

MODELO DIFUSO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PERÍODO DE MANTENIMIENTO DE REDES ELÉCTRICAS, A PARTIR DE LOS DATOS DEL CELAJE.

FUZZY MODEL TO DETERMINATION OF THE MAINTENANCE PERIOD OF ELECTRICAL NETWORKS, BY THE USE OF VISUAL INSPECTION DATA.

EDUARDO SIERRA

PhD. Profesor Titular, Universidad de Camagüey, Cuba, eduardo.sierra@reduc.edu.cu

SANTIAGO LAJES

PhD. Profesor Titular, Universidad de Camagüey, Cuba, santiago.lajes@reduc.edu.cu

YAIMA FILIBERTO

PhD. Profesora Asistente, Universidad de Camagüey, Cuba, yaima.filiberto@reduc.edu.cu

FRANCISCO BARRIOS

MSc., Organización Básica Eléctrica Camagüey, Cuba, fran@eleccmg.une.cu

Recibido para revisar Diciembre 21 de 2012, aceptado Junio 4 de 2013, versión final Julio 2 de 2013

RESUMEN: 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, con la ayuda de la cual se desarrolló el Método de diagnóstico de Líneas aéreas de distribución, con un cuerpo de 108 reglas de implicación, correspondientes a los elementos básicos de la Línea, definidos por la Unión Eléctrica de Cuba.

PALABRAS CLAVE: Diagnóstico, Redes Eléctricas, Lógica Difusa, Mantenimiento

ABSTRACT: The Maintenance by Diagnosis of the overhead distribution lines needs of the objective valuation of the deterioration level of the same ones; leaving from the qualitative and imprecise information obtained by lines inspection staff. For it the suitable mathematical tool is the Fuzzy Logic, with the help of the which the Method for the determination of the Line Deterioration Index was developed with 108 implication rules, corresponding to the basic elements of the Line, defined by the Electric Union of Cuba.

KEYWORDS: Diagnosis, Electrical Networks, Fuzzy Logic, Maintenance.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de diagnóstico de líneas aéreas de distribución, están en pleno desarrollo en la actualidad y se basan normalmente en análisis estadístico de interrupciones y la inspección de las líneas, con el objetivo de optimizar, en un momento determinado, la relación entre el costo de dar mantenimiento y el costo de las fallas, si el mismo no se ejecutara. Este modelo de diagnóstico no tiene en cuenta, de forma detallada, aunque si lo considera mediante aspectos como el tiempo de explotación de los circuitos, el estado

técnico de los elementos que componen una línea aérea de distribución e incluye factores de incertidumbre al considerar, en algunos casos, interrupciones por fallas que no se deben a la frecuencia y calidad del mantenimiento [1-7].

El modelo de diagnóstico propuesto en este trabajo se basa en la determinación, mediante la inspección visual de las líneas (celaje), de los defectos que presenta cada elemento de las mismas y considerar estos defectos como causas latentes de fallas.

Como se conoce un conjunto difuso se diferencia de un 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 [8].

Por otro lado, un enunciado lógico puede ser representado mediante la pertenencia o la membresía en el conjunto correspondiente [9]. 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 los resultados del análisis de confiabilidad, enfocado a la gestión de mantenimiento [10,11].

La calidad del celaje y la incertidumbre que introduce, dependiendo de la experiencia del personal que lo realiza, de los medios técnicos con que cuenta, de la accesibilidad de los tramos de circuitos, etc., afecta considerablemente los modelos de diagnóstico basados en el mismo. Si embargo, la robustez de la lógica difusa para tratar el problema de la toma de decisiones en un ambiente de incertidumbre, a partir de establecer la solución que tenga la mayor posibilidad de que se verifiquen los antecedentes, la perfila como la herramienta adecuada para resolver este problema.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DIFUSO BASADO EN EL SISTEMA DE INFERENCIA DE SUGENO PARA LA DETERMINACIÓN DEL PERÍODO DE MANTENIMIENTO A PARTIR DE LOS DATOS DEL CELAJE.

Para la modelación del problema de mantenimiento mediante la lógica difusa es necesario determinar una

serie de indicadores que contribuyen a establecer el estado técnico de una línea aérea de distribución, 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 en un período de tiempo determinado.

La información a la que se hace referencia anteriormente está básicamente en el reporte de celaje o inspección de líneas (Procedimiento UR-BL 001 [12], Modelo UR-BL 001 A3). 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 identifica con un código, según el procedimiento UR-BL 001, [12], Anexo A5 “Catálogo de Defectos”.

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

I_{p_i} - Importancia ponderada del elemento i (ejemplo: poste, conductor, aislamiento, etc.) atendiendo a la confiabilidad de la red y la complejidad del mantenimiento (Corresponde al valor de la Importancia crítica normalizada de cada elemento [11].

$I_{p_{ij}}$ - 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 (Corresponde al valor normalizado de la probabilidad de que el defecto se presente en un elemento fallado.

3. TRATAMIENTO DE LA VARIABLE “OBSERVACIONES DEL CELADOR”

Como variables, en la modelación del problema, se utilizaron las observaciones del celador en cada elemento defectuoso de la línea, codificadas según la clave correspondiente prevista en el manual de distribución de la UNE (Unión Eléctrica de Cuba) y representadas de forma difusa por el estado técnico de la línea, el tiempo medio entre fallas de la línea (TMEF), el período de vida característica, representado

por el parámetro de envejecimiento de la distribución Weibull de la densidad de probabilidad de falla y el tiempo medio de reparación de las averías (TMR), antes de la “fuzzificación” de la primera de estas variables, que se caracteriza por ser lingüística, se procede a determinar un indicador cuantitativo del nivel de deterioro que la represente de forma numérica, para ello se diseñó especialmente una función que representa este indicador, modelada a partir de la expresión de probabilidad de falla con distribución exponencial [13].

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

Donde:

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

λ : tasa de falla

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

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

Donde:

Nd_i : Indicador del nivel de deterioro del elemento i (Toma valores entre 0 y 1) (p.u)

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

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.

$$Nd_l = \frac{\sum_{i=1}^{12} Nd_i \cdot Ip_i}{\sum Ip_i} \quad (3)$$

Donde:

Nd_l : Índice de deterioro global de la línea (p.u)

Nd_i : Índice de deterioro del elemento i (p.u)

En el denominador aparece la sumatoria de las importancias (Ip_i) de los elementos i cuyo indicador del nivel de deterioro sea mayor que cero.

4. “FUZZIFICACIÓN” DE LAS ENTRADAS

Como se mencionó en el epígrafe anterior las variables que se utilizan como entrada al sistema de inferencia representan

- 1) El estado técnico de la línea en función del Indicador global del nivel de deterioro
- 2) La calidad del tiempo medio entre fallas de la línea
- 3) El período de vida característica.
- 4) La calidad del tiempo medio de reparación de la línea

Para la “fuzzificación” de la primera de las variables, “Estado Técnico”, la misma se representa por tres funciones de membresía trapezoidales cuyas expresiones se muestran a continuación.

Buen estado técnico

$$\begin{cases} 1 & \text{si } Nd_l \leq \gamma_{be} \\ (\chi_{be} - Nd_l) / (\chi_{be} - \gamma_{be}) & \text{si } Nd_l \in (\gamma_{be}, \chi_{be}) \end{cases} \quad (4)$$

Estado técnico regular

$$\begin{cases} 0 & \text{si } (Nd_l \leq \alpha_{er} \text{ ó } Nd_l \geq \chi_{er}) \\ (Nd_l - \delta_{er}) / (\delta_{er} - \alpha_{er}) & \text{si } Nd_l \in (\alpha_{er}, \delta_{er}) \\ 1 & \text{si } Nd_l \in (\delta_{er}, \gamma_{er}) \\ (\chi_{er} - Nd_l) / (\chi_{er} - \gamma_{er}) & \text{si } Nd_l \in (\gamma_{er}, \chi_{er}) \end{cases} \quad (5)$$

Mal estado técnico

$$\begin{cases} 0 & \text{si } Nd_l \leq \alpha_{me} \\ (Nd_l - \delta_{me}) / (\delta_{me} - \alpha_{me}) & \text{si } Nd_l \in (\alpha_{me}, \delta_{me}) \\ 1 & \text{si } Nd_l \geq \delta_{me} \end{cases} \quad (6)$$

Donde:

α y χ : Límites inferior y superior respectivamente de la función de membresía de cada estado técnico, corresponden.

δ y γ : Límites del soporte de la función trapezoidal de cada estado técnico

Los subíndices significan:

be: Estado técnico bueno

re: Estado técnico regular

me: Estado técnico malo

Las funciones de membresía de la variable de entrada estado técnico, se obtienen mediante agrupación difusa ([Fuzzy Clustering](#)) [14,15]. A partir de la información estadística sobre interrupciones, se determina un indicador de deterioro, para cada individuo de la población (La población puede estar conformada por circuitos o secciones), que representa la cantidad de elementos fallados, relacionada con la cantidad de interrupciones en un año; con estos datos se forman 3 agrupaciones con características similares (Clúster), que corresponden a los 3 estados técnicos. Los valores máximos, medios y mínimos de cada agrupación constituyen los parámetros α , δ , γ y χ de cada función de membresía de la variable estado técnico y corresponden a los valores límites del indicador de deterioro para cada estado técnico (Bueno, Regular y Malo).

La variable de entrada “TMEF” se representa por tres funciones de membresía triangulares cuyas expresiones son las siguientes.

$$TMEF_{Bajo} \begin{cases} -2x/TMEF_d + 1 & \text{si } 0 \leq x \leq TMEF_{m\acute{a}x} \\ 0 & \text{si } x \geq TMEF_{m\acute{a}x} \end{cases} \quad (7)$$

$$TMEF_{Medio} \begin{cases} 2x/TMEF_d & \text{si } 0 \leq x \leq TMEF_{m\acute{a}x} \\ -2x/TMEF_d + 1 & \text{si } TMEF_{m\acute{a}x} \leq x \leq TMEF_d \end{cases} \quad (8)$$

$$TMEF_{Alto} \begin{cases} 2x/TMEF_d - 1 & \text{si } TMEF_{m\acute{a}x} \leq x \leq TMEF_d \\ 1 & \text{si } x \geq TMEF_d \end{cases} \quad (9)$$

Donde:

$TMEF_d$: Tiempo medio entre fallas deseado (meses)

$$TMEF_d = \frac{1}{0.2 \text{ fallas/km de línea} \cdot L} \cdot 12 \text{ meses}$$

Donde:

L: Longitud del circuito (km de línea)

$TMEF_{m\acute{a}x}$: Tiempo medio entre fallas, promedio de años anteriores más tres veces la desviación estándar (meses).

El tiempo medio entre fallas 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 $TMEF = 1/\lambda \cdot \text{km de línea}$, donde λ es la tasa de fallas en fallas/km al año, aunque las empresas distribuidoras controlan la tasa de fallas, como un indicador de confiabilidad, no se considera un valor máximo para la misma; sin embargo este límite se puede obtener a partir de otros indicadores de confiabilidad que si están normados, como el SAIFI en Estados Unidos, el FMIK o el FTIK en Chile, el FES en Colombia, etc. A partir del análisis de las normativas de varios países para los indicadores antes mencionados, se pueden establecer los estándares de confiabilidad requeridos como sigue: La tasa de falla máxima para un circuito de distribución debe encontrarse entre 0.2 y 0.25 fallas/km al año, por eso se considera $TMEF_d$ como el TMEF deseado.

El período de vida característica, que como ya se mencionó responde a la curva de vida característica de cualquier elemento, conocida como “curva de bañera”; se representa por dos funciones trapezoidales y un “singleton”, cuyas expresiones se muestran a continuación.

$$\text{Período de puesta en funcionamiento} \begin{cases} 1 & \text{si } \beta < 1 \\ 0 & \text{si } \beta > 1 \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{Período de vida útil} \begin{cases} 1 & \text{si } \beta = 1 \\ 0 & \text{si } \beta \neq 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{Período de envejecimiento} \begin{cases} 0 & \text{si } \beta \leq 1 \\ 1 & \text{si } \beta > 1 \end{cases} \quad (12)$$

Donde:

β : Parámetro de envejecimiento de la función Weibull de distribución de probabilidad de la tasa de fallas (λ) (adimensional)

Finalmente la variable tiempo medio de reparación “TMR” se representa por dos funciones trapezoidales y una triangular, cuyas expresiones son:

$$TMR\ Bajo \begin{cases} 1 & \text{si } TMR \leq TMR_{medio-3\sigma} \\ \frac{(TMR_{medio} - TMR)}{(TMR_{medio} - TMR_{medio-3\sigma})} & \text{si } TMR \in (TMR_{medio-3\sigma}, TMR_{medio}) \end{cases} \quad (13)$$

$$TMR\ Medio \begin{cases} 0 & \text{si } TMR < TMR_{medio-3\sigma} \\ \frac{(TMR - TMR_{medio-3\sigma})}{(TMR_{medio} - TMR_{medio-3\sigma})} & \text{si } TMR \in (TMR_{medio-3\sigma}, TMR_{medio}) \\ \frac{(TMR_{medio+3\sigma} - TMR)}{(TMR_{medio+3\sigma} - TMR_{medio})} & \text{si } TMR \in (TMR_{medio}, TMR_{medio+3\sigma}) \\ 0 & \text{si } TMR > TMR_{medio+3\sigma} \end{cases} \quad (14)$$

$$TMR\ Alto \begin{cases} \frac{(TMR - TMR_{medio})}{(TMR_{medio+3\sigma} - TMR_{medio})} & \text{si } TMR \in (TMR_{medio}, TMR_{medio+3\sigma}) \\ 1 & \text{si } TMR \in (TMR_{medio+3\sigma}, TMR_{alto}) \end{cases} \quad (15)$$

Donde:

TMR : Tiempo medio de reparación promedio, del circuito, en el año anterior al de análisis (h)

TMR_{medio} : Suma ponderada del Tiempo medio de reparación promedio, de una muestra significativa de circuitos de distribución primaria, en el mismo período de análisis (h)

$TMR_{medio+3\sigma}$: Límite superior del TMR para una muestra significativa de circuitos de distribución primaria, en el mismo período de análisis, establecido a partir de la desviación estándar con respecto al TMR_{medio} (h).

$TMR_{medio-3\sigma}$: Límite inferior del TMR para una muestra significativa de circuitos de distribución primaria, en el mismo período de análisis, establecido a partir de la desviación estándar con respecto al TMR_{medio} (h).

En las, figuras (1), (2), (3) y (4), se muestra un ejemplo de la representación gráfica de las funciones de membresía de cada una de las variables.

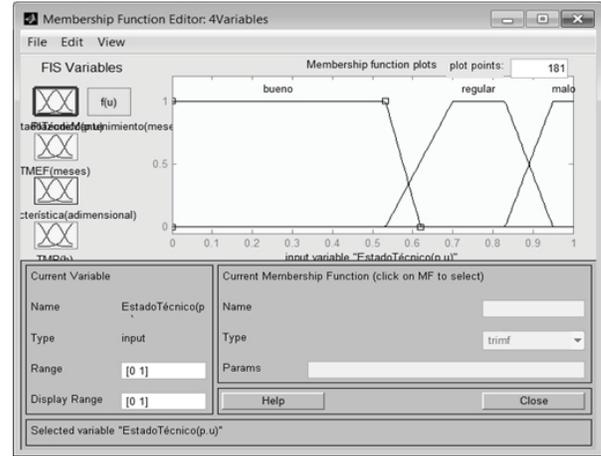


Figura 1. Representación gráfica de la fuzzificación de la variable Estado Técnico, funciones de pertenencia de la variable “Estado Técnico”, con $\gamma_{be} = \alpha_{re} = 0.532$, $\delta_{re} = 0.7$, $\gamma_{re} = 0.83$, $\chi_{re} = 0.95$, $\alpha_{me} = 0.84$ y $\delta_{me} = 0.93$ (Estos valores se obtienen como resultado del proceso de agrupación difusa (Fuzzy Clustering) de la información estadística de los 25 circuitos pertenecientes a la Empresa Eléctrica Municipal Camagüey)

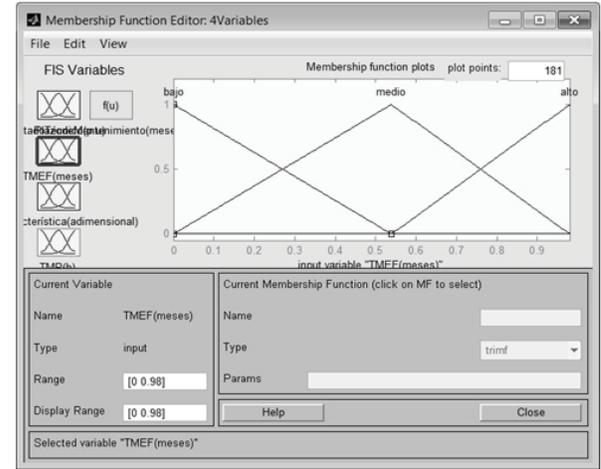


Figura 2. Representación gráfica de la fuzzificación de la variable “Tiempo medio entre fallas” para un circuito con una longitud de líneas de 61.16 km

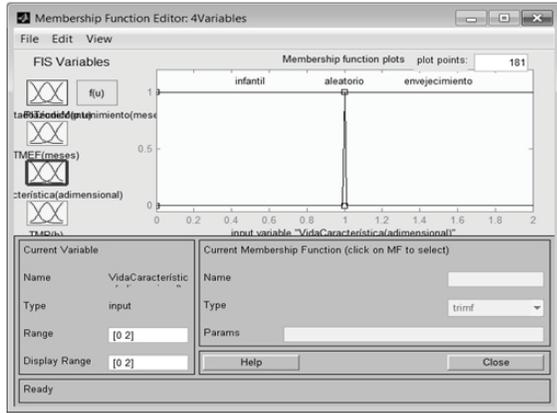


Figura 3. Representación gráfica de la fuzzificación de la variable Período de vida característica

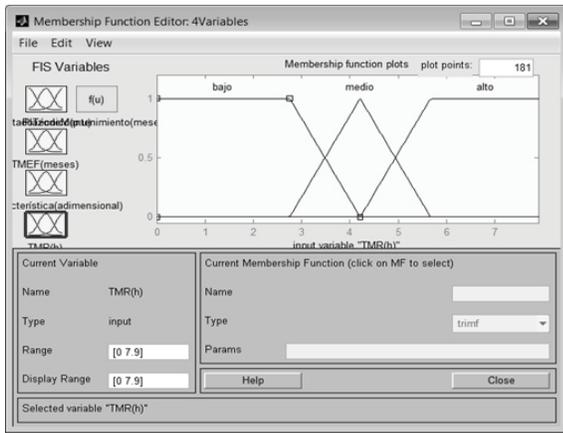


Figura 4. Representación gráfica de la fuzzificación de la variable “Tiempo medio reparación” (Utilizando la información estadística de los 25 circuitos pertenecientes a la Empresa Eléctrica Municipal Camagüey)

En general las funciones de membresía se obtienen a partir de la información histórica del registro de fallas de las empresas eléctricas y las características físicas de los circuitos en análisis.

5. PROCESO DE INFERENCIA. SISTEMA TAKAGI-SUGENO

El motor de un proceso de inferencia lo constituye una base de reglas de implicación del tipo IF-THEN. Ya que el razonamiento en este caso no es preciso, se puede inferir un consecuente aunque los antecedentes de la regla no verifiquen plenamente la misma. Dicho consecuente se parecerá más al consecuente de la Lógica Formal cuanto más exactamente se cumplan los antecedentes. La base de reglas del sistema de inferencia

para la determinación del tiempo de mantenimiento, que proporcione el menor riesgo de falla posible, cuenta con ciento ocho reglas de implicación. Estas reglas de implicación relacionan las variables del antecedente (Estado técnico, tiempo medio entre fallas, período de vida característica y tiempo medio de reparación) con la variable del consecuente (Plazo de mantenimiento), esta última variable está definida por cinco períodos de tiempo, que se corresponden con los plazos de mantenimiento establecidos en el procedimiento UR-BD 0211 “Control y registro de defectos en las redes de distribución” [16].

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

$$IF ((x_1 \text{ es } A_1) \text{ AND } (x_2 \text{ es } B_1) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_n \text{ es } w_1)) \text{ THEN } (u \text{ es } S_1)$$

Donde S_1 es singletones, puede describirse así:

$$IF ((x_1 \text{ es } A_1) \text{ AND } (x_2 \text{ es } B_1) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_n \text{ es } w_1)) \text{ THEN } (u = C_1)$$

Donde C_1 es el valor central del singleton S_1 y se puede interpretar como la función lineal

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

de orden cero.

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:

$$IF ((x_1 \text{ es } A_1) \text{ AND } \dots \text{ AND } (x_n \text{ es } A_n)) \text{ THEN } (u = a_1 * x_1 + a_2 * x_2 + \dots + a_n * x_n + C),$$

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

De este modo, el sistema Takagi-Sugeno se diferencia del de Mamdani por el hecho de 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 [17].

La función de membresía del consecuente se representa por Singletones que expresan los diferentes períodos de mantenimiento y cuyo valor depende de la importancia crítica del tramo o circuito, según la siguiente expresión:

$$S = \frac{\text{Plazo de mantenimiento (meses)}}{1 + (ICR_{j \text{ normalizada}} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot I_{eq}}))} \quad (16)$$

Donde:

$ICR_{j \text{ normalizada}}$: Importancia crítica normalizada del tramo o del circuito j (p.u).

$e^{-\alpha \cdot I_{eq}}$: Componente de la función de confiabilidad que depende del estado de carga de la línea.

$I_{eq} = I_i / K_d$: Corriente equivalente que circularía por la línea en régimen de máxima demanda si la carga estuviera concentrada en el extremo de la misma.

I_i : Corriente que circula por la primera sección de línea del tramo o circuito en régimen de máxima demanda.

K_d : Coeficiente de distribución de la carga.

α : Coeficiente de atenuación (0.001-0.0001)

Un ejemplo de función del consecuente se puede apreciar en la figura 5.



Figura 5. Funciones membresía del consecuente (Singletones) para una importancia crítica igual a 0.

Como resultado de la “desfuzzificación”, utilizando el método de centro de gravedad, se obtienen las superficies de comportamiento del consecuente en función de las variables del antecedente, Un ejemplo ilustrativo aparece en las figuras (7), (8) y (9), este ejemplo representa el comportamiento de las variables para el circuito las 500, este circuito suministra un área rural, tiene un nivel de tensión de 13.2 kV, una longitud de 61.16 km, una densidad de carga de 30.28 kVA/km y representa el 13.78% de las interrupciones totales del municipio en el período 2004-2008, en la figura (6) se muestra el diagrama monolineal de dicho circuito.

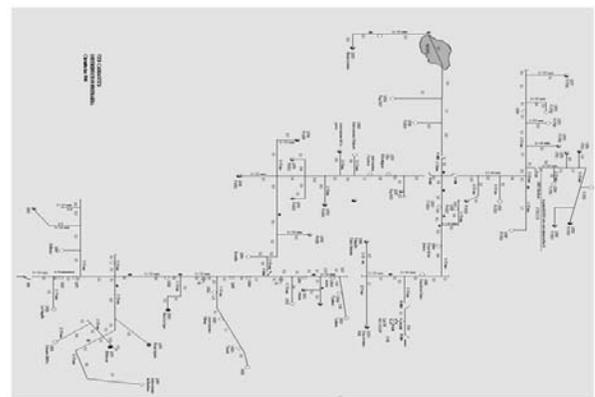


Figura 6. Diagrama Monolineal del circuito “Las 500”.

Como se puede observar la variable más influyente en el comportamiento del plazo de mantenimiento es el “Estado técnico” de la línea, obtenido a partir del indicador del nivel de deterioro que refleja los resultados del celaje, considerando que las cuatro variables de entrada tienen el mismo peso.

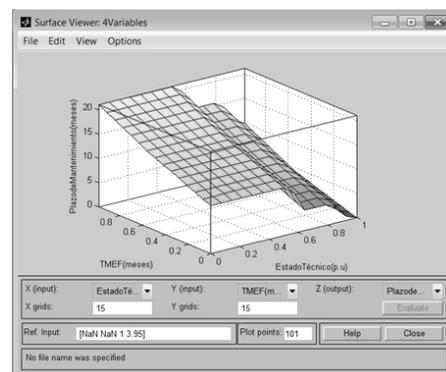


Figura 7. Superficie de comportamiento de la variable del consecuente, en función de la variación de las variables del antecedente “Estado Técnico” y TMEF, en el sistema de inferencia de Sugeno para el circuito Las 500.

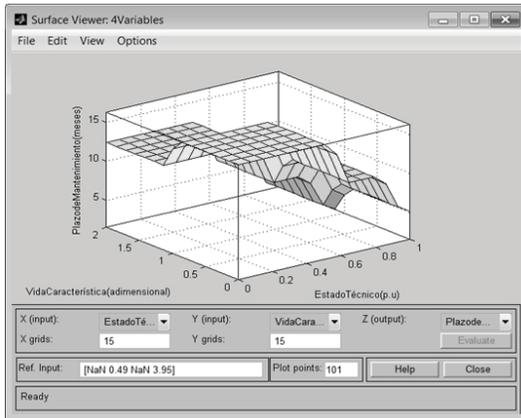


Figura 8. Superficie de comportamiento de la variable del consecuente, en función de la variación de las variables del antecedente “Estado técnico” y “Vida Característica”, en el sistema de inferencia de Sugeno para el circuito Las 500.

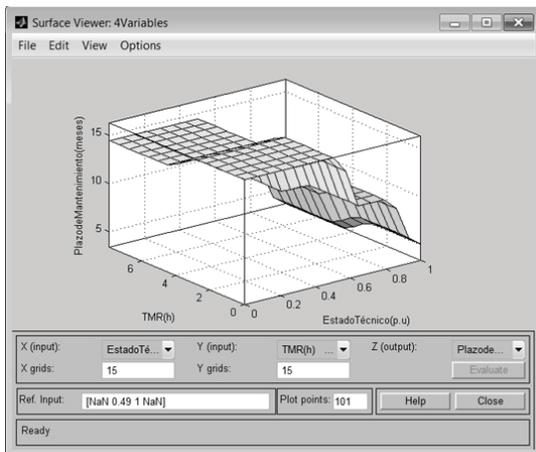


Figura 9. Superficie de comportamiento de la variable del consecuente, en función de la variación de las variables del antecedente “Estado técnico” y “TMR”, en el sistema de inferencia de Sugeno para el circuito Las 500.

6. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos con este trabajo, puede llegarse a la conclusión de que su novedad científica y a la vez práctica, radica en un aspecto fundamental: La solución de la contradicción existente entre la ambigüedad de las observaciones del celador, como variables lingüísticas borrosas y la forma categórica en que se expresa el periodo de mantenimiento, mediante un modelo de gestión de mantenimiento, centrado en la confiabilidad y utilizando como herramienta la lógica difusa, cuya

generalidad permite modelar redes de distribución radiales, primarias, de hasta 13, 8kV con sencillez y rigurosidad de forma tal que:

- 5) Expresa convenientemente el nivel de deterioro de una línea aérea de distribución primaria, a partir del tratamiento matemático de la variable observaciones del celador, teniendo en cuenta la importancia crítica de cada elemento y defecto, así como el efecto de la acumulación de elementos defectuosos, mediante una función saturable que convierte estas observaciones en un indicador de deterioro, para poder realizar la fuzzificación.
- 6) Establece un modelo difuso del comportamiento del período de mantenimiento, desde el punto de vista técnico y a partir de 4 variables que determinan este comportamiento, que permite obtener las funciones de membresía de cada una de las variables, determinar el tiempo hasta el próximo mantenimiento, a partir de la fecha de realización del celaje, que implica el menor riesgo y que tiene además la ventaja de ser ajustable, según la experiencia acumulada por el personal de mantenimiento, 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.).

REFERENCIAS

[7] Bernal, H. and Castro, A.F. “*Modelo óptimo de mantenimiento centrado en la confiabilidad para redes de distribución de energía*”. Seminario Internacional de mantenimiento y servicios asociados SIMSE-CIER 2003, Cartagena, Colombia, 2003.

REFERENCIAS

[1] Bernal, H. and Castro, A.F. “*Modelo óptimo de mantenimiento centrado en la confiabilidad para redes de distribución de energía*”. Seminario Internacional de mantenimiento y servicios asociados SIMSE-CIER 2003, Cartagena, Colombia, 2003.

[2] Carvajal, R., Ayala, M., “*Consideraciones acerca de la automatización de la planificación del mantenimiento en redes eléctricas de distribución*”. Revista Tecnológica, Serie Electroenergética, Vol 17 (1), pp. 65-72, 1998.

[3] Chowdhury, A. A., Yeddapanudi, S.R.K., Yuan, L. and

McCalley, J.D., "Risk-Based Allocation of Distribution System Maintenance Resources". IEEE Transactions on Power Systems, Vol 23 (2), pp. 287 – 295, 2008.

[4] Durán, J.B., "Nuevas tendencias del mantenimiento en la industria eléctrica". SIMSE-CIER, Cartagena, Colombia, 2003.

[5] Gondres, I., Lajes, S. et al., "Considerations about the Maintenance in Electrical Networks". Proceedings of IEEE Power Tech 05, paper # 283, 3p, 2005.

[6] Handschin, E., Jurgens, I., Weller, J. and Zdrallek, M., "Novel Methods for the Condition Based Maintenance of Distribution Networks". IEEE Power Tech, Lausanne, 1-5, pp. 6 – 11, 2007.

[7] Hegset, J., Solvang, E., Nordgard, D. and Eggens, A., "Prioritizing maintenance and renewal projects in distribution networks". Proceedings of 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, pp. 325-331, 2004.

[8] Zimmermann, H.J., "Fuzzy Set Theory and its applications". Kluwer Academic Publishers Norwel, Boston, 1991.

[9] González, J.D., Carvajal, L.F., Toro, F.M., "Water quality index based on fuzzy logic applied to the Aburra river basin in the jurisdiction of the metropolitan area". Dyna, Año 79 (171), pp. 50-58, 2012.

[10] Kuntz, P.A., Christie, R.D. and Venkata, S.S., "A reliability centered optimal visual inspection model for distribution feeders". IEEE Transactions on Power Delivery,

Vol. 16, (4) 2001, pp. 718 – 723.

[11] Sierra, E., Lajes, S. and Barrios, F., "Análisis de confiabilidad con enfoque hacia la gestión de mantenimiento". XXXIII Convención Panamericana de Ingeniería UPADI 2012. Palacio de las Convenciones/ La Habana/9 al 13 de abril de 2012. ISBN- 978-959- 247-094-1, 2012.

[12] Procedimiento UR-BL 001. "Celaje de líneas aéreas de distribución de energía eléctrica de 110 kV y menores". Manual de Distribución, UNE, Mayo, 2003.

[13] Sierra, E., Lajes, S. and Alexandrovna, M., "Diagnóstico de líneas aéreas de distribución utilizando lógica difusa". Ingenierías, Vol VII, Nro 23, FIME-UANL, México, Abril 2004.

[14] Bezdek, J.C., "Pattern recognition whit fuzzy objective function algorithms". Kluwer Academic Publishers Norwel, Boston, 1981.

[15] Ning, L., Xiaoyang, Y. and Junfeng, W., "A fault diagnosis model through G-K fuzzy clustering". Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man & Cybernetics, Beijing, 2004.

[16] Procedimiento UR-BD 0211. "Control y registro de defectos en las redes de distribución". Manual de Distribución, UNE, Mayo, 2003.

[17] Takagi, T. and Sugeno, M., "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control". IEEE Transactions on Systems, Man & Cybernetics, Vol. 15(1), pp. 116–132. 1985.