

Modelado de un sistema de inferencia difusa tipo Mamdani para el diagnóstico de envejecimiento de motores eléctricos

[Modelling of a Mamdani fuzzy inference system for the diagnosis of electric motors aging]

Sergio Carlos Ponce Flores¹, Perfecto Malaquías Quintero Flores², and José Luis Hernández Corona³

¹Master's degree in Computational Systems,
National Technological of Mexico, Technological Institute of Apizaco,
Carretera Apizaco-Tzompantepec, Tlaxcala, México

²Computation and Systems Department,
National Technological of Mexico, Technological Institute of Apizaco,
Carretera Apizaco-Tzompantepec, Tlaxcala, México

³Department of Industrial Maintenance Engineering,
Technological University of Tlaxcala,
Carretera a el Carmen Xalpatlahuaya, Tlaxcala, México

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the ***Creative Commons Attribution License***, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: Fuzzy systems have been used in maintenance and have achieved successful results, however, there are many fields of application inside the area that haven't been sufficiently explored, such as in this case, the diagnosis of electric motors aging. In this work, the basis of fuzzy systems is reviewed making emphasis to the Mamdani inference model and its application for the diagnosis of electrical motors aging is proposed, with the finality of obtaining an aging coefficient that can be used as a fundamental element in industrial maintenance. For the antecedent part are considered as principal variables the temperature, the electric current and the voltage, and for the consequent part the output is the aging coefficient. The system was based in an electric motor which specifications were used to model the system. The knowledge base of the system was extracted from the documentation available, the constant monitoring of induction motors and expert's knowledge. The system was applied using a set of hypothetical data to show the system behavior and results showed that the system could be successfully used to represent the human knowledge and benefits of its application are represented with fastest and safest diagnosis, reduction of human errors, improvements in reliability of the motors operation, among others.

KEYWORDS: fuzzy logic, fuzzy systems, maintenance, Mamdani model, electric motors aging.

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas difusos han demostrado tener una alta capacidad para resolver los problemas complejos de toma de decisiones que implican el manejo de información imprecisa, incierta o ambigua. Han sido utilizados como una estructura de representación y procesamiento de conocimiento impreciso o incierto basada en los conceptos de conjuntos difusos, reglas lingüísticas de la forma Si <antecedente> Entonces <consecuente>, así también en estos sistemas se incorpora un sistema de razonamiento difuso (Sistema de razonamiento aproximado) basado en lógica difusa, con lo cual tales sistemas han logrado exitosas aplicaciones en una amplia variedad de campos tales como medicina, robótica, control autónomo, bases de datos, minería de datos, entre otros.

En el área de mantenimiento industrial se han obtenido resultados exitosos, como por ejemplo: el diagnóstico de fallas de bombas [1], la selección del enfoque de mantenimiento más eficiente [2], el desarrollo de sistemas expertos para un mantenimiento centrado en la confiabilidad [3], el desarrollo de un sistema de mantenimiento oportunista basándose en la proximidad de componentes [4], etc.

La vida útil de los motores eléctricos es un tema importante al momento de diseñar programas de mantenimiento preventivo y predictivo, esta depende de factores primarios como la temperatura de los devanados, la intensidad de corriente, el voltaje, la frecuencia, las pérdidas del hierro, entrehierro, corrientes parasitas y la vibración. Relativamente, pocos artículos de investigación de envejecimiento de motores se han publicado. En este trabajo, se describe una propuesta basada en el modelo de sistemas difusos Mamdani.

2 MARCO TEÓRICO

En esta sección se aplican los conjuntos difusos, las reglas lingüísticas difusas, el razonamiento difuso y el sistema de inferencia difusa tipo Mamdani.

2.1 TEORÍA DE CONJUNTOS DIFUSOS

La teoría de conjuntos difusos desarrollada por Lofti A. Zadeh [5], es una extensión de la lógica booleana convencional, la cual nos restringe a los conjuntos rígidos definidos como verdadero y falso con sus respectivos grados de pertenencia 0 y 1. Es muy común encontrarnos con términos lingüísticos que no pueden ser definidos apropiadamente utilizando la lógica clásica, como "muy bello", "muy alto" o "poco atractivo", que tienen un significado ambiguo y son percibidos de manera distinta por cada individuo, ya que carecen de un criterio de grado de pertenencia preciso, sin embargo son términos lingüísticos frecuentemente utilizados en la vida diaria.

Los conjuntos difusos son una clase de objetos con un continuo de grados de pertenencia y se caracterizan por una *función de pertenencia (característica)*, la cual es la encargada de asignar a cada objeto un grado de pertenencia dentro del rango de 0 y 1 [5]. Dichos conjuntos son utilizados para definir los *términos lingüísticos* antes mencionados.

Existen diferentes tipos de funciones de pertenencia utilizadas para representar dichos conjuntos, entre las cuales se encuentran la función triangular, trapezoidal, gaussiana, bell, sigmoidal, entre otras [6].

2.2 OPERACIONES CON CONJUNTOS DIFUSOS

Las operaciones con conjuntos difusos, involucran el uso de operadores de unión, intersección y complemento, los cuales son extensiones de los operadores utilizados en operaciones de conjuntos clásicos.

El complemento de un conjunto difuso A se denota por A' y se define por [5]:

$$f_{A'} = 1 - f_A \quad (1)$$

La intersección de dos conjuntos difusos A y B con su respectiva función de pertenencia $f_A(x)$ y $f_B(x)$ es un conjunto difuso C, escrito como $C = A \cap B$, cuya función de pertenencia está relacionada a las de A y B por [5]:

$$f_C(x) = \text{Mín}[f_A(x), f_B(x)], \quad x \in X \quad (2)$$

La unión de dos conjuntos difusos A y B con su respectiva función de pertenencia $f_A(x)$ y $f_B(x)$ es un conjunto difuso C, escrito como $C = A \cup B$, cuya función de pertenencia está relacionada a las de A y B por [5]:

$$f_C(x) = \text{Máx}[f_A(x), f_B(x)], \quad x \in X \quad (3)$$

En las ecuaciones (2) y (3) se muestra que el operador de intersección y el operador de unión están dados por el grado de pertenencia mínimo y máximo respectivamente, sin embargo existen otros operadores comúnmente utilizados como lo son *los operadores de intersección <T-norm>(4) y los operadores de unión <S-conorm>(5).*

$$\begin{aligned} T_M(x, y) &= \text{mín}(x, y) \\ T_P(x, y) &= x * y \\ T_L(x, y) &= \text{máx}(x + y - 1, 0) \\ T_D(x, y) &= \begin{cases} x & \text{si } y = 1 \\ y & \text{si } x = 1 \\ \text{de otra manera } 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
 S_M(x, y) &= \text{mín}(x, y) \\
 S_P(x, y) &= x + y - x * y \\
 S_L(x, y) &= \text{mín}(x + y, 1) \\
 S_D(x, y) &= \begin{cases} x \text{ si } y = 0 \\ y \text{ si } x = 0 \\ \text{de otra manera } 1 \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Los operadores de intersección mostrados en la ecuación (4) corresponden a los T-norms: mínimo (T_M), producto (T_P), Łukasiewicz (T_L) y drástico (T_D). Mientras que los operadores de unión mostrados en la ecuación (5) corresponden a los S-conorms: máximo (S_M), producto (S_P), Łukasiewicz (S_L) y drástico (S_D)[6].

2.3 REGLAS DIFUSAS Y EL RAZONAMIENTO DIFUSO

Las reglas de inferencia difusa de la forma Si-Entonces representan la forma en que se captura el conocimiento dentro de un sistema difuso, dichas reglas están compuestas por dos partes, la parte ‘Si’ y la parte ‘Entonces’ también referidas como la parte antecedente y la parte consecuente.

Una regla difusa de la forma Si <antecedente> Entonces <consecuente> con dos variables lingüísticas de entrada en la parte antecedente y una variable lingüística de salida en la parte consecuente asume la siguiente forma:

$$\text{Si } x_1 \text{ es A y } x_2 \text{ es B entonces } y \text{ es C}
 \tag{6}$$

Dónde x_1 es un elemento que pertenece a la variable lingüística X1 ($x_1 \in X1$), x_2 es un elemento que pertenece a la variable lingüística X2 ($x_2 \in X2$), A es un término lingüístico definido por un conjunto difuso en la variable lingüística X1, B es un término lingüístico definido por un conjunto difuso en la variable lingüística X2, y es un elemento que pertenece a la variable lingüística Y ($y \in Y$) y C es un término lingüístico definido por un conjunto difuso en la variable lingüística Y [6].

A partir de un conjunto de reglas difusas el razonamiento difuso o razonamiento aproximado obtiene una conclusión.

2.4 SISTEMA DE INFERENCIA DIFUSA TIPO MAMDANI

Los sistemas de inferencia han sido utilizados como una estructura de representación y procesamiento de conocimiento impreciso o incierto, dichos sistemas están basados en los conceptos de conjuntos difusos, reglas lingüísticas de la forma Si-Entonces y en un sistema de razonamiento difuso basado en lógica difusa. Los sistemas de inferencia difusa consisten en tres etapas: la *difusificación*, (la cual consiste en transformar los valores de entrada en la parte antecedente del sistema en valores difusos con un grado de pertenencia entre 0 y 1), la *base de reglas difusas* (la cual almacena el conocimiento en un conjunto de reglas de la forma Si<antecedente> Entonces <consecuente>), y la *desdifusificación* (la cual consiste la transformación de los valores difusos obtenidos mediante las acciones del sistema, a valores rígidos, obteniendo el valor de salida del sistema). El método Mamdani (Fig.1) se desarrolló inicialmente por Mamdani y Assilan [7] como un sistema de control para un motor de vapor utilizando una combinación de reglas lingüísticas obtenidas de operadores expertos en el área.

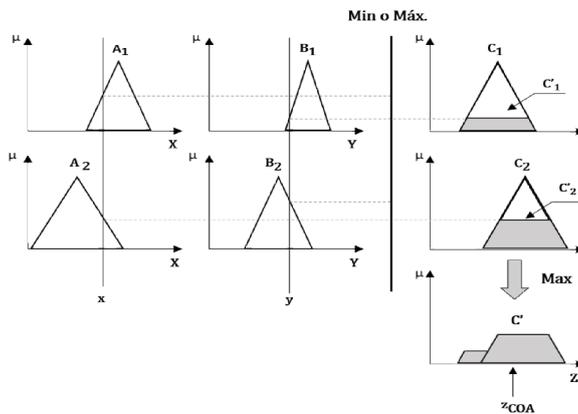


Fig. 1. Sistema de inferencia difusa tipo Mamdani

El método Mamdani es comúnmente utilizado de la forma *min.-máx.*, es decir, la composición de las reglas de inferencia están dadas por el operador de intersección *T-norm min.* y por el operador de unión *S-conorm máx.* La agregación es el método mediante el cual se van a unir los valores obtenidos en cada una de las reglas de inferencia utilizadas en el sistema, para realizar esto, existen diferentes tipos de agregación como lo son el máximo del área, el producto y la suma algebraica, entre otros. Un sistema inferencia difusa como se mencionó anteriormente, transforma las variables u objetos rígidos en variables difusas por medio de las funciones de pertenencia, por lo tanto, para poder obtener un valor rígido como salida de dicho sistema, es necesario utilizar un desdifusificador. En el método Mamdani, es común encontrarnos como resultado de la agregación, con un área irregular, por lo tanto para obtener el valor rígido como salida del sistema se utiliza alguno de los métodos de desdifusificación mostrados en la Fig.2 [6].

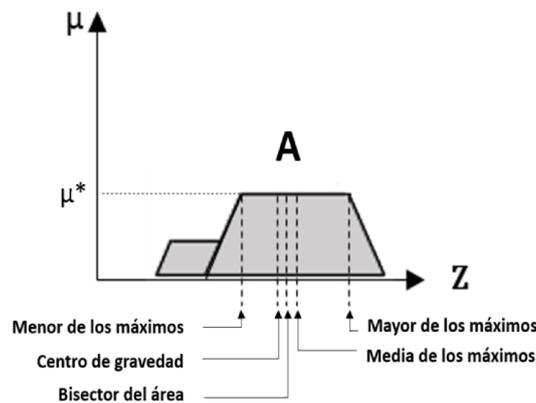


Fig. 2. Métodos de desdifusificación para sistemas difusos tipo Mamdani

El centro de gravedad que es el método utilizado en esta investigación está dado por:

$$Z_{COA} = \frac{\int z^{\mu_A(z)} z \, dz}{\int z^{\mu_A(z)} \, dz} \quad (10)$$

Donde $\mu_A(z)$ es el grado de pertenencia de z en A y A es el área resultante de la agregación de las partes consecuentes de las reglas de inferencia del sistema. Al ser el centro de equilibrio entre la distribución de los valores agregados, es el método más utilizado.

3 IMPORTANCIA DEL ENVEJECIMIENTO DE MOTORES ELÉCTRICOS

Los motores eléctricos son máquinas que son capaces de transformar la energía eléctrica en energía mecánica con variables de (movimiento, aceleración, torque, frenado, etc.). Debido a sus significantes ventajas, como la facilidad de manejo, la ausencia de emisión de gases, y eficiencia (entre otros), los motores eléctricos son una parte prevalente e importante dentro de la industria y cabe destacar que el diagnóstico y la prevención de problemas en las partes fundamentales de dichas máquinas es crucial para evitar eventos indeseados dentro del sector industrial (principalmente), además de evitar la necesidad de llevar a cabo reparaciones costosas, pérdidas significativas a nivel productivo y la reducción del ciclo de vida del motor. Entre los problemas que afectan el ciclo de vida de un motor eléctrico se encuentran la descompensación en la tensión de suministro, el aumento en la carga de trabajo, devanados cortocircuitados, corto en la conexión, sobrecalentamiento, sobrecargas eléctricas, entre otros. Estos problemas se presentan por el comportamiento indeseable de factores primarios como lo son la temperatura, la intensidad de corriente, el voltaje, la frecuencia y la vibración.

Los valores de no linealidad estudiados en motores de inducción, por ejemplo, al tener un bajo voltaje de alimentación en un motor eléctrico, deriva en el aumento del consumo de la corriente eléctrica, lo que causa un sobrecalentamiento en los devanados del motor. Estos problemas tienen un impacto negativo en la vida del aislamiento del motor, y el diagnóstico de estos problemas necesita expertos en el área. Sin embargo la realización de dichos diagnósticos por medio de operadores humanos, no siempre es el adecuado, es tardado y esta propenso a errores. Por lo tanto, el desarrollo de un sistema de inferencia difusa capaz de simular la habilidad de humanos expertos para realizar el diagnóstico apropiado y a tiempo del impacto de las condiciones actuales sobre las que se encuentra trabajando el motor, puede mejorar la predicción de los

problemas que pueden presentarse, y mejorar la confiabilidad de los programas de mantenimiento. El envejecimiento de motores eléctricos en la presente investigación, está basado principalmente en el desgaste o envejecimiento prematuro del aislamiento, el cual se ve seriamente afectado por los problemas presentados por dichos factores.

3.1 SISTEMAS DE AISLAMIENTO EN MOTORES ELÉCTRICOS Y FACTORES DE DESGASTE

El aislamiento de un motor eléctrico es el que garantiza el flujo de la intensidad de corriente a través de los devanados para la generación e iteración de los campos magnéticos necesarios durante el proceso, su papel dentro del motor permite un buen desempeño térmico y eléctrico principalmente, contribuyendo así a que el motor tenga una vida útil adecuada. Para mantener un buen desempeño del aislamiento de un motor eléctrico, es necesario evitar el aumento excesivo de temperatura en los devanados durante su operación. Dicha temperatura en los motores eléctricos se ve incrementada por distintas fuentes de calor, estas pueden ser internas, resultantes de la misma operación del motor o externas debido a las condiciones del ambiente en el que se encuentra, así como de la misma habilidad del motor para disipar el calor [8].

La temperatura del ambiente es causada por el entorno en el cual el motor se encuentra operando. Esta temperatura está en función de factores tales como los patrones climáticos locales, los sistemas de enfriamiento en la planta y el calor generado por equipos cercanos. El estándar de temperatura ambiental en los motores eléctricos por lo general es de 40°C, sin embargo en la práctica, la medición de dicho factor puede variar incluso en distintas locaciones dentro de la misma planta [8]. Las fuentes de calor internas, están dadas por el trabajo del motor bajo condiciones inadecuadas, factores como el voltaje y la intensidad de corriente afectan seriamente al motor al variar en $\pm 10\%$ de su nominal, como lo es un bajo voltaje, esto causa un aumento en la corriente afectando considerablemente la temperatura reduciendo la vida útil del aislamiento. Existen diferentes tipos de aislamientos en los motores eléctricos, los cuales están clasificados de acuerdo a la temperatura máxima permisible durante operación (estándares NEMA) [9] los cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Clases de aislamiento (estándares NEMA)

Clase de Aislamiento	Temperatura máxima permitida durante operación
A	105°C
B	130°C
F	155°C
H	180°C

Basándonos en estos factores de desgaste del aislamiento de motores eléctricos (voltaje, corriente y temperatura), se propone un sistema difuso con el objetivo de aportar un coeficiente de envejecimiento que sea capaz de determinar el impacto de las condiciones en las que se encuentra trabajando el motor en su ciclo de vida, el cual se presenta en la siguiente sección.

4 MODELADO DE UN SISTEMA DIFUSO PARA EL DIAGNÓSTICO DE ENVEJECIMIENTO DE MOTORES ELÉCTRICOS

Para el modelado del sistema difuso se utilizó el sistema de inferencia difusa tipo Mamdani de la forma mín.-máx. y el método de desdifusificación del centro de gravedad; se utilizaron 3 variables lingüísticas en la parte antecedente, estas corresponden a los 3 factores considerados en el desgaste del aislamiento antes mencionado, los cuales corresponden al voltaje, la corriente y la temperatura. La base del conocimiento utilizada se obtuvo del monitoreo constante en motores de inducción, además de la documentación disponible y los estándares de clasificación NEMA [9], así como de las especificaciones del motor y consultas con expertos en el área.

La primer variable lingüística ‘Voltaje’, está definida por los conjuntos difusos ‘Voltaje Muy bajo’ (VMB), ‘Voltaje Bajo’ (VB) y ‘Voltaje Nominal’ (VN). Los parámetros utilizados para definir los conjuntos difusos están basados en el porcentaje de tolerancia correspondiente a los estándares NEMA de $\pm 10\%$ del voltaje nominal correspondientes al motor utilizado, en este caso un motor trifásico de 10HP que trabaja bajo un voltaje nominal de 220V (ver Tabla 2) y se muestran en la Fig. 3(a).

Tabla 2. Parámetros de 'Voltaje'

Conjunto Difuso	Función de pertenencia	Parámetros(V)
VMB	Trapezoidal	(0, 0, 176, 198)
VB	Triangular	(176, 198, 220)
VN	Trapezoidal	(198, 220, 250, 250)

La segunda variable lingüística 'Corriente', está definida por los conjuntos difusos 'Corriente Nominal' (CN), 'Corriente Alta' (CA), y 'Corriente Muy Alta' (CMA). Al igual que con el voltaje, se consideraron los estándares de tolerancia de $\pm 10\%$ de la corriente nominal correspondientes al motor en cuestión, cuyo nominal en el caso de la corriente es de 27 Amperes (ver Tabla 3) y se muestran en la Fig.3 (b).

Tabla 3. Parámetros de 'Corriente'

Conjunto Difuso	Función de pertenencia	Parámetros(A)
CN	Triangular	(24, 27, 30)
CA	Triangular	(27, 30, 33)
CMA	Trapezoidal	(30, 33, 40, 40)

La tercera variable lingüística 'Temperatura', está definida con los conjuntos difusos 'Temperatura Nominal' (TN), 'Temperatura Alta' (TA), y 'Temperatura Muy Alta' (TMA). En este caso se consideró la clasificación Nema correspondiente al tipo de aislamiento del motor, el cual corresponde a un aislamiento clase F (ver Tabla 4) y se muestran en la Figura 3(c).

Tabla 4. Parámetros de 'Temperatura'

Conjunto Difuso	Función de pertenencia	Parámetros(°C)
TN	Trapezoidal	(0, 0, 40, 155)
TA	Triangular	(60, 100, 140)
TMA	Trapezoidal	(100, 155, 180, 180)

En la parte consecuente del sistema difuso, la variable lingüística corresponde al 'Envejecimiento', el cual está definido por los conjuntos difusos 'Envejecimiento Normal' (EN), 'Envejecimiento Alto' (EA), 'Envejecimiento Muy Alto' (EMA) y se muestran en la Figura 3(c). La definición de los parámetros está basada en el nivel de impacto de acuerdo al comportamiento de las variables de entrada, con una calificación de 0 a 1, donde 0 es un coeficiente de envejecimiento bajo y 1 es un envejecimiento muy alto.

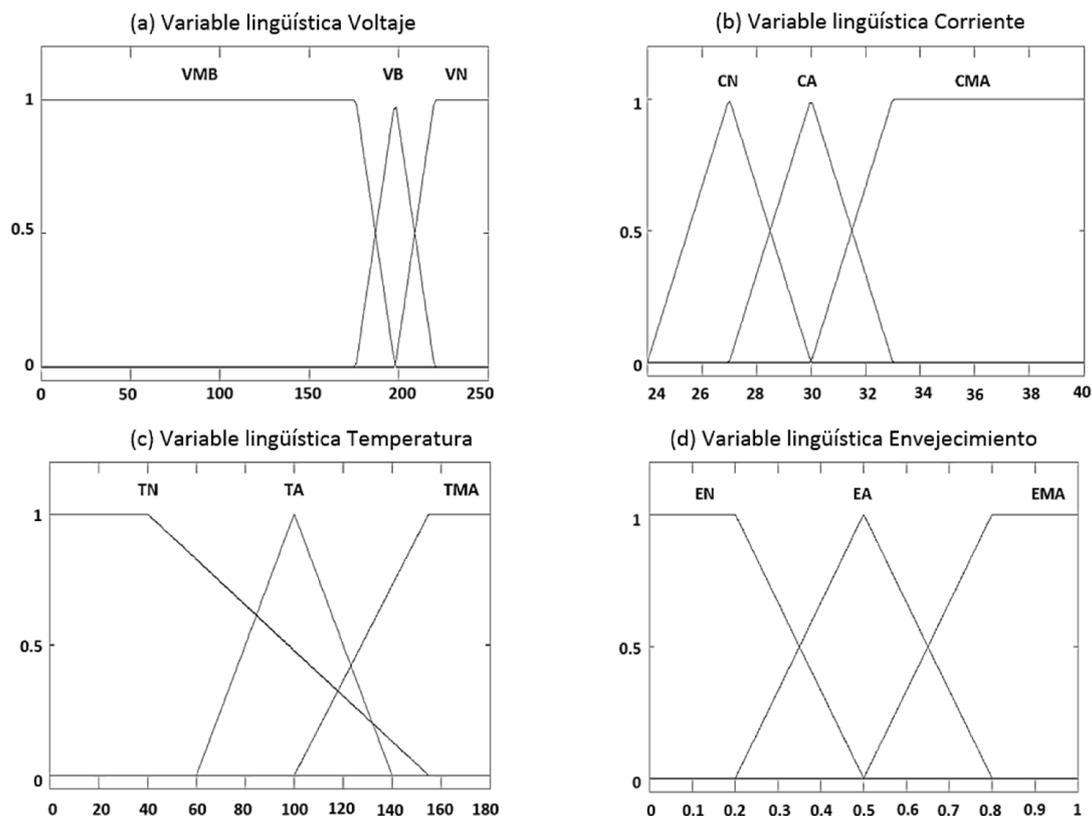


Fig. 3. Variables lingüísticas del sistema de Inferencia difusa propuesto

Para este sistema se consideraron las reglas de inferencia difusa mostradas en la Tabla 5.

Tabla 5. Reglas de inferencia consideradas

Regla #	Antecedente			Consecuente	
	Voltaje	Corriente	Temperatura	Envejecimiento	
1	Muy Bajo y	Muy Alta y	Muy Alta	entonces	Muy Alto
2	Muy Bajo y	Muy Alta y	Alta	entonces	Alto
3	Muy Bajo y	Alta y	Muy Alta	entonces	Muy Alto
4	Muy Bajo y	Alta y	Alta	entonces	Alto
5	Bajo y	Muy Alta y	Muy Alta	entonces	Muy Alto
6	Bajo y	Muy Alta y	Alta	entonces	Alto
7	Bajo y	Alta y	Muy Alta	entonces	Muy Alto
8	Bajo y	Alta y	Alta	entonces	Alto
9	Nominal y	Nominal y	Nominal	entonces	Normal

Para observar el comportamiento del modelo realizado en esta sección, se implementó utilizando 20 datos hipotéticos en dos herramientas de lógica difusa para realizar una comparación de resultados, el cual se presenta en la siguiente sección.

5 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Para verificar el desempeño del sistema difuso, el modelo realizado, se implementó en el Shell de lógica difusa FuzzyApp utilizando el modelo de inferencia Mamdani de la forma *min-más* y utilizando el método del *centro de gravedad*, de la misma forma a manera de comparación se implementó el modelo en el Fuzzy Logic ToolBox de Matlab, 10 de los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 6.

Los resultados obtenidos en las dos herramientas son muy similares, y los coeficientes de envejecimiento muestran los resultados esperados con respecto a las variables de entrada utilizadas.

Tabla 6. Datos utilizados y resultados obtenidos

Dato #	Voltaje (V)	Corriente(A)	Temperatura(°C)	FuzzyApp	Matlab
1	194	31.6	85	0.5	0.5
2	215	29	74	0.348	0.345
3	218.4	28.14	62	0.2317	0.229
4	179	34.3	116	0.582	0.585
5	218	27.8	51	0.2	0.198
6	188	32.4	120	0.607	0.61
7	209	29.7	99	0.465	0.465
8	176	32.6	129	0.679	0.683
9	212	28.5	77	0.344	0.341
10	209	31	112	0.570	0.572

6 CONCLUSIONES

En esta investigación, con el objetivo de mejorar las actividades de mantenimiento predictivo en motores eléctricos y debido al buen desempeño de los sistemas difusos en el área de mantenimiento, se propone un sistema difuso tipo Mamdani para el diagnóstico de envejecimiento de motores eléctricos considerando los factores de impacto (voltaje, corriente y temperatura), los cuales en condiciones indeseables, tienen un impacto negativo en la vida útil del motor como lo es el caso de un aumento de corriente provocado por una baja tensión, este aumento de corriente aumenta la temperatura de los devanados generando más calor del que es capaz de disipar el motor en condiciones óptimas, lo cual afecta críticamente la vida útil del aislamiento y por lo tanto afecta el ciclo de vida del motor. Para lograr dicho objetivo se adquirió una base de conocimiento mediante el monitoreo constante en motores de inducción, además de la documentación disponible, los estándares de clasificación NEMA, y el conocimiento de expertos en el área. A partir de dicho conocimiento se extrajeron las reglas lingüísticas y se desarrolló un sistema difuso con el cual se propone el diagnóstico del envejecimiento de motores eléctricos. El sistema propuesto se implementó contemplando 20 conjuntos de datos hipotéticos utilizando el Shell de lógica difusa FuzzyApp y el Fuzzy Logic Toolbox de Matlab, obteniendo resultados muy similares y de acuerdo con los expertos consultados se obtuvieron en ambos casos el desempeño esperado.

Los beneficios de la aplicación del sistema de inferencia difusa propuesto pueden verse reflejados en la reducción de tiempo en diagnósticos realizados por operadores humanos, reducción del factor de error humano, mejora en planeación de mantenimiento de los motores lo cual derivara en reducción de costos de mantenimiento y el aumento en la confiabilidad de operación de los motores, los cuales son una parte fundamental en cualquier sector industrial.

Como futuros trabajos de investigación, se contempla el agregar como variables la frecuencia y la vibración existentes en los motores eléctricos, así como realizar pruebas con diferentes motores y modelos de inferencia difusa.

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo de investigación fue posible gracias al apoyo brindado por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), a la Universidad Tecnológica de Tlaxcala por permitir el uso del laboratorio de mantenimiento predictivo donde se realizó la investigación y finalmente al Instituto Tecnológico de Apizaco que brindo las facilidades para realizar los estudio de posgrado donde fue planteado el proyecto de investigación

REFERENCIAS

- [1] A. Azadeh, V. Ebrahimipour, P. Bavar, "A fuzzy inference system for pump failure diagnosis to improve maintenance process: The case of a petrochemical industry", *Expert Systems with Applications*, vol. 28, pp 627-639, 2010.
- [2] B. Al-Najjar, I. Alsayouf, "Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making", *Int. J. Production Economics*, vol 84, pp 85-100, 2003.
- [3] D. J. Fonseca, G. M. Knapp, "An expert system for reliability centered maintenance in the chemical industry", *Expert Systems with Applications*, vol. 19, pp 45-57, 2000.
- [4] W. Derigent, E. Thomas, E. Lavrat, B. lung, "Opportunistic maintenance based on fuzzy modelling of component proximity", *Manufacturing Technology*, vol. 58, pp 29-32, 2009.
- [5] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets", *Information and control*, vol.8, pp 338-353, 1965.
- [6] J. S. R. Jang, C. T. Sun, E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*, Prentice-Hall, 1997.
- [7] Mamdani E.H., Assilan S., "An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller", *International Journal of Man-Machine Studies*, pp 1-13, 1975.
- [8] B. Campbell, J. Galleno, "Motor Life: The effects of loading, service factor and temperature rise on insulation life", Petroleum and Chemical Industry conference, 1998. *Industry Applications Society 45th Annual*, pp 303-310, 1998.
- [9] NEMA MG1-2014, Revision 3, Parte 20.