

## **Estimación no paramétrica de la fiabilidad de un transformador con eventos recurrentes**

**Nonparametric estimation of the reliability of a transformer with recurrent events**

**Rodríguez Palero M<sup>1</sup>, Onieva Giménez L<sup>2</sup>, Gutiérrez Moya E<sup>3</sup>, Grosso de la Vega R<sup>4</sup>**

**Resumen** El objetivo del trabajo desarrollado es la estimación de la función de fiabilidad de un transformador de potencia de una subestación eléctrica de media tensión. Para ello se ha realizado una estimación no paramétrica usándose tres estimadores diferentes: un estimador para sucesos recurrentes en presencia de correlación para el caso particular de eventos independientes e idénticamente distribuidos, un estimador no paramétrico de máxima verosimilitud y un estimador según un modelo gamma de fragilidad. Este trabajo se engloba dentro de un proyecto cuyo objetivo es realizar planes de mantenimiento que mejoren la fiabilidad del sistema eléctrico en su conjunto aplicando técnicas de mantenimiento basado en fiabilidad (RCM).

**Palabras clave:** Fiabilidad, modelos de eventos recurrentes, transformador.

---

<sup>1</sup> María Rodríguez Palero (✉)  
Grupo Ingeniería de Organización. Escuela de Ingenieros, Universidad de Sevilla, C/ Camino de los Descubrimientos s/n, Isla de la Cartuja, 41092 Sevilla, Spain  
e-mail: mariarodriguez@us.es

<sup>2</sup> Luis Onieva Giménez  
Grupo Ingeniería de Organización. Escuela de Ingenieros, Universidad de Sevilla, C/ Camino de los Descubrimientos s/n, Isla de la Cartuja, 41092 Sevilla, Spain  
e-mail: onieva@esi.us.es

<sup>3</sup> Ester Gutierrez Moya  
Grupo Ingeniería de Organización. Escuela de Ingenieros, Universidad de Sevilla, C/ Camino de los Descubrimientos s/n, Isla de la Cartuja, 41092 Sevilla, Spain  
e-mail: egm@esi.us.es

<sup>4</sup> Rafael Grosso de la Vega  
Grupo Ingeniería de Organización. Escuela de Ingenieros, Universidad de Sevilla, C/ Camino de los Descubrimientos s/n, Isla de la Cartuja, 41092 Sevilla, Spain  
e-mail: rgrosso@us.es

**Abstract** This document summarizes the work carried out to estimate the reliability function of a power transformer substation medium voltage. To do this we used a nonparametric estimation, being used three different estimators: an estimator for recurring events in the presence of correlation for the particular case of independent events and identically distributed, a nonparametric estimator of maximum likelihood and an estimator according to a gamma frailty model. This paper belongs to a project to make plans maintenance to improve the reliability of the overall electrical system using techniques Reliability Centered Maintenance (RCM).

**Keywords:** Reliability, recurrent events model, transformer.

## 1.1 Introducción

En la actualidad, las empresas distribuidoras de energía se encuentran en un escenario cambiante. La distribución de la energía cambiará en un pequeño espacio de tiempo de su concepción tradicional a un nuevo paradigma. La situación que durante años ha sido el marco de actuación de las distribuidoras eléctricas, un gran productor e innumerables clientes cautivos, se prevé que va a desaparecer. El éxito de las distribuidoras actuales pasa por adaptarse a la nueva situación donde existirán muchos productores, más pequeños, e igualmente una infinidad de clientes, con exigencias mucho mayores en cuanto calidad y prestaciones del servicio. En este nuevo marco conceptual de la energía, las redes de distribución tradicionales empiezan a quedarse obsoletas. La distribución de la energía debe cambiar a nuevos conceptos para poder mantener y mejorar la calidad del servicio incorporando las nuevas tecnologías. Uno de los aspectos a incluir en esta nueva situación son las nuevas técnicas de gestión del mantenimiento. La Norma UNE-EN 13306:2011 ([www.aenor.es](http://www.aenor.es)) define la gestión del mantenimiento como todas las actividades que determinan los objetivos del mantenimiento, las estrategias y responsabilidades, y las realizan por medio de planificación del mantenimiento, control y supervisión del mantenimiento, mejora de los métodos en la organización incluyendo los aspectos económicos. Una de las claves en la mejora del servicio eléctrico es aumentar la continuidad del servicio eléctrico, siendo capaz de realizar un suministro de manera continuada en el tiempo, minimizando e incluso haciendo desaparecer las interrupciones de suministro a los clientes finales. Derivado de este objetivo, las subestaciones eléctricas deben aumentar sus índices de fiabilidad. Dado el gran alcance de la red de generación y de distribución de las redes eléctricas, se deben realizar acciones encaminadas a aumentar de manera global la fiabilidad de todos los componentes de la red.

El presente trabajo se engloba en uno de mayor envergadura cuyo objeto es evaluar la fiabilidad de las subestaciones eléctricas de distribución de media tensión a través de la aplicación de RCM (mantenimiento basado en fiabilidad). El presente documento recoge el trabajo que se ha desarrollado para la estimación de

la función de fiabilidad de un transformador de potencia, considerado elemento crítico en las subestaciones a través de una estimación no paramétrica. El objetivo es poder prever y realizar planes de mantenimiento que mejoren la fiabilidad obtenida.

## 1.2 Antecedentes

Como se ha comentado anteriormente este trabajo se engloba en un trabajo de mayor envergadura. En el desarrollo de dicho trabajo, se ha realizado la identificación de los bloques funcionales en los que puede dividirse una subestación. Una vez identificados esos componentes, se ha realizado un análisis de los diferentes modos de fallo que pueden ocurrir en cada elemento. Para la determinación de los elementos y fallos críticos se ha realizado un análisis modal de fallos y efectos, FMEA (Failure Modes and Effects Analysis). Esta metodología estudia para cada equipo del conjunto, el modo de fallo, sus causas y sus efectos. En el inicio de este trabajo se realizó dicho estudio quedando identificados los elementos críticos de la subestación. Una vez identificados los modos de fallo, se completó el estudio con un análisis preliminar de riesgos (PHA - Preliminary Hazard Analysis).

Tras estos trabajos se identificaron los elementos críticos en el funcionamiento de las subestaciones: el transformador de potencia y el interruptor. Así como los modos de fallo más frecuentes de dichos elementos críticos.

Se detalla a continuación la metodología utilizada para la estimación de la función de fiabilidad del transformador de potencia atendiendo a los fallos de mayor frecuencia, identificados como modo de fallo 1 y modo de fallo 2. El objetivo de esta comparación es poder identificar cuáles son los fallos que más influencia tiene en los valores de fiabilidad del sistema. Los modelos obtenidos podrán además ser utilizados para describir el riesgo de ocurrencia de un evento de interés.

## 1.3 Metodología

El análisis de la fiabilidad de un sistema engloba los conceptos, herramientas y técnicas destinadas a estudiar el tiempo de ocurrencia hasta un suceso. Estos estudios son ampliamente aplicados actualmente en las investigaciones científicas en diversos campos tales como la sanidad (González y Peña, 2004) o los mercados financieros (Fuentelsalz, 2004).

En el caso a tratar en este trabajo, asumiendo como instante inicial el instante inmediatamente posterior al primer fallo registrado, se consideran  $n$  tipos de modos de fallo en el transformador, los cuales se consideran independientes entre sí, se denomina mediante la variable aleatoria  $T_{ij}$  al tiempo de funcionamiento del transformador hasta el  $j$ -ésimo fallo para el  $i$ -ésimo modo de fallo. Esta variable

aleatoria tiene una función de probabilidad de fallo desconocida que se define según la ecuación (3.1).

$$F(t) = P(T_{ij} \leq t) \quad (3.1)$$

Otra forma de expresar la misma distribución es a través de la función de fiabilidad  $R(t)$ . La cual determina la probabilidad acumulada de que el suceso objeto de estudio tenga lugar después del instante  $t$ . Dicha distribución y la relación con la anterior, se definen según las ecuaciones (3.2) y (3.3).

$$R(t) = P(T_{ij} \geq t) \quad (3.2)$$

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (3.3)$$

La función de probabilidad de fallo  $F(t)$  puede expresarse también a través de su función de densidad de fallos  $f(t)$  según se indica en (3.4)

$$F(t) = \int_0^t f(u) du \quad (3.4)$$

Dicha función de densidad puede también relacionarse con las anteriores según la expresión (3.5), (Fuentelsaz et al., 2004),

$$f(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \left( \frac{P(t \leq T_{ij} < t + \Delta t)}{\Delta t} \right) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{-dS(t)}{dt} \quad (3.5)$$

Otra de las funciones de interés es la función de riesgo acumulada  $H(t)$ , definida en función de las anteriores como se expresa en las ecuaciones (3.6) y (3.7), (Fuentelsaz et al., 2004),

$$H(t) = \int_0^t h(u) du \quad (3.6)$$

siendo  $h(t)$  la función de tasa de fallos,

$$r(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0^+} \left( \frac{P(t \leq T_{ij} < t + \Delta t)}{\Delta t} \right) = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (3.7)$$

En los casos en los que un suceso de interés puede ser observado en más de una ocasión en cada individuo o sistema, deben utilizarse técnicas de estimaciones específicas para eventos recurrentes. Las técnicas para el análisis de fiabilidad difieren en el caso de que el comportamiento de las variables de estudio respecto a las covariables sigan una distribución de probabilidad conocida o no. En el caso en que la variable no se rige según una distribución de probabilidad conocida, debe utilizarse estimaciones no paramétricas. Por ello, la estimación de la función de supervivencia mediante métodos tradicionales, tales como el estimador producto límite de Kaplan-Meier (1958) u otros más modernos, dejan de ser de utilidad ya que tratan eventos únicos, además de independencia en la ocurrencia de sucesos.

En el presente trabajo se realiza una estimación no paramétrica del tiempo entre la ocurrencia de fallos para un transformador de potencia, suponiendo que son eventos recurrentes y existe interdependencia entre ellos. La variable de interés es

la variable aleatoria del tiempo transcurrido entre dos instantes en los que el transformador de potencia cambia su estado de disponible a no disponible asociado a cada modo de fallo. Se pretende estimar la función de fiabilidad del transformador.

Este problema ha sido abordado por diversos autores, Wang y Chang (1999) y Peña, Strawderman y Hollander (2001), donde se presentan distintos estimadores para la función de fiabilidad para eventos recurrentes.

Para determinar la fiabilidad del transformador se han utilizado los estimadores comentados anteriormente, los cuales se detallan con mayor profundidad en los siguientes apartados.

### ***1.3.1 Estimador Wang y Chang (1999)***

Estos autores proponen un estimador para el caso de eventos recurrentes en presencia de correlación, para el caso particular de que las observaciones sean independientes e idénticamente distribuidas. Los autores presentan un modelo de fragilidad donde el estimador para la función de fiabilidad viene dada por la expresión (5.1),

$$\hat{R}(t) = \prod_{T_j \in T, T_j \leq t} \left( 1 - \frac{d^*(T_j)}{R^*(T_j)} \right) \quad (5.1)$$

siendo  $d^*(t)$  la suma de las proporciones de los dispositivos cuyos tiempos de interocurrencia son iguales a  $t$  cuando hay al menos un fallo, y  $R^*(t)$  representa la media de los dispositivos que están en riesgo en el instante  $t$ .

### ***1.3.2 Estimadores Peña, Strawderman y Hollander (2001)***

Los autores Peña et al. (2001) presentan dos posibles estimadores. El primero es un estimador no paramétrico máximo-verosímil para un modelo bajo variables independientes e idénticamente distribuidas., denominado IIDPLE (Independent and Identically Product Limit Estimator). Este estimador es una extensión del estimador producto límite para eventos recurrentes a través de procesos contadores, y se expresa a través de dos funciones doblemente indexadas según escalas de tiempo: el tiempo calendario  $s$  y el tiempo de interocurrencia  $t$ . La expresión del estimador IIDPLE es la presentada en (5.2),

$$\hat{R}(t) = \prod_{w \leq t} \left( 1 - \frac{N(s, \Delta w)}{Y(s, w)} \right) \quad (5.2)$$

donde  $N(s, t)$  representa el número de eventos observados que ocurren en el intervalo de tiempo  $[0, s]$  cuyos tiempos de interocurrencia no superan las  $t$  unida-

des de tiempo, e  $Y(s, t)$  representa el número de eventos observados en el tiempo de calendario  $[0, s]$  cuyos tiempos de interocurrencia son al menos de  $t$  unidades de tiempo.

El segundo estimador propuesto por los mismos autores es utilizado para determinar la distribución de los tiempos de ocurrencia cuando los tiempos estén correlacionados según un modelo gamma de fragilidad con parámetros de forma y escala iguales a  $\alpha$  y desconocidos. El estimador propuesto sigue la expresión presentada en (5.3),

$$\hat{S}(s, t) = \left[ \frac{\hat{\alpha}}{\hat{\alpha} + \hat{h}_0(s, t)} \right]^{\hat{\alpha}} \quad (5.3)$$

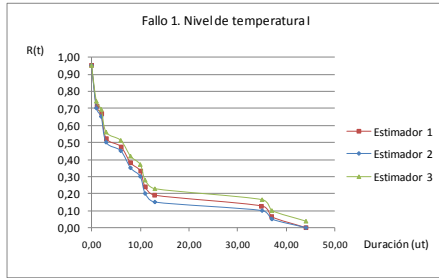
donde  $\hat{\alpha}$  y  $\hat{h}_0(s, t)$  son estimadores del parámetro de escala,  $\alpha$ , y de la función de riesgo acumulada marginal de  $h_0(t)$ , respectivamente.

## 1.4 Evaluación de la fiabilidad

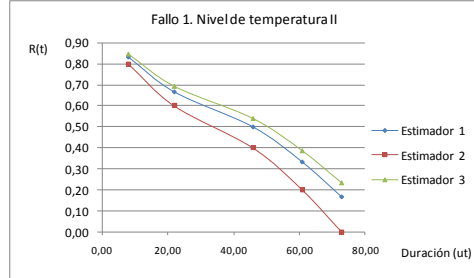
Para poder realizar las estimaciones deseadas, es necesario contar con una base de datos lo suficientemente extensa y depurada, lo cual repercutirá en una mayor exactitud de los resultados obtenidos. Para el transformador en estudio es necesario disponer de los tiempos de ocurrencia entre los sucesos o fallos, con la identificación de cada modo de fallo en cada ítem. Además deberá conocerse si la medida está censurada o no.

Por otra parte, para cada fallo ocurrido en el transformador en estudio, se analizó también un parámetro de control. El parámetro recogido es la temperatura del aceite en el último instante inmediatamente anterior a la ocurrencia del fallo. Para dicho parámetro se han definido tres niveles, nivel de temperatura I, II y III, de menor a mayor temperatura. Además, se practicaron pruebas de bondad de ajuste a los tiempos de fallo, pudiendo contrastar la idoneidad de las técnicas no paramétricas, siendo la hipótesis nula que la ley que sigue la variable aleatoria,  $T_j$ , es conocida. Al menos se utilizaron tres distribuciones: Normal, Exponencial y Weibull. Los resultados obtenidos permiten concluir la idoneidad de las técnicas propuestas (véase Tabla 4.1)

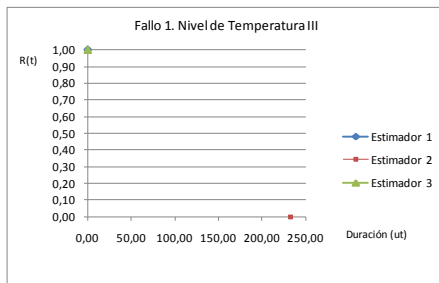
Como resultado de las estimaciones realizadas se ha obtenido la fiabilidad empírica del transformador según los tres estimadores para los dos modos de fallo más frecuentes ocurridos a diferentes niveles del parámetro de control utilizado, que en este caso es la temperatura del aceite del transformador (modo de fallo 1 y modo de fallo 2). Los resultados se presentan de forma gráfica para los dos tipos de fallo a los tres niveles de temperatura definidos, véanse las figuras 6.1 hasta la figura 6.6. Se muestran también los resultados obtenidos por nivel de temperatura para ambos modos de fallo de manera conjunta, véanse figuras 6.7, 6.8 y 6.9.



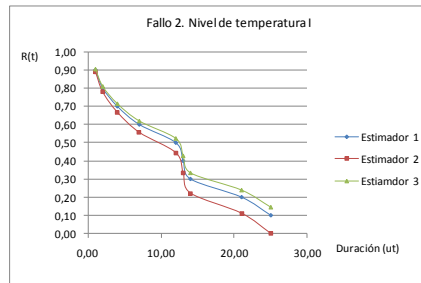
**Fig 4.1** Fiabilidad empírica del transformador, modo de fallo 1. Nivel de temperatura I



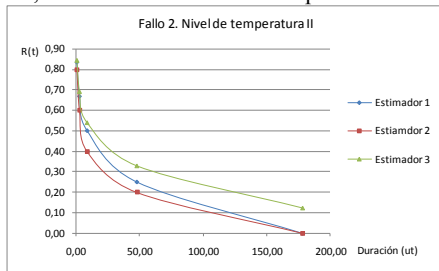
**Fig 4.2** Fiabilidad empírica del transformador, modo de fallo 1. Nivel de temperatura II



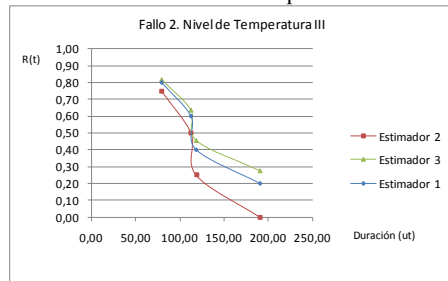
**Fig 4.3** Fiabilidad empírica del transformador, modo de fallo 1. Nivel temperatura III



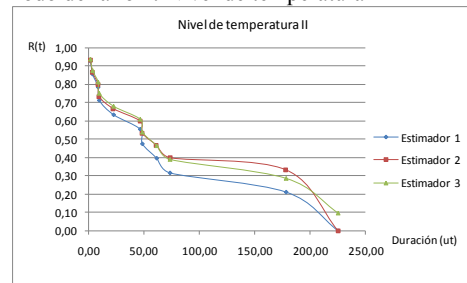
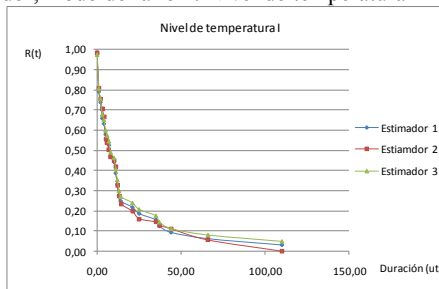
**Fig 4.4** Fiabilidad empírica del transformador, modo de fallo 2. Nivel de temperatura I

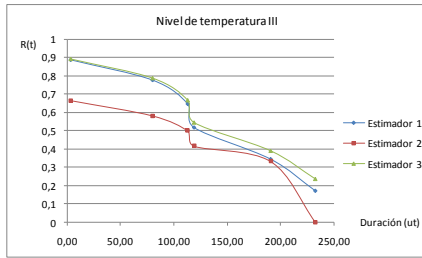


**Fig 4.5** Fiabilidad empírica del transformador, modo de fallo 2. Nivel de temperatura II



**Fig 4.6** Fiabilidad empírica del transformador, modo de fallo 2. Nivel de temperatura III





**Fig 6.9** Fiabilidad empírica del transformador. Nivel de temperatura III

## 1.5 Conclusiones

De los resultados obtenidos puede concluirse que a menores niveles de temperatura los tres estimadores utilizados dan resultados muy similares. Dicha coincidencia sugiere que los sucesos no tienen dependencia entre sí, ya que el estimador que puede recoger la dependencia de los sucesos produce el mismo resultado que los dos estimadores que suponen la interdependencia. Por el contrario a mayores niveles de temperatura los resultados obtenidos con cada estimador difieren bastante entre sí, con una mayor claridad al nivel de temperatura más elevado. Esto induce a pensar que los sucesos ocurridos a mayor nivel de temperatura son dependientes entre sí. De los resultados obtenidos se puede derivar que los fallos ocurridos en los equipos son sucesos recurrentes pero interdependientes entre sí, excepto cuando ocurren grandes fallos en los que se produce una relación de sucesos concatenados causa efecto que hacen que desaparezca la independencia.

## 1.6 Referencias

- Böhmer, PE (1912) Theorie de unabhängigen Wahrscheinlichkeiten, Rappports, Mémoires et Procès Verbaux du Septième Congrès International d'Actuaires.
- Fuentelsaz L, Gómez J, Polo Y (2004) Aplicaciones del análisis de supervivencia a la investigación en economía de la empresa. Cuadernos de Economía y Dirección de la Empresa. Núm. 19:081-114.
- González JR, Peña EA (2004) Estimación no paramétrica de la función de supervivencia para datos con eventos recurrentes. Rev. Esp. de Salud Pública, 78:189-199
- Kaplan A, Meier P (1958) Non-parametric estimation for incomplete estimations. Journal of the American Statistical Association, 53:457-481.
- Peña E, Strawderman R, Hollander M (2001) Nonparametric estimation with recurrent event data. Journal of the American Statistical Association 96:1299-1315.
- Wang MC, Chang SH (1999) Nonparametric estimation of a recurrent survival function. Journal of the American Statistical Association, 94:146-153.