

MANTENIMIENTO ÓPTIMO BASADO EN CONDICIÓN PARA UN GENERADOR SINCRÓNICO UTILIZANDO ALGORITMO PREDICTIVO DE DESGASTE DE EQUIPOS

Geovanny Jimenez Vargas¹, Iván Endara Vélez²

¹Universidad Politécnica Salesiana (UPS), ²Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL),

^{1,2}Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación Dirección
gjimenezv3@est.ups.edu.ec, iendara@ups.edu.ec

RESUMEN.

En la actualidad, una buena planificación del mantenimiento es de trascendental importancia en los sistemas de generación ya que la detección eficiente y anticipada de fallos que puedan presentarse en los mismos terminan convirtiéndose en un verdadero desafío para las empresas generadoras. El presente artículo plantea políticas de mantenimiento óptimo utilizando una arquitectura de mantenimiento basado en condición (CBM) para un caso de estudio basado en un generador sincrónico, las cuales son posibles de definir mediante el índice de degradación estimado que presenten los diferentes componentes del generador sincrónico. Los resultados obtenidos demuestran que el modelo propuesto es capaz de proponer una política acertada de mantenimiento óptimo relacionando la severidad de daño del componente con el costo promedio de mantenimiento.

Palabras Clave: Generador sincrónico; mantenimiento basado en condición; relevancia económica; desgaste de componentes; proceso de actualización; correlación económica.

ABSTRACT.

At present, good maintenance planning is of paramount importance in generation systems since the efficient and early detection of failures that may occur in them end up becoming a real challenge for generating companies. This article proposes optimal maintenance policies using a condition-based maintenance architecture (CBM) for a case study using a synchronous generator, which are possible to define the estimated degradation index presented by the different components of the synchronous generator. The results showed that the proposed model is capable of proposing a successful policy of optimal maintenance by relating the severity of component damage with the average maintenance cost.

Keywords: Synchronous generator; condition-based maintenance; economic relevance; component wear; update process; economic correlation.

1. INTRODUCCIÓN

Habitualmente el entorno de trabajo al que se encuentran expuestos los generadores sincrónicos dentro de las plantas de generación suelen ser exigentes, esto implica que los componentes del sistema experimentan cierta degradación en su rendimiento a medida que aumenta el tiempo de funcionamiento, así mismo cuando esta degradación excede el umbral determinado de tolerancia empiezan a ocurrir fallos

inesperados si estos no son atendidos en un tiempo prudencial [1]. Hoy en día la administración de un mantenimiento oportuno para reducir los costos asociados al mismo se ha convertido en un tema de notable interés por parte de las empresas generadoras, quienes buscan reducir significativamente el costo total de mantenimiento y mejorar la disponibilidad de los sistemas, un modelo que analiza la optimización cuantitativa para el mantenimiento de un sistema de generación es expuesto en [2], así mismo la condición que permite un monitoreo fiable es descrita en [3]. Varios estudios han tratado con el pasar de los años plantear una política de mantenimiento correcta para los sistemas de generación, y el resultado obtenido ha sido combinación de lineamientos y acciones estratégicas de mantenimientos preventivos, correctivos y predictivos [4],[5].

En los últimos años, el mantenimiento basado en condiciones (CBM) se ha vuelto muy sobresaliente en un esfuerzo por reducir el tiempo de inactividad de las unidades y los costos de mantenimiento. El CBM puede ser implementado mediante la vigilancia continua del estado de la máquina junto con una elaborada programación del mantenimiento, dicho de otro modo, es recomendable realizar el mantenimiento cuando este puede anticiparse cualquier comportamiento anormal en el rendimiento del sistema. En consecuencia, la supervisión constante del estado de los sistemas se ha convertido en un elemento muy esencial para mejorar la producción y las ganancias en las industrias, evitando costosas pérdidas en sistemas de tal importancia [6], por otra parte, un modelo que describe la confiabilidad que poseen los sistemas con componentes degradantes y que establece directrices que permitirían minimizar los costos de mantenimiento afianzando las políticas del CBM es el descrito en [7].

El estudio realizado en [8] se presentan modelos de degradación del rendimiento de los componentes de un sistema de generación y sus supuestos, así como también una función de costos del mantenimiento para la condición en la que se analiza determinado componente. Por otra parte, dentro de la propuesta para optimizar los esquemas de mantenimiento predictivo basado en la condición (monitoreo continuo) para un sistema de generación, tenemos la planteada en [9], la cual ha sido desarrollada con las consideraciones necesarias que

equilibran la prioridad del mantenimiento ante la posibilidad de ocurrencia de un fallo eminente, cabe destacar que el proceso de degradación de un componente puede ser descrito gracias a la utilización de herramientas matemáticas, estos pueden ser: una función de distribución continua gamma, el proceso de decisión de Márkov, el proceso de decisión semi-Márkov, etc.

Así mismo, dentro de las políticas del mantenimiento basado en condición (CBM) está el realizar una constante inspección al sistema de interés, esto con la finalidad de determinar el grado de degradación de los componentes, encontrar fallas potenciales y tomar decisiones de mantenimiento.[10]. Una aplicación del proceso Gamma en el modelado de mantenimiento de sistemas con degradación y que servirá en nuestro estudio es el analizado en [11], mientras que en [12] se define el nivel de rendimiento del sistema que se divide en varios estados discretos, este establece un modelo de proceso de degradación de Márkov de tiempo continuo polimórfico que optimizan el ciclo de detección y el umbral de mantenimiento del sistema, finalmente [13] y [14] señalan la importancia de la optimización del mantenimiento de sistemas multicomponente, indicando la necesidad de considerar la correlación económica entre componentes, y la utilización de modelos de riesgo proporcional y métodos de redes neuronales artificiales para estudiar los problemas de mantenimiento de sistemas multicomponente.

Basándose en la teoría del proceso de actualización la presente investigación considera la correlación económica entre componentes para después analizar el ciclo de detección óptimo para un sistema que analiza varios componentes, además de presentar un enfoque para la optimización del mantenimiento de componentes cuya degradación se puede clasificar de acuerdo con la severidad del daño, teniendo en cuenta que el mantenimiento de estos componentes a menudo se puede fundamentar en diferentes estrategias de mantenimiento basadas en la condición, esto se evidencia en el caso de estudio elegido.

2. METODOLOGIA

2.1 Modelo de degradación del rendimiento y sus supuestos

En esta sección se muestra una estructura para la implementación de ideas muy bien afianzadas de mantenimiento para los elementos de un generador sincrónico. La Fig. 1 presenta un diagrama esquemático del proceso de reparación y degradación del rendimiento de los componentes, siendo D_i la variable que indica el umbral de avería y post-mantenimiento que presenta el elemento; L_i es el umbral de mantenimiento preventivo; i representa el i -ésimo componente ($i = 1, 2, \dots, I$) e I es el número de componentes del sistema. La variable aleatoria, $D_i(t)$ representa el estado degradado del componente i en el tiempo t ; $D_i(t) = 0$, significa que el

componente está en un estado completamente nuevo, en otras palabras, sin realizarse el mantenimiento, se debe considerar que el rendimiento de los componentes continuará degradándose con el tiempo, esto implica que cuando $D_i(t) \geq D_i$ la falla del componente será inminente, para aquello se debe de definir el período de detección τ_i , el mismo que se selecciona mediante una detección de igual período en el estado del componente, así mismo cada uno de los puntos de detección serán definidos respectivamente como: $\{\tau_i, 2\tau_i, 3\tau_i, \dots, k\tau_i, \dots\}$.

Una vez definidos los puntos de detección podemos obtener el estado de los componentes y tomar decisiones de mantenimiento en función de la degradación de los componentes tomando en cuenta los siguientes escenarios: I) Cuando $L_i \leq D_i(t) < D_i$ debe llevarse a cabo el mantenimiento preventivo, como se muestra en la Fig. 1. (a); II) Cuando $D_i(t) \geq D_i$ debe realizarse el mantenimiento correctivo, como se muestra en la Fig. 1. (b); III) Cuando $D_i(t) < L_i$ el generador continuará su funcionamiento normal, ya que el componente no ha traspasado el umbral de desgaste establecido.

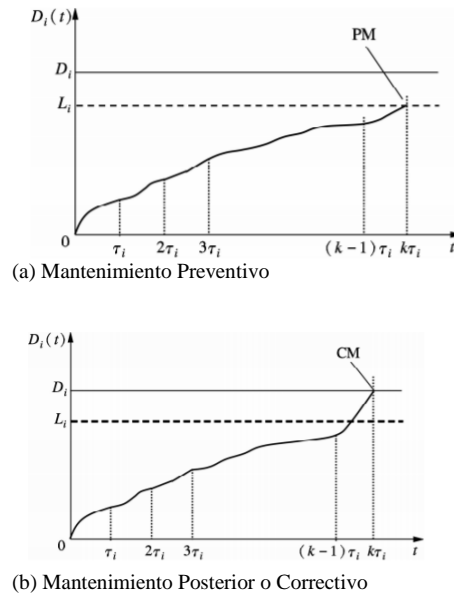


Fig. 1. Diagrama esquemático de la degradación del rendimiento de un solo componente y su umbral

2.2 Función de coste del mantenimiento considerando la condición de un solo componente

En esta sección se utilizará un modelo de efectos aleatorios para describir la degradación del rendimiento de los componentes, y la expresión de la función es

$$D_i(t) = A_i + \theta_i t^{B_i} \quad (4)$$

$\theta = 1/\lambda$ En la fórmula, A_i representa la degradación inicial del componente, como una señal de desgaste, vibración, o cualquier otra variante considerada como causante de un posible fallo; ; t es la variable tiempo; B_i indica el nivel de degradación del componente, cuanto mayor sea el valor de B_i , más rápida será la tasa de degradación y aumentará la probabilidad de fallo del componente.

La probabilidad de que la cantidad de degradación exceda el umbral x en el tiempo t es

$$P\{D_i(t) \geq x\} = 1 - F_{\theta_i} \left(\frac{D_i - A_i}{t^{B_i}} \right) \quad (5)$$

Donde, F_{θ_i} es la función de densidad acumulada evaluada en θ_i , este estudio asume que F_{θ_i} obedece a una distribución normal con media μ_{θ_i} y varianza σ_{θ_i} .

Dentro de los costos de mantenimiento estarán incluidos: los costos de inspección $C_{I(i)}$, los costos de mantenimiento preventivo $C_{P(i)}$, los costos de mantenimiento correctivo $C_{R(i)}$, la tasa de costo de tiempo de inactividad $C_{D(i)}$, y el costo mínimo de mantenimiento $C_{M(i)}$. Suponiendo que tanto el mantenimiento preventivo como el post mantenimiento pueden devolver el componente al estado inicial, el ciclo de vida se define como el intervalo de tiempo desde el estado inicial hasta la primera actividad de actualización del componente. La aparición de varios ciclos de vida consecutivos constituye un proceso de actualización. La tasa de costo promedio a largo plazo de los componentes se puede expresar como

$$Z_i(\tau_i) = \frac{E[C(\tau_i)]}{E[W(\tau_i)]} \quad (6)$$

Donde, $E[C(\tau_i)]$ es el costo de mantenimiento promedio del componente i en su tiempo total de vida de vida; $E[W(\tau_i)]$ es el ciclo de vida promedio del componente, así mismo $E[C(\tau_i)]$ puede expresarse de la forma:

$$E[C(\tau_i)] = C_{I(i)} E_i[N] + C_{P(i)} P_{P(i)} + C_{R(i)} P_{R(i)} + C_{D(i)} E_i + C_{M(i)} E_{M(i)}[N] \quad (7)$$

La forma de calcular cada parámetro se detalla a continuación:

✓ Número medio de inspecciones $E_i[N]$

Si el componente necesita mantenimiento preventivo o reparación posterior en el k-ésimo punto de inspección, se debe completar un proceso de actualización estableciendo los intervalos de su vida útil. Suponiendo que el componente tiene

un total de k actividades de inspección durante su ciclo de vida, entonces $E_i[N]$ se define como:

$$E_i[N] = \sum_{k=1}^{\infty} k P(N = k) \quad (8)$$

Siendo P (N = k) la probabilidad que denota la actualización en el k-ésimo punto de detección; lo que nos lleva a los siguientes 2 estados de actualización de componentes:

$$E_{11}^k = |D_i((k-1)\tau_i) < L_i| \cap |L_i \leq D_i(k\tau_i) < D_i| \quad (9)$$

$$E_{22}^k = |D_i((k-1)\tau_i) < L_i| \cap |D_i(k\tau_i) \geq D_i| \quad (10)$$

Para la probabilidad que el componente actualice su estado en el k-ésimo punto de detección se la definirá como:

$$P(N = k) = P\{D_i((k-1)\tau_i) < L_i\} - P\{D_i(k\tau_i) < L_i\} \quad (11)$$

$$P(N = k) = F_{\theta_i} \left(\frac{L_i - A_i}{((k-1)\tau_i)^{B_i}} \right) - F_{\theta_i} \left(\frac{L_i - A_i}{(k\tau_i)^{B_i}} \right) \quad (12)$$

Entonces, el número medio de inspecciones $E_i[N]$ se puede expresar como

$$E_i[N] = \sum_{k=1}^{\infty} k \left\{ F_{\theta_i} \left(\frac{L_i - A_i}{((k-1)\tau_i)^{B_i}} \right) - F_{\theta_i} \left(\frac{L_i - A_i}{(k\tau_i)^{B_i}} \right) \right\} \quad (13)$$

✓ Determinación de las probabilidades de mantenimiento

La probabilidad de mantenimiento preventivo de los componentes y la probabilidad de mantenimiento posterior o correctivo de los componentes están en $k\tau_i$, así mismo la probabilidad de que el umbral de falla que alcance D_i antes es:

$$P\{D_i(k\tau_i) > D_i\} = P\{T_{D_i} < k\tau_i\} \quad (14)$$

El componente alcanzara la condición de mantenimiento preventivo en el tiempo del umbral que se encuentra en la posición $(k-1)\tau_i$ y $k\tau_i$, cuya probabilidad está dada por:

$$P\{D_i((k-1)\tau_i) \leq L_i < D_i(k\tau_i)\} = P\{(k-1)\tau_i \leq T_{L_i} < k\tau_i\} \quad (15)$$

Donde, el umbral de mantenimiento preventivo se alcanza dentro del intervalo $(k-1)\tau_i$, cuando tiene un valor L_i , para esto definiremos las situaciones planteadas en la sección anterior:

① Si $L_i \leq D_i(k\tau_i) < D_i$, deberá realizarse el mantenimiento preventivo, y su probabilidad estará dada por

$$P_{P(i)} = \sum_{k=1}^{\infty} P\{D_i((k-1)\tau_i) < L_i, L_i \leq D_i(k\tau_i) < D_i\} \quad (16)$$

② Si $D_i(k\tau_i) \geq D_i$, deberá realizarse el mantenimiento posterior o correctivo y su probabilidad estará dada por:

$$P_{R(i)} = \sum_{k=1}^{\infty} P\{D_i((k-1)\tau_i) < L_i, D_i(k\tau_i) \geq D_i\} \quad (17)$$

Establecemos en los que casos que:

$$k < \frac{D_i - A_i}{D_i - L_i}; \quad P_{P(i)} = \sum_{k=1}^{\infty} \left(F_{\theta_i} \left(\frac{L_i - A_i}{((k-1)\tau_i)^{\beta_i}} \right) - F_{\theta_i} \left(\frac{L_i - A_i}{(k\tau_i)^{\beta_i}} \right) \right) \quad (18)$$

$$k \geq \frac{D_i - A_i}{D_i - L_i} \quad P_{P(i)} = \sum_{k=1}^{\infty} \left(F_{\theta_i} \left(\frac{L_i - A_i}{((k-1)\tau_i)^{\beta_i}} \right) - F_{\theta_i} \left(\frac{L_i - A_i}{(k\tau_i)^{\beta_i}} \right) \right) \quad (19)$$

Y según lo establecido en la fórmula (17), se podrá estimar el valor para $P_{R(i)}$.

✓ El tiempo de inactividad promedio de los componentes E_i

Si el componente falla en el tiempo T y este se encuentra en los límites de $(k-1)\tau_i < T \leq k\tau_i$, eso significaría que en $[T, k\tau_i]$ el generador sincrónico estará en estado de paralización hasta que se repare el siguiente punto de inspección y se obtenga el tiempo medio de inactividad de los componentes identificados.

La expresión para E_i se define como:

$$E_i[\xi] = \sum_{k=1}^{\infty} \left(\int_{(k-1)\tau_i}^{k\tau_i} (k\tau_i - t) dF_i(t) \right) P(E_{i2}^k) \quad (20)$$

Donde:

$$F_i(t) = 1 - R_i(t) = 1 - F_{\theta_i} \left(\frac{D_i - A_i}{t} \right)$$

✓ Número mínimo de piezas reparadas $E_{M(i)}[N]$

Cuando en $k\tau_i$ se produce la actualización de estado del componente, es posible realizar el mantenimiento mínimo en el primer tiempo de inspección k-1 del componente, y la expresión se define como:

$$E_{M(i)}[N] = \sum_{k=1}^{\infty} (k-1) \cdot \left[1 - \prod_{i=1}^N P(D_i(k-1)\tau_i < L_i) \right] \quad (21)$$

✓ Ciclo de vida media $E[W(\tau_i)]$

$E[W(\tau_i)]$ se expresa como:

$$E[W(\tau_i)] = \sum_{k=1}^{\infty} k\tau_i P(N=k) = \sum_{k=1}^{\infty} k\tau_i \left(F_{\theta_i} \left(\frac{L_i - A_i}{((k-1)\tau_i)^{\beta_i}} \right) - F_{\theta_i} \left(\frac{L_i - A_i}{(k\tau_i)^{\beta_i}} \right) \right)$$

Sustituyendo varios parámetros en la ecuación (6), se puede obtener la tasa de costo promedio móvil a largo plazo de los componentes $Z(\tau_i)$.

2.3 Decisión de mantenimiento del sistema multicomponente

Para sistemas en los que se integran múltiples componentes, generalmente se adopta el método de mantenimiento regular y la estrategia de mantenimiento es la siguiente [18]:

- Determinar el intervalo de detección de falla del componente, este estará definido por τ según la prueba mantenimiento del estado.
- Decisión de mantenimiento según el estado de un solo componente, si el parámetro de estado D_i de un componente en el punto de detección satisface la condición $L_i \leq D_i(T) < D_i$, entonces deberá realizarse el mantenimiento preventivo; si $D_i(T) \geq D_i$ entonces deberá realizarse el mantenimiento posterior o correctivo y actualizar la falla de componente.
- Políticas de decisión de mantenimiento de oportuno de múltiples componentes, cuando $D_i(T) < L_i$, se llevará a cabo el mantenimiento mínimo para el componente i, y el mantenimiento preventivo se lleva a cabo en los componentes relacionados.

Teniendo en cuenta la correlación económica entre los componentes del generador sincrónico, la tasa de costo de mantenimiento promedio multicomponente del generador sincrónico se puede expresar como:

$$Z_{sys}(\tau) = \frac{[N-\omega(N-1)]R}{\tau} + \sum_{i \in N} Z_i(\tau) \quad (23)$$

En la fórmula, $Z_{sys}(\tau)$ es la tasa de costo de mantenimiento promedio del generador sincrónico; ω es el coeficiente de correlación económica entre componentes del generador, $\omega = 0 \sim 1$; R es el costo fijo por mantenimiento preventivo o mantenimiento posterior al hecho (correctivo); τ es la inspección unificada para cada elemento del generador (puede ser uno o varios a la vez); $Z_i(\tau)$ es la tasa de costo de mantenimiento promedio del componente i cuando el período de detección es τ .

3. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

En esta sección, se realizará confirmación de la propuesta metodológica analizando un generador sincrónico el cual es provisto de energía mecánica mediante una turbina de vapor, este caso corresponde al generador sincrónico de la central

térmica Trinitaria, propiedad de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP ubicado en la ciudad de Guayaquil-Ecuador. Las principales características del generador se resumen en la Tabla I.

TABLA I
 CARACTERISTICAS PRINCIPALES DEL GENERADOR SINCRONICO DE LA CENTRAL TRINITARIA

Fabricante:	ABB, Tipo WX18Z-090LL
Potencia aparente nominal:	156,500 KVA
Potencia activa nominal:	133,025 KW
Enfriamiento:	Por aire
Clase de aislamiento:	F
Voltaje:	13,800 V.
Rango de voltaje de operación:	± 5 %
Rotor: Cilíndrico	2 polos
Corriente nominal:	6,547 A.
Factor de Potencia:	0.85
Número de fases:	3
Frecuencia:	60 Hz.
Velocidad:	3600 RPM
Eficiencia (a potencia nominal y f.p.=0.85):	98.6 %

Los parámetros de degradación de los componentes mostrados en la Tabla II son calculados mediante las ecuaciones (4)-(5)

TABLA II
 PARÁMETROS DE DEGRADACIÓN DELGENERADOR SINCRONICO Y COSTOS DE MANTENIMIENTO

Costos de mantenimiento/dólares	Componente		
	Rodamientos	Bobinado	Excitatriz
$C_{P(i)}$	1080	2315	1543
$C_{R(i)}$	4630	10802	7716
$C_{I(i)}$	154	154	154
$C_{D(i)}$	1111	1111	1111
$C_{M(i)}$	309	772	463
R	7716	7716	7716
Degradación			
D_i	100	200	0,08
L_i	90	190	150
$\mu\theta_i$	0,08	0,12	140
$\sigma\theta_i$	0,015	0,015	0,015
B_i	1	1	1

4. RESULTADOS

El CBM (mantenimiento basado en condición) propuesto en el presente trabajo es válido en un generador 133,025 KW, 13,800 V, 60 Hz, rotor cilíndrico de 2 polos y 3600 RPM, de la ecuación (6) se obtiene el costo de mantenimiento promedio independiente, la tasa y curva de ciclo de detección óptima para los 3 componentes. Los períodos de detección óptimos para los rodamientos, bobinado del estator y excitatriz son 109, 98 y 75 días, respectivamente. Las tasas de costo para el

mantenimiento promedio fueron 47.66, 99.53 y 73.26 dólares/d. Para la obtención de los resultados de los cálculos anteriores, se consideró el análisis como componentes independientes. Para la ejecución del mantenimiento óptimo, del generador sincrónico de esta central de generación térmica se lo puede resolver mediante la ecuación (23).

La relación entre el costo de mantenimiento de varios componentes y el ciclo de inspección se presentan en la Fig. 2. teniendo en cuenta la relevancia económica de los componentes, el período de inspección óptimo para el generador sincrónico ya no será el período de inspección óptimo de cada componente. El período de inspección óptimo ahora es de 86 días, y la tasa de costo de mantenimiento promedio del sistema durante todo el ciclo de vida de los componentes es 4.873 dólares/d. En la Fig. 2. podemos observar lo siguiente: i) Cuando el período de mantenimiento es inferior a 40 días, la tasa de costo de mantenimiento promedio del sistema disminuye rápidamente con respecto al aumento del ciclo de inspección original. Esto se debe a que la frecuencia de detección es demasiado grande, lo que provocará una detección excesiva y que conllevará a que aumente la tasa de costo de mantenimiento promedio. ii) Cuando el período de detección es mayor que el período de detección óptimo (86 días), la tasa de costo promedio aumenta a medida que aumenta el período de detección. Esto se debe a que el ciclo de inspección es demasiado largo y que existen una gran cantidad de pérdidas de tiempo por inactividad debido a la imposibilidad de reparar a tiempo esto provoca el aumento de la tasa de costo de mantenimiento promedio.

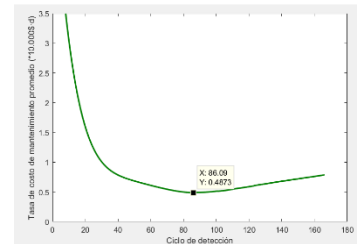


Fig. 2. Curva del ciclo de detección de la tasa de costo de mantenimiento multicomponente

En este artículo también se presenta el coeficiente de correlación económica ω para describir la correlación económica entre componentes. De acuerdo con la ecuación (23), se puede obtener la relación entre la tasa de costo de mantenimiento promedio del generador sincrónico como un sistema multicomponente y el coeficiente de correlación económica de los componentes.

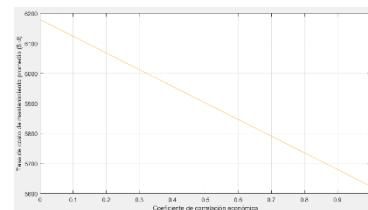


Fig. 3. Relación entre la tasa de costo de mantenimiento promedio y el coeficiente de correlación económica de los componentes

En la Fig. 3 se observa que, cuando el coeficiente de correlación económica $\omega = 1$, la correlación económica entre componentes es la más alta y la tasa de costo de mantenimiento promedio del sistema es la más baja. Por lo tanto, considerando la correlación económica entre componentes, se puede reducir el costo de mantenimiento cuando se debe tratar al generador como un sistema integrado de varios componentes.

5. CONCLUSIONES

Este trabajo toma el generador sincrónico de la planta de generación térmica del sistema Trinitaria y lo analiza como un sistema multicomponente, definiendo los componentes que constantemente son monitoreados por parte del personal que realiza mantenimiento en la planta de generación, además de aquello establece: un modelo de tasa de costo promedio de largo plazo para generadores basado en el proceso de actualización, considera la relevancia económica entre las actividades de mantenimiento de componentes, establece un modelo de mantenimiento basado en condición analizando múltiples componentes de generador, y estudia la detección óptima del ciclo del sistema.

Los resultados muestran que el modelo de optimización del mantenimiento puede describir eficazmente el problema de optimización del mantenimiento del generador sincrónico, sobreponiéndose notablemente sobre las políticas de mantenimiento convencional, las cuales cotidianamente basan su análisis y toma de decisiones en los tiempos fijos de paralización para la ejecución del mantenimiento, lo que conllevará una falta de detección de posibles problemas que aún no han sido detectados en otros componentes y que cuyo costo de mantenimiento se eleva exponencialmente al no ser este atendido de manera oportuna durante el tiempo de paralización. El CBM nos brinda la posibilidad de tomar correctas de decisiones actuando en un tiempo prudencial para la determinación del mantenimiento de la maquina sin incurrir en paros innecesarios de la misma, teniendo en cuenta los altos costos que implicaría el no proceder en los ciclos de inspección óptimos. En la investigación de seguimiento, el modelo de mantenimiento puede considerar factores como la ley de degradación del rendimiento de los componentes y la realización temprana del mantenimiento dinámico de los 3 componentes en simultaneo, además de todos los datos históricos masivos que pueden ser obtenidos de parte del personal de la central de generación mediante constante monitoreo, esta condición tiene en la práctica un valor agregado al momento de diseñar un plan que defina claramente las políticas para un mantenimiento optimo basado en condición.

Referencias

- [1] R. Gopinath, C. Santhosh Kumar, K.I. Ramachandran, V. Upendranath, P.V.R. Sai Kiran, Intelligent Fault Diagnosis of Synchronous Generators, Expert Systems with Applications (2015), doi: 10.1016/j.eswa.2015.09.043s
- [2] J. A. Andrawus, J. Watson, and M. Kishk, "Wind turbine maintenance optimization: Principles of quantitative maintenance optimization," Wind Eng., vol. 31, no. 2, pp. 101–110, 2007.
- [3] Jabid Quiroga Méndez, Silvia Oviedo Castillo "Implementing condition-based maintenance using modeling and simulation: a case study of a permanent magnet synchronous motor" Ingeniería e Investigación, vol. 31, núm. 2, agosto, 2011, pp. 18-28
- [4] François Besnard, and Lina Bertling, "An Approach for Condition-Based Maintenance Optimization Applied to Wind Turbine Blades" IEEE Transactions on Sustainable Energy, VOL. 1, NO. 2, JULY 2010
- [5] Jeet Gandhi, R. Gopinath, C. Santhosh Kumar "System Independent Fault Diagnosis for Synchronous Generator" Department of Electronics and Communication Engineering, 2020, Amrita School of Engineering, Coimbatore, Amrita Vishwa Vidyapeetham, Amrita University, India-641112
- [6] Jardine, A. K., Lin, D., & Banjevic, D. "A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance." Mechanical systems and signal processing, 2016, pp 1483-1510
- [7] Feng, Q., Jiang, L., & Coit, D. W. (2016). "Reliability analysis and condition-based maintenance of systems with dependent degrading components based on thermodynamic physics-of-failure". The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 86, 913–923. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-8220-x>
- [8] Su Chu, Chen Wu, "Optimization of condition-based maintenance for a wind turbine system considering economic dependence among components" Journal of Southeast university (Natural Science Edition), vol 46, No5, 2016, pp 1007-1012
- [9] S.J. Bae et al., Reliability Engineering and System Safety, "Condition monitoring of a steam turbine generator using wavelet spectrum-based control chart", (2017), <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.09.025>
- [10] Wang H Z. "A survey of maintenance policies of deteriorating systems" [J]. European Journal of Open Research, 2002, 139 (3): 4694489. DOI: 10.1016 / s0377-2217 (01) 00197-7.
- [11] Van Noortwijk J M. "A survey of the application of gamma processes in maintenance" Journal. Reliability Engineering and System Safety 2009, 94 (1): 221. DOI: 10.1016 / j. res. 2007.03.019.
- [12] Chiang J H, Yun J. "Optimal maintenance policy for a Markovian system under periodic inspection", [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2001, 71 (2): 165 172. DOI: 10.1016 / s0951-8320 (00) 00093-4.
- [13] Tian Z G, Liao H T. "Condition based maintenance optimization for multi-component system using proportional hazards model" [J], 2011, 96 (5): 58159. DOI: 10.1016 / j. res. 2010.12.023.
- [14] Tian Z G, Jin T, Wu B, "Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring" [J] Renewable Energy, 2011, 36 (5): 15021509. DOI: 10.1016 / j. Renene. 2010.10.028.
- [15] Guerneau L, Gouno E. "Inference for a failure counting process partially observed". [J] IEEE Transformatson Reliability, 2014, 64 (1): 19. DOI: 10.1109 / TR.2014.2354171.
- [16] Sahinl. "A generalization of renewal processes", [J] Op-ertions Research Letters, 1993, 13 (4): 259 263. DOI: 10.1016 / 0167-6377 (93) 90048-1
- [17] Van NoortwijkJM. "Explicit formulas for the variance of discounted life-cycle cost", Reallity Engineering and System Safety, 2003, 80 (2): 18515. DOI: 10.1016 / s0951-8320 (03) 00023-1.
- [18] Hornbeek A V, Pintelon L. "A Dynamic predictive maintenance policy por complex multi-component system" [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 120 (12): 3950. DOI: 10.1016 / j. res. 2013.02.029.
- [19] Torres Darío, Gallo Andres. "Implementation of a mathematical model for the Trinitaria generation." [J], IEEE Transformatson Reliability, 2017, 15 (2):22