

## UTILIZACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA EN LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO: CASO DE ESTUDIO

### RESUMEN

En el presente trabajo abordamos el tema de la gestión del mantenimiento de interruptores de potencia desde otra óptica totalmente diferente, el uso de la lógica difusa para la toma de decisiones. Se hace referencia a las diferentes reglas usadas en la lógica difusa, a sus membresías, procesos de inferencia y los métodos para la defuzzificación. Finalmente se implementa la metodología propuesta basada en la Lógica Difusa a diferentes interruptores de potencia.

**PALABRAS CLAVES:** Interruptores de Potencia, Lógica Difusa, Mantenimiento.

### ABSTRACT

*In this paper, we approach the thematic of maintenance in high voltage breaker from another totally different optics by means of the use of fuzzy logic to make an appropriate decision; we make reference to the different rules used in the fuzzy logic as well as its memberships, inference process and the methods for the defuzzification. Finally the methodology is implemented based on Fuzzy Logic to different high voltage breakers.*

**KEYWORDS:** High Voltage Breakers, Fuzzy Logic, Maintenance.

### ISRAEL GONDRES TORNÉ

Ingeniero Electricista, M.Sc.  
J' Disciplina Sistemas Eléctricos,  
Universidad de Camaguey. Cuba.  
israelgondrescu@yahoo.es

### SANTIAGO LAJES CHOY

Ingeniero Electricista, Ph.D.  
Profesor Titular. Universidad de  
Camaguey. Cuba.  
slajes@yahoo.es

### NERVELIO RODRÍGUEZ LEÓN

Ingeniero Electricista, M.Sc.  
Especialista Subestación 220kV,  
Nuevitas, Camaguey, Cuba.

### ALFREDO DEL CASTILLO SERPA

Ingeniero Electricista, Ph.D.  
Profesor Titular, Especialista en Ing.  
de Mantenimiento, CEIM, Cuba,  
acastillo@mecanica.cujae.edu.cu

## 1. INTRODUCCIÓN

El interruptor, junto con el transformador, son los equipos más importantes de una subestación. De su comportamiento depende el nivel de confiabilidad que puede tener el sistema eléctrico de potencia. El interruptor debe de ser capaz de interrumpir corrientes eléctricas de capacidades y factores de potencias diferentes, pasando desde las corrientes capacitivas de varios cientos de Amperes y las inductivas de varias decenas de kA. El principal problema de los interruptores se deriva de la naturaleza de su existencia, ya que al tener que interrumpir tanto las corrientes débiles (de carga), como corrientes de cortocircuito, y así extinguir los poderosos arcos que se originan durante su operación. El problema es entonces, esencialmente, un problema con la extinción del arco. A partir de ahí se tiene en cuenta el funcionamiento óptimo del mismo, el cual puede estar dado en la medida de la confiabilidad y esta a su vez al mantenimiento adecuado que reciba el mismo para responder ante una situación determinada. Así llegamos a la disyuntiva de cuando y por qué se debe dar mantenimiento, para ello la Lógica Difusa es una herramienta a tener en cuenta.

## 2. UTILIZACIÓN DE LA LÓGICA DIFUSA

El control difuso (*fuzzy*) se ha convertido en una de las áreas más activas y fructíferas dentro de las investigaciones en teoría de conjuntos difusos, existiendo un gran número de

aplicaciones que han puesto de manifiesto la utilización efectiva de un sistema difuso en el contexto de procesos complejos mal modelados, donde tradicionalmente se obtienen buenos resultados con un operador humano experimentado, sin el conocimiento de la dinámica subyacente. Básicamente, la lógica difusa proporciona un medio efectivo de concebir la naturaleza aproximada e imprecisa del mundo real.

En esencia, el control y supervisión difusos proporcionan mecanismos que permiten convertir una estrategia lingüística basada en el conocimiento del experto en una estrategia automática. La experiencia muestra como los resultados de aplicación de control difuso resultan mejores que los obtenidos por técnicas convencionales, en particular cuando los procesos son demasiado complejos para ser analizados por técnicas cuantitativas convencionales, o cuando las fuentes disponibles de información son interpretadas de modo cualitativo, impreciso o incierto.

El rango de la variable que representa el atributo común para los elementos de un conjunto, se denomina "el universo del discurso". Los conjuntos clásicos se definen mediante un predicado que da lugar a una clara bipartición de dicho universo. Sin embargo, el razonamiento humano utiliza frecuentemente predicados vagos que adolecen de la

nitidez binaria, y dan lugar a los conjuntos cuyos límites son borrosos o difusos.

Un Conjunto Difuso agrupa los elementos que cumplen total o parcialmente con una condición determinada. El grado de pertenencia de cada uno de ellos al conjunto representa el grado del cumplimiento de dicha condición, por ello la pertenencia de un elemento al conjunto no es absoluta sino que adoptará valores entre cero (“no pertenece”) y uno (“ciertamente pertenece”). Desde este nuevo punto de vista resulta obvio que el Conjunto Difuso es una generalización del conjunto de Cantor. [2].

Un Conjunto Difuso A sobre el universo X se representa en forma continua utilizando una función de pertenencia (membresía)  $\mu(x)$  o en forma discreta mediante un conjunto de pares ordenados  $(x, \mu_A(x))$ , donde x es el elemento de dicho conjunto y  $\mu_A(x)$  es su grado de pertenencia al mismo expresado con un número real del segmento [0, 1]. La notación simbólica correspondiente es la que sigue:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X, \mu_A(x) \in [0, 1]\} \tag{1}$$

La función de pertenencia (membresía) es una aplicación del universo X en el segmento [0, 1]:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1] \tag{2}$$

La lógica convencional puede ser interpretada como un caso particular de la Lógica Difusa, digamos que  $\mu$  es el grado de pertenencia a un conjunto que puede tomar valores entre 0 y 1 y representa el grado en que determinada proposición es verdadera. Si  $\mu$  es igual a 0 indica no pertenencia, si se igual a 1 indica pertenencia total.

### 3. METODOLOGÍA EMPLEADA EN LA GESTIÓN DEL MANTENIMIENTO A INTERRUPTORES

Actualmente las 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 diagnosticas. Sin dudas la introducción de la lógica difusa puede ayudar en esas decisiones. Para el cálculo de los índices de deterioro y el momento apropiado para dar mantenimiento a los interruptores de la subestación, considerando la misma como un sistema compuesto por estos dispositivos se necesita determinar los coeficientes de importancia del deterioro de cada tipo y del elemento del interruptor, obtenidos con la ayuda de los expertos seleccionados, según el método de expertización y de las informaciones de las inspecciones a la subestación así como del análisis cuantitativo y cualitativo de las operaciones de los mismos los datos iniciales son los siguientes:

- Estado del elemento e Interruptor al que pertenece

- Número y tipo de operaciones realizadas por cada interruptor
- Tiempo de servicio sin recibir mantenimiento.

Para la adquisición de las variables de entrada se diseñó un modelo en el que se recogen los elementos que intervienen en la valoración por el experto de la necesidad del mantenimiento parcial (Tabla 1) [4], una base de datos en Access para recoger de forma cuantitativa y cualitativa las operaciones de los interruptores. Las otras variables se obtienen de las normas cubanas para la planificación de los mantenimientos.

<b>Modelo para inspección visual a los interruptores</b>									
Subestación:				Interruptor:				Fecha:	
Tiempo de respuesta									
Bueno			Regular				Malo		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Conector									
Bueno			Regular				Malo		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Aisladores									
Bueno			Regular				Malo		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tornillería									
Bueno			Regular				Malo		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gabinete									
Bueno			Regular				Malo		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Tabla 1. Modelo para la inspección visual del interruptor.

Con estos datos se realiza primeramente la expertización del problema con el objetivo de determinar la importancia comparativa entre los elementos (Tabla 2) [6, 7] y así desarrollar las diferentes etapas.

Elemento	Importancia	Peso
Tiempo de respuesta	8	0.29
Conectores	6	0.21
Aisladores	2	0.07
Tornillería	7	0.25
Gabinete	5	0.18

Tabla 2. Importancia y peso de cada elemento que interviene en el deterioro del interruptor

**1<sup>ra</sup> Etapa:** *Determinación de la membresía de los elementos del interruptor.*

En la primera etapa del método se determina las membresías de los elementos defectuosos detectados del modo siguiente:

De la Tabla 1 en la cual el especialista recoge la valoración del estado del elemento se toma el valor numérico y se evalúa en la función del nivel de deterioro del elemento en cuestión. Esto permite garantizar que el valor de la membresía nunca sobrepase el uno, utilizándose al mismo tiempo la información ofrecida por los expertos.

Esta operación se hace para cada uno de los elementos, de este modo cada uno de los cinco elementos del Interruptor obtiene la membresía correspondiente a su nivel de deterioro, la cual se simboliza como  $\mu_i$ .

**2<sup>da</sup> Etapa:** *Determinación de la membresía global del Interruptor.* Para globalizar las cinco membresías de la primera etapa, se utiliza el método del promedio sopesado, ya que la importancia comparativa de los elementos es un dato de la información primaria suministrada por los expertos ( $\mu_i$ ):

$$\mu_G = \sum_{i=1}^{12} K_i * \mu_i \tag{3}$$

Donde:

$K_i$ : coeficiente de la importancia del elemento “i”  
 $\mu_i$ : membresía del elemento “i”

En caso de que otro o varios elementos tengan membresías igual a cero (que no presentan deterioro), esta fórmula se sustituye por la siguiente:

$$\mu_G = \frac{\sum K_j \mu_j}{\sum K_j} \tag{4}$$

donde:

j: son los elementos que presentan deterioro

**3<sup>ra</sup> Etapa:** *Determinación del índice de deterioro global ( $I_g$ ).*

Con la ayuda de los expertos se determina la estrategia del mantenimiento y se representa una curva de membresías del conjunto difuso “Interruptor Deteriorado”, cuyo atributo es el indicador del deterioro global. Dichas membresías se expresan analíticamente mediante una función de membresía ajustable y esta función se utiliza para el cálculo del índice de deterioro.

En este caso la curva de la membresía del conjunto “Interruptor Deteriorado” la cual define la estrategia a seguir cuando el interruptor tiene diferentes grados de

deterioro esta representada en la Fig.1 la cual es la representación de la ecuación 5.

La siguiente curva se obtuvo a través de análisis empíricos de acuerdo a los valores dados por el fabricante en cuanto a su ciclo de mantenimiento y el tiempo de vida útil, todo el tratamiento se hizo en el MatLab 6, así como las figuras que aparecen mas adelante.

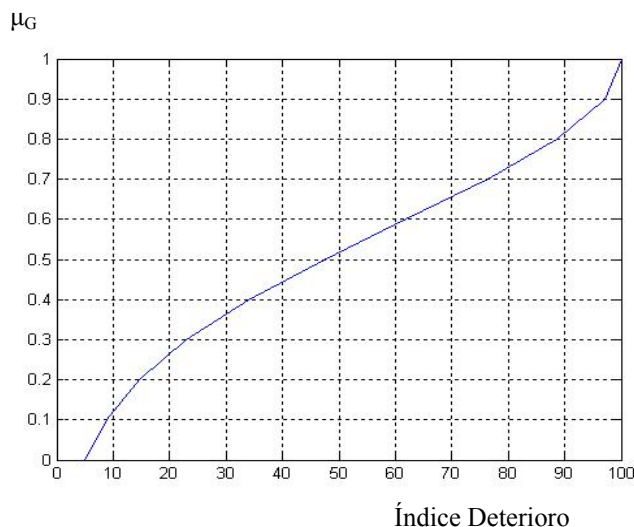


Figura 1. Representación del índice de deterioro.

$$I_g = 10 - \sqrt{\frac{10 \ln \mu_g}{-K_{mto}}} \tag{5}$$

Donde:

$\mu_g$  – membresía global del interruptor en el conjunto “Interruptor Deteriorado” según sea el caso (Mantenimiento parcial  $\mu_{Gmp}$ )  
 $K_{mto}$  – coeficiente de estrategia de mantenimiento (Durante el análisis con los expertos se comprobó que la estrategia daba buenos resultados con valores entre 0.3 y 0.4).

**4<sup>a</sup> etapa:** En esta etapa se procede a fuzzificar el “Nivel de deterioro” del interruptor. Para este fin se definieron tres funciones de membresía, cada una de ellas se representó con funciones gaussianas sobre el atributo “Índice del Deterioro”; la forma de cada función es ajustable siguiendo la experiencia del personal de mantenimiento. La forma aproximada de las curvas correspondientes se muestra en la figura 2.

**f(μ)** Alto nivel de deterioro (ecuación 6).

**g(μ)** El nivel de deterioro es medio (ecuación 7).

**h(μ)** Bajo nivel de deterioro (ecuación 8).

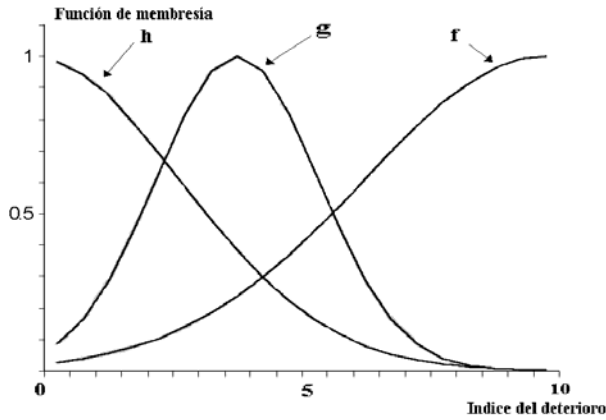


Figura 2. Funciones de membresía de la entrada “Nivel de Deterioro”

Y las funciones de membresías que describen estas curvas son las siguientes:

$$f(\mu) = e^{-0.4((I_g - 10)^2 / 10)} \quad (6)$$

$$g(\mu) = e^{-2((I_g - 4)^2 / 10)} \quad (7)$$

$$h(\mu) = e^{-0.6(I_g^2 / 10)} \quad (8)$$

5<sup>a</sup> etapa: Fuzzificación del tiempo de explotación del interruptor sin mantenimiento. Las funciones de membresía (ecuaciones 9, 10 y 11) son las siguientes:

$$\mu_B = \begin{cases} 0 < t \leq T/2 & \mu_B = -2t/T + 1 \\ t > T/2 & \mu_B = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\mu_M = \begin{cases} 0 < t \leq T/2 & \mu_M = 2t/T \\ T/2 < t \leq T & \mu_M = -2t/T + 2 \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu_A = \begin{cases} T/2 < t \leq T & \mu_A = 2t/T - 1 \\ t > T & \mu_A = 1 \end{cases} \quad (11)$$

Donde: T se determina a través de consulta con los expertos, tomarlos como una vez y media el tiempo de la norma cubana para cada tipo de mantenimiento (mantenimiento parcial y mantenimiento capital).

La representación grafica de estas ecuaciones la encontramos en la siguiente figura:

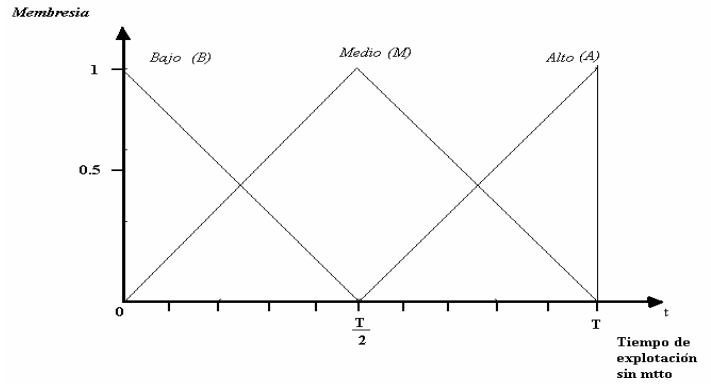


Figura 3. Funciones de membresía de la entrada “Tiempo de Explotación”

6<sup>a</sup> etapa: En esta etapa se evalúan las reglas que determinaron los expertos para alcanzar la respuesta adecuada:

Las funciones de membresía para la determinación del tiempo restante (figura 4) son las siguientes:

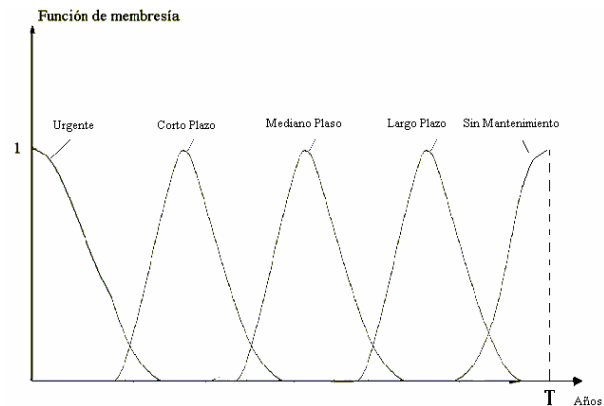


Figura 4. Funciones de membresía del “Tiempo Restante”

Las reglas utilizadas para el proceso de inferencia son:

- Si  $I_g = F$  y  $T_{exp} = Alto$  Entonces  $T_{res} = Urgente$ .
- Si  $I_g = F$  y  $T_{exp} = Medio$  Entonces  $T_{res} = Urgente$ .
- Si  $I_g = G$  y  $T_{exp} = Medio$  Entonces  $T_{res} = Mediano Plazo$ .
- Si  $I_g = G$  y  $T_{exp} = Alto$  Entonces  $T_{res} = Corto Plazo$ .
- Si  $I_g = G$  y  $T_{exp} = Bajo$  Entonces  $T_{res} = Largo Plazo$ .
- Si  $I_g = H$  y  $T_{exp} = Bajo$  Entonces  $T_{res} = Sin Mantenimiento$ .
- Si  $I_g = H$  y  $T_{exp} = Medio$  Entonces  $T_{res} = Largo Plazo$ .
- Si  $I_g = H$  y  $T_{exp} = Alto$  Entonces  $T_{res} = Corto Plazo$ .

Para el proceso de inferencia se utilizó el producto algebraico y para la defuzzificación se utilizó el método de la media del Máximo para obtener una mayor claridad en la respuesta pues la información que necesitan los expertos es si se da un mantenimiento de inmediato o con que plazo se debe planificar la ejecución del mismo.

#### 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS PRÁCTICOS

Para exponer esta metodología hemos utilizado como ejemplo el diagnóstico realizado para la planificación del mantenimiento del año 2004 los datos se encuentran recogidos en la tabla 3 como se muestra a continuación:

Elementos	N202	N203	N204	N205	N206
Tiempo de respuesta	8	7	1	4	2
Conector	5	6	3	5	3
Aisladores	8	8	2	8	6
Tornillería	4	9	2	8	3
Gabinete	10	9	3	3	3
Tiempo de Explot. sin MP (Meses)	38	22	1	11	19

Tabla 3. Datos recogidos después de la inspección visual el 01/12/2004.

1- Sustituyendo los datos en la ecuación 3:

**Int N-202:**

$$\mu_{G202} = 0.8*0.29+0.5*0.21+0.8*0.07 + 0.4*0.25+10* 0.18$$

$$\mu_{G202} = 0.673$$

2- El próximo paso consiste en buscar el índice de deterioro de cada interruptor para lo que utilizamos la curva de la estrategia del mantenimiento establecida por la ecuación 5:

**Int N-202:**

$$I_g = 10 - \sqrt{\frac{10 \ln 0.673}{-0.35}}$$

$$I_{g202} = 6.6363$$

3- Teniendo ya los índices de deterioro de cada interruptor se procede a fuzzificarlos para obtener los diferentes niveles de deterioro. Para esto se evalúan los índices en las tres funciones de membresía en las ecuaciones 6, 7 y 8.

**Int N-202:**

$$f(\mu) = e^{(-0.4((6.6363 - 10)^2 / 10)}$$

$$f(\mu) = 0.636$$

$$g(\mu) = e^{(-2((6.6363 - 4)^2 / 10)}$$

$$g(\mu) = 0.2491$$

$$h(\mu) = e^{(-0.6(6.6363^2 / 10)}$$

$$h(\mu) = 0.0712$$

4- En este paso se procede a fuzzificar el tiempo a través de las ecuaciones definidas para ello (Ec. 9, 10 y 11)

Funciones	N202	N203	N204	N205	N206
Tiempo bajo B(μ)	0.000	0.000	0.917	0.083	0.000
Tiempo medio M(μ)	0.000	0.167	0.083	0.917	0.417
Tiempo Alto A(μ)	1.000	0.833	0.000	0.000	0.583

5- Ya con todos los datos solo queda evaluar las reglas y defuzzificar para obtener el diagnóstico de cada interruptor. En el caso del interruptor N-202 el mantenimiento debe ser planificado urgentemente.

Estrategias para la planificación del Mtto	N202	N203	N204	N205	N206
Planificación Urgente	X	X			
Planificación a corto plazo (menos de 6 meses)					X
Planificación a mediano plazo (menos de 12 meses)				X	
Planificación a largo plazo (Menos de 18 meses)			X		
Planificación a muy largo plazo (Menos de 24 meses)					

#### 5. CONCLUSIONES

La Lógica Difusa brinda un medio eficaz para llevar a cabo un diagnóstico de los dispositivos con el análisis de las variables que inciden y reflejan el deterioro del equipo. Los resultados obtenidos a través del cálculo de un caso real aplicando la metodología se corresponden con los resultados esperados desde el punto de vista teórico por los expertos de experiencia en la planificación de los mantenimientos en los interruptores de potencia. En las condiciones actuales del equipamiento instalado en nuestro Sistema Electroenergético es imprescindible pasar a una nueva etapa en la cual tenga un papel protagónico la planificación de los mantenimientos por la vía del diagnóstico.

#### 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] BILLINTON Roy and R N Allan. "Reliability Analysis of Engineering Systems: Concepts and Techniques". Plenum Press, 1983.

- [2] DUBOIS, D. and Prade, H. "Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. Mathematics in Science and Engineering, Vol 144. San Diego, Calif.: Academic Press, 1980.
- [3] GONDRES, Israel. "Considerations about maintenance in electrical networks". PowerTech' 2005, St. Petersburg, Russia. June, 27-30, 2005. Paper #283, 3 p.
- [4] "Interruptores de gran volumen de aceite de 110kV tipos MKII – 110M y MKII – 110MI". / Norma Ramal de la Industria Básica. NRIB – 424 -1981.
- [5] LAJES, Santiago. "Consideraciones sobre los sistemas organizativos de reparaciones y mantenimientos en redes eléctricas". Simposio Internacional 100 años de la Enseñanza de la Ingeniería Eléctrica en Cuba. Ciudad Habana. 2000.
- [6] MINGAIL, Harry. "The right conditions for fuzzy thinking". Computing Canada June 21, 1995 v21 n13 p20.
- [7] RODRÍGUEZ, Nervalio. "Gestión de los mantenimientos en interruptores de potencia". Tesis de Maestría. U.C. 2006.