

Mantenimiento óptimo basado en condición para un generador sincrónico utilizando algoritmo predictivo de desgaste de equipos

Geovanny Jimenez Vargas¹; Iván Endara Vélez¹

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

Condition-based optimal maintenance for a synchronous generator using predictive equipment wear algorithm

Abstract

Nowadays, a good maintenance planning is of transcendental importance in the generation systems since the efficient and early detection of failures that may occur in them end up becoming a real challenge for the generating companies. This paper proposes optimal maintenance policies using a condition-based maintenance (CBM) architecture for a case study based on a synchronous generator, which can be defined by means of the estimated degradation rate of the different components of the synchronous generator. The results obtained show that the proposed model is capable of proposing a successful optimal maintenance policy by relating the severity of component damage to the average maintenance cost.

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

Recibido: 17 de marzo de 2022

Aceptado: 02 de agosto de 2022

¹ Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación, Universidad Politécnica Salesiana (UPS), Guayaquil 09-01-5863, Ecuador, Email: gjimenezv3@est.ups.edu.ec, iendara@ups.edu.ec

Autor de correspondencia: gjimenezv3@est.ups.edu.ec

I. 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

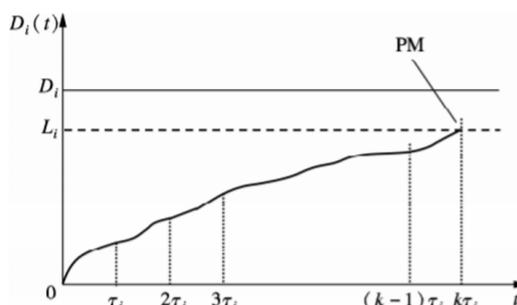
daño, teniendo en cuenta que el mantenimiento de estos componentes a menudo se puede fundamentar en diferentes estrategias de mantenimiento basadas en la condición, esto se evidencia en el caso de estudio elegido.

II. METODOLOGIA

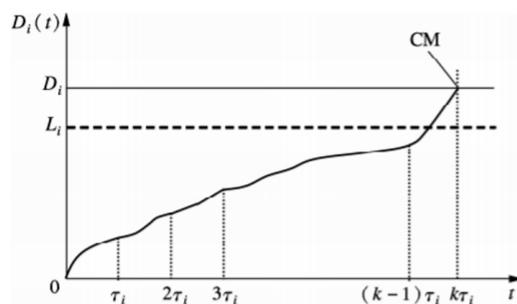
A. Modelo de degradación del rendimiento y sus supuestos

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 $D_i(t) < D_i$ el generador continuará su funcionamiento normal, ya que el componente no ha traspasado el umbral de desgaste establecido.



(a) Mantenimiento Preventivo



(b) Mantenimiento Posterior o Correctivo

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

B. Teoría del proceso de renovación

i) Proceso de conteo

Establecemos el supuesto en el que las piezas reparadas se ponen en uso cuando $t = 0$; esto es, luego de ocurrir una falla el componente ha sido restaurado a un estado normal mediante mantenimiento y su tiempo de mantenimiento se considera despreciable, este proceso se repite hasta establecer una secuencia de tiempo de falla del componente. Sea $N(t)$ el número de fallas en el intervalo de tiempo $[0, t]$ el cual responde a un proceso aleatorio $\{N(t), t \geq 0\}$ tal como el proceso de conteo descrito en [15], el cual considera un sistema definido como una correlación de dos tipos de componentes, donde número de fallas de cada componente se describe como un proceso estocástico, considerando uno de los procesos dependiente en el otro.

ii) Proceso de actualización

Si los intervalos de ocurrencia de todas las fallas en un proceso de conteo son independientes entre sí, y el tiempo entre fallas obedece a la distribución

exponencial de parámetro λ , el proceso de conteo se responde a un proceso Poisson homogéneo. Este proceso de Poisson homogéneo deberá cumplir siguientes condiciones: 1) $N(0) = 0$; 2) $N(t)$ será un incremento independiente del evento anterior; 3) el parámetro t se define como la longitud de cualquier intervalo, y el número de eventos de falla en este intervalo obedece a una distribución λt , es decir, existe para cualquier $t \geq 0$

$$\Pr [N(t+s) - N(s) = n] = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Cuando los intervalos de tiempo de llegada del proceso de Poisson homogéneo son independientes entre sí, la función de distribución es arbitraria y estos están distribuidos de forma idéntica, este proceso de recuento resultante se denomina proceso de renovación, para el cual se debe establecer $\{X_n, n = 1, 2, \dots\}$ el mismo que es una serie de variables aleatorias no negativas mutuamente independientes e idénticamente distribuidas y que tienen una función de distribución $F(x)$ en común, donde T_n es la distancia entre el evento $n-1$ y el evento n , para este proceso de conteo estableceremos una media μ y su varianza δ^2 entonces el momento en que ocurre el n -ésimo evento es

$$S_n = \sum_{k=1}^n T_k \quad (2)$$

Por definición si $S_0 = 0$, entonces se cumple que $N(t) = \sup \{n: S_n \leq t\}$ en el proceso de recuento, de la misma forma denominaremos proceso de actualización a $\{N(t), t \geq 0\}$. El proceso de las propiedades estocásticas se puede describir completamente mediante la distribución común $F(x)$ de X_n a partir del teorema de los números grandes, sabiendo que: $n \rightarrow \infty, \frac{S_n}{n} \rightarrow \mu$.

Sea $F(t)$ la distribución de probabilidad acumulada en el momento de la actualización continua, y $c(t)$ quien define el costo de un tiempo de actualización y de acuerdo con la teoría de actualización planteada en [16],[17], el costo promedio por unidad de tiempo es

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E[K(t)]}{t} = \frac{\int_0^{\infty} c(t) dF(t)}{\int_0^{\infty} t dF(t)} \quad (3)$$

Donde, $E[K(t)]$ representa el costo total esperado.

C. 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

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

En la fórmula, A_i representa la degradación inicial del componente, como una señal de desgaste, $\theta = 1/\lambda$ 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:

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

Donde:

$C_{I(i)}$ $E_i[N]$ es el costo de la prueba, $C_{I(i)}$ es el costo de una sola prueba, $E_i[N]$ es el costo del número medio

de inspecciones y N es el número total de piezas; $C_{P(i)}$, $P_{P(i)}$ son los costos de mantenimiento preventivo, $C_{R(i)}$ es el costo de un único mantenimiento preventivo, y $P_{R(i)}$ es la probabilidad de tener que realizar mantenimiento preventivo al componente; $C_{D(i)}$, $P_{D(i)}$ es el costo del mantenimiento posterior o correctivo, es decir, cuando el componente falló, $C_{R(i)}$ es el costo de un solo mantenimiento correctivo, $P_{R(i)}$ es la probabilidad de tener que realizar mantenimiento correctivo al componente; $C_{D(i)}$, E_i se utiliza para el costo de pérdida de tiempo por inactividad, donde $C_{D(i)}$ es el costo de la inactividad (paralización) por unidad de tiempo, E_i es el tiempo de inactividad promedio que tiene el componente cuando se le realiza mantenimiento; $C_{M(i)}$, $E_{M(i)}$ es el costo por mantenimiento mínimo, $C_{M(i)}$ es el costo de un mantenimiento mínimo, $E_{M(i)}$ es el número mínimo de reparaciones del componente.

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:

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

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:

$$E_{10}^k = |D_i((k-1)\tau_i) < L_i \cap |L_i \leq D_i(k\tau_i) < D_i| \tag{9}$$

$$E_{20}^k = |D_i((k-1)\tau_i) < L_i \cap |D_i(k\tau_i) \geq D_i| \tag{10}$$

Entonces la situación en la que el componente no será reemplazado se define por:

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

Esto debido a que:

$$P | D_i((k-1)\tau_i) < L_i | = F_{n_i} \left(\frac{L_i - A_i}{((k-1)\tau_i)^{n_i}} \right)$$

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

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

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

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

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

• **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:

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

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:

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

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

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

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

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

Sabiendo que:

$$P_{P(i)} + P_{R(i)} = \sum_{k=1}^{\infty} \left(F_{n_i} \left(\frac{D_i - A_i}{((k-1)\tau_i)^{n_i}} \right) - F_{n_i} \left(\frac{D_i - A_i}{(k\tau_i)^{n_i}} \right) \right)$$

Establecemos en los casos que:

$$k < \frac{D_i - A_i}{D_i - L_i}, P_{P(i)} = \sum_{k=1}^{\infty} \left(F_{n_i} \left(\frac{L_i - A_i}{((k-1)\tau_i)^{n_i}} \right) - F_{n_i} \left(\frac{L_i - A_i}{(k\tau_i)^{n_i}} \right) \right) \tag{18}$$

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

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 $[T, k\tau_i)$ en 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 $E_{M(i)}[W]$**

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:

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

- **Ciclo de vida media $E[W(\tau_i)]$**

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

$$E[W(\tau_i)] = \sum_{k=1}^{\infty} k\tau_i P(N = k) = \sum_{k=1}^{\infty} k\tau_i \left(F_{\theta_i} \left(\frac{L_i - A_i}{(k-1)\tau_i} \right) - F_{\theta_i} \left(\frac{L_i - A_i}{k\tau_i} \right) \right) \quad (22)$$

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

D. 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 $L_i \leq D_i(T) < D_{i1}$, entonces deberá realizarse el mantenimiento preventivo; si $D_i(T) \geq D_{i1}$ 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 .

III. CASO DE ESTUDIO

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 1. Características principales del generador sincrónico 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:	$\pm 5 \%$
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 %

Para el presente estudio se realizará un breve análisis de su funcionamiento en estado estable, tomando como referencia el modelo planteado en [19], el mismo que permitirá obtener datos de interés tales como: voltajes y corrientes de operación, velocidad a la que se encuentra el generador en estado estable, potencias mecánicas y eléctricas, etc. Esta adquisición de datos nos permitirá tener un banco de datos históricos, con los que se procederá a realizar la construcción de nuestro modelo para la estimación del desgaste de componentes y los umbrales permitidos antes de la falla basados en las ecuaciones descritas en el apartado II.

Un modelo bastante aproximado a las condiciones reales presentadas en la Central Térmica Trinitaria se muestra en la Fig. 2 [19], cabe destacar que dicho modelo replica toda la central térmica Trinitaria, pero para efectos de este estudio solo nos centraremos en la utilización del modelo del generador, el cual facilitara nuestro análisis del desgaste que presentan diversos componentes a ser analizados: i) rodamientos, ii) excitatriz, iii) bobinado.

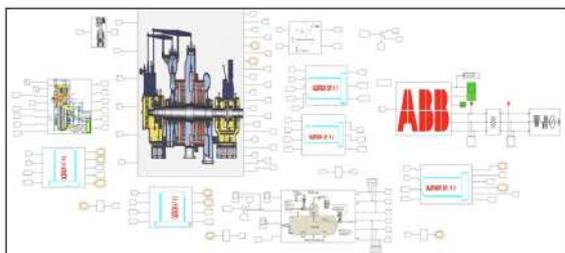


Figura 2. Diagrama esquemático de la Central Térmica Trinitaria

IV. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.

Para efectos del estudio es necesario contar con el histórico de operación del generador sincrónico, estos datos fueron obtenidos simulando la operación normal del generador y estimando las condiciones que conllevan el desgaste de los componentes en un tiempo T. La Fig. 3. muestra la condición de operación del generador sincrónico en estado estable o también llamado régimen permanente, donde se muestran las corrientes del estator, la corriente de campo y el torque electromecánico en p.u.

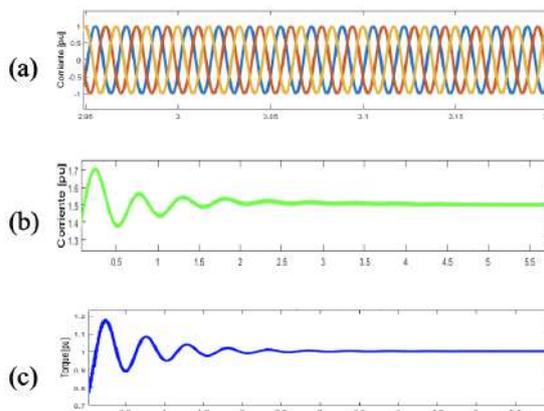


Figura 3. Operación normal o régimen permanente del generador sincrónico (a) corrientes estáticas. (b) corriente de campo. (c) torque electromecánico.

Este modelo puede ser idealizado para analizar las condiciones de desgaste basándonos en el esquema presentado en la Fig. 1, lo que permitiría estimar los datos de la degradación del rendimiento de los componentes y del proceso de reparación y mantenimiento, la Fig. 4 presenta como el deterioro de componentes afecta a operación normal del generador, mostrándonos cómo el fallo del generador se vuelve inminente al no tomarse las consideraciones necesarias para la ejecución del mantenimiento.

Cada uno de los escenarios de fallo y de deterioro de los componentes ha sido considerados para la estimación de los tiempos de detección de la falla, esto nos permitirá predecir mediante la utilización del modelo propuesto los fallos que se presenten en los componentes del generador antes definidos, proporcionándonos tiempos oportunos en la toma de decisiones del mantenimiento.

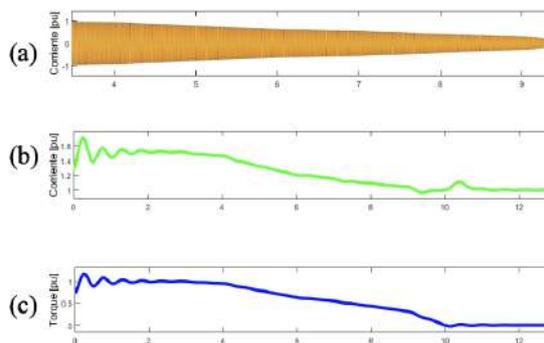


Figura 4. Operación del generador sincrónico considerando el deterioro con respecto al tiempo de sus rodamientos a) corrientes estáticas. (b) corriente de campo. (c) torque electromecánico

Partiremos del supuesto en el que la degradación inicial de los tres componentes es cero, debido a que no se pudo contar con los datos de los costos de mantenimiento de parte de la empresa generadora fijaremos estos bajo suposición, los parámetros de mantenimiento y degradación son mostrados en la Tabla II

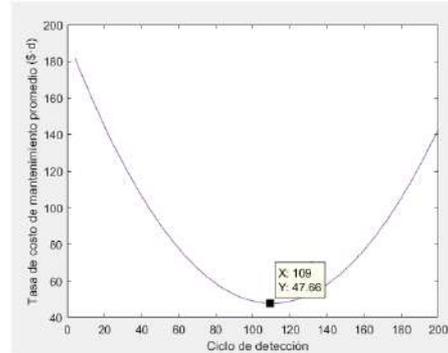
Los parámetros de degradación de los componentes mostrados en la Tabla II son calculados mediante las ecuaciones (4)-(5)

Tabla 2. Parámetros de degradación del generador sincrónico y costos de mantenimiento

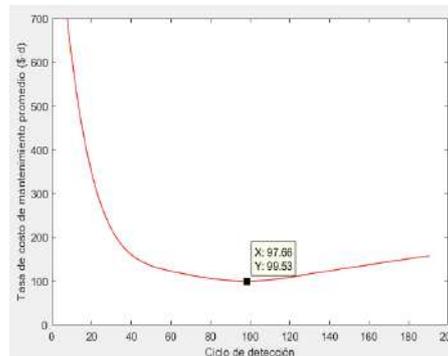
Costos de mantenimiento/ dólares	Componente		
	Rodamientos	Bobinado	Excitatriz
$C_{P(i)}$	1080	2315	1543
$C_{R(i)}$	4630	10802	7716
$C_{I(i)}$	154	154	154
$C_{D(i)}$	1111	1111	1111
$C_{M(i)}$	309	772	463
R	7716	7716	7716
	Degradación		
D_i	100	200	0,08
L_i	90	190	150
μ_{θ_i}	0,08	0,12	140
σ_{θ_i}	0,015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

V. RESULTADOS

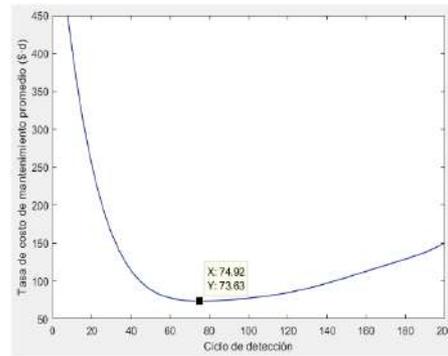
El CBM (mantenimiento basado en condición) propuesto en el presente trabajo es válido en un generador 133,025 KW, 13,800 V, 60 Hz, rotor cilíndrico de 2 polos y 3600 RPM, de la ecuación (6) se obtiene el costo de mantenimiento promedio independiente, la tasa y curva de ciclo de detección óptima para los 3 componentes los cuales se muestran en la Fig. 5. 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).



(a) Rodamientos



(b) Bobinado del estator



(c) Excitatriz

Figura 5. Curva del ciclo de detección de la tasa de costo de mantenimiento promedio de cada componente

La relación entre el costo de mantenimiento de varios componentes y el ciclo de inspección se presentan en la Fig. 6. 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. 6. 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.

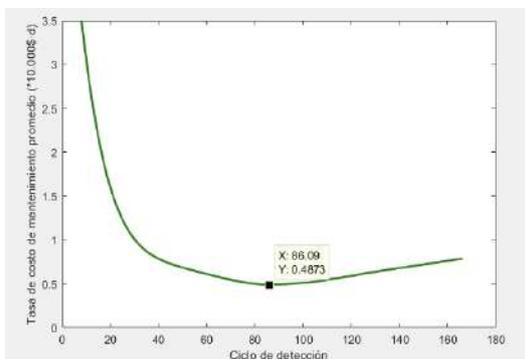


Figura 6. Curva del ciclo de detección de la tasa de costo de mantenimiento multicomponente

Las actividades de mantenimiento de los componentes del generador sincrónico originaran las correspondientes tasas de costes por inactividad, para esto se mantendrá la tasa para los valores de otros parámetros sin cambio y se remplazara el valor $C_{D(t)}$.

La relación entre la tasa de costo de mantenimiento total promedio y el ciclo de detección para el generador sincrónico bajo diferentes pérdidas por parada se obtienen de las ecuaciones (6) - (13), como se muestra en la Fig. 7.

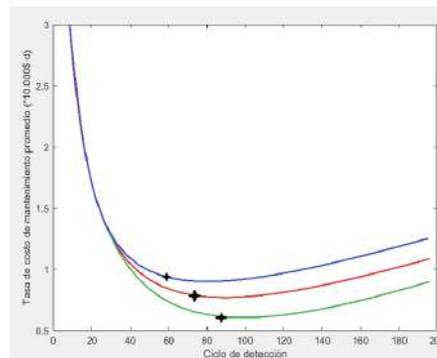


Figura 7. Efecto de la tasa de costo del tiempo de inactividad en el período de detección óptimo del generador sincrónico

Se puede ver en la Fig. 7. que cuando la tasa de costo de tiempo de inactividad es 536, 1125 y 1688 dólares respectivamente, los períodos de detección óptimos correspondientes del generador sincrónico son 59, 78 y 84 días, respectivamente.

De acuerdo con la Fig. 7., podemos inferir lo siguiente:

- A medida que aumenta la tasa de costo del tiempo de inactividad por unidad de tiempo, el período de detección óptimo disminuye. Esto se debe a que cuando aumenta la tasa de costo del tiempo de inactividad por unidad de tiempo, para garantizar la tasa de costo promedio óptima, es necesario aumentar la frecuencia de detección para acortar el tiempo de inactividad y acortar el ciclo de detección.
- A medida que aumenta la tasa de costo de pérdida de tiempo por inactividad por unidad de tiempo, la tasa de costo promedio óptimo tendrá un comportamiento creciente. Al cambiar el valor del costo de mantenimiento fijo R, se puede obtener la relación entre la tasa de costo de mantenimiento promedio del generador sincrónico y el ciclo de inspección bajo diferentes costos de mantenimiento

fijo, la Tabla III. Muestra como a diferentes valores de costo de mantenimiento fijo R se definen los periodos de inspección óptimos para el generador analizado como un sistema multicomponentes. Obviamente, cuando aumenta el costo fijo de mantenimiento R aumentará el ciclo de mantenimiento del generador sincrónico, esto con la finalidad de reducir los tiempos de mantenimiento del sistema durante el ciclo de vida y reducir el

Tabla 3. Impacto del costo de mantenimiento fijo R en el costo de mantenimiento del generador sincrónico

Componente	Costo fijo de mantenimiento R (dólares)	Periodo óptimo de inspección τ (días)
Rodamientos	5625	85
Rotor	16875	110
Excitatriz	11250	98

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.

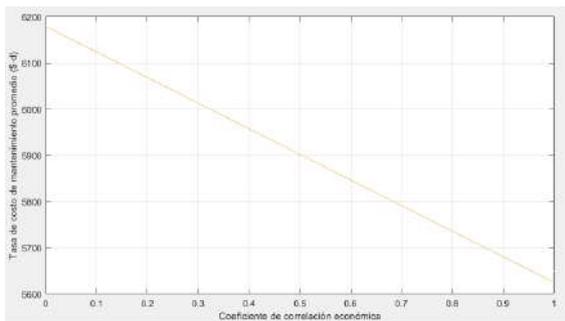


Figura 8. Relación entre la tasa de costo de mantenimiento promedio y el coeficiente de correlación económica de los componentes

En la Fig. 8 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.

VI. CONCLUSIONES

La temprana detección de fallas en generadores de los sistemas de generación es de vital importancia, por lo que aquellas representaciones que permitan un estudio acertado y confiable sin requerir la paralización de la maquinaria para su posterior revisión son objeto de estudios encaminados a la mejora de las políticas de mantenimiento óptimo, teniendo en cuenta los distintos costos que estos implicaría.

El mantenimiento basado en condición (CBM) plantea la detección de fallas cuando estas no han alcanzado un nivel perjudicial, evaluando los costos que implicarían no actuar en un tiempo prudencial a partir de la predicción de estados futuros para los diferentes componentes analizados del generador cuando se encuentra en operación normal o también llamado régimen permanente.

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 practica un valor agregado al momento de diseñar un plan que defina claramente las políticas para un mantenimiento optimo basado en condición.

REFERENCIAS

- 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
- 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.
- 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
- 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
- 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
- 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
- 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>
- 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
- 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>
- 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.
- Van Noortwijk J M. "A survey of the application of gamma proses in maintenance" Journal. Reliability Engineering and System Safety 2009, 94 (1): 221. DOI: 10.1016 / j. res. 2007.03.019.
- 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) 000093-4.
- 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.
- 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.

- Guerineau L, Gouno E. "Inference for a failure counting process partially observed", [J] IEEE Transactions Reliability, 2014, 64 (1): 19. DOI: 10.1109 / TR.2014.2354171.
- Sahin I. "A generalization of renewal processes", [J] Operations Research Letters, 1993, 13 (4): 259-263. DOI: 10.1016 / 0167-6377 (93) 90048-1
- Van Noortwijk JM. "Explicit formulas for the variance of discounted life-cycle cost", Reliability Engineering and System Safety, 2003, 80 (2): 185-195. DOI: 10.1016 / S0951-8320 (03) 00023-1.
- Hornbeek A V, Pintelon L. "A Dynamic predictive maintenance policy for complex multi-component system" [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2013, 120 (12): 3950. DOI: 10.1016 / j.ress.2013.02.029.
- Torres Darío, Gallo Andres. "Implementation of a mathematical model for the Trinitaria generation." [J], IEEE Transactions Reliability, 2017, 66 (2):22