

Determinación del nivel de deterioro en líneas eléctricas utilizando lógica difusa

Marina Alexandrovna Escobar, Eduardo Sierra Gil,
Santiago Lajes Choy

Universidad de Camagüey, Facultad de Electromecánica.

Carretera Circunvalación Norte Km. 5 ^{1/2}, Camagüey, CP 74650. Cuba

Tel: 53-322-61019 ext. 241, Fax: 53-322-61126,

sierra@em.reduc.edu.cu

RESUMEN

El Mantenimiento por Diagnóstico de las redes de subtransmisión y distribución (niveles de voltaje desde 4 KV hasta 33 KV) necesita de la valoración objetiva del nivel de deterioro de las mismas, partiendo de la información cualitativa e imprecisa recogida mediante el celaje (inspección visual de la línea). Para ello la herramienta matemática idónea es la Lógica Difusa o Borrosa (Fuzzy Logic), con la ayuda de la cual se desarrolló el Método de la determinación del Índice del Deterioro de la Línea. Dicho método permite cuantificar la información y determinar analíticamente la posibilidad de que la red o uno de sus elementos necesiten mantenimiento en un período de tiempo determinado, utiliza el esquema de la Inferencia Monótona Directa con un cuerpo de doce reglas de implicación, correspondientes a los elementos básicos de la Línea, definidos por la Unión Nacional Eléctrica de Cuba.

PALABRAS CLAVE

Lógica difusa, Mantenimiento, Diagnóstico, Líneas Eléctricas.

ABSTRACT

The Maintenance by Diagnosis of the sub transmission and distribution networks (4 KV to 33 KV voltage level) needs of the objective assesment of the deterioration level; starting from the qualitative and imprecise information gathered by the inspection staff. The suitable mathematical tool for this purpose is Fuzzy Logic, with the help of which the Method for the determine in the of the Line Deterioration Index was developed. This method permits to obtain the information in quantitative form and determine if the network or one of its elements needs maintenance in a specific interval of time, using the outline of the Direct Monotonous Inference with twelve implication rules, corresponding to the basic elements of the Line, as defined by the National Electric Union of Cuba.

KEYWORDS

Fuzzy Logic, Maintenance, Diagnosis, Electric Lines



LA LÓGICA DIFUSA COMO HERRAMIENTA PARA EXPRESAR LA INFORMACIÓN IMPRECISA EN FORMA CUANTITATIVA

El deterioro de una línea eléctrica se aprecia mediante las observaciones del celador (persona designada para inspeccionar la línea, visualmente, de forma periódica), el cual detecta los defectos del tipo:

- poste inclinado
- cable flojo
- grampa corroída
- etc.

Además anota la ubicación de los mismos con bastante precisión. Sin embargo muestra con mucha ambigüedad la posibilidad de dar o no mantenimiento en uno u otro periodo de tiempo.

Para valorar cuantitativamente el nivel del deterioro de la línea, es menester buscar la forma numérica a la información cualitativa e imprecisa recogida por el celador. Actualmente existe la herramienta matemática especialmente apta para este fin, que es la Lógica Difusa o Borrosa (Fuzzy Logic).

Se puede afirmar que cualquier valoración con el empleo de La Lógica Difusa se basa en la relación de implicación:

$$IF (antecedente) THEN (consecuente) \quad (1)$$

En este caso el antecedente debe abarcar todos los defectos detectados mediante el celaje en la línea, mientras que el consecuente es el enunciado lógico "El nivel del deterioro crece".

Un enunciado lógico y un conjunto están directamente relacionados: decir "este bajante está flojo" es lo mismo que decir "este bajante pertenece al conjunto de los flojos". Los conjuntos difusos son una generalización de los conjuntos de Cantor; en estos últimos un elemento rotundamente pertenece o no pertenece al conjunto, mientras que en los primeros el nivel de la pertenencia puede tomar cualquier valor del intervalo [0,1]. Para los enunciados lógicos difusos esto significa, que pueden no ser totalmente ciertos ni totalmente falsos, sino que su nivel de verdad puede tomar cualquier valor del mismo intervalo [0,1].

Para obtener la valoración del deterioro de la línea en su totalidad, es necesario aplicar la implicación lógica difusa (1) de tal forma, que se tenga en

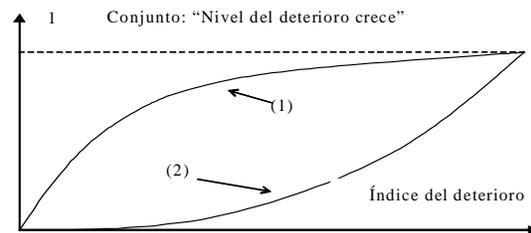


Fig. 1 Estrategias del mantenimiento: optimista (1) y pesimista (2).

cuenta, que el aporte de cada elemento deteriorado al nivel total del deterioro de la Línea es diferente.

De este modo, el conjunto difuso del consecuente puede utilizarse de dos formas: para expresar la estrategia general del mantenimiento (casos 1 y 2, ejemplificados en la figura 1) y para relacionar directamente el índice del deterioro parcial con la importancia que representa el elemento en cuestión para el nivel del deterioro de la línea.

En el presente trabajo se aplicó el último enfoque combinado con la forma a), mencionada anteriormente, de estructurar los conjuntos difusos del antecedente.

PASOS PARA LA APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

El primer paso para la aplicación de esta metodología consiste en determinar una serie de indicadores¹ necesarios para la modelación del problema de mantenimiento mediante la lógica difusa, antes de definir estos indicadores se verá a partir de que información se debe realizar la toma de decisiones para afirmar que una línea se encuentra en uno de estos estados técnicos.

- a) Buen estado.
- b) Mal estado (necesidad de mantenimiento)

La información a la que nos referimos anteriormente está básicamente en el reporte de celaje o inspección de líneas en este reporte, el celador, que es la persona encargada de esta actividad, debe reflejar todos los defectos que encuentre en cada uno de los elementos que conforman la línea y que son detectados por inspección visual de la misma.

Para facilitar la interpretación de estos reportes cada defecto de cada elemento se codifica con una

Tabla I. Claves de clasificación de defectos en elementos de líneas de distribución eléctrica de acuerdo a la norma UNE NRIB-441.

Elementos	Defectos
Poste o Tocón	a) Inclinado I b) Podrido P c) Rajado RJ d) Quemado Q e) Revisar Rv f) Enzancar Z
Conductor	a) Flojo F b) Cambiar C c) Reparar R d) Revisar Rv
Aislamiento	a) Dañado D b) Roto R c) Salto eléctrico S
Cable Protector	a) Bayoneta podrida P b) Bayoneta rajada RJ c) Bayoneta inclinada I d) Bayoneta torcida T e) Revisar Rv f) Cable protector flojo CCP g) Cambiar cable protector CCP h) Reparar cable protector RCP
Bajante a Tierra	a) Cruceta sin aterrizar CST b) Bajante partido BP c) Bajante flojo BF d) Grampa defectuosa GD e) Varilla podrida VP

clave, un ejemplo se muestra en la tabla I, según la norma ramal de la UNE NRIB-441 de 1982 revisada en el 2002.²

Ahora se puede pasar a definir los indicadores mencionados al inicio de este epígrafe.

Ki- Importancia ponderada del elemento i (ejemplo: poste, conductor, aislamiento, etc.) atendiendo a la confiabilidad de la red y la complejidad del mantenimiento.

Kij- Importancia ponderada del defecto j del elemento i (ejemplo: poste: inclinado, podrido, rajado, etc.) atendiendo a la posibilidad de que la aparición del mismo provoque una falla.

La determinación de estos indicadores se realizó a partir de una prueba de expertos, para ello se elaboró una encuesta que se aplicó a un grupo de ocho expertos. Las respuestas de los expertos fueron procesadas por el método de selección ponderada, un ejemplo de los resultados obtenidos se muestra en la tabla II.

La competencia de los expertos encuestados fue evaluada por el sistema de autovaloración,³ que considera dos aspectos: el nivel de su competencia profesional y el grado de la argumentación del mismo.

Tabla II. Ejemplo de índices evaluados en base a una encuesta a expertos.

Poste o Tocón	0.03
Inclinado	0.09
Podrido	0.3
Rajado	0.17
Quemado	0.27
Enzancar	0.16
Conductor	0.07
Flojo	0.25
Cambiar	0.4
Reparar	0.35
Aislamiento	0.03
Dañado	0.34
Roto	0.25
Salto Eléctrico	0.39

La evaluación de la competencia se expresa mediante la constante K_c , determinada a partir de la opinión del experto sobre sí mismo: se le pide que valore su competencia sobre el problema en una escala de 0 a 1. De acuerdo a su auto evaluación, el experto sitúa su competencia en algún punto de esta escala.

La validez del coeficiente K_c se estima del siguiente modo: se le pide al experto que indique el grado de influencia (alto, mediano, bajo) que tienen en sus criterios profesionales cada una de las fuentes del conocimiento enumeradas más abajo:

- Estudios teóricos
- Experiencia profesional
- Trabajos de autores nacionales
- Trabajos de autores extranjeros
- Sus conocimientos sobre el estado del problema a nivel internacional
- Su intuición personal.

Las casillas marcadas por el experto se valoran de acuerdo a la tabla III; la suma de dichas valoraciones es el coeficiente K_a . Con estos datos se determina entonces el coeficiente de la idoneidad del

Tabla III. Grado de influencia de las fuentes de información en la evaluación de defectos, según encuesta a expertos.

Fuentes de argumentación	Grado de influencia de cada una de las fuentes		
	A (alto)	M (mediano)	B (bajo)
Estudios teóricos	0.3	0.2	0.1
Experiencia profesional	0.5	0.4	0.2
Trabajos de autores nacionales	0.05	0.05	0.05
Trabajos de autores extranjeros	0.05	0.05	0.05
Estado del problema a nivel internacional	0.05	0.05	0.05
Su intuición	0.05	0.05	0.05

experto K como el promedio de los dos anteriores, es decir:

$$K = \frac{K_c + K_a}{2}$$

Explicado el primer paso, pasaremos a analizar el modelo difuso en cuestión. Para esta tarea se seleccionó el método de inferencia monótona escalonada ya que permite valorar el índice de deterioro no solo de la línea en general sino de cada uno de los elementos por separado.

Partimos de la suposición de que a medida que aumenta la cantidad de elementos con un mismo defecto se incrementa la posibilidad de que este elemento pertenezca al conjunto “Elementos deteriorados por este defecto”. Para determinar la pertenencia de un elemento a este conjunto se diseñó especialmente una función de membresía, que toma como modelo la función de confiabilidad, y que está dada por la siguiente expresión.

$$\mu_{ij} = 1 - \frac{1}{e^{n(kij)}} \tag{1}$$

Donde:

μ_{ij} - Membresía del elemento i al conjunto de elementos deteriorados por el defecto j.

n - Cantidad de elementos i con el defecto j.

Una vez obtenidas las membresías μ_{ij} para cada elemento i para los defectos desde j=1 hasta n se procede a determinar la membresía global del elemento i, para ello se utiliza el operador AND de Fibonacci, al que se le dedicará a continuación una atención especial.

Pasando revista a algunas de normas más utilizadas al aplicar el operador AND,⁴ llegamos a las siguientes conclusiones.

- AND del mínimo escoge el factor del antecedente que tiene la membresía mínima, despreciándose los demás factores, lo cual es inadmisibles para el análisis del nivel de deterioro, ya que ofrece el criterio optimista en demasía.
- AND del producto multiplica entre sí todas las membresías del antecedente, y de este modo se toman en cuenta todos los factores que influyen en el deterioro. Pero no hay que olvidar, que el producto de los números menores que 1 es menor que el menor de ellos; este hecho traería dificultades con el ajuste de la escala del consecuente, sobre todo porque no todos los factores del deterioro tendrían siempre membresías diferentes de cero.
- AND de la media aritmética calcula la media aritmética de las membresías del antecedente; de esta forma, todos tienen una participación sin que se modifique la escala. Pero hay que señalar, que su uso presupone la relación lineal entre los elementos del antecedente, que en general no es cierto para los factores del deterioro de un sistema.
- AND de la media geométrica calcula la raíz cuadrada del producto de las membresías $\mu_a(x)$ y $\mu_b(y)$ de los factores del antecedente, tomados de dos en dos. Aquí están presentes las ventajas del AND del producto, y se evitan sus deficiencias. No obstante, hay que señalar, que la media geométrica de dos números siempre es menor que la media aritmética de los mismos; esto significa un enfoque optimista no justificado en la generalización de los factores del deterioro.

Para el cálculo del Indicador del Deterioro necesitamos un AND con tal fuerza de enlace entre sus entradas, que la membresía resultante fuera mayor o igual que la del AND de media aritmética, que es el único que considera todos los factores sin modificar la escala, o sea, debe ser preferentemente

pesimista (sin llegar a la exageración) con el objetivo de llamar adecuadamente la atención sobre el deterioro del sistema y tener a su vez en cuenta la no linealidad de la relación entre las entradas. Con este fin se ha diseñado un operador nuevo, que utiliza el número de Fibonacci para lograr este efecto. Leonardo de Pisa (1170 – 1250) (conocido como *Fibonacci*, contracción de *filius Bonacci*, es decir *el hijo de Bonacci*), estuvo en contacto con la cultura árabe, interesándose especialmente por sus matemáticas. Su obra principal fue el *Liber Abaci* (o Libro acerca del Ábaco), una extensa obra que contiene casi todo el conocimiento algebraico y aritmético de la época.

Como se sabe, el número de Fibonacci

$$\varphi = \frac{\sqrt{5} + 1}{2}$$

es el límite del cociente de la progresión geométrica del mismo nombre:

$$\text{Fib}(n) = 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, \dots$$

y posee la propiedad siguiente: $\varphi - 1 = 1/\varphi = 0.6183\dots$ (Número de Oro).

Para cumplir con el propósito de exagerar moderadamente la simultaneidad de los defectos, se propone el conectivo AND como la partición de la diferencia entre las entradas en la proporción de la sección de oro:

$$\text{AND}(\mu_a(x), \mu_b(y)) = (\varphi - 1)(\mu_a(x) + \mu_b(y)) \quad (2)$$

Veamos un ejemplo de lo explicado anteriormente:

Determinemos la pertenencia de una línea al conjunto de las líneas deterioradas, partiendo de que existen dos elementos de la misma cuyas membresías en el conjunto de los elementos deteriorados son las entradas μ_1 y μ_2 , y el grado de deterioro de la línea está dado por la relación de las entradas a través del conectivo AND.

Como se puede apreciar los resultados del AND de Fibonacci son ligeramente mayores que los del AND de la media aritmética, que es el más aceptable, de los conocidos, para este caso pero tiene el defecto de que presupone la relación lineal entre las entradas, lo cual no es cierto. El AND de Fibonacci contiene las bondades del de la media aritmética y asume la relación no lineal entre las entradas.

Para determinar la membresía global de cada elemento i se utiliza la siguiente expresión del AND de Fibonacci.

$$\mu_i = (((((\mu_{i_1} \text{and} \mu_{i_2}) * (1 - \varphi)) \text{and} \mu_{i_3}) * (1 - \varphi)) \dots) \text{and} \mu_{i_n}) * (1 - \varphi) \quad (3)$$

Donde:

μ_i - Membresía global del elemento i .

Con esta membresía global se determina el índice de deterioro de cada tipo de elemento a través de la curva de deterioro o estrategia de mantenimiento, la cual se define mediante la expresión (4) y se representa en la figura 2.

$$I_{\text{det}_i} = (e^{-(Ki)((\mu_i + \alpha) - 100)^2 / 10^2}) * 100 \quad (4)$$

Donde:

I_{det_i} Índice de deterioro del elemento i .

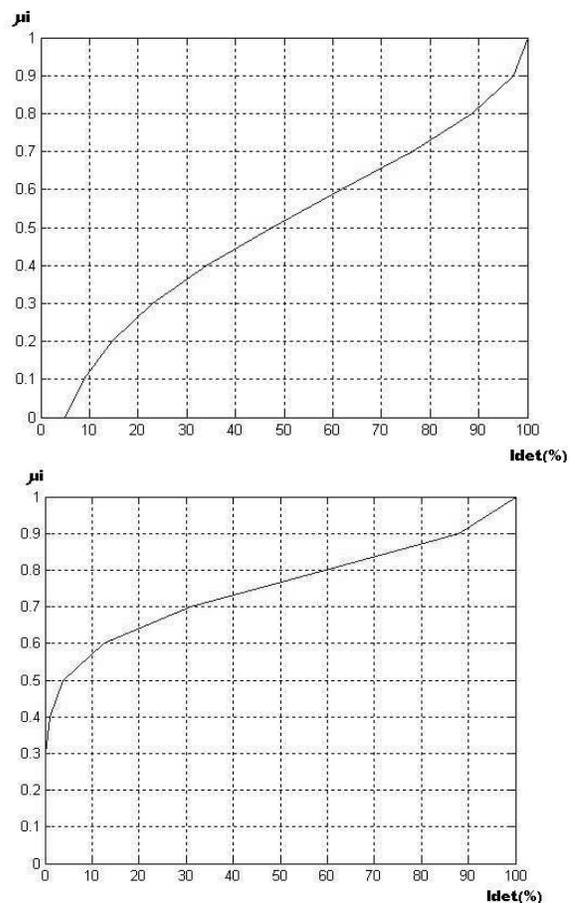


Fig. 2. a) Índice de deterioro con $Ki=0.03$.
b) Índice de deterioro con $Ki=0.13$.

Esta curva se ajusta según los valores de Ki potenciando o reduciendo los índices de deterioros para el mismo valor de membresía según la importancia del elemento.

Una vez determinados los índices de deterioro para cada tipo de elemento se puede determinar el deterioro promedio de la línea como la suma sopesada de los índices de cada elemento.

$$I_{prom} = \sum_{i=1}^n \frac{I_{det_i}}{n} \tag{5}$$

Donde:

I_{prom} – Índice de deterioro promedio del circuito.
 n - Elementos que conforman la línea.

Con el apoyo, nuevamente, de la norma NRIB-441 se puede apreciar que se debe dar una prioridad a la ejecución del mantenimiento según la gravedad del deterioro.

- 1- mantenimiento urgente.
- 2- mantenimiento en los próximos 6 meses.
- 3- mantenimiento después de un año.

Con ayuda de 3 funciones gaussianas y a partir de los índices de deterioro de los elementos y del circuito se puede determinar la prioridad a conceder al mantenimiento como se muestra en la figura 3.

La posibilidad (μ_p) de que el mantenimiento sea concedido en el período 1, 2 o 3 puede expresarse analíticamente como.

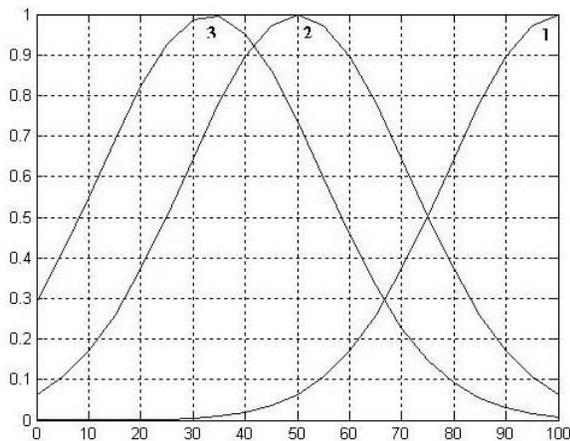


Fig.3 Curvas de posibilidades.

$$\mu_{p_1} = (e^{-(\lambda_{aa}''((i \det a)-100)^2/10^2)}) \tag{6}$$

$$\mu_{p_2} = (e^{-(\lambda_{aa})((i \det a)-\frac{100}{2})^2/10^2)}) \tag{7}$$

$$\mu_{p_3} = (e^{-(\lambda_{aa})((i \det a)-\frac{100}{3})^2/10^2)}) \tag{8}$$

donde:

λ_{aa} - Índice de averías que depende del hombre.

CONCLUSIONES

1. La información que se utiliza actualmente, a partir de la inspección visual, no permite realizar un diagnóstico general del estado de las redes de subtransmisión y distribución y por lo tanto conduce a decisiones incorrectas en la gestión del mantenimiento.
2. La lógica difusa constituye una herramienta robusta y sencilla para la modelación del problema del diagnóstico de redes de subtransmisión y distribución, permitiendo cuantificar la información cualitativa brindada por el personal de inspección de líneas.
3. La utilización de curvas gaussianas de posibilidades permite al personal técnico de gestión de mantenimiento tener un criterio cuantitativo en que basar la planificación de los mantenimientos corrientes y capitales.
4. Esta metodología tiene la ventaja de ser ajustable según la experiencia acumulada por el personal de mantenimiento (expertización), las condiciones iniciales del estudio y características particulares de la región donde se encuentra ubicada la red (condiciones ambientales, índices de averías que dependen del hombre, etc).
5. Esta metodología no tiene en cuenta la medición de parámetros eléctricos de las redes, ya que esta medición brinda una información cuantitativa y exacta del estado de los elementos sometidos a prueba (existen métodos para la evaluación del deterioro de elementos a partir de la medición de varios de sus parámetros⁵), lo que no ocurre en el caso de los parámetros mecánicos que son evaluados a partir de observaciones visuales externas.

BIBLIOGRAFÍA

1. Hernández, E. y Navarrete, E. Sistema de cálculo de indicadores para el mantenimiento. 2001. <http://www.mantenimiento mundial.com> (13 de Marzo de 2003).
2. Norma ramal de la UNE NRIB-441de 1982 revisada en el 2002.
3. De Campistrous, Luis y Rizo, Celia. Indicadores e investigación educativa (Primera Parte). Investigadores del Instituto Central Ciencias Pedagógicas en Cuba. Agosto, 1998.
4. Cox, Earl. Fuzzy Systems Handbook, 1994.
5. Frolova, Liubov. Aplicación de la lógica difusa en el perfeccionamiento del sistema de mantenimiento por diagnóstico en transformadores de fuerza. Tesis de Maestría. Universidad de Camagüey, 2002. -7-47p.
6. Díaz, Roberto. Optimización en la selección del sistema organizativo de reparaciones y mantenimientos en líneas de 33 KV. Trabajo de Diploma. Universidad de Camagüey, 2001. -35-41 p.
7. Lajes Santiago, *et al*. Sistemas organizativos de reparaciones y mantenimiento en redes eléctricas de distribución en Camagüey, Cuba: Universidad de Camagüey, Facultad de Electromecánica, Departamento de Ingeniería Eléctrica.
8. Batista, J. Carlos y Montalbán, Pedro. Análisis comparativos entre los Sistemas Organizativos de Reparaciones y Mantenimiento en redes eléctricas de distribución. Trabajo de Diploma. Universidad de Camagüey, 2000.
9. Mojicar, Segismundo. Contribución del mantenimiento al aprovechamiento de la capacidad de producción 2001. <http://www.mantenimiento mundial.com> (13 de Marzo de 2003).
10. Lantos, Esteban. Mantenimiento proactivo en transformadores. 2002. <http://www.mantenimientomundial.com> (13 de Marzo de 2003).
11. Augusto, Lourival. Mantenimiento centrado en el negocio (BCM) ó Mantenimiento basado en riesgo (RBM) ó Mantenimiento estratégico. 2002. <http://www.mantenimiento mundial.com> (13 de Marzo de 2003).
12. Trujillo, Gerardo. El mantenimiento proactivo como una herramienta para extender la vida de sus equipos. <http://www.mantenimiento mundial.com> (13 de Marzo de 2003).
13. Hernández, Eugenio. Controlando y evaluando la gestión de mantenimiento. 2001. <http://www.mantenimiento mundial.com> (13 de Marzo de 2003)
14. Augusto, Lourival. Administración Moderna del Mantenimiento. <http://www.mantenimiento mundial.com> (13 de Marzo de 2003)
15. Marquez, Roberto. Diseño y ajuste de Reguladores Difusos aplicados a los Accionamientos Eléctricos. Trabajo de Diploma. Universidad de Camagüey, 2001.- 8-56.
16. Bernardo, José. ¿Qué es confiabilidad operacional?. 2000. <http://www.mantenimiento mundial.com> (13 de Marzo de 2003)
17. González, Antonio y Hechavarría Laureano. Metodología para seleccionar sistemas de mantenimiento. 2002. <http://www.mantenimiento mundial.com>

