay varias variables medidas para cada individuo u objeto estudiado.

Estos métodos estadísticos ayudan al analista o investigador a tomar decisiones óptimas en el contexto en el que se encuentre, teniendo en cuenta la información disponible por el conjunto de datos analizado.

Se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- **Métodos de dependencia**

Suponen que las variables analizadas están divididas en dos grupos: las variables dependientes y las variables independientes. El objetivo de los métodos de dependencia consiste en determinar si el conjunto de variables independientes afecta al conjunto de variables dependientes y de qué forma.

- **Métodos de interdependencia**

Estos métodos no distinguen entre variables dependientes e independientes y su objetivo consiste en identificar qué variables están relacionadas, cómo lo están y por qué.

- **Métodos estructurales**

Suponen que las variables están divididas en dos grupos: el de las variables dependientes y el de las independientes. El objetivo de estos métodos es analizar, no sólo como las variables independientes afectan a las variables dependientes, sino también cómo están relacionadas las variables de los dos grupos entre sí.

De los métodos estadísticos existentes se han seleccionado aquellos que aplicados al estudio de la fiabilidad de sistemas reparables, pueden ayudar y complementar los ensayos y resultados de los estudios desarrollados en los Apartados 6 y 7 de esta tesis.

Con ayuda de STATGRAPHICS Centurion se han ensayado diferentes métodos estadísticos de análisis multivariante:

- **Análisis de correlaciones**

Los análisis de correlación miden la fuerza de la relación lineal entre dos variables en una escala de  $-1$  a  $+1$ . Entre mayor sea el valor absoluto de la correlación, más fuerte es la relación lineal entre las dos variables. En su aplicación a la fiabilidad de los sistemas reparables, puede permitir descubrir dependencias o interdependencias en los TBF, y para poder seleccionar adecuadamente los modelos de fiabilidad que mejor se adapten a la naturaleza de los TBF.

En la Tabla 73 se presentan las correlaciones de Pearson de las variables número de TBF, fecha de fabricación, orden de fabricación, sentido de marcha, longitud y tránsito de las 40 escaleras mecánicas TNE. Sólo existen dos variables con un valor alto y obvio; fecha de fabricación con orden de fabricación.

	Nº TBF	Orden Fabricación	Fecha Fabricación	Sentido	Longitud	Tránsito
Nº TBF		-0,1604	-0,1783	0,1074	0,1856	0,3547
Orden Fabricación	-0,1604		0,9808	-0,5659	-0,1006	-0,1554
Fecha Fabricación	-0,1783	0,9808		-0,4988	-0,1662	-0,2002
Sentido	0,1074	-0,5659	-0,4988		-0,0592	-0,1177
Longitud	0,1856	-0,1006	-0,1662	-0,0592		-0,0264
Tránsito	0,3547	-0,1554	-0,2002	-0,1177	-0,0264	

Tabla 73 – Correlaciones entre variables de contexto de las escaleras mecánicas TNE

Estos estudios de correlación complementarios a los ya efectuados en el Apartado 7.2, no han mostrado ningún hallazgo reseñable de correlación en los cuatro sistemas reparables ensayados, tanto para las variables de contexto operacional, como entre los subsistemas que los componen.

#### – Componentes Principales

El análisis de componentes principales está diseñado para extraer  $k$  componentes principales de un grupo de  $p$  variables cuantitativas  $X$ . Los componentes principales se definen como un grupo de combinaciones ortogonales lineales de  $X$  que tienen la mayor varianza. Con frecuencia, el determinar los componentes principales es usado para reducir la dimensión de un grupo de variables predictivas anterior a su uso en procedimientos como Regresión Múltiple o análisis de conglomerados. Cuando las variables están altamente correlacionadas, los primeros componentes principales pueden ser suficientes para describir la mayor parte de la variabilidad presente.

Su potencial aplicación en el estudio de la fiabilidad de sistemas reparables es encontrar un sistema o sistemas que sean capaces de explicar el comportamiento del conjunto de los sistemas en la evolución de los  $E[N(t)]$ .

Los análisis de componentes principales en los cuatro sistemas, no han evidenciado ningún tren o escalera mecánica que explique la evolución de los  $E[N(t)]$  del conjunto de cada sistema. Este resultado es el esperado, dada la dispersión de los  $E[N(t)]$  manifiesta entre los items de un mismo sistema.

### – Análisis Factorial

El procedimiento análisis factorial está diseñado para extraer  $m$  factores comunes de un grupo de  $p$  variables cuantitativas  $X$ . En muchas situaciones, un pequeño número de factores comunes puede ser capaz de representar un gran porcentaje de la variabilidad en las variables originales. La habilidad de expresar las covarianzas entre las variables en términos de un pequeño número de factores significativos, con frecuencia conduce a encontrar importantes cuestiones acerca de los datos que están siendo analizados.

Su potencial aplicación en el estudio de la fiabilidad de sistemas reparables es también encontrar un sistema o sistemas que sean capaces de explicar el comportamiento del conjunto de los sistemas en la evolución de los  $E[N(t)]$ .

Los análisis factoriales en los cuatro sistemas, no han evidenciado ningún tren o escalera mecánica que explique la evolución de los  $E[N(t)]$  del conjunto de cada sistema. Este resultado es el esperado, dada la dispersión de los  $E[N(t)]$  manifiesta entre los items de un mismo sistema.

### – Análisis de Conglomerados

El procedimiento Análisis de Conglomerados está diseñado para agrupar observaciones o variables en grupos o conglomerados basándose en las similitudes entre ellas. Los datos primos para el procedimiento pueden estar en cualquiera de dos formas:

- $n$  filas o casos, cada uno que contenga los valores de  $p$  variables cuantitativas.
- $n$  filas y  $n$  columnas si se agrupan observaciones o  $p$  filas y  $p$  columnas si se agrupan variables, conteniendo una medida de la "distancia" entre todos los pares de elementos.

Existe un número de algoritmos diferentes para generar los grupos. Algunos de los algoritmos son aglomerativos, empezando con grupos separados para cada observación o variable y luego juntándolos basándose en su similitud. Otros métodos comienzan con un grupo de semillas y empatan otros casos o variables a esas semillas. Con el objetivo de crear conglomerados de observaciones o variables, es importante tener una medida de "cercanía" o "similaridad" tal que los objetos parecidos puedan ser juntados. Cuando observaciones son conglomeradas, la cercanía es típicamente medida por la distancia entre observaciones en el  $p$ -dimensional espacio de variables. El procedimiento Análisis de Conglomerados de provee STATGRAPHICS Centurion contiene 3 diferentes métricas para medir la distancia entre 2 objetos, representados por  $x$  e  $y$ :

- Distancia Euclidiana Cuadrada.
- Distancia Euclidiana.
- Distancia de Bloque Habitacional.

Cuando se conglomeran variables, la distancia es definida similarmente excepto que  $x$  e  $y$  representan la localización de 2 variables en el  $n$ -dimensional espacio de las observaciones, y la suma es sobre las observaciones en lugar de sobre las variables. Hay dos tipos básicos de métodos para conglomerar objetos:

- Métodos Jerárquicos Aglomerativos: Métodos de conglomeración jerárquicos aglomerativos inician poniendo cada observación en un conglomerado separado. Conglomerados son unidos, dos cada vez, hasta que el número de conglomerados es reducido a un objetivo deseado. En cada etapa, los conglomerados son unidos en pares de acuerdo a su cercanía:
  - Vecino más cercano (liga simple): Define la distancia entre 2 conglomerados como el mínimo de las distancias entre cualquier miembro de un conglomerado con cualquier miembro del otro conglomerado.
  - Vecino más lejano (liga compuesta): Define la distancia entre 2 conglomerados como el máximo de las distancias entre cualquier miembro de un conglomerado con cualquier miembro del otro conglomerado.
  - Centroide: Define la distancia entre 2 conglomerados como la distancia entre los centroides de cada conglomerado, donde el centroide es localizado en el valor promedio de cada variable sobre todos los miembros del conglomerado.
  - Mediana: Define la distancia entre 2 conglomerados como la distancia entre las medianas de cada conglomerado, donde la mediana es localizada en el valor mediano de cada variable sobre todos los miembros del conglomerado.
  - Promedio de Grupo (liga promedio): Define la distancia entre 2 conglomerados como la distancia promedio entre todos los miembros de un conglomerado a todos los miembros del otro.
  - Método de Ward: Define la distancia entre 2 conglomerados en términos del incremento en la suma de las desviaciones cuadradas alrededor de la media del conglomerado que ocurriría si los dos conglomerados estuvieran unidos.
- Método de k-Medias: Este método inicia identificando  $k$  objetos como semillas iniciales para cada conglomerado. Los objetos son adheridos al conglomerado más cercano. El método de  $k$ -medias trabaja como sigue:
  1.  $k$  objetos son seleccionados para ser las semillas iniciales (semillas) para los  $k$  conglomerados deseados.
  2. Los restantes objetos son asignados a el conglomerado cuya semilla este más cercana de estos.
  3. Los centroides de cada conglomerado son calculados.

4. Cada objeto es revisado para determinar si es más cercano al centroide de otro que al centroide del conglomerado que está actualmente asignado. Si es así este se asigna al otro y ambos centroides son recalculados.

5. El paso 4 es repetido hasta que no hay cambios de lugar.

La potencial aplicación del análisis de conglomerados en el estudio de la fiabilidad de sistemas reparables es la generación de clústeres (grupos) de sistemas reparables que tienen una fiabilidad similar. En muchos casos el número de items a analizar es muy alto y la presentación de resultados de fiabilidad para un número, por ejemplo, superior a 50 sistemas, puede resultar complejo para la gestión del mantenimiento en las organizaciones empresariales.

#### – **Correlaciones Canónicas**

El procedimiento Correlaciones Canónicas está diseñado para ayudar a identificar asociaciones entre dos conjuntos de variables. Esto lo hace encontrando combinaciones lineales de las variables en los dos conjuntos que exhiban correlaciones fuertes. El par de combinaciones lineales con la correlación más fuerte forman el primer conjunto de variables canónicas. El segundo conjunto de variables canónicas es el par de combinaciones lineales que muestran la siguiente correlación más fuerte entre todas las combinaciones que no están correlacionadas con el primer conjunto. Frecuentemente, un número pequeño de pares puede ser usado para cuantificar la relación que existe entre los dos conjuntos.

Se estima que este método no debe ser empleado para, por ejemplo, la creación de un único individuo "tipo", calculado mediante la combinación lineal de los fallos de " $n$ " sistemas reparables idénticos, al no contar con el necesario soporte estadístico respecto al correcto tratamiento de los TBF y contemplar la naturaleza estocástica o de dependencia de los fallos.

#### – **Análisis de Correspondencias**

El procedimiento Análisis de Correspondencias crea un mapa de filas y columnas en una tabla de contingencia de dos dimensiones para superponer categorías relacionadas para variables fila y columna. No obstante, no se utilizan más de dos o tres dimensiones para mostrar la variabilidad de la inercia en la tabla. Una importante parte de la salida es el mapa de correspondencias en el cual la distancia entre dos categorías es una medida de su similitud.

No se le ha encontrado aplicación concreta a este método en su aplicación al análisis de la fiabilidad de sistemas reparables.

### – **Análisis de Regresión**

El procedimiento de Análisis de Regresión está orientado para construir un modelo estadístico que describe el impacto de uno o varios factores cuantitativo  $X_1-X_i$ , sobre una variable dependiente  $Y$ . Existen desarrollados múltiples modelos y métodos de análisis de regresión destacando:

- Regresión Simple.
- Regresión Múltiple.
- Regresión Logística.
- Regresión Binomial Negativa.
- Regresión No Lineal.
- Regresión Polinomial.
- Regresión de Poisson.
- Regresión de Cordillera.
- Riesgos Proporcionales de Cox.

Algunos de estos métodos se encuentran entre los empleados por algunos autores para modelar la fiabilidad de los sistemas reparables (ver Apartado 2.7.8). Se trata de encontrar el modelo que mejor se ajuste a los datos, sin necesidad de soporte del porqué del comportamiento de los TBF.

En el Apartado 7.5 se ha presentado una aplicación de estimación de  $E[N(t)]$  en diferentes sistemas reparables mediante regresión simple (método de mínimos cuadrados). Los resultados no muestran una gran robustez y muchos autores consideran este tipo de modelos orientados a datos poco ortodoxos.

### – **Análisis de Discriminante**

El procedimiento Análisis Discriminante está diseñado para ayudar a distinguir entre dos o más grupos de datos basados en un grupo de  $p$  variables cuantitativas observadas. Lo hace al construir funciones discriminantes que son combinaciones lineales de las variables. El objetivo de dicho análisis es regularmente uno o ambos de los siguientes:

- Ser capaz de describir casos observados matemáticamente en una manera que los separa en grupos lo mejor posible.
- Se capaz de clasificar nuevas observaciones como pertenecientes a uno u otro de los grupos.

No se le ha encontrado aplicación concreta a este método en su aplicación al análisis de la fiabilidad de sistemas reparables.

MÉTODO	APLICACIÓN	APARTADO
Análisis de Correlaciones	Dependencia y/o interdependencia en los TBF	7.2 y 8.2
Componentes Principales	Ítem o ítems que explican fiabilidad de un sistema	8.2
Análisis Factorial	Ítem o ítems que explican fiabilidad de un sistema	8.2
Análisis de Conglomerados	Generación de clústeres (grupos) de ítems que tienen una fiabilidad similar	8.3
Correlaciones Canónicas	No identificada aplicación	--
Análisis de Correspondencias	No identificada aplicación	--
Análisis de Regresión	Modelar la fiabilidad de los sistemas reparables (orientado a datos)	7.5
Análisis Discriminante	No identificada aplicación	--

Tabla 74 – Métodos multivariantes. Aplicación a la fiabilidad de sistemas reparables

Algunos de los métodos de análisis multivariante ya se han empleado en ensayos anteriores, como el análisis de correlaciones en la dependencia de los TBF (ver Apartado 7.2) y el análisis de regresión para modelar la fiabilidad de los sistemas (ver Apartado 7.5).

La aplicación del análisis de componentes principales y análisis factorial en los cuatro sistemas reparables ensayados, para la detección de un ítem o ítems que explican la fiabilidad de un sistema no ha sido concluyente. Este resultado es el esperado, dada la dispersión de los  $E[N(t)]$  de los ítems de un mismo sistema analizada en múltiples de los ensayos presentados. No obstante, se estiman métodos de interés cuando en un sistema con múltiples ítems y  $E[N(t)]$  similares, se desee identificar el sistema que mejor representa al conjunto.

A continuación se propone efectuar la caracterización y el modelado de agrupaciones (clúster) de la fiabilidad de los ítems cuyas  $z(t)$  sean próximas, al objeto de simplificar la presentación de resultados cuando el número de ítems es muy alto, y facilitar la comprensión y gestión de los resultados de la fiabilidad en flotas de sistemas reparables (aeronáutica, ferrocarril, naval, transporte terrestre, transporte vertical, etc.).

Este método se presenta de especial relevancia en su aplicación a los estudios de fiabilidad que se han presentado, ya que los sistemas reparables constan de un número alto de ítems y éstos presentan una fiabilidad diferente que puede ser agrupada de acuerdo a su tendencia y valor, por lo que se desarrolla su aplicación en el siguiente apartado.

### 8.3. Caracterización y creación de clústeres de sistemas reparables

La creación de clústeres en sistemas reparables mediante la selección de variables destacables de cada ítem, simplifica la toma de decisiones cuando el número de sistemas es muy elevado, ver ejemplos y procedimientos en:

- Juárez y otros (2011), variables “parámetros de generación” aplicado al sistema de interconexión de energía.
- Yu y Chan (2012), variables “temperaturas, potencias y caudales” aplicado a la operación de sistemas de refrigeración.
- Jaafar y otros (2012), variable “perfil de conducción” aplicado al diseño de locomotoras.
- Shang y Wang (2015), variables “fiabilidad, económicas y fiabilidad” aplicado a la generación de energía por grupos.
- Rastegari y Mobin (2016), variables “coste, frecuencia e indisponibilidad” aplicado a un sistema de gestión de mantenimiento.

En este estudio se plantea como variable la “fiabilidad” para simplificar la toma de decisiones de mantenimiento en grandes flotas. Para la creación de clústeres en sistemas reparables sin tendencia se han tomado como variables los valores de  $\lambda_i$  calculados por los modelos aceptados de fiabilidad RP (ver apartado 7.3):

- Sistema de tracción eléctrica serie 5000-4<sup>a</sup>: 1 ítem (no aplicable).
- Sistema de tracción eléctrica serie 2000-B: 30 ítems.
- Sistema de tracción eléctrica serie 8000: 11 ítems.
- Escaleras mecánicas del modelo TNE: 14 ítems.

El número de clústeres a generar debe ser fijado antes del ensayo. En los resultados presentados se han creado 3 clústeres:

- Clúster Alto: Ítems con  $\lambda$  alto que requieren unas políticas de mantenimiento diferenciales, aumentando las consistencias del mantenimiento preventivo y con una atención especial en la resolución de los fallos en el mantenimiento correctivo, al ser los ítems con los peores resultados de fiabilidad.
- Clúster Medio: Ítems con  $\lambda$  medio que requieren unas políticas de mantenimiento habituales en las consistencias del mantenimiento preventivo y en la resolución de los fallos en el mantenimiento correctivo.
- Clúster Bajo: Ítems con  $\lambda$  bajo que permiten relajar las políticas de mantenimiento preventivo y correctivo, ya que estos ítems presentan los mejores resultados de fiabilidad.

Se ha aplicado el análisis de conglomerados con los métodos; vecino más cercano, vecino más lejano, centroide, mediana, promedio de grupo, Ward y  $K$ -medias y métrica de distancia; euclidiana cuadrada, euclidiana y bloque habitacional.

Ha resultado el **método de Ward** el más apropiado en la creación de los clúster con un número de ítems equilibrado por grupo y sin mayor relevancia en los resultados la métrica de distancia que se emplee.

TREN	Mejor Distribución RP	$\lambda$	CLUSTER
11	Logística Generalizada	<b>5,01E-05</b>	ALTO
87	Logística Generalizada	<b>4,88E-05</b>	ALTO
8	Logística Generalizada	<b>4,84E-05</b>	ALTO
19	Logística Generalizada	<b>4,65E-05</b>	ALTO
48	Logística Generalizada	<b>4,55E-05</b>	ALTO
49	Logística Generalizada	<b>4,03E-05</b>	MEDIO
28	Logística Generalizada	<b>3,98E-05</b>	MEDIO
63	Logística Generalizada	<b>3,94E-05</b>	MEDIO
41	Logística Generalizada	<b>3,90E-05</b>	MEDIO
70	Logística Generalizada	<b>3,82E-05</b>	MEDIO
32	Logística Generalizada	<b>3,77E-05</b>	MEDIO
36	Logística Generalizada	<b>3,70E-05</b>	MEDIO
12	Logística Generalizada	<b>3,69E-05</b>	MEDIO
57	Logística Generalizada	<b>3,54E-05</b>	MEDIO
84	Logística Generalizada	<b>3,38E-05</b>	MEDIO
31	Logística Generalizada	<b>3,35E-05</b>	MEDIO
47	Logística Generalizada	<b>3,32E-05</b>	MEDIO
79	Logística Generalizada	<b>3,26E-05</b>	MEDIO
83	Logística Generalizada	<b>3,26E-05</b>	MEDIO
88	Logística Generalizada	<b>3,21E-05</b>	MEDIO
77	Logística Generalizada	<b>2,98E-05</b>	BAJO
53	Logística Generalizada	<b>2,76E-05</b>	BAJO
27	Logística Generalizada	<b>2,74E-05</b>	BAJO
64	Logística Generalizada	<b>2,48E-05</b>	BAJO
40	Logística Generalizada	<b>2,46E-05</b>	BAJO
61	Logística Generalizada	<b>2,28E-05</b>	BAJO
73	Logística Generalizada	<b>2,17E-05</b>	BAJO
82	Logística Generalizada	<b>1,89E-05</b>	BAJO
78	Logística Generalizada	<b>1,69E-05</b>	BAJO
62	Logística Generalizada	<b>1,68E-05</b>	BAJO

Tabla 75 – Clústeres de los sistemas de tracción de trenes 2000-B con modelo RP aceptado

En los sistemas de tracción de trenes 2000-B el clúster alto está formado por 5 ítems, el clúster medio por 15 y el clúster bajo por 10. Esta clasificación permite a los responsables de mantenimiento ajustar de forma más precisa las estrategias de mantenimiento diferencial a cada grupo de ítem cuya fiabilidad está teniendo un comportamiento semejante, al objeto de ser más eficientes y eficaces en el empleo de los recursos disponibles.

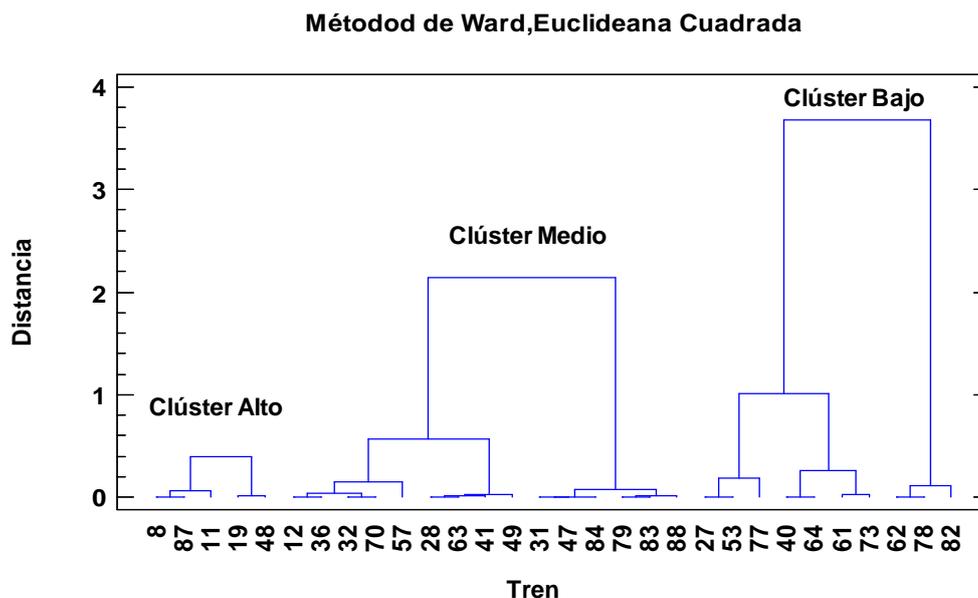


Figura 92 – Dendrograma de los clústeres de los sistemas de tracción de trenes 2000-B con modelo RP

TREN	Mejor Distribución RP	$\lambda$	CLUSTER
14	Logística Generalizada	<b>4,30E-05</b>	ALTO
7	Logística Generalizada	<b>2,51E-05</b>	MEDIO
12	Logística Generalizada	<b>2,42E-05</b>	MEDIO
13	Logística Generalizada	<b>2,04E-05</b>	BAJO
23	Logística Generalizada	<b>2,02E-05</b>	BAJO
9	Logística Generalizada	<b>1,95E-05</b>	BAJO
21	Logística Generalizada	<b>1,95E-05</b>	BAJO
22	Logística Generalizada	<b>1,93E-05</b>	BAJO
4	Logística Generalizada	<b>1,79E-05</b>	BAJO
1	Logística Generalizada	<b>1,71E-05</b>	BAJO
5	Logística Generalizada	<b>1,59E-05</b>	BAJO

Tabla 76 – Clústeres de los sistemas de tracción de trenes 8000 con modelo RP aceptado

En los sistemas de tracción de trenes 8000 el clúster alto está formado por sólo 1 ítems, el clúster medio por 2 y el clúster bajo por 8. En este caso los responsables de mantenimiento tienen que centrar sus esfuerzos y recursos en mejorar los resultados de la fiabilidad de los 3 ítems de los clústeres alto y medio.

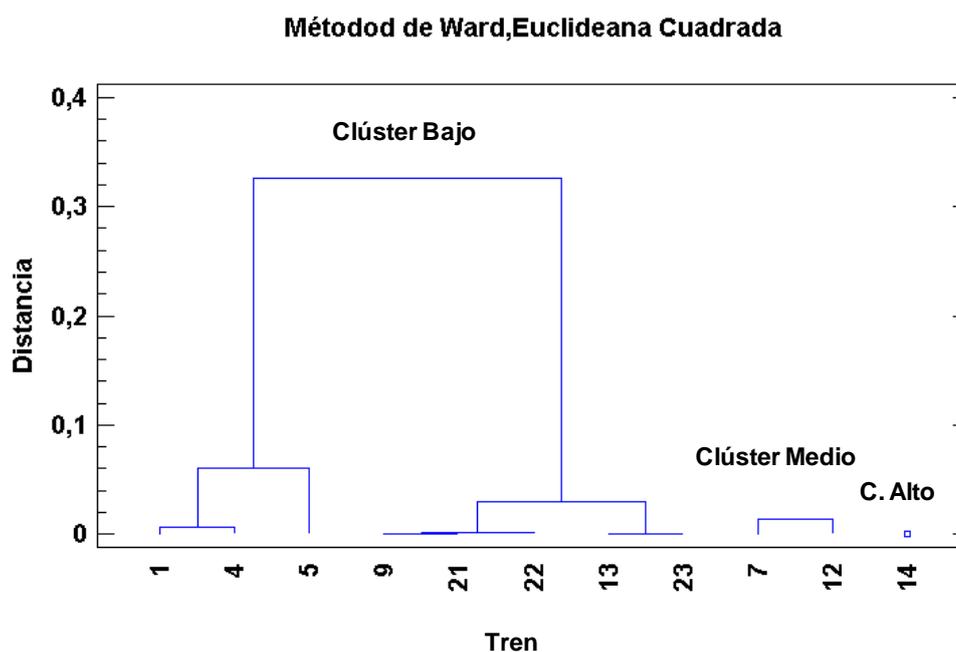


Figura 93 – Dendrograma de los clústeres de los sistemas de tracción de trenes 8000 con modelo RP

ESCALERA	Mejor Distribución RP	$\lambda$	CLUSTER
34	Log-normal 3 parámetros	<b>3,98E-03</b>	ALTO
29	Log-normal 3 parámetros	<b>3,54E-03</b>	ALTO
8	Log-normal 3 parámetros	<b>3,38E-03</b>	ALTO
11	Log-normal 3 parámetros	<b>2,34E-03</b>	MEDIO
1	Log-normal 3 parámetros	<b>2,23E-03</b>	MEDIO
2	Log-normal 3 parámetros	<b>2,17E-03</b>	MEDIO
7	Log-normal 3 parámetros	<b>2,05E-03</b>	MEDIO
10	Log-normal 3 parámetros	<b>1,93E-03</b>	MEDIO
31	Log-normal 3 parámetros	<b>1,91E-03</b>	MEDIO
36	Log-normal 3 parámetros	<b>1,55E-03</b>	BAJO
18	Log-normal 3 parámetros	<b>1,52E-03</b>	BAJO
3	Log-normal 3 parámetros	<b>1,39E-03</b>	BAJO
32	Log-normal 3 parámetros	<b>1,36E-03</b>	BAJO
27	Log-normal 3 parámetros	<b>1,00E-03</b>	BAJO

Tabla 77 – Clústeres de las escaleras mecánicas TNE con modelo RP aceptado

En las escaleras mecánicas TNE el clúster alto está formado por sólo 3 ítems, el clúster medio por 6 y el clúster bajo por 5. En este caso los responsables de mantenimiento tienen que centrar sus esfuerzos y recursos en mejorar los resultados de la fiabilidad de los 3 ítems del clúster alto.

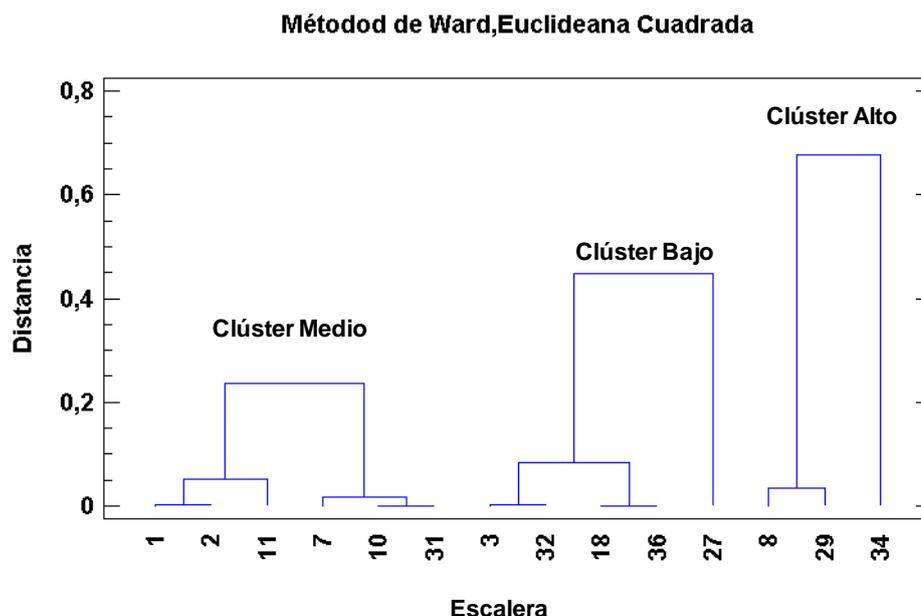


Figura 94 – Dendrograma de los clústeres de las escaleras mecánicas TNE con modelo RP

La creación de clústeres en los sistemas reparables con modelo NHPP aceptado, pueden ser generados tomando como variables los valores de  $\lambda_i$  y  $\beta_i$ :

- Sistema de tracción eléctrica serie 5000-4<sup>a</sup>: 3 ítem (no aplicable).
- Sistema de tracción eléctrica serie 2000-B: 13 ítems.
- Sistema de tracción eléctrica serie 8000: 2 ítems (no aplicable).
- Escaleras mecánicas del modelo TNE: 1 ítems (no aplicable).

De los 13 ítems de los sistemas de tracción de los trenes 2000-B con modelo NHPP aceptado, hay 4 con tendencia de fallos creciente que se debe agrupar en un clúster a tal efecto, ya que su fiabilidad tiene una tendencia consolidada hacia su empeoramiento, por lo que la política de mantenimiento tiene que ser especialmente profunda, al objeto de intentar revertir esta situación:

TREN	$\lambda$	$\beta$	CLUSTER
21	7,09E-07	1,28	Creciente
38	3,39E-07	1,32	Creciente
55	7,01E-07	1,26	Creciente
74	5,62E-11	1,92	Creciente

Tabla 78 – Clúster creciente de los sistemas de tracción de trenes 2000-B con modelo NHPP aceptado

TREN	$\lambda$	$\beta$	CLUSTER DECRECIENTE
50	6,38E-04	0,80	ALTO
45	1,17E-03	0,75	ALTO
37	1,22E-03	0,75	ALTO
51	1,87E-03	0,71	ALTO
68	2,09E-03	0,71	ALTO
22	2,38E-03	0,69	ALTO
13	4,12E-03	0,66	ALTO
26	1,08E-02	0,59	MEDIO
43	3,13E-02	0,49	BAJO

Tabla 79 – Clústeres decrecientes de los s. de tracción de trenes 2000-B con modelo NHPP aceptado

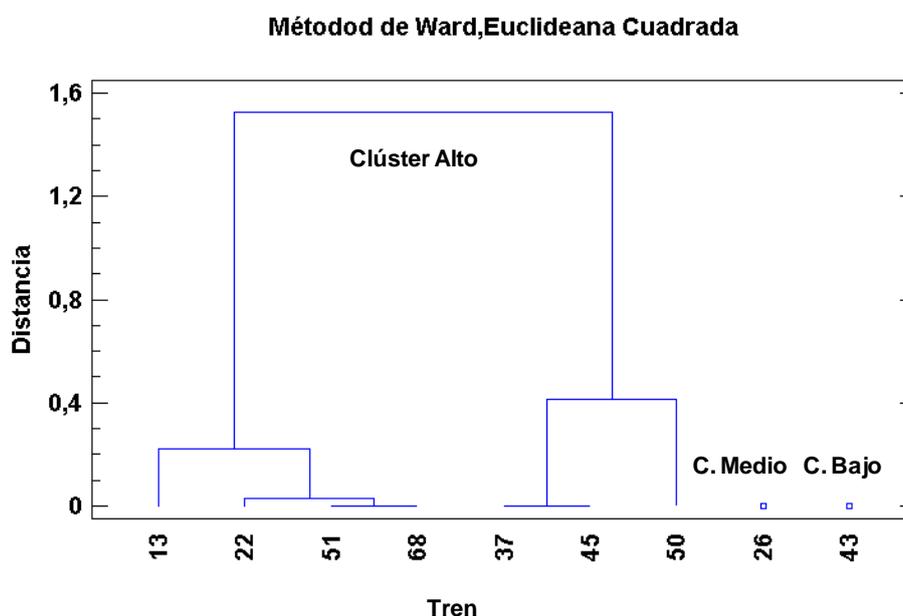


Figura 95 – Dendrograma de los clústeres de trenes 2000-B con modelo NHPP decreciente

De los 13 ítems de los sistemas de tracción de los trenes 2000-B con modelo NHPP aceptado, hay 9 con tendencia de fallos decrecientes. Se han generado 3 clúster tomado como variables los valores de  $\lambda_i$  y  $\beta_i$ , y aplicando el método de Ward, en este caso, no se consiguen agrupaciones equilibradas en el número de ítems, dadas las distancias de  $\lambda_i$  de los trenes 26 y 43. El clúster alto es el que presenta peores resultados de fiabilidad y debe ser al que se le aplique un mantenimiento diferencialmente más intensivo.

Con independencia del método y métrica que se emplee para la creación de clústeres aplicados a ítems con fiabilidades homogéneas de un sistema reparable, se estima una herramienta muy útil para ajustar las decisiones en las estrategias de mantenimiento de grandes flotas por agrupaciones, ya que resulta muy complejo, aunque deseable, realizar un mantenimiento personalizado a cada ítem, de acuerdo a su fiabilidad en cada momento de la operación.

#### 8.4. Procedimiento metodológico complementario a IEC

Se procede a representar gráficamente el procedimiento metodológico aplicado complementario a IEC (ver apartado 3.9) para el análisis de la fiabilidad de sistemas reparables, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en su aplicación a los sistemas de tracción eléctrica ferroviaria en trenes y las escaleras mecánicas. Han sido ensayados a sistemas reparables técnicamente muy distintos, y al obtener resultados coincidentes, permiten extender esta metodología a cualquier conjunto de sistemas reparables del que se dispongan los datos de fallos en operación.

En el procedimiento propuesto se resumen y ordenan los análisis y ensayos presentados en el apartado 8 “Estudio complementario de la fiabilidad de los sistemas reparables” y en el apartado 9 “Propuestas de análisis multivariante”, al objeto de representar de forma simplificada las fases ordenadas de los análisis propuestos, con el objetivo de identificar y caracterizar a los ítems de acuerdo a la fiabilidad que presenta cada uno en la operación y permitir a los responsables de mantenimiento establecer estrategias diferenciales, más eficientes y eficaces adaptadas al comportamiento real que cada ítem manifiesta en cada caso:

1. Analizar detalladamente los TBF y la naturaleza de los fallos en la búsqueda de dependencias, interdependencias, tendencias, etc., ya que de su resultado dependerá que método de modelado de la fiabilidad es el más apropiado aplicar en cada ensayo.
2. Para los ítems sin modelo aceptado por los de IEC, se deben efectuar los ensayos necesarios para obtener modelos alternativos aceptados. En el caso de los ítems sin tendencia se ensayan modelos RP alternativos al HPP y para los ítems con tendencia modelos NHPP alternativos al PLP. A los ítems que no se consigan modelar, se deben ensayar modelos de “reparación imperfecta” u otros, teniendo en cuenta las limitaciones detalladas en el apartado 7.5.
3. Con los ítems con modelo de fiabilidad aceptado preferentemente, se representa gráficamente en 3 ejes las  $z(t)$  de los ítems objeto de estudio de cada sistema reparable, al objeto de identificar gráficamente la dispersión e efectuar una identificación cualitativa de las diferencias existentes en la fiabilidad entre los ítems.
4. Si el número de ítems del sistema reparable es muy elevado se propone caracterizar y crear clústeres con aquellos ítems que presenten una fiabilidad homogénea en tendencia y cuantitativamente, al objeto de simplificar la toma de decisiones por los responsables de mantenimiento.

Este procedimiento posibilita implantar de estrategias de mantenimiento diferenciales, ajustadas a la fiabilidad de cada ítem o clúster, al objeto de intensificar el mantenimiento en los ítems o clúster con peores resultados de fiabilidad, optimizando los recursos mediante una aplicación más eficiente y eficaz.

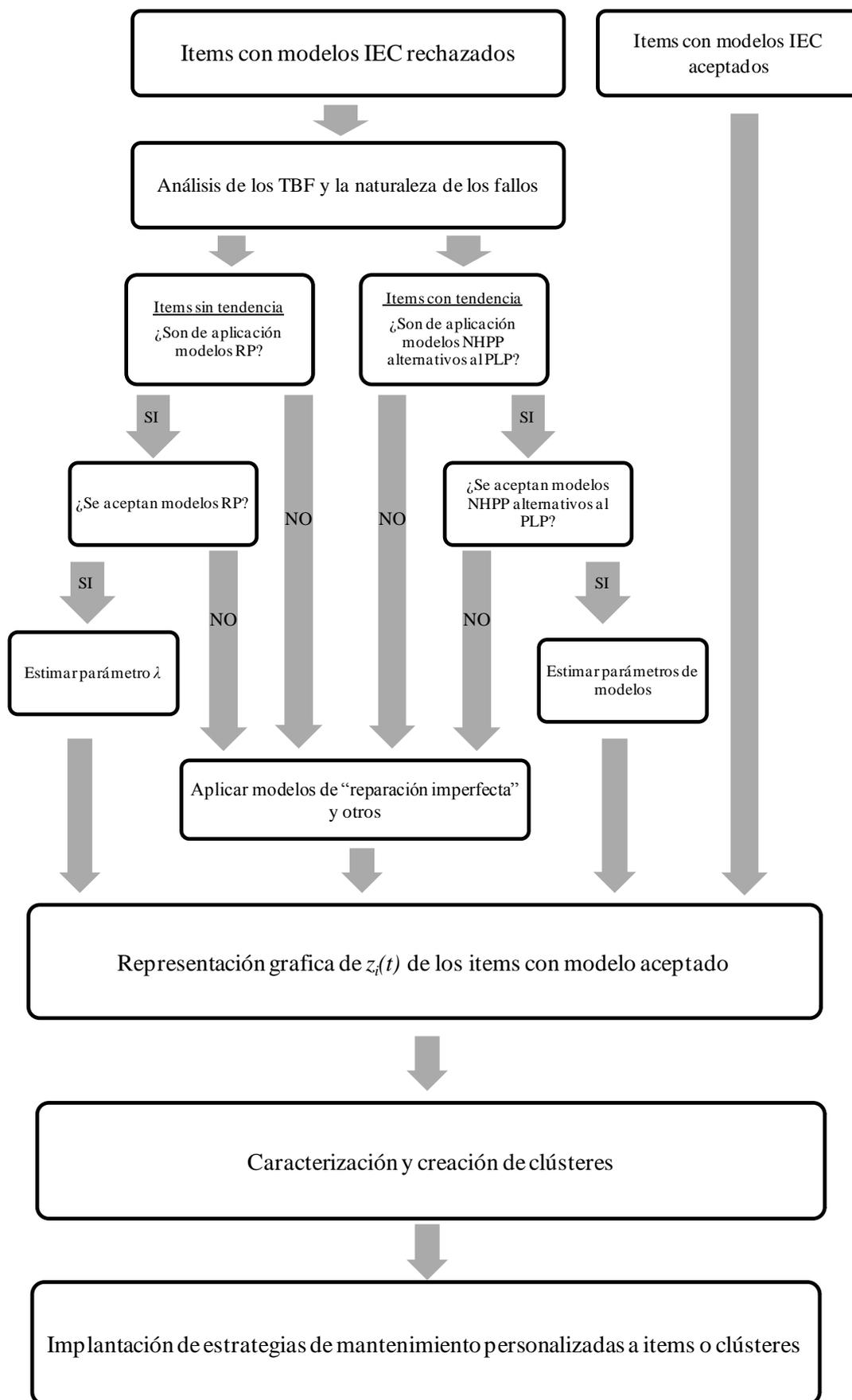


Figura 96 – Procedimiento complementario a IEC de análisis de la fiabilidad de sistemas reparables

# 9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

---

*Dejemos las conclusiones para los idiotas.*

*- Pio Baroja-*

**E**n este apartado se resumen los resultados obtenidos en los ensayos efectuados a los cuatro sistemas reparables, los principales hallazgos de la investigación, las aportaciones al conocimiento en el campo de la fiabilidad de los sistemas reparables, las conclusiones generales y las potenciales líneas de investigación.

## 9.1. Resumen de los resultados obtenidos en los ensayos

Se resumen a continuación los principales resultados obtenidos en los ensayos presentados en esta tesis aplicados sobre cuatro sistemas reparables:

- a) El sistema de tracción eléctrica de 36 trenes de la serie 5000-4ª.
- b) El sistema de tracción eléctrica de 88 trenes de la serie 2000-B.
- c) El sistema de tracción eléctrica de 23 trenes de la serie 8000.
- d) 40 escaleras mecánicas del modelo TNE.

### Resultados del estudio normativo IEC de la fiabilidad:

- Tendencia de los fallos de los sistemas:
  - o Los sistemas de tracción de los trenes 5000-4ª presentan una tendencia de alto crecimiento de los fallos acorde con el comportamiento general de los sistemas electromecánicos.
  - o Los sistemas de tracción de los trenes 2000-B presentan una tendencia ligeramente creciente de los fallos que responde al comportamiento de sistemas eminentemente electrónicos y eléctricos.
  - o Los sistemas de tracción de los trenes 8000 presentan una tendencia decreciente de los fallos compatibles con sistemas electrónicos y software.
  - o Las escaleras mecánicas TNE presentan una tendencia crecimiento de los fallos acorde con el comportamiento general de los sistemas electromecánicos.
- Modelo PLP para múltiples ítems:
  - o El modelo de PLP es rechazado en los cuatro sistemas objeto de ensayo, dada la dispersión de datos de fallos y tendencias de fallo de los sistemas de tracción de cada tren y de cada escalera mecánica.

- 
- Tendencia de los fallos de cada ítem:
    - En los sistemas de tracción de los trenes 5000-4ª mayoritariamente la tendencia es creciente en fallos y algunos ítems no presentan tendencia.
    - En los sistemas de tracción de los trenes 2000-B los ítems sin tendencia son los más comunes, seguidos por ítems con tendencia creciente de fallos, y en menor proporción con tendencia decreciente de fallos.
    - En los sistemas de tracción de los trenes 8000 los ítems sin tendencia son mayoritarios, con un número destacable de ítems con tendencia decreciente de fallos.
    - En las escaleras mecánicas TNE los ítems sin tendencia son los más comunes, con casi la misma proporción por ítems con tendencia creciente de fallos, y en menor grado con tendencia decreciente de fallos.
  - Modelo HPP aplicado a los 95 ítems sin tendencia de fallo:
    - 77 ítems sin tendencia en el fallo no pueden ser modelados HPP, ya que sus TBF no se distribuyen exponencialmente.
    - Para 18 ítems sin tendencia en el fallo se acepta el modelo mediante un proceso de Poisson homogéneo HPP.
    - El modelo HPP para ítems sin tendencia de fallo fracasa de forma generalizada.
  - Modelo de PLP aplicado a los 92 ítems con tendencia de fallo:
    - 73 ítems con tendencia en el fallo no pueden ser modelados PLP.
    - Para 19 ítems con tendencia en el fallo se acepta el modelo mediante un proceso de Poisson no homogéneo NHPP con ley de potencia PLP.
    - El modelo PLP para ítems con tendencia de fallo fracasa de forma generalizada.
  - Sólo se han podido modelar la fiabilidad 37 de los 187 ítems, de los cuatro sistemas reparables objeto de este estudio mediante la aplicación de las normas IEC, lo que supone un fracaso masivo de los modelos recogidos en las normas y que ha motivado analizar detalladamente los TBF y la naturaleza de los fallos de los sistemas y efectuar ensayos complementarios a las normas IEC.

**Resultados del estudio complementario de la fiabilidad:**

- Análisis de los TBF y naturaleza de los fallos:
  - Los TBF de los ítems de cada sistema tiene una gran dispersión en su tendencia y valor cuantitativo ( $E[N(t)]$ ).
  - Los TBF presentan una tendencia generalizada a la acumulación de varios fallos consecutivos durante cortos periodos temporales, a los que preceden y anteceden largos periodos temporales sin fallos acumulados. Son los denominados “fallos repetitivos” (recurrent failures).
  - Los TBF no se ajustan a una distribución exponencial. En los datos se observa que existe una gran concentración de TBF cercanos al origen, y que son los fallos repetitivos.
  - Se ha analizado la posible dependencia de los TBF de diferentes variables operativas, técnicas y humanas, y no se ha podido rechazar la hipótesis de su independencia.
  - No se puede afirmar que exista una relación causa-efecto entre un fallo que, después de la revisión del sistema, el técnico de mantenimiento clasifica como “sin anomalía aparente” y la potencial repetición del fallo, no se evidencia correlación alguna.
  - Cualquier TBF por pequeño que sea,  $TBF \rightarrow 0$ , se encuentra dentro de los rangos esperados de su distribución. No se puede establecer un valor crítico de TBF para la identificación de los episodios con “acumulación de fallos supuestamente anormales” y tipificar estos TBF como fallos repetitivos.
  - No se ha evidenciado patrón estadísticamente reconocible en los fallos repetitivos, siendo episodios con una distribución idéntica respecto de  $km$  o  $t$  y sin asociación aparente entre tipos de fallos o reparación efectuada, resultando en la práctica los fallos primarios y los supuestos secundarios, indistinguibles.
  - Los TBF de los ítems de los estudios no han permitido, siquiera, efectuar una discriminación matemáticamente aceptable entre los supuestos TBF primarios y los TBF repetitivos (o secundarios). Tampoco existen cambios de tendencia en los fallos con patrones observables, ni distribuciones en los TBF.
  - Asimismo los estudios de dependencia de los TBF no han podido demostrar la existencia de ninguna variable de los sistemas que demuestre correlación con los fallos.
- Modelo RP aplicado a los 95 ítems sin tendencia de fallo:
  - La distribución logística generalizada la que mejor ajusta a los TBF en los tres (3) sistemas de tracción de trenes.
  - En el caso de las escaleras mecánicas es la distribución log-normal 3 parámetros la que mejor se ajusta a los datos de TBF.

- En los cuatro (4) sistemas ensayados se han aceptado el modelo RP en 56 items de un total de 95 items, mejorando los resultados de ensayo del modelo HPP que sólo ha permitido modelar 18 items. Estos resultados permiten estimar  $\hat{\lambda}$  para items sin tendencia en TBF mediante modelos RP con un nivel de rechazo moderado.
- Modelo NHPP aplicado a los 92 ítems sin tendencia de fallo:
  - En los cuatro (4) sistemas ensayados se han aceptado modelos NHPP en 8 items de un total de 92 items. Estos niveles de aceptación de los modelos NHPP empeoran los niveles de aceptación de los modelos PLP, pasando de 19 items con modelo PLP aceptado a los 8 items con modelo NHPP aceptado.
  - Dado que mayoritariamente los TBF de los items no tienen una distribución exponencial, todos los modelos NHPP fracasan masivamente ya requieren que los TBF tengan una distribución exponencial.
- Modelos de “reparación imperfecta” y otros:
  - Tienen una serie de importantes limitaciones en su aplicación práctica:
    - Existencia de una multitud de modelos plausibles para ensayar.
    - Necesidad de un complejo aparato matemático.
    - Falta de implementación y soporte de software para estos modelos en el contexto del análisis de datos estadísticos y de contraste.
  - Estimación de  $E[N(t)]$  mediante regresión simple (método de mínimos cuadrados):
    - Para los items sin tendencia en los fallos el modelo de regresión simple más aceptado y de mayor ajuste es el lineal.
    - Para los items con tendencia creciente en los fallos el modelo de regresión simple más aceptado y de mayor ajuste es el cuadrado de  $x$ .
    - Para los items con tendencia decreciente en los fallos el modelo de regresión simple más aceptado y de mayor ajuste es la raíz cuadrada de  $x$ .
    - Los resultados no muestran una gran robustez, ya que para cada ítem los modelos de regresión simple aceptados con un nivel de significación de 5% son múltiples y en algunos casos con un ajuste de la tendencia de los fallos divergente. Asimismo en cada ítem la prueba de bondad de ajuste con un nivel de significación de 5% admite entre 6 y 9 modelos de regresión simple y cuya tendencia no es coincidente en algunos casos, lo que cuestiona los resultados obtenidos.

**Resultados del análisis multivariante:**

- Representación gráfica tridimensional de  $z(t)$  del sistema reparable:
  - Esta gráfica permite realizar una primera identificación cualitativa de las diferencias existentes entre las  $z(t)$  de los ítems objeto de estudio de cada sistema reparable.
- Potenciales aplicaciones de herramientas estadísticas de análisis multivariante:
  - El análisis de correlaciones permite analizar la posible dependencia y/o interdependencia de los TBF con una o varias variables.
  - El análisis de componentes principales detecta la existencia (o no) del ítem o ítems con mayor semejanza a fiabilidad de un sistema (conjunto de ítems iguales).
  - El análisis factorial detecta la existencia (o no) del ítem o ítems con mayor semejanza a fiabilidad de un sistema (conjunto de ítems iguales).
  - El análisis de conglomerados permite crear clústeres (grupos) de ítems que tienen una fiabilidad similar.
  - El análisis de regresión crea modelos la fiabilidad de los sistemas reparables (orientado a datos).
- Caracterización y creación de clústeres de sistemas reparables:
  - Es una herramienta muy útil para ajustar las decisiones en las estrategias de mantenimiento de grandes flotas por agrupaciones de acuerdo a la fiabilidad observada en operación, personalizando las tareas de mantenimiento y ajustando los recursos de forma más eficiente y eficaz.
  - El método de Ward el más apropiado en la creación de los clúster con un número de ítems equilibrado por grupo, y sin mayor relevancia en los resultados la métrica de distancia que se emplee.

**9.2. Principales resultados de la investigación**

- i. **Los TBF de ítems de cada sistema reparable no se comportan de forma semejante.** Es lo que se podría esperar al ser sistemas reparables constructivamente idénticos, pero los datos muestran una gran dispersión en su tendencia y valor cuantitativo ( $E[N(t)]$ ).
- ii. **La aplicación del análisis metodológico de la fiabilidad propuesto por las normas IEC fracasa masivamente** en el modelo HPP para TBF sin tendencia y en el modelo PLP para TBF con tendencia, como consecuencia de que se rechaza la hipótesis de que los TBF tienen una distribución exponencial.

- iii. Los ensayos efectuados manifiestan la existencia en todos los sistemas reparables, de periodos de incrementos de fallos, a los que preceden y anteceden periodos sin fallos. Este fenómeno tipificado como “**fallos repetitivos**” es el causante de que los modelos HPP y PLP fracasen.
- iv. **En los periodos de incrementos de fallos (fallos repetitivos), no se ha evidenciado patrón estadísticamente reconocible**, siendo episodios con una distribución idéntica respecto de  $km$  o  $t$  y sin asociación aparente entre tipos de fallos, resultando en la práctica los fallos primarios y los supuestos secundarios, indistinguibles.
- v. Si no se rechaza la hipótesis de que los TBF son independientes, para aquellos sistemas que no presentan tendencia se puede aceptar que los TBF son independientes e idénticamente distribuidos (i.i.d.). A estos sistemas se les ha aplicado **modelos RP** con un grado moderado de items con modelos aceptados, siendo las **distribuciones** que de forma mayoritaria mejor caracterizan el **TBF la logística generalizada en los sistemas de tracción eléctrica y la log-normal 3 parámetros en las escaleras mecánicas**.
- vi. **Los modelos NHPP alternativos al PLP para sistemas con tendencia, han fracasado en casi su totalidad**, ya que requieren que los TBF tengan una distribución exponencial.
- vii. **Es necesario que a corto plazo se incorporen a los estándares del IEC modelos RP, NHPP y modelos de “reparación imperfecta”**, al objeto disponer de modelos aceptados y normalizados internacionalmente, de especial interés en los sectores industriales que son auditados externamente por requisitos de seguridad.
- viii. **La potencial aplicación de modelos de “reparación imperfecta” y otros (BPP, MRP, BP, BBS, TRP, GRP, PI, etc.) en la práctica está muy limitada**; por las innumerables posibilidades selección del tipo y modelo más adecuado a los datos y el acceso a las complejas herramientas de cálculo requeridas para su adecuada aplicación en cada caso. Es poco probable que exista un modelo de “reparación imperfecta” “perfecto”, pero sería conveniente que la comunidad científica logre avances para seleccionar el o los modelos de “reparación imperfecta” “menos malos” y que de esta forma se puedan trasladar a las organizaciones empresariales de mantenimiento.
- ix. **Los ítems de un sistema reparable pueden presentar valores de fiabilidad dispersos y en muchos casos divergentes**, y los **métodos de análisis multivariante pueden muy ser útiles** para avanzar en el conocimiento de la naturaleza de los fallos y las causas primigenias de las diferencias de fiabilidad entre los ítems.

- x. **Se propone a los responsables de mantenimiento que reorienten sus esfuerzos al estudio de la fiabilidad de cada ítem y no del conjunto**, y que implementen mecanismos para la detección proactiva de episodios de incrementos temporales de fallos en cada ítem, y aplicar un mantenimiento diferencial en cada caso.
- xi. Dado que los sistemas reparables ensayados son opuestos en su tecnología constructiva y contexto operacional, potencialmente **se pueden generalizar estas hipótesis y conclusiones a otros sistemas reparables**.

### **9.3. Aportaciones originales al conocimiento general en el campo de la fiabilidad**

Se estima que esta investigación aporta al menos seis (6) novedades destacables en el campo de la fiabilidad de sistemas reparables, ya que es la primera vez que se presenta y publica un estudio (compendiado en esta tesis) que:

1. **Aplica el procedimiento metodológico recogido en las normas IEC para el modelado de la fiabilidad de sistemas reparables.**
2. **Presenta los resultados de fiabilidad de tres (3) sistemas de tracción eléctrica ferroviaria.**
3. **Presenta los resultados de fiabilidad de escaleras mecánicas.**
4. **Obtiene modelos RP aceptados con distribuciones de TBF log-normal 3 parámetros y logística generalizada en sistemas reparables sin tendencia en los fallos.**
5. **Aplica métodos de análisis multivariante para la creación de clústeres en los sistemas reparables que permiten personalizar las estrategias de mantenimiento.**
6. **Desarrolla y ensaya un procedimiento metodológico complementario al IEC para el modelado de la fiabilidad de sistemas reparables.**

## 9.4. Conclusiones

**La fiabilidad de los sistemas reparables complejos**, como los ensayados en estudio, **no responde a modelos matemáticos simples, o no tan simples**. Los cientos de modelos estocásticos desarrollados durante décadas (1964 – Actual) han tenido un éxito limitado en su aplicación para modelar sistemas con los datos reales de operación.

**Los primeros modelos HPP y NHPP resultaban insuficientes** para representar el comportamiento de los fallos de los sistemas reparables. Desde un principio se detectó el impacto en la fiabilidad de los episodios de **fallos repetitivos** y la existencia de cambios de tendencia en los fallos durante la operación.

Esta circunstancia que ha dado pie a un prolífico desarrollo, ensayo y publicación de **modelos estocásticos más complejos** que intentan modelar los fallos; BPP, SRP, MRP, PEXP, BP, BBS, GRP, TRP, etc. Su aplicación es compleja y sus posibilidades de éxito también limitada.

Otras líneas de investigación han optado por intentar **ajustar los datos de los fallos mediante ecuaciones matemáticas**. Su aceptación científica está cuestionada, ya que no se responde a la pregunta crucial de porqué del comportamiento de los TBF, simplemente se busca la ecuación o ecuaciones que mejor representan las series de datos.

A finales del siglo XX se empiezan a presentar modelos de fiabilidad que abandonan la suposición del carácter aleatorio de los fallos, **los fallos no son independientes**. Los TBF tiene dependencia de una o varias variables, y una vez identificadas se puede modelar la fiabilidad del sistema, mediante la formulación adecuada de estas variables; PI, PWP, AG, LWL, etc.

Ya en el siglo XXI se presentan los **modelos de fragilidad** para datos correlacionados y los **modelos con dependencia multivariantes**. Estos modelos han iniciado su aplicación para el análisis de supervivencia multivariante en otros campos; medicina, economía, etc. y se prevé una próxima aplicación en la fiabilidad de los sistemas reparables.

Las publicaciones, artículos, ponencias, etc. reflejan la **complejidad del problema y la dificultad de darle una explicación científica convincente al comportamiento de la fiabilidad de los sistemas reparables**.

**Quedan aún muchas incógnitas por responder**, no sólo en el desarrollo y aceptación internacional de modelos que representen adecuadamente la fiabilidad de los sistemas reparables, sino en la explicación del porqué sistemas reparables idénticos a lo largo de años de operación, presentan fiabilidades no homogéneas e incluso con tendencias opuestas.

Los ensayos y estudios presentados en esta tesis demuestran, mediante evidencias objetivas, que **la fiabilidad de los sistemas reparables debe orientarse al análisis de cada ítem y no del conjunto**, y que es necesario implementar mecanismos para la detección proactiva de episodios de incrementos temporales de fallos en cada ítem, para **aplicar un mantenimiento diferencial correctivo** en esos casos.

**Los actuales modelos de la fiabilidad de sistemas reparables complejos no satisfacen las necesidades de las Empresas y Responsables de Mantenimiento.** De hecho existe un claro divorcio entre la comunidad científica, que sigue desarrollando modelos de compleja aparenta matemática y dudosa aplicabilidad, y el mundo empresaria que orienta sus esfuerzos en el desarrollo de estrategias de optimización de los costes de mantenimiento; mantenimiento predictivo, monitorización en tiempo real, etc.

## 9.5. Conclusions

The reliability of complex repairable systems, such as those tested in study, does not respond to simple, or not so simple, mathematical models. The hundreds of stochastic models developed for decades (1964 - Present) have had limited success in their application for modeling systems with actual operating data.

The first HPP and NHPP models were insufficient to represent the failure behavior of the repairable systems. From the beginning, the impact on the reliability of recurrent failure episodes and the existence of trend changes in failures during operation were detected.

This circumstance has led to a prolific development, testing and publication of more complex stochastic models that attempt to model failures; BPP, SRP, MRP, PEXP, BP, BBS, GRP, TRP, etc. Its application is complex and its chances of success also limited.

Other lines of research have chosen to try to adjust the fault data using mathematical equations. Its scientific acceptance is questioned, since it is not answered the crucial question of why the behavior of the TBF, simply look for the equation or equations that best represent the data series.

At the end of the twentieth century, reliability models that abandon the assumption of the random character of the failures begin to appear, the failures are not independent. The TBF has dependence on one or several variables, and once identified can be modeled the reliability of the system, through the appropriate formulation of these variables; PI, PWP, AG, LWL, etc.

In the 21st century fragility models for correlated data and models with multivariate dependence are presented. These models have started their application for multivariate survival analysis in other fields; medicine, economics, etc. And an upcoming application on the reliability of repairable systems is envisaged.

Publications, articles, presentations, etc., reflect the complexity of the problem and the difficulty of giving a convincing scientific explanation to the performance of the reliability of the repairable systems.

There are still many unknowns to answer, not only in the development and international acceptance of models that adequately represent the reliability of the repairable systems, but also in explaining why identical repairable systems over years of operation, have non-homogeneous reliability and even with opposite tendencies.

The tests and studies presented in this thesis show, through objective evidence, that the reliability of the repairable systems must be oriented to the analysis of each item and not of the whole, and that it is necessary to implement mechanisms for the proactive detection of episodes of temporary failure increments in each item, to apply differential corrective maintenance in such cases.

The current models of the reliability of complex repairable systems do not meet the needs of the companies and maintenance personnel. In fact there is a clear divorce between the scientific community, which continues to develop models of complex mathematical appearance and dubious applicability, and the business world that guides their efforts in the development of strategies to optimize maintenance costs; predictive maintenance, real-time monitoring, etc.

## 9.6. Potenciales futuras líneas de investigación

**No se prevé una convergencia a corto plazo de los estudios científicos para modelar la fiabilidad de los sistemas reparables y su aplicación en el mundo empresarial.** Es por ello que se proponen potenciales líneas de investigación en ambos campos, y que serán de momento paralelas:

- Estudios científicos: Son esperanzadores los desarrollos en el campo de los modelos de fragilidad para datos correlacionados, y estos parece que apuntan en la dirección correcta. Pensemos en los siguientes paralelismos entre un ser vivo y un sistema reparable complejo:
  - Los eventos que en un ser vivo generan “indisponibilidad” son los días que está enfermo y los eventos que en un sistema reparable generan “indisponibilidad” son los fallos.
  - En ambos casos los eventos aparecen agrupados en el tiempo, y se alternan largos periodos de disponibilidad con otros periodos de indisponibilidad de duración variable (días de enfermedad en los seres vivos y fallos repetitivos en los sistemas reparables).
  - No todos los seres vivos de una misma especie enferman igual en un mismo entorno, ni todos los sistemas reparables fallan igual aunque sean idénticos y operen en las mismas condiciones.
  - Una vez que se enferma (ser vivo) o se falla (sistema reparable) con unos determinados síntomas, y se aplican medicinas/terapias (ser vivo) o mantenimiento correctivo (sistema reparable), cada ser vivo y sistema reparable reacciona de una manera individual no idéntica.

- Los estudios epidemiológicos en los seres vivos indican que existen una serie de variables (genéticas, ambientales, alimenticias, etc.) que correlacionan el desarrollo y prevalencia de las muchas enfermedades, pero no se cumple en todos los individuos, persistiendo grados de aleatoriedad. Los estudios en los sistemas reparables atisban que existen una serie de variables (técnicas, humanas y operativas) que correlacionan los fallos, pero no se cumple en todos los ítems, persistiendo grados de aleatoriedad.

Por todo ello, parece una línea de investigación alentadora adaptar los modelos existentes y que se desarrollen en el campo de la Bioestadística a la fiabilidad de los sistemas reparables complejos.

- Desarrollos empresariales: Las empresas de mantenimiento de sistemas reparables complejos están orientando sus esfuerzos, no en modelar la fiabilidad, sino en ser más eficientes y eficaces. Menos fallos son menos costes de mantenimiento y mayor fiabilidad y disponibilidad; hay que anticiparse a la aparición del siguiente fallo.

El mantenimiento predictivo es el mantenimiento basado en la condición que se realiza siguiendo una predicción obtenida del análisis repetido o de características conocidas y de la evaluación de los parámetros significativos de la degradación del elemento. Hay dos factores que van a permitir la implantación de forma exponencial del mantenimiento predictivo en los sistemas reparables:

- Internet de las cosas (Internet of things, IoT): El desarrollo y abaratamiento de las pasarelas de conectividad (cable, WIFI, UTMS, etc.) a la red TCP/IP, va a permitir que los sistemas reparables estén monitorizados en tiempo real desde puestos remotos de supervisión. Cuando acontezca un fallo se podrán registrar múltiples variables (temperatura, potencia, etc.) y estados del sistema (frenando, acelerando, etc.), cuya información es vital para analizar las potenciales causas de los fallos.
- Procesamiento de macro-datos (Big Data y Smart Data): Actualmente ya es posible el procesamiento de cientos de miles de datos con tiempos de respuesta bajos. La captura, transformación, almacenamiento, análisis y visualización de datos masivos permitirá el ensayo e identificación de patrones de fallo en los sistemas reparables monitorizados, al objeto de identificar aquellas variables notables que permitan la implantación de un mantenimiento predictivo.

Este escenario permite anticipar grandes avances en la comprensión de la naturaleza de los fallos en los sistemas reparables, al registrarse en el momento de cada fallo una gran cantidad de información de gran relevancia, como son los estados operativos y los valores de las variables.

Asimismo, se podrá efectuar un análisis personalizado de cada ítem (sistema), ajustando las estrategias de mantenimiento de acuerdo al comportamiento de su fiabilidad en el corto, medio y largo plazo.

Actualmente hay varias iniciativas de corporaciones internacionales que se están desarrollando en este campo, como por ejemplo:

- Max de Thyssenkrupp y Microsoft: aplicado al mantenimiento predictivo de ascensores.
- E-Link de Kone: aplicado al mantenimiento predictivo de ascensores y escaleras mecánicas.
- Mantenimiento Predictivo de Siemens: aplicado a trenes de alta velocidad.

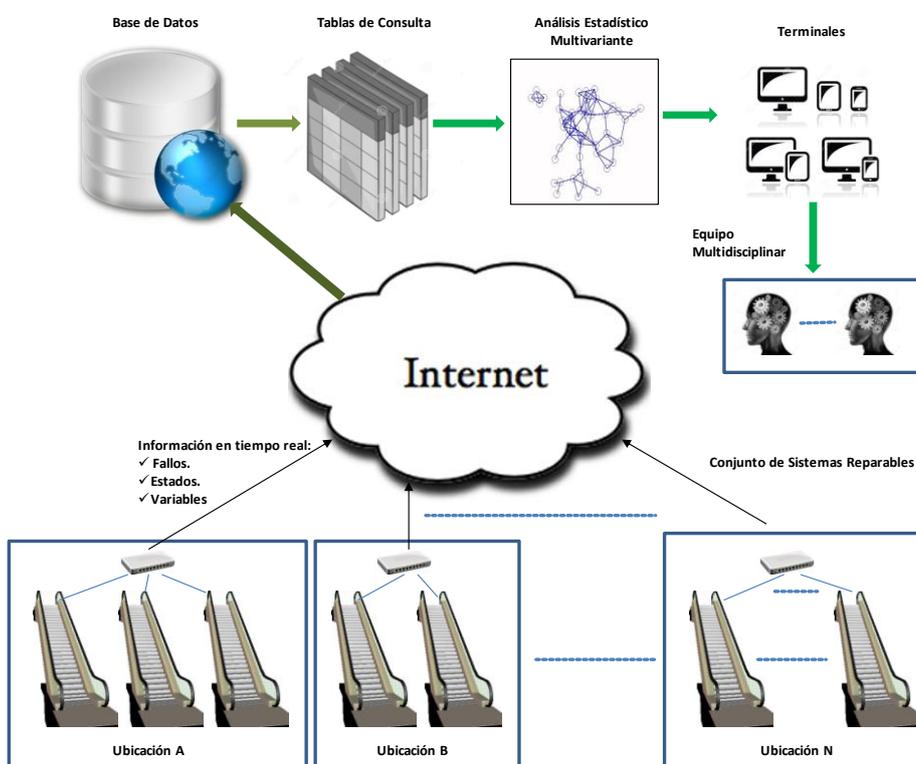


Figura 97 – El futuro análisis de la fiabilidad de sistemas reparables.

Se estima que a medio plazo los estudios científicos y los desarrollos empresariales confluirán, con la creación de equipos de trabajo multidisciplinarios, ingenieros y matemáticos, que analicen conjuntamente la información recolectada y almacenada.

Por un lado, es imprescindible unos profundos conocimientos estadísticos para aplicar correctamente los métodos matemáticos apropiados en la búsqueda de patrones, correlaciones, etc. en los fallos. También es imprescindible un extenso conocimiento del equipo reparable que se está analizando, sus modos y causas de fallos y los procesos de mantenimiento a los que es sometido.

De esta manera, se podrá avanzar en el análisis de la fiabilidad de los sistemas reparables, que actualmente no está completamente resuelta, como se ha podido contrastar en este estudio presentado. **El futuro de operación de los sistemas reparables será un mantenimiento predictivo personalizado, basado en un modelo de fiabilidad adaptativo en el tiempo.** Y respecto a la **naturaleza de los fallos** de los sistemas reparables se intuye que se demostrará:

1. **Que una parte de los fallos muestran grados de correlación con valores de variables y estados de operación del sistema reparable en el momento del fallo.**
2. **Que la otra parte de los fallos son de naturaleza aleatoria.**

*No podré olvidar la cita del azar*

- Jeremías -

# Bibliografía

---

- 1 . Achen, C. H. (1982), *Interpreting and using regression*, Sage.
- 2 . Allan, J., Mellitt, B., and Pong, M. H. (1984), "Rheostatic stabilisation of a chopper-controlled brake for traction drives", *IEE Proceedings B-Electric Power Applications IET*, Vol. 131 No. 5, pp. 190-194.
- 3 . Alva, J. A. V., and Carreño, M. A. D. (2016), "Pruebas no paramétricas para procesos poisson no homogéneos".
- 4 . Amo, D. (2008), *Estudio sobre la evolución de la tracción eléctrica ferroviaria*, PFC, Universidad de Zaragoza.
- 5 . Anderson, G. B., and Peters, A. J. (1993), "An overview of the maintenance and reliability of AC traction systems", *Railroad Conference, 1993., Proceedings of the 1993 IEEE/ASME Joint*, pp. 7-15.
- 6 . Andronov, A. (2014), "Resampling Estimators of the Renewal Function", *Journal of Mathematical Sciences*, Vol. 196 No. 1.
- 7 . Arab, A., Rigdon, S. E., and Basu, A. P. (2012), "Bayesian inference for the piecewise exponential model for the reliability of multiple repairable systems", *Journal of Quality Technology*, Vo. 44 No. 1, pp. 28.
- 8 . Arjas, E. (1981), "A stochastic process approach to multivariate reliability systems: notions based on conditional stochastic order", *Mathematics of Operations Research*, Vol. 6 No. 2, pp. 263-276.
- 9 . Arqués, J. L. (2009), *Ingeniería y gestión del mantenimiento en el sector ferroviario*. Ediciones Díaz de Santos.
- 10 . Ascher, H. and Feingold, H. (1984), *Repairable System Reliability*, Marcel Dekker, New York, NY.
- 11 . Attardi, L. and Pulcini, G. (2005), "A new model for repairable systems with bounded failure intensity", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 54 No. 4, pp. 572-582.
- 12 . Avery C. R. (1998), "Power electronics reliability in rail traction", *IEE Colloquium on Power Electronics Reliability - Promise and Practice*, pp. 6/1-6/7.
- 13 . Bain, L., Engelhardt, M. and Wright, F. (1985), "Tests for an Increasing Trend in the Intensity of a Poisson Process: A Power Study", *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 80 No. 390, pp. 419-422.
- 14 . Băjenescu, T. I., and Băzu, M. I. (2010), *Component reliability for electronic systems*, Artech House.
- 15 . Barabady, J. and Kumar, U. (2008), "Reliability analysis of mining equipment: A case study of a crushing plant at Jajarm Bauxite Mine in Iran", *Reliability engineering & system safety*, Vol. 93 No. 4, pp. 647-653.
- 16 . Barlow, R. E., and Proschan, F. (1996), *Mathematical theory of reliability*, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- 17 . Basile, O., Dehombreux, P., and Riane, F. (2007), "Evaluation of the uncertainty affecting reliability models", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 13 No. 2, pp. 137-151.

- 18 . Baxter, L.A., Scheuer, E.M., McConalogue, D.J. and Blischke, W.R. (1982), "On the tabulation of the renewal function", *Technometrics*, Vol. 24 No. 2, pp. 151-156.
- 19 . Beiser, J.A. and Rigdon, S.E. (1997), "Bayes prediction for the number of failures of a repairable system", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 46 No. 2, pp. 291-295.
- 20 . Berman, M. (1981), "Inhomogeneous and modulated gamma processes", *Biometrika*, Vol. 68 No. 1, pp. 143-152.
- 21 . Bernet, S. (2000), "Recent developments of high power converters for industry and traction applications", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 15 No. 6, pp. 1102-1117.
- 22 . Bettini, G., Giansante, R. and Tucci, M. (2007), "Forecasting fleet warranty returns using modified reliability growth analysis", *Proceedings of annual IEEE reliability and maintainability symposium, 2007 (RAMS '07)*, pp. 350-355.
- 23 . Blischke, W.R., and Murthy, D.P. (2011), *Reliability: modeling, prediction, and optimization*, John Wiley & Sons.
- 24 . Block, H., Borges, W. and Savits, T. (1985), "Age-dependent minimal repair", *Journal of Applied Probability*, Vol. 22 No. 2, pp. 370-385.
- 25 . Block, J., Ahmadi, A., Tyrberg, T., and Kumar, U. (2013), "Fleet-level reliability analysis of repairable units: a non-parametric approach using the mean cumulative function", *International Journal of Pedagogy, Innovation and New Technologies*, Vol. 9 No. 3, pp. 333-344.
- 26 . Blumenthal, S. (1993), "New approximations for the event count distribution for superimposed renewal processes at the time origin with application to the reliability of new series systems", *Operations research*, Vol. 41 No. 2, pp. 409-418.
- 27 . Blumenthal, S., Greenwood, J. A., and Herbach, L. (1973), "The transient reliability behavior of series systems or superimposed renewal processes", *Technometrics*, Vol. 15 No. 2, pp. 255-269.
- 28 . Bonnett, C. F. (2005), *Practical railway engineering*, Imperial College Press.
- 29 . Bozzo, R., Fazio, V., and Savio, S. (2003), "Power electronics reliability and stochastic performances of innovative ac traction drives: a comparative analysis", *Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna*, Vol. 3, pp. 7-pp.
- 30 . Bredrup, E., Evensen, K., Helvik, B.E. and Swensen, A. (1986), "The activity-dependent failure intensity of SPC systems – some empirical results", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 4 No. 7, pp. 1052-1059.
- 31 . Brown, M. and Proschan, F. (1983), "Imperfect repair", *Journal of Applied Probability*, Vol. 20, pp. 851-859.
- 32 . Búger, J.M. (2002), *Tracción ferroviaria*, PFC, Universidad Carlos III.
- 33 . CAF (1982), *Manual de mantenimiento C-5000*, CAF.
- 34 . CAF (1987), *Manual de mantenimiento C-2000*, CAF.
- 35 . CAF (2003), *Manual de mantenimiento C-8000*, CAF.
- 36 . Cangussu, J. W., Mathur, A. P., and DeCarlo, R. A. (2002), "Effect of disturbances on the convergence of failure intensity", *Software Reliability Engineering, 2002. ISSRE 2003. Proceedings. 13th International Symposium on*

- IEEE*, pp. 377-387.
- 37 . CEI 60300-3-9:1995, *Gestión de la confiabilidad. Parte 3: Guía de aplicación. Sección 9: Análisis del riesgo de sistemas tecnológicos.*
  - 38 . CEI 61163-2:1998, *Selección mediante pruebas de vida bajo condiciones de esfuerzo. Parte 2: Componentes electrónicos.*
  - 39 . Chen, S. K., Ho, T. K. and Mao, B. H. (2007), "Reliability evaluations of railway power supplies by fault-tree analysis", *IET Electric Power Applications*, Vol. 1 No. 2, pp. 161-172.
  - 40 . Cheng, Y., and Elsayed, E. A. (2016), "Reliability modeling and prediction of systems with mixture of units", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 65 No. 2, pp. 914-928.
  - 41 . Ciappa, M., and Castellazzi, A. (2007), "Reliability of high-power IGBT modules for traction applications", *Reliability physics symposium, 2007. proceedings. 45th annual. IEEE international*, pp. 480-485.
  - 42 . Cinlar, E. (2013), *Introduction to stochastic processes*, Courier Corporation.
  - 43 . Coetzee, J. L. (1997), "The role of NHPP models in the practical analysis of maintenance failure data", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 56 No. 2, pp. 161-168.
  - 44 . Cornwell, W. L. (2002), *Switching Frequency Effects on Traction Drive System Efficiency*, Doctoral dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University.
  - 45 . Cosulich, G., Firpo, P., and Savio, S. (1996), "Power electronics reliability impact on service dependability for railway systems: a real case study", *Industrial Electronics, 1996. ISIE'96., Proceedings of the IEEE International Symposium on IEEE*, Vol. 2, pp. 996-1001.
  - 46 . Cox, D.R. (1972), "The statistical analysis of dependencies in point process", *Stochastic Point Process: Statistical Analysis, Theory and Applications*, Wiley, New York, NY.
  - 47 . Crow, L. H. (1990), "Evaluating the reliability of repairable systems", *Reliability and Maintainability Symposium, 1990. Proceedings., Annual IEEE*, pp. 275-279.
  - 48 . Crow, L. H. (1993), "Confidence intervals on the reliability of repairable systems", *Reliability and Maintainability Symposium, 1993. Proceedings., Annual*, pp. 126-134.
  - 49 . Crow, L.H. (1975), "Reliability analysis for complex, repairable systems", *AMSAA Technical Report*, No. 138.
  - 50 . Crowder, M. J., Kimber, A., Sweeting, T., and Smith, R. (1994), *Statistical analysis of reliability data (Vol. 27)*. CRC Press.
  - 51 . Cuadras, C. M. (2007), *Nuevos métodos de análisis multivariante*, CMC Editions.
  - 52 . Darling, D. A. (1957), "The kolmogorov-smirnov, cramer-von mises tests", *The Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 28 No. 4, pp. 823-838.
  - 53 . De la Fuente S., (2011), *Análisis de Conglomerados*, Universidad Autónoma de Madrid.
  - 54 . Denning, R. (2012), *Applied R&M Manual for Defence Systems*. MoD, Abbey

- Wood.
- 55 . Dhillon, B. S. (2016), *Transportation systems reliability and safety*, CRC press.
  - 56 . Díaz, J. (2009), *Regulación de velocidad de un motor de SRM para tracción eléctrica*, TFM, Universidad Politécnica de Catalunya.
  - 57 . Dixon, J. W., Ortúzar, M., and Ríos, F. (2002), "Traction Drive System for Electric Vehicles, Using Multilevel Converters", *19th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Bexco, Busan, Korea*, Vol. 19.
  - 58 . Duane, J.T. (1964), "Learning curve approach to reliability monitoring", *IEEE Transactions on Aerospace*, Vol. 2 No. 2, pp. 563–566.
  - 59 . Dylis, D. D., and Priore, M. G. (2001), "A comprehensive reliability assessment tool for electronic systems", *Reliability and Maintainability Symposium, 2001. Proceedings. Annual IEEE*, pp. 308-313.
  - 60 . Eckel, H. G., Bakran, M. M., Krafft, E. U., and Nagel, A. (2005), "A new family of modular IGBT converters for traction applications", *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on IEEE*, pp. 10.
  - 61 . EN 50126-1 (1999), *Railway Applications-The Specification and Demonstration of Reliability. Availability, Maintainability, and Safety (RAMS)-Part, 1*.
  - 62 . EN 61165:2006, *Application of Markov techniques (IEC 61165:2006)*.
  - 63 . EN 62502:2010 , *Analysis techniques for dependability - Event tree analysis (ETA)*
  - 64 . EN 62506:2013, *Methods for product accelerated testing*
  - 65 . EN 62508:2010 , *Guidance on human aspects of dependability*
  - 66 . EN 62673:2013, *Methodology for communication network dependability assessment and assurance*
  - 67 . Epstein, B., and Weissman, I. (2008), *Mathematical models for systems reliability*, CRC Press.
  - 68 . Fajardo, J.F., Perez, A.A.J., Alsina, S.S.M. and Ramirez-Marquez, J.E. (2010), *Simulation methods for reliability and availability of complex systems*, Springer Science & Business Media.
  - 69 . Franz, J., Jokiel-Rokita, A., and Magiera, R. (2014), "Prediction in trend-renewal processes for repairable systems", *Statistics and Computing*, Vol. 24 No. 4, pp. 633-649.
  - 70 . Frenkel, I.B., Gertsbakh, I.B. and Khvatskin, L.V. (2003), "Parameter Estimation and Hypotheses Testing for Nonhomogeneous Poisson Process", *Transport and Telecommunication*, Vol. 4 No 2.
  - 71 . Gámiz, M. L., Kulasekera, K. B., Limnios, N., and Lindqvist, B. H. (2011), *Applied nonparametric statistics in reliability*, Springer Science & Business Media.
  - 72 . García J.L. (2006), *Análisis de máquinas de tracción ferroviaria*, PFC, Universidad Carlos III.
  - 73 . García, S. M., and Gil, J. A. G. (2006), *Electrónica de potencia: componentes, topologías y equipos*, Editorial Paraninfo.
  - 74 . Garmabaki, A.H.S., Ahmadi, A., Block, J., Pham, H. and Kumar, U. (2016), "A reliability decision framework for multiple repairable units", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 150, pp. 78-88.
  - 75 . Gayathry, G., and Selvi, R. T. (2015), "Classification of software reliability

- models to improve the reliability of software", *Indian Journal of Science and Technology*, Vol. 8 No. 29.
- 76 . Ghosh, S. and Majumdar, S.K. (2011), "Reliability modeling and prediction using classical and Bayesian approach: a case study", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 28 No. 5, pp. 556-586.
- 77 . González, F. J. (2005), *Teoría y práctica del mantenimiento industrial avanzado*, FC Editorial.
- 78 . González, F. J. (2010), *Ingeniería ferroviaria. Segunda edición actualizada y ampliada*, Editorial UNED.
- 79 . Griful, E. (2004), *Fiabilidad industrial (Vol. 65)*. Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- 80 . Guo, R., Ascher, H. and Love, E. (2000), "Generalized models of repairable systems – a survey via stochastic processes formalism," *ORiON*, Vol. 16 No. 2, pp. 87-128.
- 81 . Hall, J.B. and Mosleh, A. (2009), "Bayesian methods for evaluating discrete reliability growth", *Proceedings of annual IEEE reliability and maintainability symposium, 2009 (RAMS 2009)*, pp. 383-388.
- 82 . Hamada, M. S., Wilson, A., Reese, C. S., and Martz, H. (2008), *Bayesian reliability*, Springer Science & Business Media.
- 83 . Hansen, C. K. (1995), "Reliability prediction and simulation for a communications-satellite fleet", *Reliability and Maintainability Symposium, 1995. Proceedings., Annual IEEE*, pp. 152-158.
- 84 . Harris, B. (1971), "Hypothesis testing and confidence intervals for products and quotients of Poisson parameters with applications to reliability", *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 66 No. 335, pp. 609-613.
- 85 . Hatton, L. (2009), "Repetitive failure, feedback and the lost art of diagnosis", *Journal of Systems and Software*, Vol. 47 No. 2–3, pp. 183-188.
- 86 . Higgins, J. J., and Tsokos, C. P. (1981), "A quasi-Bayes estimate of the failure intensity of a reliability-growth model", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 30 No. 5, pp. 471-475.
- 87 . Hill, R. J. (1994), "Electric railway traction. I. Electric traction and DC traction motor drives", *Power Engineering Journal*, Vol. 8 No.1, pp. 47-56.
- 88 . Hnatek, E. R. (2002), *Practical reliability of electronic equipment and products (Vol. 116)*, CRC press.
- 89 . Horie, A., Mizobuchi, T., Nakamura, K., and Eng, D. (1999), "Efficient Train Traction System That Reduces Maintenance Work", *Hitachi Review*, Vol.48 No. 3, pp. 139.
- 90 . Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalookakaie, R., Ghodrati, B. and Kumar, U. (2012), "Reliability analysis of drum shearer machine at mechanized longwall mines", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 18 No. 1, pp. 98-119.
- 91 . Hoseinie, S.H., Ataei, M., Khalookakaie, R. and Kumar, U. (2011), "Reliability modeling of hydraulic system of drum shearer machine", *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, Vol. 17 No. 4, pp. 450-456.
- 92 . Hougaard, P. (2012), *Analysis of multivariate survival data*, Springer Science &

Business Media.

- 93 . Hussin, H., Mohd-Hashim, F., Halim-Ramli, O. and Muhammad-Afdhal-Ghazali, S. (2013), "Maintainability analysis of an offshore gas compression train system, a case study", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 30 No. 5, pp. 495-510.
- 94 . Huzurbazar, A. V., and Williams, B. J. (2010), "Incorporating covariates in flowgraph models: Applications to recurrent event data", *Technometrics*, Vol. 52 No. 2, pp. 198-208.
- 95 . IEC 60300-1:2014, *Dependability management - Part 1: Guidance for management and application*.
- 96 . IEC 60300-3-1:2003, *Dependability management - Part 3-1: Application guide - Analysis techniques for dependability - Guide on methodology* .
- 97 . IEC 60300-3-10:2001, *Dependability management - Part 3-10: Application guide - Maintainability*.
- 98 . IEC 60300-3-11:2009, *Dependability management - Part 3-11: Application guide - Reliability centred maintenance*.
- 99 . IEC 60300-3-12:2011, *Dependability management - Part 3-12: Application guide - Integrated logistic support* .
- 100 . IEC 60300-3-14:2004, *Dependability management - Part 3-14: Application guide - Maintenance and maintenance support*.
- 101 . IEC 60300-3-15:2009, *Dependability management - Part 3-15: Application guide - Engineering of system dependability*.
- 102 . IEC 60300-3-16:2008, *Dependability management - Part 3-16: Application guide - Guidelines for specification of maintenance support services*.
- 103 . IEC 60300-3-2:2004, *Dependability management - Part 3-2: Application guide - Collection of dependability data from the field*.
- 104 . IEC 60300-3-3:2004, *Dependability management - Part 3-3: Application guide - Life cycle costing*.
- 105 . IEC 60300-3-4:2007, *Dependability management - Part 3-4: Application guide - Guide to the specification of dependability requirements* .
- 106 . IEC 60300-3-5:2001, *Dependability management - Part 3-5: Application guide - Reliability test conditions and statistical test principles*.
- 107 . IEC 60300-3-9 :1995, *Dependability management - Part 3: Application guide - Section 9: Risk analysis of technological systems*.
- 108 . IEC 60319:1999, *Presentation and specification of reliability data for electronic components*.
- 109 . IEC 60605-2:1994, *Equipment reliability testing - Part 2: Design of test cycles*.
- 110 . IEC 60605-4:2001, *Equipment reliability testing - Part 4: Statistical procedures for exponential distribution - Point estimates, confidence intervals, prediction intervals and tolerance intervals*.
- 111 . IEC 60605-6:2007, *Equipment reliability testing - Part 6: Tests for the validity and estimation of the constant failure rate and constant failure intensity*.
- 112 . IEC 60706-2:2006, *Maintainability of equipment - Part 2: Maintainability requirements and studies during the design and development phase*.
- 113 . IEC 60706-3:2006, *Maintainability of equipment - Part 3: Verification and*

- collection, analysis and presentation of data.*
- 114 . IEC 60706-5:2007, *Maintainability of equipment - Part 5: Testability and diagnostic testing.*
  - 115 . IEC 60812:2006, *Analysis techniques for system reliability - Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA).*
  - 116 . IEC 61014:2003, *Programmes for reliability growth.*
  - 117 . IEC 61025:2006, *Fault tree analysis (FTA).*
  - 118 . IEC 61070:1991, *Compliance test procedures for steady-state availability.*
  - 119 . IEC 61078:2006, *Analysis techniques for dependability - Reliability block diagram and boolean methods.*
  - 120 . IEC 61123:1991, *Reliability testing - Compliance test plans for success ratio.*
  - 121 . IEC 61124:2012, *Reliability testing - Compliance tests for constant failure rate and constant failure intensity.*
  - 122 . IEC 61160:2005, *Design review.*
  - 123 . IEC 61163-1:2006, *Reliability stress screening - Part 1: Repairable assemblies manufactured in lots.*
  - 124 . IEC 61163-2:1998, *Reliability stress screening - Part 2: Electronic components.*
  - 125 . IEC 61164:2004, *Reliability growth - Statistical test and estimation methods.*
  - 126 . IEC 61165:2006, *Application of Markov techniques.*
  - 127 . IEC 61649:2008, *Weibull analysis.*
  - 128 . IEC 61650:1997, *Reliability data analysis techniques - Procedures for comparison of two constant failure rates and two constant failure (event) intensities.*
  - 129 . IEC 61703:2001, *Mathematical expressions for reliability, availability, maintainability and maintenance support terms.*
  - 130 . IEC 61709:2011, *Electric components - Reliability - Reference conditions for failure rates and stress models for conversion.*
  - 131 . IEC 61710:2013, *Power law model - Goodness-of-fit tests and estimation methods.*
  - 132 . IEC 61882:2001, *Hazard and operability studies (HAZOP studies) - Application guide.*
  - 133 . IEC 61907:2009, *Communication network dependability engineering.*
  - 134 . IEC 62198:2013, *Managing risk in projects - Application guidelines.*
  - 135 . IEC 62308:2006, *Equipment reliability - Reliability assessment methods.*
  - 136 . IEC 62309:2004, *Dependability of products containing reused parts - Requirements for functionality and tests.*
  - 137 . IEC 62347:2006, *Guidance on system dependability specifications.*
  - 138 . IEC 62402:2007, *Obsolescence management - Application guide.*
  - 139 . IEC 62429:2007, *Reliability growth - Stress testing for early failures in unique complex systems.*
  - 140 . IEC 62502:2010, *Analysis techniques for dependability - Event tree analysis (ETA).*
  - 141 . IEC 62506:2013, *Methods for product accelerated testing.*
  - 142 . IEC 62508:2010, *Guidance on human aspects of dependability.*
  - 143 . IEC 62551:2012, *Analysis techniques for dependability - Petri net techniques.*
  - 144 . IEC 62628:2012, *Guidance on software aspects of dependability.*
  - 145 . IEC 62673:2013, *Methodology for communication network dependability assessment and assurance.*

- 146 . IEC 62740:2015, *Root cause analysis (RCA)*.
- 147 . IEC 62741:2015, *Demonstration of dependability requirements - The dependability case*.
- 148 . IEC TR 62380:2004, *Reliability data handbook - Universal model for reliability prediction of electronics components, PCBs and equipment*.
- 149 . IEC/ISO 31010:2009, *Risk management - Risk assessment techniques*.
- 150 . Iglesias, J. I., and Jiménez, J. A. (2000), "Sistemas de tracción en los trenes españoles de alta velocidad", *Ingeniería Civil*, Vol. 118.
- 151 . Inarida, S., and Kaneko, T. (2005), "A novel power control method achieving high reliability of auxiliary power supply system for trains", *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on IEEE*, pp. 8-.
- 152 . Jaafar, A., Sareni, B. and Roboam, X. (2012), "Clustering analysis of railway driving missions with niching", *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, Vol. 31 No. 3, pp. 920-931.
- 153 . Jacob, P., Held, M., and Scacco, P. (1995), "IGBT power semiconductor reliability analysis for traction application. In Physical and Failure Analysis of Integrated Circuits", *Proceedings of the 1995 5th International Symposium on the IEEE*, pp. 169-175.
- 154 . Jenney, B. W., and Sherwin, D. J. (1986), "Open & short circuit reliability of systems of identical items", *IEEE transactions on reliability*, Vol. 35 No. 5, pp. 532-538.
- 155 . Ji, G., Wu, W., Zhang, B., and Sun, H. (2013), "A renewal-process-based component outage model considering the effects of aging and maintenance", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 44 No. 1, pp. 52-59.
- 156 . Jiang S.T., Landers T.L. and Rhoads T.R. (2005), "Semi-parametric proportional intensity models robustness for right-censored recurrent failure data", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 90 No. 1, pp. 91-98.
- 157 . Jones, J., and Hayes, J. (2001), "Estimation of system reliability using a non-constant failure rate" model", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 50 No. 3, 286-288.
- 158 . Juarez, C., Messina, A.R., Castellanos, R. and Espinosa-Perez, G. (2011), "Characterization of multimachine system behavior using a hierarchical trajectory cluster analysis", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 26 No. 3, pp. 972-981.
- 159 . Kaminskiy, M. and Krivtsov, V. (2015), "Geometric G1-renewal process as repairable system model", *Proceedings of annual IEEE reliability and maintainability symposium (RAMS), 2015*, pp. 1-6.
- 160 . Kaminskiy, M., and Krivtsov, V. (2010), "G1-renewal process as repairable system model", arXiv preprint arXiv:1006.3718.
- 161 . Karanikas, N. (2013), "Using reliability indicators to explore human factors issues in maintenance databases", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 30 No. 2, pp. 116-128.
- 162 . Kashyap, R., and Nasburg, R. (1974), "Parameter estimation in multivariate

- stochastic difference equations", *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 19 No. 6, pp. 784-797.
- 163 . Kijima, M. (1989), "Some results for repairable systems with general repair", *Journal of Applied Probability*, Vol. 26 No. 1, pp. 89-102.
- 164 . Kim, H. K. (2009), *Reliability modeling and evaluation in aging power systems*, Doctoral dissertation, Texas A&M University.
- 165 . Kim, H., and Singh, C. (2010), "Reliability modeling and simulation in power systems with aging characteristics", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 25 No. 1, pp. 21-28.
- 166 . Kim, J., and Dobson, I. (2010), "Approximating a loading-dependent cascading failure model with a branching process", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 59 No. 4, pp. 691-699.
- 167 . Kjellqvist, T. (2009), *On design of a compact primary switched conversion system for electric railway propulsion*, Doctoral dissertation, KTH.
- 168 . Knafl, G. J., and Sacks, J. (1991), "Poisson processes with nearly constant failure intensity", *Software Reliability Engineering, 1991. Proceedings., 1991 International Symposium on IEEE*, pp. 60-66.
- 169 . Koseki, T. (2010), "Technical trends of railway traction in the world", *Power Electronics Conference (IPEC), IEEE 2010 International*, pp. 2836-2831.
- 170 . Krasich, M. (2012), "Power law model, correct application in reliability growth do the cumulative times indeed always add up?", *Proceedings of annual IEEE reliability and maintainability symposium, 2012 (RAMS 2012)*, pp. 1-7.
- 171 . Krivtsov, V. (2007), "Recent advances in theory and applications of stochastic point process models in reliability engineering", *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 5 No. 92, pp. 549-551.
- 172 . Krivtsov, V. and Wasiloff, J. (2000), "Classical vs. Bayes reliability growth in theory and practice", in *Proceedings of ASQ World Conference on Quality and Improvement*, Vol. 54.
- 173 . Krivtsov, V., and Frankstein, M. (2014), "Reliability analysis of "sibling" components", *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2014 Annual IEEE*, pp. 1-4.
- 174 . Kulworawanichpong, T. (2003), *Optimising AC electric railway power flows with power electronic control*, Doctoral dissertation, The University of Birmingham.
- 175 . Kulworawanichpong, T., and Goodman, C. J. (2005), "Optimal area control of AC railway systems via PWM traction drives", *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, Vol.152 No.1, pp. 33-40.
- 176 . Kumamoto, H., Tanaka, K., Inoue, K. and Henley, E.J. (1980), "State-transition Monte Carlo for evaluating large, repairable systems", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-29 No. 5, pp. 376-380.
- 177 . Kumar, U. (1990), *Reliability analysis of load-haul-dump machines*, Doctoral dissertation, Lulea Tekniska Universitet.
- 178 . Kumar, U., Klefsjö, B. and Granholm, S. (1989), "Reliability investigation for a fleet of load haul dump machines in a Swedish mine", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 26 No. 4, pp. 341-361.

- 179 . Kurien, K.C., Sekhon, G.S. and Chawla O.P. (1993), "Analysis of aircraft reliability using Monte Carlo simulation", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 10 No. 2.
- 180 . Landers, T. L., Jiang, S. T., and Peek, J. R. (2001), "Semi-parametric PWP model robustness for log-linear increasing rates of occurrence of failures", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 73 No. 2, pp. 145-153.
- 181 . Lawless, J. F., and Nadeau, C. (1995), "Some simple robust methods for the analysis of recurrent events", *Technometrics*, Vol. 37 No. 2, pp. 158-168.
- 182 . Lawless, J. F., and Thiagarajah, K. (1996), "A point-process model incorporating renewals and time trends, with application to repairable systems", *Technometrics*, Vol. 38 No. 2, pp. 131-138.
- 183 . Léger, C., and Wolfson, D. B. (1987), "Hypothesis testing for a non-homogeneous Poisson process", *Stochastic Models*, Vol. 3 No. 3, pp. 439-455.
- 184 . Lewis, P. (1964), "A branching Poisson process model for the analysis of computer failure patterns", *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, Vol. 26 No. 3, pp. 398-456.
- 185 . Lewis, P. A. (1967), "Non-homogeneous branching Poisson processes", *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, pp. 343-354.
- 186 . Li, Z., Zhou, S., Choubey, S., and Sievenpiper, C. (2007), "Failure event prediction using the Cox proportional hazard model driven by frequent failure signatures", *IIE transactions*, Vol. 39 No. 3, pp. 303-315.
- 187 . Liang, Y. (2008), "Combining neural networks and genetic algorithms for predicting the reliability of repairable systems", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 25 No. 2, pp. 201-210.
- 188 . Liang, Y. (2011), "Analyzing and forecasting the reliability for repairable systems using the time series decomposition method", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 28 No. 3, pp. 317-327.
- 189 . Limnios, N., and Ionescu, D. C. (2012), *Statistical and probabilistic models in reliability*, Springer Science & Business Media.
- 190 . Lindley, D. V., and Singpurwalla, N. D. (1986), "Multivariate distributions for the life lengths of components of a system sharing a common environment", *Journal of Applied Probability*, Vol. 23 No. 2, pp. 418-431.
- 191 . Lindqvist, B. H. (1999). "Repairable systems with general repair".
- 192 . Lindqvist, B.H. (2006), "On the statistical modeling and analysis of repairable systems", *Statistical Science*, Vol. 21 No. 4, pp. 532-551.
- 193 . Lindqvist, B.H., Elvebakk, G. and Heggland, K. (2003), "The trend-renewal process for statistical analysis of repairable systems", *Technometrics* Vol. 45, pp. 31-44.
- 194 . Lisnianski, A., Frenkel, I. and Ding, Y. (2010), *Multi-state system reliability analysis and optimization for engineers and industrial managers*, Springer Science & Business Media.
- 195 . Liu, Z., Ma, X., and Zhao, Y. (2011), "Mission reliability assessment for plane fleet based on flight profile", *Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS), 2011 9th International Conference on IEEE*, pp. 154-158.

- 196 . Lozynsky, O., and Shcherbovskykh, S. (2010), "Failure intensity determination for renewal doubling system with parallel redundancy"; *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2010 International Conference on IEEE*, pp. 316-316.
- 197 . Lu, S., Lu, H., and Kolarik, W. J. (2001), "Multivariate performance reliability prediction in real-time", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 72 No. 1, pp. 39-45.
- 198 . Lucero, A. (2006), *Tracción Eléctrica*, Publicaciones Docentes.
- 199 . Luo, M., Wu, M. L., and Wang, X. Y. (2010), "Study on Reliability Test for Brake Control Execution Unit of Rail Transit Vehicle", *E-Product E-Service and E-Entertainment (ICEEE), 2010 International Conference on IEEE*, pp. 1-4.
- 200 . Luo, M., Wu, M.L. and Wang, X.Y. (2010), "Study on reliability test for brake control execution unit of rail transit vehicle", *E-Product, E-Service and E-Entertainment (ICEEE), 2010 International Conference on*, pp. 1-4.
- 201 . Lyu, M. R. (1996), *Handbook of software reliability engineering*, McGraw-Hill.
- 202 . Ma, Z., and Krings, A. W. (2008), "Multivariate survival analysis (I): shared frailty approaches to reliability and dependence modeling", *Aerospace Conference, 2008 IEEE*, pp. 1-21.
- 203 . Ma, Z., Krings, A. W., and Hiromoto, R. E. (2008), "Multivariate survival analysis (II): an overview of multi-state models in biomedicine and engineering reliability", *BioMedical Engineering and Informatics, 2008. BMEI 2008. International Conference on IEEE*, Vol. 1, pp. 536-541.
- 204 . Maghsoodloo, S. and Helvaci, D. (2014), "Renewal and Renewal-Intensity Functions with Minimal Repair", *Journal of Quality and Reliability Engineering*, Vol. 2014.
- 205 . Mahadevan, S. (2000), *Probability, reliability, and statistical methods in engineering design*. Wiley.
- 206 . Mallor, F., and Santos, J. (2003), "Reliability of systems subject to shocks with a stochastic dependence for the damages", *Test*, Vol. 12 No. 2, pp. 427-444.
- 207 . Maricau, E., De Jonghe, D., and Gielen, G. (2012), "Hierarchical analog circuit reliability analysis using multivariate nonlinear regression and active learning sample selection", *IEEE Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE)*, pp. 745-750.
- 208 . Markovich, N. M., and Krieger, U. R. (2006), "Nonparametric estimation of the renewal function by empirical data", *Stochastic Models*, Vol. 22 No. 2, pp. 175-199.
- 209 . Martinez, C., Vazquez, R., Quesada, I., Lucena, C., Lazaro, A., and Barrado, A. (2011), "PWM-VSI overmodulation technique with carrier harmonics reduction for auxiliary railway power supply" *IEEE Compatibility and Power Electronics (CPE), 7th International Conference-Workshop*, pp. 252-257.
- 210 . Mealing, S. W., and Hinsley, W. (2011), "In-service reliability demonstration testing", *Railway Condition Monitoring and Non-Destructive Testing (RCM 2011), 5th IET Conference on IET*, pp. 1-6.
- 211 . Meeker, W. Q., and Escobar, L. A. (2010), *SPLIDA (S-PLUS life data analysis)*, Iowa State University and Louisiana State University.

- 
- 212 . Melis, M., and González, F. J. (2002), *Ferrocarriles metropolitanos: tranvías, metros ligeros y metros convencionales*, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- 213 . Mermet-Guyennet M. and Piton M. (2010), "Railway traction reliability", *6th International Conference on Integrated Power Electronics Systems IEEE, Nuremberg*, pp. 1-6.
- 214 . Mester, V. (2007), *Conception optimale systémique des composants des chaînes de traction électrique*, Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Lille.
- 215 . Metro de Madrid (2006), *Electrónica de potencia C-2000*, Metro de Madrid.
- 216 . Metro de Madrid (2008), *Descripción del regulador de marcha MITRAC*, Metro de Madrid.
- 217 . Metro de Madrid (2015), *Plano 22.500*, Metro de Madrid.
- 218 . Mettas, A., and Zhao, W. (2005), "Modeling and analysis of repairable systems with general repair", *Reliability and Maintainability Symposium, 2005. Proceedings. Annual IEEE*, pp. 176-182.
- 219 . MIL-HDBK-108, *Sampling Procedures and Tables for Life and Reliability Testing (Based on Exponential Distribution)*.
- 220 . MIL-HDBK-189 (1981), "Reliability Growth Management", *Headquarters, US Army Communication Research and Development Command, A'ITN: DRDCO-PT, Fort Monmouth, NJ*.
- 221 . MIL-HDBK-189C, *Reliability Growth Management - Revision C*.
- 222 . MIL-HDBK-2164A, *Environmental Stress Screening Process for Electronic Equipment - Revision A*.
- 223 . MIL-HDBK-217F, *Reliability Prediction of Electronic Equipment - Revision F*.
- 224 . MIL-HDBK-251, *Reliability/Design Thermal Applications*.
- 225 . MIL-HDBK-338B, *Electronic Reliability Design Handbook - Revision B*.
- 226 . MIL-HDBK-344A, *Environmental Stress Screening (ESS) of Electronic Equipment - Revision A*.
- 227 . MIL-HDBK-470A, *Designing and Developing Maintainable Products and Systems - Revision A*.
- 228 . MIL-HDBK-472, *Maintainability Prediction*.
- 229 . MIL-HDBK-781A, *Handbook for Reliability Test Methods, Plans, and Environments for Engineering, Development, Qualification, and Production - Revision A*
- 230 . MIL-P-24534A, *Planned Maintenance System: Development of Maintenance Requirement Cards, Maintenance Index Pages, and Associated Documentation-Revision A*.
- 231 . MIL-STD-1543B, *Reliability Program Requirements for Space and Launch Vehicles - Revision B*.
- 232 . MIL-STD-1629A, *Procedures for Performing a Failure Mode Effects and Criticality Analysis - Revision A*.
- 233 . MIL-STD-2073E, *Standard Practice for Military Packaging - Revision E*.
- 234 . MIL-STD-2074, *Failure Classification for Reliability Testing*.
- 235 . MIL-STD-2155, *Failure Reporting, Analysis and Corrective Action Systems*.
- 236 . MIL-STD-2173, *Reliability Centered Maintenance Requirements for Naval Aircraft*,

- Weapons Systems and Support Equipment.*
- 237 . MIL-STD-3034, *Reliability-Centered Maintenance (RCM) Process.*
- 238 . MIL-STD-471A, *Maintainability Verification/Demonstration/Evaluation - Revision A.*
- 239 . MIL-STD-690D, *Failure Rate Sampling Plans and Procedures - Revision D.*
- 240 . MIL-STD-721C, *Definition of Terms for Reliability and Maintainability - Revision C.*
- 241 . MIL-STD-756B, *Reliability Modeling and Prediction - Revision B.*
- 242 . MIL-STD-781D, *Reliability Testing for Engineering Development, Qualification and Production - Revision D.*
- 243 . MIL-STD-785B, *Reliability Program for Systems and Equipment Development and Production - Revision B.*
- 244 . MIL-STD-790F, *Established Reliability and High Reliability Qualified Products List (QPL) Systems For Electrical, Electronic, and Fiber Optic Parts Specifications - Revision F.*
- 245 . MIL-STD-882C, *System Safety Program Requirements- Revision C.*
- 246 . MIL-STD-883J, *Test Method Standard Microcircuits - Revision J.*
- 247 . Montanés V., (2012), *Procesos de Renovación en tiempo discreto: Aplicación del caso tipo fase en fiabilidad*, TFM, Univesidad de Granada.
- 248 . Moore, A. H., Harter, H. L., and Antoon, D. F. (1981), "Confidence intervals and tests of hypotheses for the reliability of a 2-parameter Weibull system", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 30 No. 5, pp. 468-470.
- 249 . Musa, J. D. (1994), "Adjusting measured field failure intensity for operational profile variation", *Software Reliability Engineering, 1994. Proceedings., 5th International Symposium on IEEE*, pp. 330-333.
- 250 . Musa, J. D. (1994), "Sensitivity of field failure intensity to operational profile errors", *Software Reliability Engineering, 1994. Proceedings., 5th International Symposium on IEEE*, pp. 334-337.
- 251 . Nakagawa, T. (1979), "Optimum policies when preventive maintenance is imperfect", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 28 No.4, pp 331-332.
- 252 . Narváez, M. (2015)., *Modelo para la evaluación de la fiabilidad de sistemas dinámicos reparables de múltiples componentes*, tesis doctoral, Universidad de Cali.
- 253 . Nelson, W. (2003), *Recurrent Events Data Analysis for Product Repairs, Disease Recurrences, and Other Applications*, ASA/SIAM, Providence, RI.
- 254 . Nicholls, D. (2005), *System reliability toolkit*, Riac.
- 255 . Niu, C., Liang, X., Ge, B., Tian, X., and Chen, Y. (2016), "Optimal replacement policy for a repairable system with deterioration based on a renewal-geometric process", *Annals of Operations Research*, Vol. 244 No. 1, pp. 49-66.
- 256 . Ntafos, S., and Pociun-Benson, V. (2000), "Improved testing using failure cost and intensity profiles", *Application-Specific Systems and Software Engineering Technology, 2000. Proceedings. 3rd IEEE Symposium*, pp. 143-147.
- 257 . Ocaña J., (2001), *Notas sobre la generación de procesos estocásticos*, Universidad de Barcelona.
- 258 . O'connor, P. D., O'Connor, P., and Kleyner, A. (2012), *Practical reliability*

- engineering*, John Wiley & Sons.
- 259 . Onda, S., and Maekawa, K. (2010), "Hardware embedded current control PWM" Hi-PWM" to reduce switching frequency for application to railway", *Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International IEEE*, pp. 1596-1599.
- 260 . Onuki, J., Koizumi, M., and Suwa, M. (2000), "Reliability of thick Al wire bonds in IGBT modules for traction motor drives", *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, Vol. 23 No. 1, pp. 108-112.
- 261 . Panja, S.C. and Ray, P.K. (2007), "Reliability analysis of track circuit of Indian railway signalling system", *International Journal of Reliability and Safety*, Vol. 1 No. 4, pp. 428-445.
- 262 . Peña, E.A. (2006), "Dynamic modeling and statistical analysis of event times", *Statistical Science*, Vol. 21 No. 4, pp. 487-500.
- 263 . Peña, E.A. and Hollander, M. (2004), "Models for recurrent events in reliability and survival analysis", in Soyer, T., Mazzuchi, T. and Singpurwalla, N. (Eds.), *Mathematical Reliability: An Expository Perspective*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 105-123.
- 264 . Péres V., and Reynoso D. (2010), *Introducción a los Procesos de Poisson*, Universidad de Guanajuato.
- 265 . Pérez-Alonso, M., Moriñigo-Sotelo, D., and Duque-Pérez, Ó. (2011), "Los motores eléctricos de tracción ferroviaria. Características y técnicas de mantenimiento del sistema eléctrico", *DYNA-Ingeniería e Industria*, Vol. 86 No. 4.
- 266 . Perpina, X., Jordà, X., Vellvehi, M., Rebollo, J., and Mermet-Guyennet, M. (2011), "Long-term reliability of railway power inverters cooled by heat-pipe-based systems", *IEEE transactions on industrial electronics*, Vol. 58 No. 7, pp. 2662-2672.
- 267 . Pham, H. (2007), *System software reliability*, Springer Science & Business Media.
- 268 . Pham, H. and Wang, H. (1996), "Imperfect maintenance", *European Journal of Operational Research*, Vol. 94 No. 3, pp. 425-438.
- 269 . Pita, S., and Pértega, S. (1997), "Relación entre variables cuantitativas", *Cad Aten Primaria*, Vol. 4, pp. 141-144.
- 270 . Plaza J. (2013), *Modelos de fiabilidad del software*, TFM, Universidad de Valladolid.
- 271 . Powers, W. A., and Posten, H. O. (1975), "The Robustness of Reliability Predictions For Parallel Systems of Identical Components", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 24 No. 2, pp 126-128.
- 272 . Proust, M. (2013), *Reliability and Survival Methods*, JMP, A. - SAS.
- 273 . Qian, X., and Wu, Y. (2011), "A practical method of predicting the failure intensity of hydropower generating units", *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Shenzhen), 2011 IEEE*, pp. 1-5.
- 274 . Quiroga, J. A. (2000), *Onduladores trifásicos aplicados a tracción ferroviaria*, PFC, Universidad Politécnica de Madrid.
- 275 . Qurashi, M. and Hamdi, A.M.A. (2016), "Stochastic renewal process model for maintenance (case study: thermal electricity generation in Sudan)",

- International Journal of Advanced Statistics and Probability*, Vol. 4 No.1, pp. 11-15.
- 276 . Ranganathan, J., and Kale, B. K. (1979), "Tests of hypotheses for reliability functions in two-parameter exponential models", *Canadian Journal of Statistics*, Vol. 7 No. 2, pp. 177-184.
- 277 . Rashid, M. H., and Sood, V. K. (1984), "Comparative evaluations of thyristor choppers for railway applications", *Vehicular Technology Conference, 34th IEEE*, Vol. 34, pp. 235-241.
- 278 . Rastegari, A. and Mobin, M. (2016), "Maintenance decision making, supported by computerized maintenance management system", *IEEE 2016 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, pp. 1-8.
- 279 . Rausand, M. and Hoyland, A. (2004), *System Reliability Theory: Models, Statistical Methods, and Applications*, 2nd ed., Wiley, New York, NY.
- 280 . ReliaSoft Corporation (2003), *Blueprint for a Comprehensive Reliability Program*, ReliaSoft Corporation.
- 281 . ReliaSoft Corporation (2014), *RGA 9 Quick Start Guide*, ReliaSoft Corporation.
- 282 . ReliaSoft Corporation (2014), *RGA 9 Software*, ReliaSoft Corporation.
- 283 . ReliaSoft Corporation (2015), *Experiment Design & Analysis Reference*, ReliaSoft Corporation.
- 284 . ReliaSoft Corporation (2015), *Life Data Analysis Reference*, ReliaSoft Corporation.
- 285 . ReliaSoft Corporation (2015), *Reliability Growth & Repairable System Data Analysis*, ReliaSoft Corporation.
- 286 . ReliaSoft Corporation (2015), *RGA 10 Quick Start Guide*, ReliaSoft Corporation.
- 287 . ReliaSoft Corporation (2015), *Software & services*, ReliaSoft Corporation.
- 288 . Rigdon S.E., Basu A.P. (2000), *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*, Wiley, New York, NY.
- 289 . Rincón L., (2011), *Introducción a los procesos estocásticos*, Universidad Nacional Autónoma de México.
- 290 . Roy, D. (2001), "Some properties of a classification system for multivariate life distributions", *IEEE Transactions on reliability*, Vol. 50 No. 2, pp. 214-220.
- 291 . Ruggeri, F. (2006), "On the reliability of repairable systems: methods and applications", *Proceedings of progress in industrial mathematics at ECMI 2004*, Vol. 8, pp. 535-553.
- 292 . Sagareli, S. (2004), "Traction power systems reliability concepts", *ASME/IEEE 2004 Joint Rail Conference*, pp. 35-39.
- 293 . Salinas M., (2013), *Modelos de fragilidad paramétricos*, TFM, Univesidad de Granada.
- 294 . Sanjuán, E. L. (2004), *Estudio de la fiabilidad de sistemas con reparaciones postpuestas*, tesis doctoral, Universidad de Extremadura.
- 295 . Santos, A. F. D. (2007), *Gerenciamento da confiabilidade em projetos de material rodante ferroviário*, Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo.
- 296 . Santos, R. Á. (1979), *Materiales y componentes electrónicos: materiales, componentes pasivos, componentes activos*. Editesa.

- 
- 297 . Sari, J. K. (2007), *Multivariate degradation modeling and its application to reliability testing*, Doctoral dissertation, National University of Singapore.
- 298 . Sawyer, E., Hosking, T., and Brubaker, M. (2011), "Advanced simulation tools used to provide high-reliability next generation film capacitors for traction drives and power electronics", *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on IEEE*, pp. 1-5.
- 299 . Schilling, M.T., Praca, J.C.G., De Queiroz, J.F., Singh, C. and Ascher, H. (1988), "Detection of ageing in the reliability analysis of thermal generators", *IEEE transactions on power systems*, Vol. 3 No. 2, pp. 490-499.
- 300 . Shang, L. and Wang, S. (2015), "Application of the principal component analysis and cluster analysis in comprehensive evaluation of thermal power units", *5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), Changsha*, pp. 2769-2773.
- 301 . Sharifi, M., Ganjian, M., and Ghajar, H. R. (2005), "Expansion of Reliability Models based on Markov Chain with Consideration of Fuzzy Failure Rates: System with two Parallel and Identical Elements with Constant Failure Rates", *Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2005 and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, International Conference on IEEE*, Vol. 2, pp. 1022-1026.
- 302 . Sharifi, M., Ganjian, M., and Shafiee, P. (2006), "Reliability of a System with n Parallel and Not Identical Elements with Constant Failure Rates", *Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation, 2006 and International Conference on Intelligent Agents, Web Technologies and Internet Commerce, International Conference on IEEE*, pp. 48-48.
- 303 . Sharma, R. (2015), "Reliability Analysis for a Repairable System under N-policy and Imperfect Coverage", *Proceedings of the International Multi-Conference of Engineers and Computer Scientists, Hong Kong*, Vol. 2.
- 304 . Shen, J., and Butterworth, N. (1997), "Analysis and design of a three-level PWM converter system for railway-traction applications", *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, Vol.144 No.5, pp. 357-371.
- 305 . Shima, K., Takada, S., Matsumoto, K. I., and Torii, K. (1997), "A study on the failure intensity of different software faults", *Proceedings of the 19th international conference on Software engineering ACM*, pp. 86-94.
- 306 . Siemens (2011), *Sibas 32*, Siemens.
- 307 . Simpson, K.G.L. and Kelly, M. (2002), "Reliability assessments of repairable systems – Is Markov modeling correct?", *Safety and Reliability Society Journal*, Vol. 22 No. 2.
- 308 . Smeitink, E. and Dekker, R. (1990), "A simple approximation to the renewal function [reliability theory]", *IEEE transactions on reliability*, Vol. 39 No. 1, pp. 71-75.
- 309 . Smith, S.A. and Oren, S.S. (1980), "Reliability growth of repairable systems", *Naval Research Logistics Quarterly*, Vol. 27 No. 4, pp. 539-547.
- 310 . Solano Hurtado, H. (2008), *Análisis de Supervivencia en Fiabilidad. Predicción en condiciones de alta censura y truncamiento: el caso de las redes de suministro de agua potable*, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia.

- 311 . Solé, A. C. (2005), *Fiabilidad y seguridad: su aplicación en procesos industriales*, Marcombo.
- 312 . Sommer, H. W., Himmelstoss, F. A., and Zach, F. C. (1991), "Analysis of a low loss turn-off network for a GTO chopper for international railway cars operating under different railway supply voltages", *Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, 1991. *Proceedings. IECON'91., 1991 International Conference on IEEE*, pp. 656-661.
- 313 . Statgraphics (2006), *Ajustando Distribución (Datos No Censurados)*, Statgraphics.
- 314 . Statgraphics (2006), *Análisis de Conglomerados*, Statgraphics.
- 315 . Statgraphics (2006), *Análisis de Factores*, Statgraphics.
- 316 . Statgraphics (2006), *Análisis Discriminante*, Statgraphics.
- 317 . Statgraphics (2006), *Análisis Multivariante*, Statgraphics.
- 318 . Statgraphics (2006), *Correlaciones Canónicas*, Statgraphics.
- 319 . Statgraphics (2006), *Histogramas*, Statgraphics.
- 320 . Statgraphics (2006), *Procedimientos de Análisis*, Statgraphics.
- 321 . Statgraphics (2006), *Regresión de Datos de Vida*, Statgraphics.
- 322 . Statgraphics (2006), *Riesgos Proporcionales de Cox*, Statgraphics.
- 323 . Statgraphics (2007), *Análisis de Componentes de la Varianza*, Statgraphics.
- 324 . Statgraphics (2007), *Análisis de Una Variable*, Statgraphics.
- 325 . Statgraphics (2007), *Análisis de Weibull*, Statgraphics.
- 326 . Statgraphics (2007), *ANOVA Multifactorial*, Statgraphics.
- 327 . Statgraphics (2007), *ANOVA Simple*, Statgraphics.
- 328 . Statgraphics (2007), *Componentes Principales*, Statgraphics.
- 329 . Statgraphics (2007), *Distribuciones de Probabilidad*, Statgraphics.
- 330 . Statgraphics (2007), *Regresión Múltiple*, Statgraphics.
- 331 . Statgraphics (2007), *Regresión Simple*, Statgraphics.
- 332 . Statgraphics (2007), *Selección del Modelo de Regresión*, Statgraphics.
- 333 . Statgraphics (2007), *Tablas de Vida (Intervalos)*, Statgraphics.
- 334 . Statgraphics (2007), *Tablas de Vida (Tiempos)*, Statgraphics.
- 335 . Statgraphics (2009), *Correspondence Analysis*, Statgraphics.
- 336 . Statgraphics (2009), *Multiple Correspondence Analysis*, Statgraphics.
- 337 . Statgraphics (2009), *Point Processes (One Dimensional)*, Statgraphics.
- 338 . Statgraphics (2009), *Repairable Systems (Intervals)*, Statgraphics.
- 339 . Statgraphics (2009), *Repairable Systems (Times)*, Statgraphics.
- 340 . Steimel, A. (2008), *Electric traction-motive power and energy supply: basics and practical experience*, Oldenbourg Industrieverlag.
- 341 . Stocker IV, R. S., and Peña, E. A. (2007), "A general class of parametric models for recurrent event data", *Technometrics*, Vol. 49 No. 2, pp. 210-221.
- 342 . Sun, Y. (2006), *Reliability prediction of complex repairable systems: an engineering approach*, Doctoral dissertation, Queensland University of Technology.
- 343 . Suryanarayana, N. V. (1994), *Utilisation of electric power: Including electric drives and electric traction*, New Age International.
- 344 . Sykes, A. J., and Faddoul, R. Y. (1993), "Thermal evolution of air cooled traction converters", *Thermal Management in Power Electronics Systems*, IEE

*Colloquium on IET*, pp. 5-1.

- 345 . Tan F.R., Jiang, Z.B. and Bai, T.S. (2008), "Reliability analysis of repairable systems using stochastic point processes", *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, Vol. 13, pp. 366-369.
- 346 . Tanaka, A., Mori, M., Inoue, H., Koike, Y., Kushima, T., Shimizu, H., and Saito, R. (1997), "3300 V 400 A, 600 A and 1200 A high power IGBT modules with high reliability for traction applications", *Power Conversion Conference-Nagaoka 1997., Proceedings of the IEEE*, Vol. 2, pp. 967-970.
- 347 . Tang, L.C. and Chen, L.P. (2014), "A piecewise constant failure intensity model", *Proceedings of annual IEEE reliability and maintainability symposium, 2014 (RAMS 2014)*, pp. 1-6.
- 348 . Tang, L.C. and Xie, M. (2002), "A simple graphical approach for comparing reliability trends of different units in a fleet", *Proceedings of annual IEEE reliability and maintainability symposium, 2002*, pp. 40-43.
- 349 . ThyssenKrupp (2005), *Descripción Técnica Escalera Mecánica TNE*, ThyssenKrupp.
- 350 . Tian, Y. (2013), "Estimating a parametric lifetime distribution from superimposed renewal process data", *Digital Repository @ Iowa State University*.
- 351 . Tobias, P.A. and Trindade, D. (2011), *Applied reliability*, CRC Press
- 352 . Tong, L. and Liang, Y. (2005), "Forecasting field failure data for repairable systems using neural networks and SARIMA model", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 22 No. 4, pp. 410-420.
- 353 . Trindade, D., and Nathan, S. (2006), "Analysis of field data for repairable systems", *Proceedings of Reliability and Maintainability Symposium*.
- 354 . Trivedi, K. S. (2008), *Probability & statistics with reliability, queuing and computer science applications*, John Wiley & Sons.
- 355 . Turkkan, N., and Pham-Gia, T. (2007), "System stress-strength reliability: The multivariate case", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 56 No. 1, pp. 115-124.
- 356 . Tusell, F. (1999), *Análisis multivariante*, F. Tusell.
- 357 . UNE 200001-3-5:2002, *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-5: Guía de aplicación. Condiciones para los ensayos de fiabilidad y principios para la realización de contrastes estadísticos*.
- 358 . UNE 20512-6:2001, *Presentación y especificación de datos de fiabilidad de componentes electrónicos*.
- 359 . UNE 20608-2:1999, *Pruebas de fiabilidad de equipos. Parte 2: Diseño de los ciclos de prueba*.
- 360 . UNE 20932:1996, *Ensayos de fiabilidad. Planes de ensayo de conformidad con una proporción de éxitos*.
- 361 . UNE 20970:1999, *Procedimientos de ensayo de conformidad con la disponibilidad en régimen permanente*.
- 362 . UNE 50136:1997, *Documentación. Presentación de tesis y documentos similares*.
- 363 . UNE-CEN/TS 115-4, *Seguridad de escaleras mecánicas y andenes móviles. Parte 4: Interpretaciones relativas a las normas de la familia EN 115*.

- 364 . UNED (2013), *Tesis Doctoral. Elaboración: Idioma, Estructura, Redacción, Formato/Soporte*, Vicerrectorado de Investigación de la UNED.
- 365 . UNE-EN 115-1:2009+A1:2010, *Seguridad de escaleras mecánicas y andenes móviles. Parte 1: Construcción e instalación.*
- 366 . UNE-EN 115-2:2011, *Seguridad de escaleras mecánicas y andenes móviles. Parte 2: Reglas para la mejora de la seguridad de las escaleras mecánicas y de los andenes móviles existentes.*
- 367 . UNE-EN 12015:2014, *Compatibilidad electromagnética. Norma de familia de productos para ascensores, escaleras mecánicas y andenes móviles. Emisión.*
- 368 . UNE-EN 12016:2014, *Compatibilidad electromagnética. Norma de familia de productos para ascensores, escaleras mecánicas y andenes móviles. Inmunidad.*
- 369 . UNE-EN 13015:2002+A1, *Mantenimiento de ascensores y escaleras mecánicas. Reglas para instrucciones de mantenimiento.*
- 370 . UNE-EN 13306, *Mantenimiento. Terminología del mantenimiento.*
- 371 . UNE-EN 31010:2011, *Gestión del riesgo. Técnicas de apreciación del riesgo.*
- 372 . UNE-EN 50126-1:2005, *Aplicaciones Ferroviarias. Especificación y demostración de la fiabilidad, la disponibilidad, la mantenibilidad y la seguridad (RAMS). Parte 1: Requisitos básicos y procesos genéricos.*
- 373 . UNE-EN 60300-1:2015, *Gestión de la confiabilidad. Parte 1: Directrices para su gestión y aplicación.*
- 374 . UNE-EN 60300-3-1:2005, *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-1: Guía de aplicación. Técnicas de análisis de la confiabilidad. Guía metodológica.*
- 375 . UNE-EN 60300-3-11:2013, *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-11: Guía de aplicación. Mantenimiento centrado en la fiabilidad.*
- 376 . UNE-EN 60300-3-12:2014, *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-12: Guía de aplicación. Soporte logístico integrado.*
- 377 . UNE-EN 60300-3-14:2007, *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-14: Guía de aplicación. Mantenimiento y logística de mantenimiento. (IEC 60300-3-14:2004)*
- 378 . UNE-EN 60300-3-15:2013, *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-15: Guía de aplicación. Ingeniería de la confiabilidad de sistemas.*
- 379 . UNE-EN 60300-3-16:2012, *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-16: Guía de aplicación. Directrices para la especificación de los servicios de logística de mantenimiento.*
- 380 . UNE-EN 60300-3-2:2008, *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-2: Guía de aplicación. Recogida de datos de confiabilidad en la explotación.*
- 381 . UNE-EN 60300-3-3:2009, *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-3: Guía de aplicación. Cálculo del coste del ciclo de vida.*
- 382 . UNE-EN 60300-3-4:2011, *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-4: Guía de aplicación. Guía para la especificación de los requisitos de confiabilidad.*
- 383 . UNE-EN 60706-2:2009, *Mantenibilidad de equipos. Parte 2: Requisitos y estudios de mantenibilidad durante la fase de diseño y desarrollo.*
- 384 . UNE-EN 60706-3:2009, *Mantenibilidad de equipos. Parte 3: Verificación y recogida, análisis y presentación de datos.*
- 385 . UNE-EN 60706-5:2011, *Mantenibilidad de equipos. Parte 5: Facilidad de ensayo y ensayos de diagnóstico.*

- 
- 386 . UNE-EN 60812:2008, *Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas. Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE)*.
- 387 . UNE-EN 61014:2004, *Programas de crecimiento de fiabilidad*.
- 388 . UNE-EN 61025:2011, *Análisis por árbol de fallos (AAF)*.
- 389 . UNE-EN 61078:2006, *Técnicas de análisis de la confiabilidad. Método del diagrama de bloques de la fiabilidad y métodos booleanos (IEC 61078:2006)*.
- 390 . UNE-EN 61124:2014, *Ensayos de fiabilidad. Planes de ensayos de conformidad para tasa de fallo constante y para intensidad de fallo constante*.
- 391 . UNE-EN 61160:2007, *Revisión de diseño. (IEC 61160:2005)*.
- 392 . UNE-EN 61163-1:2010, *Cribado de elementos mediante esfuerzos. Parte 1: Elementos reparables fabricados en lotes*.
- 393 . UNE-EN 61164:2005, *Crecimiento de la fiabilidad. Ensayos estadísticos y métodos de estimación*.
- 394 . UNE-EN 61649:2012, *Análisis de Weibull*.
- 395 . UNE-EN 61703:2003, *Expresiones matemáticas para los términos de fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y de logística de mantenimiento*.
- 396 . UNE-EN 61709:2014, *Componentes electrónicos. Fiabilidad. Condiciones de referencia para tasas de fallo y modelos de conversión en función de los esfuerzos*.
- 397 . UNE-EN 61710:2014, *Modelo de ley de potencia. Ensayos de bondad de ajuste y métodos de estimación*.
- 398 . UNE-EN 61907:2013, *Ingeniería de confiabilidad de las redes de comunicación*.
- 399 . UNE-EN 62198:2015, *Gestión de riesgos del proyecto. Directrices de aplicación*.
- 400 . UNE-EN 62308:2010, *Fiabilidad de los equipos. Métodos de evaluación de la fiabilidad*.
- 401 . UNE-EN 62309:2005, *Confiabilidad de productos que contienen componentes reutilizados. Requisitos para funcionalidad y ensayos*.
- 402 . UNE-EN 62347:2010, *Directrices para especificaciones de confiabilidad de sistemas*.
- 403 . UNE-EN 62402:2011, *Gestión de la obsolescencia. Guía de aplicación*.
- 404 . UNE-EN 62429:2012, *Crecimiento de la fiabilidad. Ensayos de esfuerzo para revelar fallos infantiles en sistemas complejos únicos*.
- 405 . UNE-EN 62551:2014, *Técnicas de análisis de la confiabilidad. Técnicas de redes de Petri*.
- 406 . UNE-EN 62628:2015, *Guía sobre la confiabilidad del software*.
- 407 . UNE-EN 62740:2015, *Análisis de causa raíz (RCA)*.
- 408 . UNE-EN 62741:2015, *Demostración de los requisitos de confiabilidad. El caso de confiabilidad*.
- 409 . UNE-IEC 60300-3-10:2007, *Gestión de la confiabilidad. Parte 3-10: Guía de aplicación. Mantenibilidad. (IEC 60300-3-10:2001)*.
- 410 . Uriel E., (2913), *Contraste de hipótesis en el modelo de regresión múltiple*, Universidad de Valencia.
- 411 . Ushakov, I. A. (1994), *Handbook of reliability engineering*, John Wiley & Sons.
- 412 . Valis, D., Vintr, Z., and Koucky, M., (2010), "Contribution to reliability analysis of highly reliable items", *Theory & Applications*, Vol 1., pp. 239.
- 413 . Volovoi, V. (2004), "Modeling of system reliability Petri nets with aging tokens", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 84 No. 2, pp 149-161.

- 414 . Wang, P. and Coit, D.W. (2005), "Repairable systems reliability trend tests and evaluation", *Proceedings of annual IEEE reliability and maintainability symposium, 2005*, pp. 416-421.
- 415 . Weckman, G.R., Shell, R.L. and Marvel, J.H. (2001), "Modeling the reliability of repairable systems in the aviation industry", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 40 No. 1-2, pp. 51-63.
- 416 . Wood, A. (1996), *Software reliability growth models*, Tandem technical report, 96(130056).
- 417 . Wu, W., Ma, J. and Liu, L. (2011), "Research on FFOP prediction approach of a pulse generator based on Homogeneous Poisson process", *Reliability, Maintainability and Safety (ICRMS), 2011 9th International Conference on*, pp. 334-338.
- 418 . Xie, M. and Ho, S.L. (1999), "Analysis of repairable system failure data using time series models", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol. 5 No. 1, pp. 50-61.
- 419 . Xu, D., and Zhao, W. (2005), "Reliability prediction using multivariate degradation data", *IEEE Reliability and Maintainability Symposium, 2005. Proceedings. Annual*, pp. 337-341.
- 420 . Xu, Z., Hong, Y., Meeker, W. Q., Osborn, B. E., and Illouz, K. (2016), "A Multi-level Trend-Renewal Process for Modeling Systems with Recurrence Data", *Technometrics*, (just-accepted), 00-00.
- 421 . Yanez, M., Joglar, F., and Modarres, M. (2002), "Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience", *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 77 No. 2, pp. 167-180.
- 422 . Yang, Q., Zhang, N., and Hong, Y. (2013), "Reliability analysis of repairable systems with dependent component failures under partially perfect repair", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 62 No. 2, pp. 490-498.
- 423 . Yépez, A. A., and López, L. R. (2007), "Análisis de fiabilidad de sistemas aplicando técnicas de crecimiento de fiabilidad del software", *Revista de Procesos y Métricas de las tecnologías de la información*, Vol. 4 No. 3, pp. 65-73.
- 424 . Yongqin, H., and Xishi, W., (1996), "The reliability and performability of a repairable and degradable ATP system", *Vehicular Technology Conference, 1996. Mobile Technology for the Human Race., IEEE 46th*, Vol. 3, pp. 1609-1612.
- 425 . Yu, F. W. and Chan, K. T. (2012), "Assessment of operating performance of chiller systems using cluster analysis", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 53, pp. 148-155.
- 426 . Zapata, C. J., (2011), *Confiabilidad en Ingeniería*, Universidad Tecnológica de Pereira.
- 427 . Zapata, C. J., Silva, S. C., Gonzalez, H. I., Burbano, O. L., and Hernández, J. A. (2008), "Modeling the repair process of a power distribution system", *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES*, pp. 1-7.
- 428 . Zapata, C.J., Torres, A., Kirschen, D.S. and Rios, M. A. (2009), "Some common misconceptions about the modeling of repairable components", *Proceedings of IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009 (PES '09)*, pp. 1-8.

- 429 . Zhang, X., and Wang, Y. (2010), "Estimation of Structural Reliability for Exponential Strength and Multivariate Exponential Distribution Stress", *Computational Intelligence and Software Engineering (CiSE), 2010 International Conference on IEEE*, pp. 1-4.
- 430 . Zhang, X., Ning, Y., and Meng, G. (2013), "Delayed renewal process with uncertain interarrival times", *Fuzzy Optimization and Decision Making*, Vol. 12 No. 1, pp. 79-87.
- 431 . Zhao, M., and Xie, M. (1996), "On maximum likelihood estimation for a general non-homogeneous Poisson process", *Scandinavian journal of statistics*, pp. 597-607.
- 432 . Zhu, L., Sun, J., Tong, X., and Srivastava, D. K. (2010), "Regression analysis of multivariate recurrent event data with a dependent terminal event", *Lifetime data analysis*, Vol. 16 No. 4, pp. 478-490.

Tabla de fractiles de  $X^2$  (IEC 60605-4)

v	$\alpha$			
	0,050	0,100	0,900	0,950
2	0,10	0,21	4,61	5,99
4	0,71	1,06	7,78	9,49
6	1,64	2,20	10,64	12,59
8	2,73	3,49	13,36	15,51
10	3,94	4,87	15,99	18,31
12	5,23	6,30	18,55	21,03
14	6,57	7,79	21,06	23,68
16	7,96	9,31	23,54	26,30
18	9,39	10,86	25,99	28,87
20	10,85	12,44	28,41	31,41
22	12,34	14,04	30,81	33,92
24	13,85	15,66	33,20	36,42
26	15,38	17,29	35,56	38,89
28	16,93	18,94	37,92	41,34
30	18,49	20,60	40,26	43,77
32	20,07	22,27	42,58	46,19
34	21,66	23,95	44,90	48,60
36	23,27	25,64	47,21	51,00
38	24,88	27,34	49,51	53,38
40	26,51	29,05	51,81	55,76
42	28,14	30,77	54,09	58,12
44	29,79	32,49	56,37	60,48
46	31,44	34,22	58,64	62,83
48	33,10	35,95	60,91	65,17
50	34,76	37,69	63,17	67,50
52	36,44	39,43	65,42	69,83
60	43,19	46,46	74,40	79,08
62	44,89	48,23	76,63	81,38
70	51,74	55,33	85,53	90,53
72	53,46	57,11	87,74	92,81
80	60,39	64,28	96,58	101,88
82	62,13	66,08	98,78	104,14
90	69,13	73,29	107,57	113,15
92	70,88	75,10	109,76	115,39

100	77,93	82,36	118,50	124,34
110	86,79	91,47	129,39	135,48
120	95,70	100,62	140,23	146,57
130	104,66	109,81	151,05	157,61
140	113,66	119,03	161,83	168,61
150	122,69	128,28	172,58	179,58
160	131,76	137,55	183,31	190,52
170	140,85	146,84	194,02	201,42
180	149,97	156,15	204,70	212,30
190	159,11	165,49	215,37	223,16
200	168,28	174,84	226,02	233,99
$z_{\alpha}$	-1,64	-1,28	+1,28	+1,64

Linear interpolation of intermediate values is sufficiently accurate. Values for  $v = 2r + 2$  for various integer  $r$  values are included. For higher values of  $v$ , use  $\chi_{\alpha}^2(v) = \{(z_{\alpha} + \sqrt{2v-1})^2\} / 2$ , where  $z_{\alpha}$  is the corresponding standardized normal variate of the Gaussian (normal) distribution ( $\alpha$ -fractile) given at the foot of each column. See Johnson et al. (1994) for additional information [3].

**Tabla de valores críticos  $C_{0,90}^2(M)$  para ensayo bondad de ajuste  
Cramer-von-Mise (IEC 61710)**

$M$	Critical value of statistic $C_{0,90}^2(M)$
3	0,154
4	0,155
5	0,160
6	0,162
7	0,165
8	0,165
9	0,167
10	0,167
11	0,169
12	0,169
13	0,169
14	0,169
15	0,169
16	0,171
17	0,171
18	0,171
19	0,171
20	0,172
30	0,172
≥60	0,173

NOTE 1 For time terminated tests,  $M = N$ .

NOTE 2 For failure terminated tests,  $M = N-1$ .

### Test de bondad de ajuste K-S (STATGRAPHICS)

Esta prueba compara la distribución de acumulación de los datos, a la distribución de acumulación ajustada. Se evalúa la distribución de acumulación ajustada en cada uno de los datos;

$$Z_{(i)} = \hat{F}(X_{(i)})$$

y entonces calcula y muestra el máximo de las distancias de la CDF empírica por encima de la CDF ajustada;

$$D^+ = \max_i \left\{ \frac{i}{n} - z_{(i)} \right\}$$

y el máximo de las distancias de la CDF empírica por debajo de la CDF ajustada;

$$D^- = \max_i \left\{ z_{(i)} - \frac{i-1}{n} \right\}$$

La estadística Kolmogorov-Smirnov es la más grande de las dos distancias;

$$D = \max(D^+, D^-)$$

El criterio empleado en estos ensayos es rechazar  $H_0$  con un 5% de nivel de significación si  $D > D_{crítico}$ , con;

$$D_{crítico} = 1.36/\sqrt{n}$$

### Test de tendencia de Laplace $U$ (EIC 60605-6)

Para ensayo terminado por tiempo;

$$U = \frac{\sum_{i=1}^r T_i - r \frac{T^*}{2}}{T^* \sqrt{\frac{r}{12}}}$$

Para ensayo terminado por fallo;

$$U = \frac{\sum_{i=1}^r T_i - (r-1) \frac{T_r}{2}}{T_r \sqrt{\frac{r-1}{12}}}$$

Siendo:

- $r$  el número total de fallos a considerar
- $T^*$  el tiempo total del ensayo terminado por tiempo
- $T_r$  el tiempo total del ensayo terminado por fallo
- $T_i$  el tiempo acumulado del ensayo a considerar en el fallo  $i$ -enésimo

Con la hipótesis de crecimiento cero (es decir, los tiempos de fallo siguen un proceso homogéneo de Poisson, HPP), el estadístico  $U$  se distribuye aproximadamente según una distribución exponencial tipificada de media 0 y desviación 1. Un ensayo bilateral para crecimiento positivo o negativo con el nivel de significación  $\alpha$  tiene los valores críticos  $u_{1-\alpha/2}$  y  $-u_{1-\alpha/2}$ , donde  $u_{1-\alpha/2}$  es el percentil  $(1-\alpha/2) \times 100\%$  de la distribución normal tipificada. Si:

$$-u_{1-\alpha/2} < U < u_{1-\alpha/2}$$

entonces no hay evidencia de crecimiento de la fiabilidad positivo o negativo al nivel de significación  $\alpha$ . En este caso se acepta la hipótesis de distribución exponencial de los tiempos entre fallos sucesivos (o un proceso de Poisson homogéneo HPP) con el nivel de significación  $\alpha$ . Los valores críticos  $u_{1-\alpha/2}$  y  $-u_{1-\alpha/2}$  corresponden a un ensayo unilateral para crecimiento positivo o negativo, respectivamente, con el nivel de significación  $\alpha/2$ . Para los niveles de significación requeridos hay que elegir los valores críticos adecuados de la tabla de percentiles de la distribución normal tipificada:

$\alpha$	Valor de $U_\alpha$
0,025	2,24
0,050	1,96
0,100	1,64

Valores críticos estadístico  $U$

**Test de tendencia RAT (STATGRAPHICS)**

Para la muestra  $q$ , sea  $X_i$  el  $i$ -enésimo tiempo entre fallos. Sea  $R_q$  el número de veces que  $X_i < X_j$  para  $i = 1, \dots, n_q - 1$  y  $j = i + 1, \dots, n_q$ , el test estadístico;

$$Z_q = \frac{R_q + \frac{1}{2} - \frac{n_q(n_q - 1)}{4}}{\sqrt{\frac{(2n_q + 5)(n_q - 1)n_q}{72}}}$$

se compara con una distribución norma estándar y se calcula el P-valor de  $P_q$ . Para combinar los resultados de la prueba, se utiliza la prueba compuesta de Fisher, que calcula;

$$\chi^2 = \sum_{q=1}^k -2\ln(P_q)$$

que se compara con una distribución de chi-cuadrado con  $2k$  grados de libertad.

### Test de tendencia Mil-Hdbk-189 (STATGRAPHICS)

Para la muestra truncada por tiempo, el test es;

$$\chi_q^2 = 2 \sum_{i=1}^{n_q} \ln\left(\frac{T_q}{t_{qi}}\right)$$

que se compara con una distribución de chi-cuadrado con  $2n_q$  grados de libertad.

Para la muestra truncada por fallo, el test es;

$$\chi_q^2 = 2 \sum_{i=1}^{n_q-1} \ln\left(\frac{T_q}{t_{qi}}\right)$$

que se compara con una distribución de chi-cuadrado con  $2(n_q - 1)$  grados de libertad.

### Coefficiente de correlación de Pearson (STATGRAPHICS)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

$$t = \frac{(n - 2)r^2}{1 - r^2}$$

El  $t$  estadístico se compara con una  $t$  distribución con  $n-2$  grados de libertad.

### Coefficiente de determinación $R^2$

$$R^2 = r^2$$

**Distribución exponencial (STATGRAPHICS)**

$$\text{PDF; } f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

Con parámetro  $\lambda > 0$ , la media es  $1/\lambda$  y la varianza  $1/\lambda^2$ .

**Distribución Logística generalizada (STATGRAPHICS)**

$$\text{PDF; } f(x) = \frac{\gamma}{\kappa} \frac{e^{(-\frac{x-\mu}{\kappa})}}{(1 + e^{(-\frac{x-\mu}{\kappa})})^{1+\gamma}}$$

Con parámetros; localización  $\mu$ , escala  $\kappa > 0$  y forma  $\gamma > 0$ .

Media =  $\mu + [0,5226 + \psi(\gamma)]\kappa$ , donde  $\psi(z)$  es la función digamma.

$$\text{Varianza} = \left[\frac{\pi^2}{6} + \psi'(\gamma)\right]\kappa^2$$

**Distribución log-normal 3 parámetros (STATGRAPHICS)**

$$\text{PDF; } f(x) = \frac{1}{(x-\theta)\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(\ln(x-\theta)-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Con parámetros; localización  $\mu$ , escala  $\sigma > 0$  y umbral  $\theta$ .

$$\text{Media} = \theta + e^{\frac{\mu+\sigma^2}{2}}$$

$$\text{Varianza} = e^{2\mu+\sigma^2}(e^{\sigma^2} - 1)$$

**Regresión Simple, estimadores de mínimos cuadrados (STATGRAPHICS)**

$$\widehat{\beta}_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}}$$

$$\widehat{\beta}_0 = \bar{y} - \widehat{\beta}_1 \bar{x}$$

donde;

$$S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

**Bondad de ajuste ANOVA (STATGRAPHICS)**

$$SSR = \widehat{\beta}_1^2 S_{xx}$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \widehat{\beta}_0 - \widehat{\beta}_1 x_i)^2$$

$$MSE = \frac{SSE}{n - 2}$$

$$\text{Radio } F; F = \frac{SSR}{MSE}$$

$$\text{Bondad de ajuste; } SSLOF = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^{n_j} (\bar{y}_j - \hat{y}_{ij})^2$$

$$\text{Error Puro; } SSPE = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2$$

$$\text{Radio } F \text{ para bondad de ajuste; } F = \frac{SSLOF/(c-2)}{SSPE/(n-c)}$$

donde  $c$  = número de valores únicos de  $X$ .

#### Métricas de Análisis de Conglomerados (STATGRAPHICS)

$$\text{Distancia Euclidiana Cuadrada; } d(x, y) = \sum_{i=1}^p (x_i - y_i)^2$$

$$\text{Distancia Euclidiana; } d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^p (x_i - y_i)^2}$$

$$\text{Distancia Bloque Habitacional; } d(x, y) = \sum_{i=1}^p |x_i - y_i|$$