



Perfeccionamiento del diagnóstico de las líneas aéreas de distribución utilizando la lógica difusa

Eduardo Sierra
Santiago Lajes

Marina Alexandrovna
Francisco Barrios

Recibido: Octubre del 2007
Aprobado: Diciembre del 2007

Resumen / Abstract

El mantenimiento por diagnóstico de las líneas aéreas de distribución necesita de la valoración objetiva del nivel de deterioro de las mismas, partiendo de la información cualitativa e imprecisa recogida mediante el celaje. Para ello la herramienta matemática idónea es la lógica difusa o borrosa, con la ayuda de la cual se desarrolló el método de diagnóstico de líneas aéreas de distribución. Dicho método puede utilizar, indistintamente, los sistemas de inferencia de Mamdani o Sugeno, aunque los resultados de este trabajo sugieren el segundo, 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: Diagnóstico, líneas eléctricas, lógica difusa, mantenimiento

The maintenance by diagnosis of the overhead distribution lines needs of the objective valuation of the deterioration level of the same ones; leaving of the qualitative and imprecise information gathered by lines inspection staff. For it the suitable mathematical tool is the fuzzy logic, with the help of which the method for the determination of the line deterioration index was developed. This method can use, indistinctly, the mamdani or sugeno inference systems, although the results of this work suggest the second, with twelve implication rules, corresponding to the basic elements of the line, defined by the National Electric Union of Cuba.

Key words: Diagnosis, electric lines, fuzzy logic, maintenance

INTRODUCCIÓN

Como se conoce, el conjunto difuso se diferencia del conjunto ordinario por el hecho de que la pertenencia al mismo puede tomar valores menores que uno, o sea, existen elementos que no pertenecen del todo al conjunto.¹

Por otro lado, un enunciado lógico puede ser representado mediante la pertenencia o la membresía en el conjunto correspondiente. Por ejemplo, la afirmación: "La línea está en mal estado técnico", se puede sustituir por "La línea pertenece al conjunto líneas en mal estado técnico"; de este modo la

sentencia. " Esta línea está en muy mal estado técnico", se puede sustituir por: "La membresía de esta línea en el conjunto líneas en mal estado técnico es igual a 1". Como se puede apreciar, la aplicación de la lógica difusa permite representar el nivel de deterioro de un elemento mediante los números del intervalo $[0,1]$, lo cual a su vez facilita la aplicación de la matemática y la computación a las apreciaciones vagas e imprecisas de los resultados de observación.

Para la expresión mínima de los resultados de observación de las líneas eléctricas, aportados por el celador, se deben utilizar expertos de largos años de

experiencia en la explotación de dichas líneas, los cuales además no deben elegirse al azar. En este trabajo se utilizan los aportes de expertos, recogidos en trabajos anteriores y seleccionados por el método de autovaloración.²

Para la modelación del problema de mantenimiento mediante la lógica difusa es necesario determinar una serie de indicadores.^{3,4} Antes de definir estos indicadores, se verá a partir de qué información se debe realizar la toma de decisiones, para afirmar que una línea necesita mantenimiento capital en un período de tiempo determinado.

MODELOS DIFUSOS BASADOS EN LOS SISTEMAS DE INFERENCIA DE MAMDANI Y SUGENO

La información referida 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 clave, como se muestra en la tabla 1, según la norma ramal de la UNE NRIB-441 de 1982 revisada en el 2002.

Ahora se pueden definir los indicadores antes mencionados:

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

K_{ij} : Importancia ponderada del defecto j del elemento i (ejemplo, poste: inclinado, podrido, rajado, etc.) atendiendo a la posibilidad de que la aparición de este defecto provoque una falla.

Tabla 1 Ejemplo de codificación de los defectos en cada elemento de la línea según la norma ramal de la UNE NRIB-441	
Elementos	Defectos
Poste o Tocón	Inclinado (I) Podrido (P) Rajado (RJ) Quemado (Q) Enzacar (Z)
Conductor	Flojo (F) Cambiar (C) Reparar (R) Revisar (Rv)
Cruceta	Inclina (I) Podrida (P) Rajada (RJ) Quemada (Q)

Tabla 2 Ejemplo de las importancias de los defectos obtenidos	
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
Cruceta	0,08
Inclinada	0,16
Podrida	0,32
Rajada	0,19
Quemada	0,33

La determinación de los indicadores se realizó a partir de pruebas de expertos realizadas en trabajos precedentes. Las respuestas de los expertos fueron procesadas por el método de selección ponderada, arrojando los resultados que se muestran en la tabla 2.⁵

Cuantificación de las variables lingüísticas y fuzzificación de las entradas

En este caso las variables de entrada son las observaciones del celador en cada elemento de la línea defectuoso, codificadas según la clave correspondiente prevista en el manual de distribución de la UNE, para la cuantificación de estas variables lingüísticas se procede a determinar un indicador numérico del deterioro, para ello se diseñó, especialmente, una función que representa este indicador, modelada a partir de la expresión de la probabilidad de falla con distribución exponencial.

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad \dots(1)$$

donde:

Q(t): Probabilidad de que ocurra una falla en el tiempo t.

λ : Razón de falla forzada.

La función que representa el indicador de deterioro para cada elemento es la siguiente:

$$Id_i = 1 - \frac{1}{e^{\sum_{j=1}^h n_{ij} \cdot K_{ij}}} \quad \dots(2)$$

donde:

Id_i : Indicador del deterioro del elemento i (toma valores entre 0 y 1).

n_{ij} : Cantidad de elementos de tipo i en los que se repite el defecto de tipo j.

K_{ij} : peso ponderado del defecto de tipo j en el elemento de tipo i.

Una vez obtenido el indicador de deterioro de un elemento i se procede a obtener el indicador de deterioro global de la línea, para ello se utiliza el promedio sopesado de cada uno de los indicadores de deterioro de los elementos que componen una línea.

$$Id_l = \frac{\sum_{i=1}^{12} Id_i \cdot K_i}{\sum K_i} \quad \dots(3)$$

donde:

Id_l : Índice de deterioro global de la línea.

Id_i : Índice de deterioro del elemento i.

K_i : Importancia del elemento i.

En el denominador aparece la sumatoria de las importancias de los elementos i, cuyo indicador de deterioro es mayor que cero.

Como entrada al sistema de inferencia se escogieron dos funciones de membresía que representan:

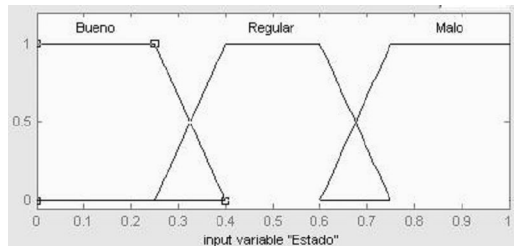
1. El estado técnico de la línea en función del indicador global del deterioro (figura 1).
2. La fuzzificación del tiempo medio de funcionamiento de la línea (Mean Time Between Failure MTBF).

La primera función de membresía estado técnico se representa por tres funciones trapezoidales dadas por las siguientes expresiones:

$$\text{Buen estado técnico} \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq 0,3 \\ (0,4 - x)/(0,4 - 0,3) & \text{si } x \in (0,3; 0,4) \end{cases} \quad \dots(4)$$

$$\text{Estado técnico regular} \begin{cases} 0 & \text{si } (x \leq 0,3 \text{ o } x \geq 0,75) \\ (x - 0,3)/(0,4 - 0,3) & \text{si } x \in (0,3; 0,4) \\ 1 & \text{si } x \in (0,4; 0,60) \\ (0,75 - x)/(0,75 - 0,60) & \text{si } x \in (0,60; 0,75) \end{cases} \quad \dots(5)$$

$$\text{Mal estado técnico} \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 0,60 \\ (x - 0,60)/(0,75 - 0,60) & \text{si } x \in (0,60; 0,75) \\ 1 & \text{si } x \geq 0,75 \end{cases} \quad \dots(6)$$



Función de membresía: Estado técnico de la línea en función del índice global de deterioro.

1

La segunda función de membresía MTBF se representa por tres funciones triangulares dadas por las siguientes expresiones:

$$\text{MTBF Bajo} \begin{cases} -2x/T + 1 & \text{si } 0 \leq x \leq T/2 \\ 0 & \text{si } x \geq T/2 \end{cases} \quad \dots(7)$$

$$\text{MTBF Medio} \begin{cases} 2x/T & \text{si } 0 \leq x \leq T/2 \\ -2x/T + 1 & \text{si } T/2 \leq x \leq T \end{cases} \quad \dots(8)$$

$$\text{MTBF Alto} \begin{cases} 2x/T - 1 & \text{si } T/2 \leq x \leq T \\ 1 & \text{si } x \geq T \end{cases} \quad \dots(9)$$

donde:

T: Tiempo medio de funcionamiento deseado.

T=1/0,2 · km de línea.

...(10)

El tiempo medio de funcionamiento en el caso de los circuitos de distribución, en los cuales la frecuencia de ocurrencia de fallas es aproximadamente igual al número de interrupciones en un año, se puede expresar como

$$\text{MTBF} = 1/\lambda \cdot \text{km de línea}$$

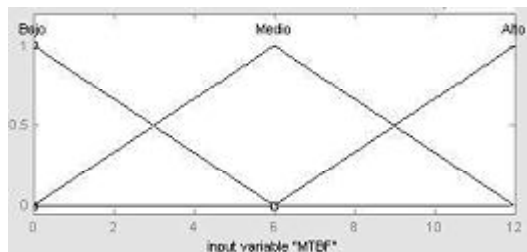
...(11)

donde:

λ : Tasa de fallas en falla por kilómetro al año.

$\lambda \cdot \text{km de línea}$: Número de interrupciones en un año.

Las normas internacionales establecen que la tasa de falla máxima para un circuito de distribución debe ser de 0,2 fallas/km, por eso se considera T como el MTBF deseado. Ver figura 2.



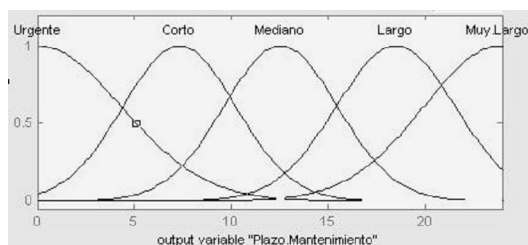
Función de membresía: Tiempo medio entre fallas de la línea.

2

Sistema de inferencia de Mamdani

La base de reglas del sistema de inferencia cuenta con nueve reglas de implicación IF-THEN, como el antecedente es compuesto se utilizó el conectivo OR del máximo, para eliminar las ambigüedades en el consecuente.¹

La función de membresía del consecuente se representa por funciones gaussianas que expresan los diferentes períodos de mantenimiento. Ver figura 3.

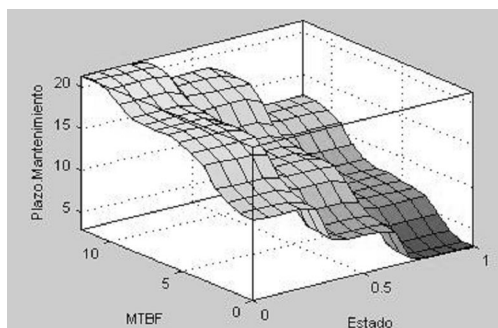


3

Los plazos de mantenimiento se determinan según la base de reglas.

Para la desfuzzificación, considerando que las curvas de membresía del consecuente son continuas, se utilizó el método biselector de área, Dando como resultado la superficie de la figura 4.

Como se puede apreciar un incremento del deterioro o una disminución del tiempo medio de funcionamiento, provocan una reducción de los plazos de mantenimiento



Superficie que relaciona las variables de entrada y salida en el sistema de inferencia de Mamdani.

4

Sistema de inferencia de Takagi-Sugeno

Un caso especial de defuzzificación ha dado lugar a sistemas de este nombre, a diferencia del descrito anteriormente, que se conoce como sistema Mamdani.

Al observar un proceso de inferencia, cuando el consecuente es un conjunto de Singletons y la defuzzificación se realiza con el método del centro de gravedad, resulta que desde el punto de vista matemático una regla.

IF ((X_1 es A_1) AND (X_2 es B_1) AND ... AND (X_n es W_1)) THEN (u es S_1)

Donde S_1 es singletons, puede describirse así:

IF ((X_1 es A_1) AND (X_2 es B_1) AND ... AND (X_n es W_1)) THEN ($u = C_1$)

Donde C_1 es el valor central del singleton S_1 y se puede interpretar como la función lineal, de orden cero:

$$y = A_n x^n + A_{n-1} x^{n-1} + \dots + A_1 x + A_0 \quad \dots (12)$$

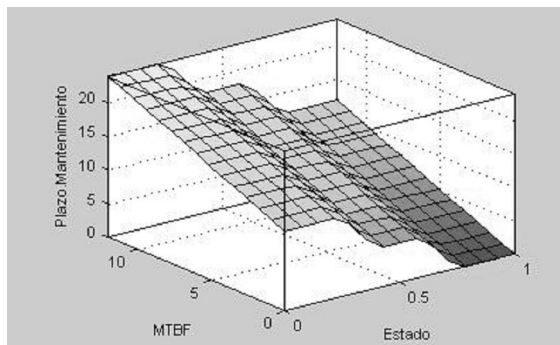
Prosiguiendo la generalización, Sugeno ha propuesto representar el consecuente como una función de orden n de las variables del antecedente; el caso particular de función de primer orden se presenta a continuación:

IF((x_1 es A_1) AND..AND (x_n es A_n)) THEN ($u = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_n \cdot x_n + C$), $\dots (13)$

donde a_1, a_2, \dots, a_n, C son constantes.

De este modo, el sistema Takagi-Sugeno se diferencia del de Mamdani porque puede sustituir el proceso de fuzzificación-defuzzificación por el simple cálculo del consecuente como una función de orden n de las variables del antecedente; aquí en la región de solapamiento de membresías del antecedente, el valor del consecuente se obtiene mediante la interpolación entre dos funciones correspondientes de este último.

El cuerpo de reglas para este caso se mantiene, utilizándose el método de centro de gravedad para la defuzzificación, dando como resultado la superficie de la figura 5.



Superficie que relaciona las variables de entrada y salida en el sistema de inferencia de Takagi-Sugeno.

Como se puede apreciar, los resultados utilizando ambos sistemas de inferencia son similares, aunque observando la superficie obtenida por el sistema de Sugeno se nota que, la dependencia entre las funciones de membresía del antecedente y del consecuente es prácticamente lineal,

también se puede notar que el sistema de Sugeno es ligeramente más desfavorable que el de Mamdani, cuando el indicador del deterioro es bajo y el tiempo medio de funcionamiento es alto.

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 distribución y por lo tanto conduce a decisiones incorrectas en la gestión del mantenimiento. La lógica difusa constituye una herramienta robusta y sencilla para la modelación del problema del diagnóstico de redes de distribución, permitiendo cuantificar la información cualitativa brindada por el personal de inspección de líneas.
2. La utilización de curvas gaussianas (Mamdani) o Singletons (Sugeno), permite al personal técnico de gestión de mantenimiento tener un criterio cuantitativo en el cual basar la planificación de los mantenimientos capitales. 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, etcétera).
3. 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 parámetros), lo que no ocurre en el caso general de las líneas que son evaluadas a partir de observaciones visuales externas.

REFERENCIAS

1. **Cox, E.:** Fuzzy Systems Handbook, 1994.
2. **Frolova, L.:** 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.
3. **Hernández, E. y E. Navarrete:** Sistema de cálculo de indicadores para el mantenimiento, 2001 <<http://www.mantenimiento mundial.com>> (13 de marzo de 2003).
4. **Augusto, L.:** Administración moderna del mantenimiento. <<http://www.mantenimiento mundial.com>> (13 de marzo de 2003)
5. **Sierra, E. y S. Lajes:** "Diagnóstico de líneas aéreas de distribución utilizando lógica difusa", Revista Ingenierías, FIME, UANL, Vol VII, No 23, México, 2004.

AUTORES

Eduardo Sierra Gil

Ingeniero Electricista, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba
e-mail: eduardo.sierra@reduc.edu.cu

Santiago Lajes Choy

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba
e-mail: santiago.lajes@reduc.edu.cu

Marina Alexandrovna Escobar

Ingeniera en Control de Procesos Térmicos y Eléctricos, Máster en Ingeniería Eléctrica, Profesora Titular, Profesora Consultante, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba
e-mail: marina.alexandrovna@reduc.edu.cu

Francisco Barrios Martínez

Ingeniero Electricista, Profesor Instructor Adjunto, Organización Básica Eléctrica Municipal, Universidad de Camagüey, Camagüey, Cuba