

MODELO DE GESTIÓN CONTEXTUALIZADO DEL MANTENIMIENTO A LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE MEDIA TENSIÓN DE INTERIORES MEDIANTE MÉTODOS DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL

I MODEL OF ADMINISTRATION FROM THE MAINTENANCE TO THE ELECTRIC SUBSTATIONS OF HALF TENSION OF INTERIORS BY MEANS OF METHODS OF THE ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Carlos Manuel Ruano González, cmruanog@gmail.com, carlos.ruano@reduc.edu.cu

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad Electromecánica, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba

Resumen

La operación confiable de un sistema hace necesario conocer por un lado las tasas de falla, los tiempos de reparación, el costo de las reparaciones y los equipos propensos a fallas; por otro lado, se requiere conocer los tiempos de indisponibilidad por inspecciones, mantenimientos programados y sus costos asociados. En ello juega un papel importante la confiabilidad de las subestaciones eléctricas de interiores y dentro de ellas, las celdas eléctricas, que se expresan mediante índices de confiabilidad, los cuales cuantifican la calidad del servicio que presenta el sistema eléctrico en general. Dichos índices deben ser lo suficientemente consistentes y sensibles para diferenciar varias alternativas y asegurar la operación del sistema de forma tal que garantice su operación confiable y de los elementos asociados al mismo.

Palabras clave: Métodos, Modelos de gestión, Inteligencia Artificial

Abstract

The reliable operation of a system makes necessary to know on one hand the flaw rates, the times of repair, the cost of the repairs and the prone teams to flaws; on the other hand, it is required to know the times of unavailability for inspections, programmed maintenances and its associate costs. In it plays it an important paper the dependability of the electric substations of interiors and inside them, the electric cells that are expressed by means of indexes of dependability, which quantify the quality of the service that presents the electric system in general. This indexes should be the sufficiently consistent and sensitive ones to differentiate several alternatives and the operation of the system in a such way that guarantees its reliable operation to assure and of the elements associated to the same one.

Keywords: Methods, administration Models, Artificial Intelligence

Introducción

Los principales índices de confiabilidad están interrelacionados con la gestión del mantenimiento de cualquier activo, dependiendo del tipo y con qué frecuencia ocurren las fallas, la gravedad de las consecuencias y las

estrategias de mantenimiento que son adecuadas para prevenir tales fallas. De ahí parte el RCM, el cual se considera por varios autores como una de las filosofías mundiales del mantenimiento pues contribuye a aplicar nuevos conceptos y categorías en la actividad ya compleja del mantenimiento, en este caso es referido al análisis de criticidad, con el fin de evaluar la gravedad de los fallos.

Por lo tanto, si se integran los elementos de la confiabilidad operacional dada por el análisis de criticidad y las influencias medioambientales en que se encuentran las celdas eléctricas, las mediciones de los parámetros eléctricos que definen el estado de las mismas, así como las revisiones visuales y la inteligencia artificial, se está en condiciones de formular una nueva concepción del tratamiento a la gestión del mantenimiento en las subestaciones eléctricas de interiores de los grupos de generación distribuida, por lo que en los próximos epígrafes se abordan las bases de dicho modelo.

La confiabilidad engloba varias actividades y una de ellas es el planteamiento de modelos de confiabilidad, que es la probabilidad de supervivencia del sistema (Kaminskiy, 2012) y se expresa como una función de las confiabilidades de los componentes o subsistemas, y generalmente estos modelos se encuentran dependiendo del tiempo; otra actividad de la confiabilidad es la de las pruebas de duración y estimación de la confiabilidad. Cuando se realizan estos tipos de análisis en las celdas eléctricas, varios autores se refieren al uso de la Función de Confiabilidad y a la Tasa de Fallas (Lindquist & et al, 2008) (Gondres & et al, 2013).

Desarrollo

Determinación de la confiabilidad operacional de las subestaciones eléctricas de interiores mediante análisis estadísticos

La Función de Distribución Acumulativa para una población es llamada distribución de vida y se denota como $F(t)$. La $F(t)$ se interpreta como la proporción de componentes, equipos o sistemas que fallan antes o hasta el tiempo t .

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx, \quad t \in [0, \infty]$$

Dónde:

T : es la variable aleatoria que indica el tiempo de fallas.

$f(x)$: es la función de densidad de probabilidad.

La Función de Distribución Acumulativa se puede interpretar de dos maneras:

1. La probabilidad o seguridad de que una unidad de la población falle antes de t unidades de tiempo.
2. Fracción de la población que falla antes de t unidades de tiempo.

La función de confiabilidad, es un complemento de la Función de Distribución

Acumulativa y esta tiene una peculiar atención en la confiabilidad ya que se centra en las unidades que no fallan en un tiempo t .

La función de confiabilidad $R(t)$ se define de la siguiente manera:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

Esta función se puede interpretar de la siguiente forma:

1. La probabilidad de que una unidad de la población no haya fallado antes del tiempo t.

2. Fracción de la población que sobrevive al tiempo t.

Mientras que la tasa de falla es la cantidad de fallas de un componente del sistema en un período de observación (años) en que estuvo operando.

$$\lambda = \frac{N}{n \cdot T} \quad (\text{Fallas/años})$$

Dónde: λ es la Tasa de falla.

N es el número de fallas de un elemento.

n es el número total de elementos expuestos a las fallas.

T es el período de estudio en años.

A partir de ahí se puede definir la Tasa de Falla Instantánea que es conocida también como Tasa de Riesgo. La tasa de fallos puede definirse como el número de equipos que fallan durante un período de tiempo concreto dividido por el número de equipos expuestos al fallo. Puede interpretarse como la tasa de transición del estado "en funcionamiento" al estado "averiado".

La función de riesgo especifica las fallas instantáneas o la tasa de muerte en el tiempo t, dado que un objeto ha sobrevivido hasta el tiempo t. La tasa de falla instantánea está definida como:

$$Tf(t, t + \Delta t) = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{t + \Delta t - t} * \frac{1}{R(t)}$$

Dónde: $(t + \Delta t)$ es la función de probabilidad acumulativa en el tiempo $t + \Delta t$.

$F(t)$ es la función de probabilidad acumulativa en el tiempo t.

$R(t)$ es la función de confiabilidad.

Por último y no menos importante el método de la Razón Promedio de Falla se utiliza para medir la calidad del servicio eléctrico, acercándose más a medir la frecuencia de ocurrencia de fallas que a medir la duración de las mismas. En él se consideran combinaciones de elementos en serie o paralelo basados en los siguientes principios:

- a) Cada componente se encuentra en solo dos estados que son: disponible y no disponible. No se toma en cuenta el estado de mantenimiento. Considerando el número de fallas se determina la probabilidad de falla "p", y a la probabilidad de que esté disponible se le llama "q" siendo:

$$p + q = 1$$

- b) Se supone que las fallas son independientes y por tanto la probabilidad de fallas simultáneas viene dada por el producto de sus respectivas probabilidades.

- c) En un sistema en serie, todos los componentes deben estar disponibles para que exista el flujo de potencia desde el envío hasta el recibo. La probabilidad de no falla es el producto de las probabilidades de no falla de cada componente; para el caso de dos componentes:

$$Q_s = Q_1 * Q_2$$

Y la probabilidad de falla es:

$$P_s = 1 - Q_1 * Q_2 = p_1 + p_2 - p_1 * p_2$$

Si p_1 y p_2 son menores que la unidad $p_1 * p_2$ se puede despreciar.

d) En sistemas en paralelo deben fallar todos los componentes para que no exista el flujo de potencia desde el envío hasta el recibo.

La probabilidad de falla es:

$$P_s = p_1 * p_2$$

El valor de la probabilidad de falla se obtiene de dividir el número de días en que ocurren fallos al número de días que el componente debe estar en servicio; generalmente se considera un año.

$$P_{fallas} = \frac{\text{suma de días en que ocurrieron fallas}}{\text{días del año}}$$

Sin embargo, la estimación de la confiabilidad o la probabilidad de fallas de las celdas va a depender del tipo de datos disponibles, o sea, puede ser de dos formas, una **basada en datos de condición**, altamente recomendable para equipos estáticos, que presentan patrones de “baja frecuencia de fallas” y por ende no se tiene un “historial de fallas” que permita algún tipo de análisis estadístico como es el caso de las celdas eléctricas que llevan pocos años de operación en las subestaciones; la otra forma es **basada en el historial de fallas**, recomendable para equipos dinámicos, los cuales por su alta frecuencia de fallas, permiten el almacenamiento de un historial de fallas que hace posible el análisis estadístico, o sea, cuando las celdas lleven muchos años de servicio (Jiménez, 2009) (Parra & Crespo, 2012).

Evaluación de la confiabilidad operacional de las celdas eléctricas mediante análisis de la criticidad

A medida que ha evolucionado la tecnología de fabricación de las celdas eléctricas, también se han realizado análisis de su funcionamiento y de la confiabilidad operacional de las mismas. En las investigaciones realizadas por varios autores se define la confiabilidad operacional como la capacidad de una instalación o sistema, para cumplir su función dentro de los límites de diseño, bajo contexto operacional específico de sus procesos, su tecnología y su personal (Del Castillo Serpa & et al, 2009) (Alba Valle & et al, 2012) (Díaz & et al, 2012) (Mesbah-UI-Awal & Das, 2013).

En el caso de las subestaciones si se realiza el análisis de forma general se utilizan los conjuntos de corte, mientras que si es por celdas se usan otros métodos como es el caso de la criticidad (Al-Suhaily & et al, 2010) (ReliaSoft, 2012).

El método clásico de evaluación de la criticidad de los componentes de un sistema consiste en la determinación, en primer lugar, de las funciones que debe realizar el sistema considerado dentro del conjunto de la instalación, así como de sus fallos funcionales asociados de acuerdo a la norma militar estadounidense 1629A, la cual propone un Análisis de Criticidad Cualitativo cuando no se dispone de información específica sobre la configuración de las partes o las tasas de falla y propone un método de Análisis de Criticidad Cuantitativo cuando se dispone de dicha información (Mil-Std-1629A, 1980).

Para cada uno de estos fallos funcionales, se identifican aquellos componentes cuyo fallo da lugar al fallo funcional en estudio, provocando efectos negativos en la instalación (Sachdeva & et al, 2009) (Johnson, 2013). La criticidad de los modos de falla es evaluada en términos de la probabilidad de ocurrencia, de

acuerdo a diferentes niveles (Del Castillo Serpa & et al, 2009) (Gargama & et al, 2011) (Alba Valle & et al, 2012) (Rojas, 2013).

Por lo tanto, si se conoce la frecuencia de falla y sus consecuencias de un determinado activo, se puede determinar su nivel de criticidad en un tiempo de operación específico, debido a los modos de falla con una determinada categoría de severidad. La clasificación de criticidad está dada de acuerdo al grado de severidad.

Criticidad Alta: Falla que puede causar lesiones severas, daños mayores propiamente, o daños al sistema que signifiquen la pérdida de la misión.

Criticidad Media: Falla que puede causar lesiones menores, daños menores propiamente o daños menores al sistema que signifiquen retrasos, pérdida de disponibilidad o degradación de la misión.

Criticidad Baja: Falla que no causa lesiones, ni daños propiamente o daños al sistema. Aunque puede generar actividades de mantenimiento no programado o reparaciones.

El análisis de la criticidad persigue como objetivo establecer un método que permita la determinación de la jerarquía de procesos, sistemas y equipos de una planta compleja permitiendo la subdivisión de los elementos en secciones que puedan ser manejadas de manera controlada (Johnson, 2013). La criticidad se puede expresar en la forma matemática siguiente (1):

$$Criticidad = Frecuencia * Consecuencia$$

En la anterior expresión la frecuencia se asocia al número de fallas, interrupciones o eventos que tenga el elemento o el sistema que se encuentre en el proceso de análisis, mientras que la consecuencia se asocia al impacto y flexibilidad operacional, los costos de reparación y los impactos en seguridad y ambiente.

En el caso de las celdas eléctricas de una subestación puede tenerse en cuenta la frecuencia de fallas, la transferencia de potencia que circula a través de la misma, el impacto a la transmisión de energía cuando ocurre una falla, tiempo promedio para reparar, costo del mantenimiento, impacto en seguridad personal y ambiental, los cuales están relacionados con el análisis de la confiabilidad operacional de cualquier elemento.

De acuerdo a los criterios antes expuestos, a las características del SEN y a las consideraciones de los especialistas de la ECIE, se determinaron los indicadores a tener en cuenta para el análisis de la criticidad en las celdas eléctricas de una subestación de interiores como se muestra a continuación:

1. Frecuencia de fallas (FF)

La frecuencia de fallas de las celdas no es más que la tasa de fallas del mismo en un período de observación como se muestra en la ecuación 2.3. En el caso de que no existan fallas en el período analizado debido al poco tiempo que llevan de explotación o estabilidad operacional, se realiza una modelación de su tasa de falla mediante análisis probabilísticos (Jiménez, 2009) (Parra & Crespo, 2012).

2. Transferencia de potencia a través de la celda (TPC).

El impacto que puede ocasionar una falla de la celda a la transmisión de energía, o sea, de acuerdo al elemento que protege (reactor, línea, transformador, generador).

3. Impacto a la transmisión de energía (ITE).

Se tiene en cuenta la transferencia de flujo de carga a través de las celdas eléctricas de acuerdo a la ubicación dentro de la subestación, y va a estar dado por la redistribución que puede existir al desconectar una línea determinada, por lo que diferentes cargas pueden salir de servicio provocando pérdidas económicas por desconexiones no planificadas y la energía dejada de servir (Mozina, 2012).

4. Tiempo promedio para reparar (TPPR).

El tiempo promedio para reparar es la medida de la distribución del tiempo de reparación de un equipo o sistema. Este indicador mide la efectividad en restituir algún o algunos elementos de la celda a condiciones óptimas de operación una vez que se encuentra fuera de servicio por un fallo, dentro de un período de tiempo determinado (Gill, 2009) (Lopera & Manotas, 2011). El mismo puede ser calculado como sigue (2):

$$TPPR = \text{Tiempo Total de Inactividad} \div \text{numero de falla}$$

5. Costo del mantenimiento (CM).

El costo del mantenimiento está dado de acuerdo a los costos directos e indirectos que intervienen en el mantenimiento parcial que se le realiza a los interruptores (Martínez, 2013).

6. Impacto en la seguridad personal (IS).

El impacto en la seguridad personal considera la posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños a personas producto de la ocurrencia de un fallo, como puede ser el caso de la explosión de un interruptor de acuerdo a la norma cubana (NC96-01-15, 1986).

7. Impacto ambiental (IA).

El impacto ambiental considera la posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños al medio ambiente producto de la ocurrencia de un fallo, el cual puede estar dado por la emisión de gas SF₆ a la atmósfera por desgaste o avería dentro del interruptor que compone la celda eléctrica y aceite dieléctrico de los transformadores de medición, según establece la norma cubana (NC93-00-003, 1987). Por lo tanto, la ecuación a utilizar quedaría de la siguiente forma (3):

$$\text{Criticidad} = FF * [(ITE * TPI * TPPR + CM + IS + IA)]$$

se realizan los análisis pertinentes para la determinación de los criterios de evaluación de cada indicador, los rangos de criticidad, así como los pasos a seguir para su implementación en una subestación eléctrica.

Utilización de los métodos de inteligencia artificial en la gestión del mantenimiento a las subestaciones eléctricas de media tensión de interiores

Existen varios métodos de inteligencia artificial que se pueden aplicar a las gestiones de mantenimiento. A continuación, se mencionan algunos de ellos:

1. **Aprendizaje automático**: El aprendizaje automático se puede utilizar para analizar grandes cantidades de datos de mantenimiento y detectar patrones que indiquen la necesidad de realizar mantenimiento a algunos de ellos. Este método se utiliza para analizar grandes cantidades de datos históricos y predecir posibles fallas

en los equipos de mantenimiento. Se pueden utilizar técnicas de regresión, clasificación y agrupamiento para identificar patrones en los datos y tomar decisiones basadas en ellos.

2. **Redes neuronales**: Se pueden utilizar redes neuronales para predecir el desgaste de los equipos y mejorar la programación del mantenimiento preventivo. Estas redes pueden analizar datos en tiempo real y generar alertas para el personal de mantenimiento cuando se detecta un problema potencial.

3. **Sistema experto**: Los sistemas expertos son programas de software que utilizan reglas y conocimientos específicos para tomar decisiones. En el caso de mantenimiento, se pueden utilizar para identificar los problemas existentes en el equipo y determinar los pasos que deben seguirse para repararlo.

4. **Simulación**: La simulación se utiliza para crear modelos virtuales de equipos y sistemas. Se pueden utilizar estas herramientas para probar diferentes escenarios y optimizar la programación del mantenimiento.

En general, la inteligencia artificial se puede aplicar de diversas formas a las gestiones de mantenimiento, lo que permite una mejor eficiencia y eficacia en la administración del mismo.

En la gestión de mantenimiento a redes de alta tensión, se aplican varios métodos de inteligencia artificial, como:

1. **Análisis predictivo**: Este método utiliza algoritmos de aprendizaje automático para predecir fallos en los equipos y sistemas antes de que realmente ocurran. Se utilizan datos históricos de mantenimiento, registros de mantenimiento y minería de datos: se utilizan algoritmos de aprendizaje automático para analizar grandes cantidades de datos históricos de los equipos de alta tensión, con el fin de identificar patrones y anomalías en el funcionamiento de los equipos.

2. **Sistemas expertos**: Son programas informáticos diseñados para simular el razonamiento humano en una tarea específica. En la gestión de mantenimiento de alta tensión, se utilizan sistemas expertos para diagnosticar problemas y proponer soluciones para equipos específicos.

3. **Redes neuronales**: Se utilizan para aprender de experiencias pasadas y mejorar la capacidad de detección de fallas y mantenimiento preventivo. A través de la identificación de patrones en datos históricos, las redes neuronales pueden predecir cuándo un equipo puede fallar y sugerir un plan de mantenimiento preventivo.

4. **Sistemas de gestión de activos**: Utilizan técnicas de inteligencia artificial para identificar tendencias de fallas, y programar actividades de mantenimiento preventivo reduciendo el tiempo de inactividad y los costos de reparación.

5. **Herramientas de monitoreo y diagnóstico**: Se utilizan para recolectar y analizar datos en tiempo real, permitiendo la capacidad para identificar problemas de manera temprana y tomar medidas correctivas antes de que los problemas empeoren.

En resumen, la inteligencia artificial se aplica en la gestión de mantenimiento de alta tensión para mejorar la eficiencia de la gestión de activos y reducir los costos asociados con el mantenimiento y reparación de los equipos.

Algunos de los métodos de inteligencia artificial que se aplican en la gestión de mantenimiento a las subestaciones eléctricas de alta tensión son:

Análisis de datos: La inteligencia artificial se utiliza para analizar grandes cantidades de datos en tiempo real para identificar patrones y tendencias que indiquen problemas potenciales en subestaciones eléctricas de alta tensión son:

1. **Aprendizaje automático:** Se utiliza para determinar patrones y tendencias a partir de grandes conjuntos de datos relacionados con las operaciones y mantenimiento de las subestaciones. Esto puede ayudar a predecir y prevenir fallos y averías, así como a optimizar los tiempos de inactividad y la eficiencia en la gestión de los activos.

2. **Redes neuronales artificiales:** Estos algoritmos de aprendizaje profundo pueden ayudar a mejorar la precisión de los modelos predictivos y analíticos utilizados en el mantenimiento, por ejemplo, para detectar problemas de calidad de la energía o identificar señales de alerta temprana de fallas potenciales.

3. **Análisis de datos en tiempo real:** Las subestaciones eléctricas modernas están equipadas con sistemas de monitorización y control en tiempo real que permiten recopilar y analizar grandes cantidades de datos. La inteligencia artificial puede ser utilizada para analizar estos datos en tiempo real y alertar al personal de mantenimiento cuando se detectan anomalías o problemas.

4. **Sistemas de recomendación:** Estos sistemas pueden ayudar a los encargados de mantenimiento a seleccionar las mejores prácticas y herramientas para llevar a cabo diferentes tareas de mantenimiento. Esto puede mejorar la eficiencia y reducir los costos y el tiempo de inactividad.

5. **Lógica difusa:** Esta técnica se puede utilizar para modelar el conocimiento y la experiencia de los expertos en mantenimiento y operaciones, y luego aplicar esos modelos para tomar decisiones informadas sobre el mantenimiento preventivo. Este método se aplica para modelar problemas en los que la realidad no es completamente precisa o binaria, es decir, en situaciones donde la respuesta no es un simple "verdadero" o "falso", sino que existe un grado de incertidumbre o ambigüedad.

Para utilizar la lógica difusa, se sigue lo siguiente que las variables no pueden ser perfectamente clasificadas como verdaderas o falsas. En lugar de eso, la lógica difusa permite asignar grados de verdad para las variables en cuestión.

La aplicación de la lógica difusa se puede dividir en tres pasos básicos:

1. Definir las variables de entrada: Se deben identificar todas las variables relevantes y definir cada una de ellas como una función de pertenencia que describe su grado de verdad.
2. Definir las reglas: Se deben establecer las reglas que relacionan las variables de entrada con las variables de salida.
3. Definir las variables de salida: Se deben definir las variables de salida, las cuales se obtienen aplicando las reglas antecedentes a las funciones de pertenencia de las variables de entrada.

Una vez definidas estas variables, se puede utilizar una herramienta de lógica difusa para procesar la información y obtener soluciones que se adapten a las condiciones cambiantes del entorno. La lógica difusa se aplica en diversos campos, como en ingeniería de sistemas inteligentes, control de procesos, análisis de mercado, procesamiento de imágenes, entre otros.

Modelo de gestión de mantenimiento a las subestaciones eléctricas de media tensión mediante teoría de la lógica difusa de los conjuntos aproximados

Actualmente, algunas empresas tratan de implementar el sistema de mantenimiento por diagnóstico, haciendo esto que en varias ocasiones se presenten problemas sobre todo a la hora de decidir un mantenimiento o el tiempo probable de ejecutarlo, a partir de las pruebas diagnósticas, por lo que la introducción de la lógica difusa puede ayudar en esas decisiones.

El cálculo de los índices de deterioro y el momento apropiado para dar mantenimiento a las celdas eléctricas de las subestaciones de interiores de 34, 5 kV de los grupos de generación distribuida se realiza considerando la misma como un sistema compuesto por varios dispositivos, y se necesita determinar los coeficientes de importancia del deterioro de cada tipo y de los elementos de la celda, obtenidos con la ayuda de los especialistas y de las informaciones de las inspecciones a la subestación, así como del análisis cuantitativo y cualitativo de las operaciones de los mismos, mediante el método de la teoría difusa de los conjuntos aproximado podemos hacer un modelo de gestión del mantenimiento para lograr la eficiencia operacional de la subestación.

- La teoría de los conjuntos aproximados en la toma de decisiones:

Los Conjuntos Aproximados son un nuevo enfoque matemático que trabaja con datos que presentan imprecisión, vaguedad e incertidumbre. Se relaciona con la teoría de la evidencia, las redes neuronales y los conjuntos difusos, entre otras ramas de la inteligencia artificial. Este vínculo es una característica importante que ha contribuido a la rápida y amplia propagación de los Conjuntos Aproximados; siendo de interés para la inteligencia artificial y ciencias cognitivas tales como: aprendizaje automático, la adquisición de conocimientos, análisis de la decisión y descubrimiento de conocimiento en bases de datos, sistemas expertos y patrones de reconocimiento. Asimismo, tiene peculiar importancia para los sistemas de apoyo a la decisión y Minería de Datos (Junhai & et al, 2011) (Qinghua & et al, 2012). Sí se tiene un conjunto de elementos que tienen atributos en común, se seleccionan atributos a priori y se agrupan los elementos que tengan valores iguales en sus atributos. A esto se le conoce como relación de inseparabilidad, que es una

relación de equivalencia que agrupa en clases disjuntas a los elementos indiscernibles entre ellos con base en el par atributo-valor. Las inconsistencias que existen son tratadas mediante dos aproximaciones por defecto y por exceso. El primero hace referencia a los elementos que con seguridad pertenecen a una clase y los segundos a los que probablemente pertenezcan a otra clase. Se permite que los datos tengan inconsistencias al iniciar el análisis y los resultados ayudan a determinar la importancia de los atributos y observar las relaciones entre ellos (Pawlak, 1996) (Tsangi & et al, 2012) (Yang & et al, 2012).

Primeramente, se parte de un sistema de información, el cual asume que cada objeto existente en el universo tiene asociada información (datos e información) que es expresada mediante atributos.

Dado un par $A = (U, A)$ no vacío de conjuntos finitos, donde U es el conjunto de objetos y A el conjunto de atributos, se tiene una función $a: U \rightarrow V_a$, donde V_a es el conjunto de valores de los atributos llamado dominio de a . El par $A = (U, A)$ es llamado sistema de información, que expresa el conocimiento a priori que se tiene sobre un conjunto de objetos (Tsangi & et al, 2012).

Por otro lado, tenemos que la aproximación por defecto se define:

$\underline{B}X = \{X \mid [X]B \subseteq X \neq \emptyset\}$ Los objetos $\underline{B}X$ que pueden ser identificados como elementos de X con certeza. La aproximación por exceso se define:

$\overline{B}X = \{X \mid [X]B \cap X \neq \emptyset\}$ Los objetos en $\overline{B}X$ son aquellos que probablemente pertenezcan a X .

El conjunto $BN_B(X) = \underline{B}X - \overline{B}X$ si $BN_B(X)$ se conoce como la región límite de X , $BN_B(X)$ es vacío X es un concepto preciso, de lo contrario se dice que es un concepto impreciso basado en el conocimiento de B .

El conjunto $U - \underline{B}X$ se le denomina conjunto Región exterior de X , son los elementos que con base en el conocimiento que se tiene son clasificados como elementos que no pertenecen a X (Pawlak & Skowron, 2007).

La imprecisión se puede representar también a través de la siguiente fórmula:

$$\alpha B(X) = \frac{|\underline{B}X|}{|\overline{B}X|}$$

Si $\alpha B(X) = 1$ el conjunto es preciso con respecto a B , si $\alpha B(X) \leq 1$ el conjunto es impreciso con respecto a B , $\alpha B(X)$ está en el intervalo $[0,1]$.

La clasificación de objetos se lleva a cabo mediante patrones o atributos. La cuestión es saber qué atributos se pueden remover de la tabla de decisión sin que se modifique la familia de conjuntos elementales, es decir, que se preserve la relación de inseparabilidad; por lo que se debe tener en cuenta la dependencia de atributos.

Un conjunto de atributos D depende totalmente de un conjunto de atributos C , $C \Rightarrow D$, si todos los atributos de C determinan de manera única los valores de D . D depende de C , si existe una dependencia funcional entre los valores de C y D . Dado que C y D son subconjuntos de A , D depende en un grado k ($0 \leq k \leq 1$), denotado por:

$C \Rightarrow_k D$, si D depende de C , entonces $IND(D) \subseteq IND(C)$.

Por lo tanto, se está en condiciones de unificar todo lo relacionado en los epígrafes anteriores en un modelo mediante el uso de la Teoría Difusa de los Conjuntos Aproximados que permita tomar la decisión correcta respecto al mantenimiento de las celdas eléctricas.

Modelo de gestión de mantenimiento a las celdas eléctricas mediante teoría difusa de los conjuntos aproximados

Existe una paradoja entre la certidumbre de que todas las máquinas y equipos fabricados por una firma tienen las mismas respuestas y la incertidumbre, así como la inestabilidad del funcionamiento real, máxime, cuando está mediado por el hombre. Este efecto ha sido sembrado bajo la lógica formal de Aristóteles, cuyos principios básicos son:

- Principio de identidad: un objeto sólo es igual a sí mismo;
- Principio de no-contradicción: un objeto no puede estar en un conjunto y en su complementario;
- Principio del tercero excluido: un objeto sólo puede estar en un conjunto o en su complemento, y no hay otra posibilidad.

Haciendo un análisis, se observa que la realidad está mediada por lo difuso, en donde esto hoy, no es igual a esto mañana, ni es igual a sus semejantes, pero aún más, quien opera hoy, no opera igual mañana y todos operan distinto, por lo que el pensamiento lineal se debe cambiar por uno no lineal, un nuevo modo de conocer la realidad y precisamente un conjunto difuso no cumple el segundo y el tercer principio aristotélico, es decir, que una cosa puede pertenecer y no pertenecer a la vez a un mismo conjunto complementario, simplemente porque los criterios de pertenencia no son nítidos.

Sí se toma en cuenta que la subestación eléctrica, al ser un organismo no-autónomo, el producto de su funcionamiento es diferente de él mismo y, por extensión, los cambios que pueda sufrir sin alterar su identidad están subordinados a la producción de algo diferente (entre otros el mantenimiento). Este hecho caracteriza una situación de no-autonomía, por lo que cada cambio, queda marcado en su historia y desde luego, influenciará en su funcionamiento, por lo que es necesario tenerlo en cuenta.

En consecuencia, se aprecian como fundamentos del modelo de gestión del mantenimiento:

- a) La subjetividad de la gestión del mantenimiento.
- b) La historia del funcionamiento de las celdas eléctricas.
- c) El envejecimiento de los equipos primarios que componen las celdas.
- d) La relación contextual del sistema celdas-hombre.
- e) Lo difuso de las revisiones visuales.
- f) La incertidumbre en la medición de las variables.

La modelación de la gestión del mantenimiento parcial se efectúa a través del método estructural funcional, basado en cuatro subsistemas bien definidos como se observa en la figura.

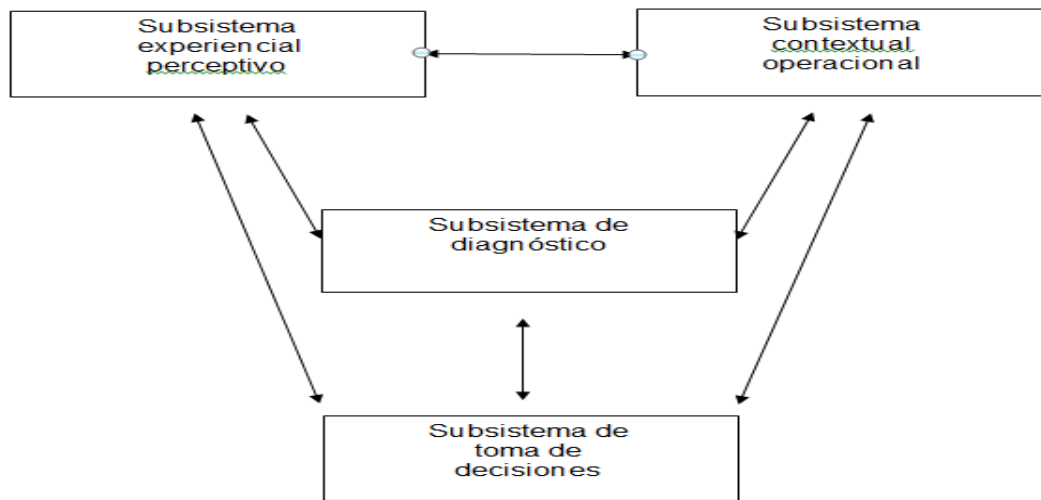


Figura. Modelo de gestión del mantenimiento a las subestaciones eléctricas

El modelo está formado por cuatro subsistemas que se interrelacionan dialécticamente. El subsistema contextual operacional donde se integran tanto la situación actual de las celdas eléctricas por el grado de envejecimientos de sus equipos primarios, la confiabilidad y por la historia de su funcionamiento, que deben dar una idea general de su estado a partir de datos reales, el segundo subsistema experiencial perceptivo brinda el nivel de signos (subjetivos) devenidos de la experiencia y las revisiones visuales del profesional, luego ambos polos llevan a un diagnóstico del estado de las celdas eléctricas, síntesis de ellos y que representa el tercer subsistema, sin embargo, como de lo que se trata es de la gestión, entonces otro subsistema, se encargará de precisar la toma de decisiones al respecto mediante el uso de teoría difusa de los conjuntos aproximados.

Por tanto, el principio fundamental del modelo propuesto de la gestión del mantenimiento parcial a interruptores de potencia se determina a partir de la integración de los resultados de un diagnóstico formado por la inspección visual, los datos históricos, la confiabilidad y el posible desgaste en los contactos.

Mientras que las regularidades del modelo propuesto están dadas en:

El subsistema de diagnóstico para la gestión del mantenimiento a las celdas eléctricas es la síntesis del subsistema contextual operacional y el subsistema experiencial perceptivo.

El subsistema de toma de decisiones para la gestión del mantenimiento a las celdas eléctricas es mediante un sistema experto debido al carácter difuso y la incertidumbre propia del sistema; y se basa en la Teoría Difusa de los Conjuntos Aproximados.

A partir de estos subsistemas y de lo que se conoce como un sistema experto, el cual permite incorporar de forma operativa el conocimiento de expertos sobre un dominio particular, razonar utilizando técnicas de razonamiento simbólico para resolver los problemas que se presentan en su dominio, y es capaz de explicar sus conclusiones; puede ser extendido a la gestión del mantenimiento de las celdas eléctricas en las subestaciones de interiores y en los campos en las subestaciones de exteriores mediante teoría difusa de los

conjuntos aproximados, o sea, crear un sistema que alerte cuándo una celda eléctrica necesita mantenimiento, evitando de esta forma la ocurrencia de fallas en el sistema eléctrico y el aumento de los costos en los mismos, tratándolo como un problema de clasificación, en el sentido que dadas las entradas de las variables se debe decidir si la celda necesita mantenimiento (Clase Positiva) o no necesita (Clase Negativa).

En esta investigación se realizaron numerosas observaciones a varias celdas eléctricas (11 celdas de 34,5 kV) y en cada caso un equipo de expertos determinó si era necesario o no dar mantenimiento a las celdas, por lo que se obtuvo un conjunto de datos que tiene dentro de sus características el hecho de que una clase posee muchos menos ejemplos que la otra, por lo que dadas las características observadas en los datos es un problema que se conoce dentro de la Minería de Datos como datos desbalanceados.

Por tanto, no es factible el uso de redes neuronales o neurodifusas, ya que estos clasificadores no pueden actuar sobre conjuntos de datos desbalanceados, por lo que se propone la integración de la lógica difusa con los conjuntos aproximados para obtener un modelo mediante teoría difusa de los conjuntos aproximados y así determinar la variable requerimiento de mantenimiento de una celda eléctrica.

Los pasos del modelo propuesto son los siguientes:

1. Preparación de los datos a utilizar en la base de conocimientos.
 - a) Identificación de las variables a utilizar.
 - b) Realización de las mediciones de cada variable.
 - c) Determinación por parte de expertos para cada una de las mediciones si necesita mantenimiento.
2. Determinación de las características de la base de conocimientos atendiendo al número de instancias en cada clase.
3. Elección del clasificador que se usará en la aplicación.
4. Elección del algoritmo de preprocesamiento que se usará en la aplicación.

Conclusiones

El principio fundamental del modelo propuesto de la gestión del mantenimiento parcial a interruptores de potencia se determina a partir de la integración de los resultados de un diagnóstico formado por la inspección visual, los datos históricos, la confiabilidad y el posible desgaste en los contactos.

Mientras que las regularidades del modelo propuesto están dadas en:

El subsistema de diagnóstico para la gestión del mantenimiento a las celdas eléctricas es la síntesis del subsistema contextual operacional y el subsistema experiencial perceptivo.

El subsistema de toma de decisiones para la gestión del mantenimiento a las celdas eléctricas es mediante un sistema experto debido al carácter difuso y la incertidumbre propia del sistema; y se basa en la Teoría Difusa de los Conjuntos Aproximados.

Referencias Bibliográficas

- ABB. (2005). *Spring operating mechanism for high voltage circuit breakers. Model FSA 1*. India: ABB Limited High Voltage Products.
- Abe, S., & et al. (2010). Malfunction suppression of semiconductor circuit breaker in high voltage DC power supply system. *IEEE Region 10 Conference TENCON 2010* (pp. 1278-1283). Fukuoka: IEEE Conference Publications.
- Alba Valle, B., & et al. (2012). *Determinación de una guía de criticidad operacional para el sistema soterrado de la Habana*. II Congreso Cubano de Ingeniería Eléctrica (pp. 884-891). Habana: CUJAE.
- Alcalá-Fdez, J., & et al. (2010). Keel data-mining software tool: Data set repository, integration of algorithms and experimental analysis framework. *Journal of Multiple-Valued Logic and Soft Computing*, 17, 255–287.
- Almaguer, R. A. (2012). *Diccionario de Contabilidad y Auditoría* (Segunda Edición.). La Habana, Cuba: Editorial de Ciencias Sociales.
- ALSTOM. (2007). *Manual técnico de interruptores GL311*
- Jaramillo Carrión, L. R. y Miño Santander, L. B. (2018). *Manual de verificación y mantenimiento Subestación Eléctrica CC Santo Domingo*. [en línea]. [Memoria inedita, Universidad de Cuenca]. <http://192.188.48.14/handle/123456789/40?offset=80>.
- Marrero Hernández, R. A., Vilalta Alonso, J. A. y Martínez Delgado, E. (2019). *Modelo de diagnóstico-planificación y control del mantenimiento. Ingeniería Industrial*. [en línea]. La Habana, Cuba: Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría, Cujae. vol.40, no.2, pp. 148-160. ISSN 1815-5936. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/pdf/rri/v40n2/1815-5936-rri-40-02-148.pdf>
- Morales Anguiano, J. N. (2021). *Interruptores Electromagnéticos*. [en línea]. <https://es.scribd.com/document/617708300/INTERRUPTORES-ELECTROMAGNETICOS>
- Núñez Ramírez, F. H. (2015). *Centrales de Generación y Subestaciones Eléctricas*. [en línea]. Santo Domingo, Republica Dominicana: Centrales De Generacion y Subestaciones Electricas. <https://core.ac.uk/download/225150793.pdf>.
- Osorio Patiño, W. y Culma Ramírez, C. A. (2019). *Manual para la operación de subestaciones eléctricas con niveles de tensión 115 kV, 33 kV y 13,2 kV*. [en línea]. [Memoria inedita, Universidad Tecnológica de Pereira]. <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/45d3d748-ba03-4ca9-8c45-a405093484f7/content>.
- Cuascuas Gutiérrez, J. H. (2020). *Simulación de interruptores de potencia con gas en ATP Draw*. [en línea]. [Memoria inedita, Instituto Politécnico Nacional]. <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/7182/1/4.pdf>
- Cuascuas Gutiérrez, J. H. (2008). *Arquitectura y montaje de subestaciones aisladas por Hexafloruro de Azufre*. Ciudad de Mexico, Mexico: Instituto Politécnico Nacional.

Gondres Torné, I., Lages Choy, S. y del Castillo Serpa, A. (2018). Modelo de gestión de mantenimiento parcial a interruptores de potencia mediante inteligencia artificial. *Revista Chilena*. [en línea]. Chile: Universidad de Chile. vol. 26, no. 3, pp. 391-397. ISSN 0718-3305. Disponible en: <https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v26n3/0718-3305-ingeniare-26-03-00391.pdf>