

Mantenimiento y vida media en los sistemas eléctricos

MELCHOR-HERNÁNDEZ, César Leonardo *† & MOLINA-GARCÍA, Moisés

División de Ingeniería Electromecánica, Instituto Tecnológico Superior de Huatusco

Recibido Junio 29, 2017; Aceptado Agosto 06, 2017

Resumen

El envejecimiento de los equipos eléctricos es un proceso gradual cuya consecuencia son las fallas. Una manera de evitar las fallas y extender la vida del equipo es mediante los mantenimientos. Dichos mantenimientos deben de ser aplicados de acuerdo a las fallas estadísticas del equipo, evitando los mantenimientos recomendados por los fabricantes, por experiencia del personal, los programados anualmente, etc., que muchas veces son más costosos a largo plazo. Además del mantenimiento, el cálculo de la vida media en los equipos eléctricos es de importancia para estimar su condición, envejecimiento del sistema, ajustar la política de mantenimiento, etc. La literatura existente sobre mantenimientos y vida media utiliza modelos complejos de aplicar, uso de parámetros adicionales, estimaciones subjetivas, falta de datos reales, uso de métodos numéricos, de probabilidad de gráficas, de regresión lineal, etc., cuyas desventajas son estimaciones inexactas, problemas de existencia, unicidad, convergencia y varianzas grandes. En este artículo se presenta un estado del arte sobre las políticas de mantenimiento en los sistemas eléctricos de potencia.

Fallas; Mantenimiento; Probabilidad; Sistemas eléctricos de potencia.

Abstract

The aging of electrical equipment is a gradual process whose consequence is failure. One way to avoid faults and extend the life of the equipment is through maintenance. Such maintenance must be applied according to the statistical failures of the equipment, avoiding the maintenance recommended by the manufacturers, by personnel experience, those programmed annually, etc., which are often more expensive in the long term. In addition to maintenance, the calculation of the half-life in electrical equipment is important for estimating its condition, aging system, adjusting maintenance policy, etc. Existing literature on maintenance and half-life uses complex models of application, use of additional parameters, subjective estimates, lack of real data, use of numerical methods, graph probability, linear regression, etc., whose disadvantages are inaccurate estimates, problems of existence, uniqueness, convergence and large variances. This article presents a state of the art on maintenance policies in electric power systems.

Maintenance; Probability; Electrical power systems

Citación: MELCHOR-HERNÁNDEZ, César Leonardo & MOLINA-GARCÍA, Moisés. Mantenimiento y vida media en los sistemas eléctricos. Revista de Sistemas Computacionales y TIC's. 2017, 3-9:51-60

*Correspondencia al Autor Correo Electrónico (cesar.melchor@itshuatusco.edu.mx)

† Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

El envejecimiento de los equipos es un hecho de la vida en los sistemas eléctricos de potencia, aunque puede haber diferentes causas de envejecimiento para diferentes tipos de equipos. El envejecimiento puede ser causado por el deterioro del aislamiento de los componentes eléctricos (tales como: transformadores y reactores), daños por fatiga de las partes mecánicas (generadores y motores), o la erosión de estructuras metálicas (revestimiento de cables subterráneo).

Al igual que los seres humanos, cualquier equipo va a experimentar las etapas de: infancia, funcionamiento normal y el desgaste. Conforme una pieza de equipo envejece, este falla con más frecuencia, necesita tiempos más largos para la reparación, y eventualmente alcanza su fin de vida. La consecuencia directa del envejecimiento de los equipos es un alto riesgo para el sistema, debido a la mayor probabilidad de falla y posible daño del sistema, siguiendo con las fallas de fin de vida. Las compañías normalmente llevan a cabo reparaciones preventivas e inspecciones regulares. Las actividades de mantenimiento pueden, hasta cierto punto, extender la vida de los equipos pero podría ser muy costoso para los equipos en su etapa final de vida.

Un acuerdo entre el mantenimiento y el reemplazo debe ser considerado cuidadosamente. Un equipo realiza funciones técnicas y económicas en los sistemas eléctricos de potencia. Hay tres conceptos diferentes de tiempo de vida para los equipos del sistema eléctrico de potencia: Tiempo de vida físico: Una pieza de equipo comienza a funcionar a partir de su condición de nuevo a un estado en el que ya no puede ser utilizado en su estado de funcionamiento normal y debe ser retirado. El mantenimiento preventivo puede prolongar su tiempo de vida físico. Tiempo de vida técnico:

Una pieza de equipo puede tener que ser reemplazado debido a razones técnicas aunque todavía se pueda utilizar físicamente. Por ejemplo, una nueva tecnología es desarrollada para un tipo de equipo y los fabricantes ya no producirán piezas de repuesto. Esto puede resultar en una situación en donde las compañías no puedan obtener las partes necesarias ó estas se vuelvan demasiado caras para el mantenimiento.

Los relés de protección mecánica y convertidores de arco de mercurio en los sistemas de alto voltaje de corriente directa (HVDC) son ejemplos de la categoría de tiempo de vida técnico. Tiempo de vida económico: Una pieza de equipo ya no es económicamente valiosa, aunque todavía puede ser utilizable físicamente. Existen dos métodos para estimar el tiempo de vida económico: 1) El valor capital de cualquier equipo del sistema eléctrico de potencia es devaluado cada año.

Una vez que el valor del capital restante se aproxima a cero, el equipo llega al final de su tiempo de vida económico. 2) Además del devaluó del costo capital del equipo, los costos de operación y mantenimiento son considerados. Los costos de operación y mantenimiento suelen aumentar con el tiempo conforme el equipo envejece y pueden llegar a ser excesivos. Ellos pueden incluso superar el valor devaluado del equipo. Podría ser rentable retirar y reemplazar el equipo antes de que su valor capital llegue a cero en lugar de continuar haciendo frente a los altos costos de operación y mantenimiento.

I. Estado del arte

El propósito del mantenimiento es extender el tiempo de vida del equipo, o al menos el tiempo promedio para la siguiente falla cuya reparación puede ser costosa. Además, se espera que las políticas de mantenimiento eficaces puedan reducir la frecuencia de las interrupciones del servicio y las muchas consecuencias indeseables de tales interrupciones.

El mantenimiento afecta claramente la confiabilidad de los componentes y del sistema: si se hace poco, esto puede dar lugar en un número excesivo de fallas costosas y un desempeño deficiente del sistema y, por lo tanto, la confiabilidad es reducida; si se hace con demasiada frecuencia, la confiabilidad puede mejorar pero el costo de mantenimiento aumentará considerablemente. En un esquema rentable, los dos gastos deben estar equilibrados.

El mantenimiento es sólo una de las herramientas para asegurar satisfactoriamente la confiabilidad de los componentes y del sistema. Otros incluyen el aumento de la capacidad del sistema, reforzando la redundancia y empleando componentes más confiables. Al momento, sin embargo, cuando estos enfoques están muy limitados, las compañías eléctricas están obligadas a obtener el máximo provecho de los dispositivos que ya poseen a través de políticas de operación más eficaces, incluida la mejora de las políticas de mantenimiento.

El mantenimiento puede ser categorizado dentro de tres grupos: (1) Mantenimiento correctivo (MC), (2) Mantenimiento preventivo (MP) y (3) Mantenimiento predictivo (MPd). MC son acciones llevadas a cabo cuando el sistema falla. MP es una política de mantenimiento basado en la sustitución, la revisión o la re-fabricación de un sistema a intervalos de tiempo fijos o adaptativos, independientemente de su condición actual. La política periódica de MP puede ser considerada como la política de mantenimiento más común en el que una pieza de un equipo se mantuvo preventivamente a intervalos de tiempo fijos, independientemente del historial de fallas de la pieza de equipo (E.Pan, 2010, D. Kim. (2010), F.G. Badia. (2002), V. Mijailovic. (2003)). El MPd es un enfoque preventivo avanzado donde el mantenimiento es aplazado hasta que sea realmente necesario. El objetivo de este enfoque es monitorear la pieza del equipo con el fin de detectar fallas incipientes antes de que puedan causar que la parte falle X. Jiang. (2013).

Esta estrategia de mantenimiento ha sido implementada como un mantenimiento basado en la condición del equipo donde ciertos índices de su desempeño son monitoreados continuamente o periódicamente (D. Chen y K. Trivedi. (2002), M. Marseguerra et al. (2002), Z. Tian y H. Liao. (2011)).

Las políticas de MP han sido consideradas por muchos investigadores como una de las políticas de mantenimiento más estudiadas (W. Wang. (2012), P. Bruns. (2002), C. T. Chen et al. (2003), G. Cavory et al.). Para la mayoría de las plantas industriales, el MP es todavía una política de mantenimiento dominante ya que es fácil de implementar y a muchos equipos no se les puede monitorear su condición (A. Kobbacy y P. Murthy. (2008)).

Una definición más comprensiva es: la política de MP es un mantenimiento planificado que reduce o elimina el deterioro acumulado del componente, y se ejecuta de acuerdo a un calendario planeado. En la literatura de confiabilidad y mantenimiento, las políticas de MP se clasifican comúnmente como (S. Sheu y C. Chang. (2009)): MP periódico y MP secuencial. El MP periódico se ejecuta en múltiplos enteros de un cierto intervalo de tiempo fijo. Por otro lado, el MP secuencial se implementa a intervalos de longitudes de tiempo desiguales. El MP secuencial es más adecuado cuando la pieza del equipo requiere un mantenimiento más frecuente a medida que envejece, mientras que el MP periódico es más conveniente para programar.

El mantenimiento puede ser también categorizado de acuerdo a su efectividad de la siguiente manera (S. Wu y M. J. Zuo. (2010)): perfecto, mínimo e imperfecto. El MP perfecto restaura el sistema a un estado de "tan bueno como nuevo". El MP mínimo restaura el sistema a un estado en que estaba antes de la acción del mantenimiento, o "tan malo como viejo".

Un MP imperfecto restaura al sistema a cualquier estado entre “tan bueno como nuevo” y “tan malo como viejo”. La Figura 1 muestra la tasa de falla de cualquier dispositivo ante la efectividad de estos tres mantenimientos. En la práctica, el MP es generalmente imperfecto.

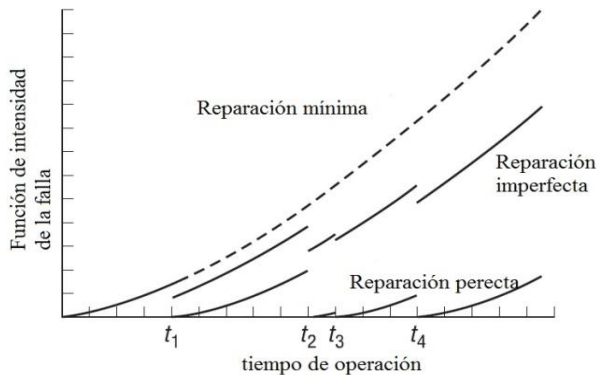


Figura 1 Acciones de reparación (mínima, imperfecta y perfecta) en cualquier dispositivo

Fuente: *Handbook of reliability engineering*, 2003

El MP imperfecto ha crecido recientemente como un tema popular para los investigadores así como para aplicaciones industriales (M. Y. You et al. (2011)). Control-limit preventive maintenance policies for components subject to imperfect preventive maintenance and variable operational conditions. *Reliab. Eng. Syst. Saf*, 96, 590-598, G. Levitin y A. Lisniaski. (2000), Y. Liu y H. Huang. (2010), P. Do et al. (2015), M. Y. You et al. (2011)).

Para modelar el impacto del MP imperfecto, se utiliza generalmente la función de la tasa de falla del sistema bajo mantenimiento, como se muestra en la Figura 2. De hecho, la tasa de falla por lo general es más informativa sobre las causas del mecanismo de la falla que las otras distribuciones representantes del tiempo de vida. Por esta razón, la consideración de la tasa de falla puede ser el método dominante para el modelado del MP imperfecto.

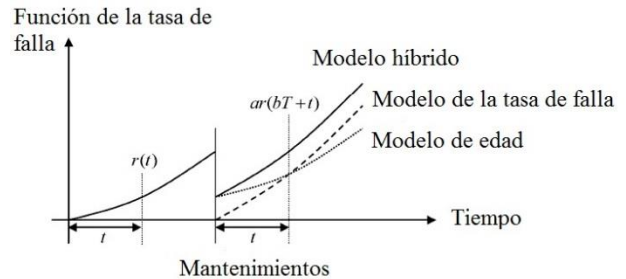


Figura 2 Diferentes modelos del mantenimiento en función de la tasa de falla del equipo

Fuente: *An extended periodic imperfect preventive maintenance model with age-dependent failure type*, 2009

En 1995, el subcomité IEEE de aplicación de métodos de probabilidad estableció un grupo de trabajo para investigar el estado actual de las estrategias de mantenimiento en la industria de la energía. El resultado de esta investigación fue reportado en (IEEE Task Force. (2001)).

La principal conclusión de ésta investigación fue que el mantenimiento a intervalos fijos es el más frecuentemente utilizado, y las estrategias basadas en el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) son consideradas cada vez más para la aplicación. Esto puede ser observado recientemente en algunas aplicaciones del RCM en los sistemas de transmisión (J. H. Heo et al. (2011)), sistemas de distribución (P. Dehghanian et al. (2013)), y turbinas de viento (K. Fischer et al. (2012)), sólo por mencionar algunos ejemplos.

También, otros estudios han propuesto modelos de mantenimiento probabilístico basados en diagrama de estados. Los diagramas de estado pueden ser convertidos directamente en modelos matemáticos llamados modelos de Markov los cuales pueden ser fácilmente resueltos usando métodos estándar y ecuaciones analíticas (H. Ge et al. (2007), F. Yang et al. (2008), M. Welte. (2009), S. K. Beygunawardane y P. Jirutitijaroen. (2011)).

La implementación de los programas RCM representan un paso significativo en la dirección de “conseguir el máximo rendimiento” de los equipos instalados. Sin embargo, el enfoque sigue siendo heurístico, y su aplicación requiere de experiencia y juicio en cada aplicación. Además, puede tomar un largo tiempo antes de que suficientes datos sean recopilados para hacer tales juicios. Por esta razón, se han propuesto varios modelos matemáticos para ayudar a la programación del mantenimiento. De hecho, la literatura sobre modelos de mantenimiento se ha vuelto bastante extensa (IEEE Task Force. (2001)).

Un número de modelos matemáticos de MP han sido desarrollados con el fin de describir el impacto de los MP imperfectos en la tasa de falla de los sistemas reparables. Estos modelos de MP pueden ser clasificados dentro de tres grupos (S. Wu y M. J. Zuo. (2010)): modelos de reducción de edad, modelos de tasa de falla, e híbrido de ambos.

Los modelos de reducción de edad asumen que hay una reducción efectiva de la edad justo después de una acción de MP, y que la tasa de falla continúa siendo una función de la edad efectiva (M. Malik y M. Zuo. (1979), R. Canfield. (1986), S. Wu y C. Clements-Croome. (2005)). Los modelos de la tasa de falla suponen que justo después de una acción de MP, la tasa de falla se reduce a cero, y luego aumenta más rápido que como lo hizo en el intervalo de MP anterior (R. Canfield. (1986), S. Wu y C. Clements-Croome. (2005), T. Nakagawa. (1998), J. K. Chan y L. Shaw. (1993)).

En los modelos híbridos, la tasa de falla se convierte en una combinación de ambos modelos de reducción de edad y los modelos de tasa de falla (D. Lin et al. (2000), F. Zhang y A. K. S. Jardine. (1998)).

Los modelos de MP imperfectos han hecho una gran contribución a éste campo de investigación, sin embargo, en la práctica el principal problema es como tomar decisiones o hacer inferencias acerca de los factores desconocidos envueltos en estos modelos. Numerosos enfoques han sido propuestos basados en adivinar los valores de estos factores por un método subjetivo, el cual está bien, siempre que haya suficiente conocimiento experto para llevar a cabo esta tarea apropiadamente.

Otros enfoques están basados en estimar estos factores de los datos observados. Éstas técnicas de inferencia estadística son muy buenas si existen suficientes datos para estimar estos factores exactamente. Sin embargo, en la práctica, hay muy pocos datos disponibles en muchas áreas del mantenimiento y reemplazo (A. Kobbacy y P. Murthy. (2008)). En la industria de los sistemas eléctricos de potencia, el estudio reportado en (IEEE Task Force. (2001)) concluyó que los modelos matemáticos, determinísticos o probabilísticos, son todavía raramente usados porque ellos carecen de la simplicidad requerida para la evaluación que frecuentemente se lleva a cabo en el campo; además, ellos requieren de mucha información de entrada la cual puede no estar disponible. Hasta cierto punto, estas declaraciones y observaciones siguen siendo válidas hoy en día.

Además de los problemas antes mencionados, por lo general un modelo de MP requiere estimar los parámetros de la distribución del tiempo de vida usado para determinar la función de la tasa de falla en el cual el modelo está basado. La distribución de Weibull de dos parámetros es una de las distribuciones más populares para el modelado estocástico del deterioro de los sistemas eléctricos de potencia ya que es muy flexible, y puede modelar muchos tipos de comportamientos de la tasa de falla mediante una selección adecuada de sus parámetros.

La estimación de estos parámetros ha sido abordada en la literatura mediante varias técnicas, tales como el trazado de probabilidad, la estimación de momentos, la estimación de momentos modificados y la estimación de máxima probabilidad (MLE). En el caso de MLE, las ecuaciones de probabilidad correspondientes deben ser resueltas numéricamente y programas de software relacionados deben aplicarse (B. Dodson. (2006)). Por otra parte, ya que la solución es numérica, los problemas de existencia y unicidad de las estimaciones deben de ser resueltas, lo cual es muy complicado en el caso de datos escasos (N. Balakrishnan y M. Kateri. (2008)).

La metodología aplicada en este apartado fue la de revisar, en la bibliografía consultada, los modelos existentes y aplicados en el área de mantenimiento en los sistemas eléctricos de potencia. Se descarta el análisis de las metodologías de cada artículo debido a la complejidad que representa cada uno. El estado del arte pretende dar un panorama general de la aplicación de modelos en el mantenimiento en el área de los sistemas eléctricos.

Vida media y equipos de sistemas de potencia

La vida media de los equipos de potencia se estima normalmente a través de métodos basados en inferencia a partir de datos históricos del tiempo de vida. La parte central de la estadística inferencial basado en la función de distribución es la estimación de los parámetros de distribución. Varias distribuciones estadísticas, incluyendo la distribución de Weibull de dos parámetros (W. Li. (2004), L. Seung-Hyuk et al. (2009)).

Y. Hong et al. (2009), C. J. Dent y J. D. Gray. (2006), Z. Dan. (2013), Z. Dan et al. (2013)), distribución normal (W. Li. (2004)), distribución log-normal (H. Maciejewski et al. (2011)), distribución de Weibull de tres parámetros (L. Chmura et al. (2011)), y la distribución exponencial generalizada (J. Cota-Felix et al. (2009)), han sido propuestas para el análisis de los datos del tiempo de vida de los equipos eléctricos de potencia. Sin embargo, la distribución de Weibull de dos parámetros, la cual esta definida por los parámetros de forma y escala, es un modelo comúnmente utilizado en la confiabilidad y en el análisis de los datos de tiempo de vida.

El problema de la estimación de los parámetros de forma y escala de la distribución de Weibull se ha abordado en la literatura mediante diversas técnicas, tales como los mínimos cuadrados, trazado de probabilidad, y la estimación de máxima probabilidad (MLE). Para la MLE, las ecuaciones correspondientes de probabilidad deben ser resueltas numéricamente y programas de software relacionados deben ser aplicados. Por ejemplo, en (. W. Li. (2004)) el autor presenta dos métodos para las distribuciones normal y de Weibull para evaluar la vida media y la desviación estándar de un grupo de reactores de potencia con datos limitados de fallas de fin de vida.

Para la estimación de los parámetros de Weibull, el autor desarrolló un conjunto de ecuaciones no lineales usando un método de mínimos cuadrados para resolver los parámetros de escala y forma mediante el uso de un método de gradiente descendente. En (L. Seung-Hyuk et al. (2009)), se propone un método analítico de datos para estimar la vida media de un grupo de generadores. En este método, los parámetros de Weibull son estimados ajustando una línea de regresión de mínimos cuadrados a través de los puntos de datos en una gráfica de probabilidad.

En (Y. Hong et al. (2009)), los autores llevaron a cabo un análisis de datos del tiempo de vida de los transformadores de potencia de una compañía de energía en los Estados Unidos de Norteamérica. Ellos utilizaron la distribución de Weibull como su modelo de tiempo de vida y la ajustaron mediante maximización directa a través de los métodos de probabilidad máxima y de Newton-Raphson.

En (C. J. Dent y J. D. Gray. (2006)), se presenta una versión modificada del método de mínimos cuadrados ajustándose a lo propuesto en (. W. Li. (2004)), donde el parámetro de forma es estimado utilizando un software de optimización numérica. Una comparación de los estimadores de parámetros, máxima probabilidad y la regresión de rango medio, para estimar la transformación del tiempo de vida utilizando la distribución de Weibull, es presentado en (Z. Dan. (2013)).

Para el método de estimación de máxima probabilidad, el autor propone para obtener el parámetro de forma la aplicación de un método numérico, como el de Newton-Raphson. Por último, el impacto de los datos de supervivencia en la precisión de los modelos del tiempo de vida de los transformadores es analizado en (Z. Dan et al. (2013)), donde es elegida la distribución de Weibull de dos parámetros para simular los datos de falla, y la estimación de máxima probabilidad y la función "wblfit" del software de Matlab son adoptados para estimar los parámetros correspondientes de la función de Weibull.

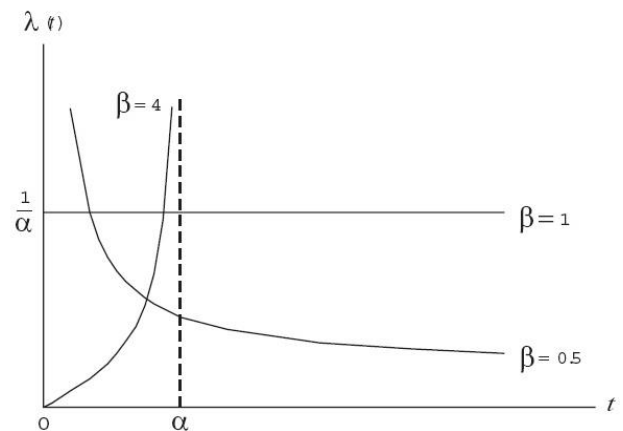


Figura 3 Función de distribución de Weibull de dos parámetros. Relación entre sus parámetros alfa (α) y beta (β)

Fuente: *Introduction to reliability engineering*, 1994

Estas técnicas de estimación de parámetros propuestos para el modelado del tiempo de vida de los equipos eléctricos de potencia tienen algunas desventajas, que se han discutido en la literatura especializada. Por ejemplo, los métodos de trazado de probabilidad son fáciles, pero se ha reportado que no pueden dar una estimación precisa (W. Li. (2004), . D. Mao y W. Li. (2007)). Los métodos basados en el análisis de regresión son estimadores lineales que ponen un gran peso en las observaciones extremas teniendo grandes varianzas (U. Genschel y W. Q. Meeker. (2010)).

Para los métodos de estimación de máxima probabilidad, las ecuaciones de probabilidad correspondientes deben ser resueltas numéricamente por métodos como el de Newton-Raphson o métodos de la secante; sin embargo, debido a que la solución es numérica, problemas de existencia y unicidad de las estimaciones tienen que ser abordadas, lo cual es un poco complicado en el caso de datos censurados (N. Balakrishnan y M. Kateri. (2008)). No obstante, la mayoría de los programas de software relacionados se basan en estas técnicas estadísticas.

Resultados

El análisis de resultados en el presente artículo muestra las diferentes técnicas, métodos, herramientas utilizadas en el área de confiabilidad, vida media y mantenimiento en los sistemas eléctricos de potencia. Además, se analiza las técnicas numéricas utilizadas para la estimación de la vida media en los sistemas eléctricos de potencia.

Conclusiones

Debido a la importancia del mantenimiento en los sistemas eléctricos de potencia y el presupuesto destinado a este, es necesario un estudio analítico para comparar las actuales políticas de mantenimiento (propuestas por el fabricante, experiencia personal, etc.), con aquellas que buscan introducir técnicas analíticas y/o numéricas para el máximo aprovechamiento de los dispositivos con los que cuenta la compañía. En el presente artículo se presentó una recopilación sobre las diversas técnicas y métodos, existentes en la bibliografía consultada, que se aplican al mantenimiento de dispositivos eléctricos.

Referencias

A. Kobbacy y P. Murthy. (2008). A complex system maintenance handbook. London: Springer

A. Kobbacy y P. Murthy. (2008). A complex system maintenance handbook. London: Springer.

B. Dodson. (2006). The Weibull analysis handbook. Milwaukee: ASQ Quality Press.

C. J. Dent y J. D. Gray. (2006). Component time-to-failure distribution estimation with limited statistical data: A critical survey. In IEEE Power and energy society general meeting, 4, 15-17.

C. T. Chen et al. (2003). On a dynamic preventive maintenance policy for a system under inspection. Reliab. Eng. Syst. Saf, 80, 41-47

D. Chen y K. Trivedi. (2002). Closed-form analytical results for condition based maintenance. Reliab. Eng. Syst. Saf, 76, 43-51.

D. Kim. (2010). Optimal schedules of two periodic preventive maintenance policies and their comparison. Eng. Asset Lifecycle Manag, 1, 449-457.

D. Lin et al. (2000). General sequential imperfect preventive maintenance models. International Journal of Reliability. Quality and Safety Engineering, 7, 253-266.

D. Mao y W. Li. (2007). A bounded derivation
E. Pan. (2010). Periodic preventive maintenance policy with infinite time and limit of reliability based on health index. Univ. (Sci), 15, 231-235.

F. Yang et al. (2008). Multi-objective evolutionary optimization of substation maintenance using decision-varying markov model. IEEE Transactions on Power Systems, 23, 1328-1335.

F. Zhang y A. K. S. Jardine. (1998). Optimal maintenance models with minimal repair, periodic overhaul and complete renewal. IIE Transactions, 30, 1109-1119.

F.G. Badia. (2002). Optimal inspection and preventive maintenance of units with revealed and unrevealed failures. Reliab. Eng. Syst. Saf., 78, 157-163.

G. Cavory et al. (2001). A genetic approach to the scheduling of preventive maintenance tasks on a single product manufacturing production line. Int. J. Prod. Econ, 74, 135-146

- G. Levitin y A. Lisniaski. (2000). Optimization of imperfect preventive maintenance for multi-state systems. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 67, 193-203.
- H. Ge et al. (2007). Optimum maintenance policy with inspection by semi-markov decision processes. *North American Power Symposium*, 39, 10.
- H. Maciejewski et al. (2011). On the use of statistical methods and models for predicting the end of life of electric power equipment. In *IEEE power engineering, energy and electrical drives*, 5, 6-9.
- I. T. Castro. (2009). A model of imperfect preventive maintenance with dependent failure modes. *Eur. J. Oper. Res.*, 196, 217-224.
- IEEE Task Force. (2001). Present status of maintenance strategies and the impact of maintenance on reliability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16, 638-646
- J. Cota-Felix et al. (2009). A new method to evaluate mean life of power system equipment. In *20th international conference electricity distribution*, 12, 58-61.
- J. H. Heo et al. (2011). A reliability-centered approach to an optimal maintenance strategy in transmission systems using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26, 2171-2179.
- J. K. Chan y L. Shaw. (1993). Modeling repairable systems with failure rates that depend on age and maintenance. *IEEE Transactions on Reliability*, 42, 566-571.
- K. Fischer et al. (2012). Reliability-centered maintenance for wind turbines based on statistical analysis and practical experience. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27, 184-195.
- L. Chmura et al. (2011). The application of statistical tools for the analysis of power transformer failures. In *17th international symposium on high voltage*, 11, 35-39.
- L. Seung-Hyuk et al. (2009). Evaluation aging failure probability of generating units using data analytic method. *European Transactions on Electrical Power*, 19, 631-641.
- M. Malik y M. Zuo. (1979). Reliable preventive maintenance scheduling. *AIIE Transactions*, 11, 221-228.
- M. Marseguerra et al. (2002). Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithm and monte carlo simulation. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 77, 151-166.
- M. Y. You et al. (2011). Control-limit preventive maintenance policies for components subject to imperfect preventive maintenance and variable operational conditions. *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, 96, 590-598. method for the maximum likelihood estimation on the parameters of weibull distribution. *Journal of LaTeX class files*, 6, 1-5.
- N. Balakrishnan y M. Kateri. (2008). On the maximum likelihood estimation of parameters of weibull distribution based on complete and censored data. *Statistics and Probability Letters*, 78, 2971-2975.
- P. Bruns. (2002). Optimal maintenance strategies for systems with partial repair options and without assuming bounded costs. *Eur. J. Oper. Res.*, 139, 146-165.
- P. Dehghanian et al. (2013). A comprehensive scheme for reliability centered maintenance in power distribution systems-part i: methodology. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28, 761-770.

- P. Do et al. (2015). A proactive condition-based maintenance strategy with both perfect and imperfect maintenance actions. *Reliab. Eng. Syst. Saf*, 133, 22-32.
- R. Canfield. (1986). Cost optimization of periodic preventive maintenance. *Transactions on Reliability*, 35, 78-81.
- S. K. Beygunawardane y P. Jirutitijaroen. (2011). New state diagrams for probabilistic maintenance models. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26, 2207-2213.
- S. Sheu y C. Chang. (2009). An extended periodic imperfect preventive maintenance model with age-dependent failure type. *Trans. Reliab*, 58, 397-405
- S. Wu y C. Clements-Croome. (2005). Optimal maintenance policies under different operational schedules. *Transactions on Reliability*, 2, 338-346.
- S. Wu y M. J. Zuo. (2010). Linear and nonlinear preventive maintenance models. *IEEE Transactions on Reliability*, 59, 242-249.
- T. M. Welte. (2009). Using state diagrams for modeling maintenance of deteriorating systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24, 58-66.
- T. Nakagawa. (1998). Sequential imperfect preventive maintenance policies. *IEEE Transactions on Reliability*, 37, 295-298.
- U. Genschel y W. Q. Meeker. (2010). A comparison of maximum likelihood and medianrank regression for weibull estimation. *Quality Engineering*, 22, 236-255.
- V. Mijailovic. (2003). Probabilistic method for planning of maintenance activities of substation component. *Electr. Power Syst. Res*, 64, 53-68.
- W. Li. (2004). Evaluating mean life of power system equipment with limited end-of-life failure data. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19, 236-242.
- W. Wang. (2012). An overview of the recent advances in delay-time-based maintenance modeling. *Reliab. Eng. Syst. Saf*, 106, 165-178.
- X. Jiang. (2013). Bayesian inference method for stochastic damage accumulation modeling. *Reliab. Eng. Syst. Saf*, 111, 126-138.
- Y. Hong et al. (2009). Prediction of remaining life of power transformer based on left truncated and right censored lifetime data. In *The annals of applied statistics*, 4, 16-19.
- Y. Liu y H. Huang. (2010). Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance. *IEEE Trans. Reliab*, 59, 356-367
- Z. Dan et al. (2013). Data requisities for transformer statistical lifetime modelling part 1: Aging-related failures. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 28, 1750-1757.
- Z. Dan. (2013). Comparison of two popular methods for transformer weibull lifetime modelling. In *International journal of advanced research in electrical, electronics and instrumentation engineering*, 12, 1-4.
- Z. Tian y H. Liao. (2011). Condition based maintenance optimization for multicomponent systems using proportional hazards model. *Reliab. Eng. Syst*, 96,