

# **INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO**

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

## **“SISTEMA EXPERTO DIFUSO EN ENVEJECIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCION”**

# **TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN SISTEMAS COMPUTACIONALES**

PRESENTA:

**ING. GELACIO COPALCUA NAVA**

ASESORES:

**DIRECTOR: DR. PERFECTO MALAQUIAS QUINTERO FLORES**

**CO-DIRECTOR: DR. RAFAEL ORDOÑEZ FLORES**

APIZACO, TLAXCALA

NOVIEMBRE 2016

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
Instituto Tecnológico de Apizaco

Apizaco, Tlax., 09 de Agosto de 2016

No. de Oficio: DEPI/248/16

ASUNTO: Se Autoriza Impresión de Tesis de Grado.

ING. COPALCUA NAVA GELACIO,  
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO  
EN SISTEMAS COMPUTACIONALES  
No. de Control: M07370485  
P R E S E N T E.

Por este medio me permito informar a usted, que por aprobación de la Comisión Revisora asignada para valorar el trabajo, mediante la Opción: I **Tesis de Grado por Proyecto de Investigación**, de la **Maestría en Sistemas Computacionales**, que presenta con el tema: "**SISTEMA EXPERTO DIFUSO EN ENVEJECIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCIÓN**" y conforme a lo establecido en el Procedimiento para la Obtención del Grado de Maestría en el Instituto Tecnológico, la División de Estudios de Posgrado e Investigación a mi cargo le emite la:

#### AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

Debiendo entregar un ejemplar del mismo debidamente encuadrado y seis copias en CD en formato PDF, para presentar su Acto de Recepción Profesional a la brevedad.

Sin otro particular por el momento, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE

PENSAR PARA SERVIR, SERVIR PARA TRIUNFAR®

  
DR. JOSÉ FEDERICO CASCO VÁSQUEZ  
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN.



Secretaría de Educación Pública  
Instituto Tecnológico de Apizaco  
División de Estudios de Posgrado  
e Investigación

C.p.- Expediente.

JFCV/MJSH\*mebr



Carretera Apizaco- Tzompantepec, Esq. con Av. Instituto Tecnológico S/N  
Conurbado Apizaco-Tzompantepec, Tlaxcala, Méx.  
C.P. 90300 Apizaco, Tlaxcala. Tels. 01 241 41 7 20 10, Conmut. 101  
[www.itapizaco.edu.mx](http://www.itapizaco.edu.mx)



Fecha de certificación:  
11/Ago/2015  
Registro: CTAP150811  
Fecha de renovación:  
11/Ago/2018  
Certificado desde: 14/Ago/2012



Fecha de certificación:  
05/Oct/2015  
Registro: CTAP151208-045  
Fecha de renovación:  
05/Oct/2018  
Certificado desde: 28/Oct/2009

SEP

SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
Instituto Tecnológico de Apizaco

Apizaco, Tlax., 30 de junio de 2016

ASUNTO: Aprobación del trabajo de Tesis de Maestría.

DR. JOSE FEDERICO CASCO VASQUEZ  
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACION,  
P R E S E N T E.

Por este medio se le informa a usted, que los integrantes de la **Comisión Revisora** para el trabajo de tesis de maestría que presenta el **ING. COPALCUA NAVA GELACIO**, con número de control **M07370485** candidato al grado de **Maestro en Sistemas Computacionales** y egresado del Instituto Tecnológico de Apizaco, cuyo tema es **"SISTEMA EXPERTO DIFUSO EN ENVEJECIMIENTO DE MOTORES DE INDUCCION"**, fue:

**A P R O B A D O**

Lo anterior, al valorar el trabajo profesional presentado por el candidato y constatar que las observaciones que con anterioridad se le marcaron así como correcciones sugeridas para su mejora ya han sido realizadas.

Por lo que se avala se continúe con los trámites pertinentes para su titulación.

Sin otro particular por el momento, le envió un cordial saludo.

LA COMISIÓN REVISORA

DR. P. MALAQUIAS QUINTERO FLORES

M.C. JOSE JUAN HERNANDEZ MORA

C. p.- Interesado.

DR. RAFAEL ORDÓÑEZ FLORES

DR. JOSE FEDERICO RAMIREZ CRUZ



Carretera Apizaco- Tzompantepec, Esq. con Av. Instituto Tecnológico S/N  
Conurbado Apizaco-Tzompantepec, Tlaxcala, Méx.  
C.P. 90300 Apizaco, Tlaxcala. Tels. 01 241 41 7 20 10, Conmut. 101  
[www.itapizaco.edu.mx](http://www.itapizaco.edu.mx)



Fecha de certificación:  
11ago2015  
Registro: 15AP150811  
Fecha de renovación:  
11ago2016  
Certificado desde: 14ago2012



Fecha de certificación:  
06Oct2015  
Registro: ITAP151208 QMS  
Fecha de renovación:  
06Oct2016  
Certificado desde: 28Feb2009

# Agradecimientos

Esta tesis ha sido posible al apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca que me fue proporcionada en los dos años de estudios en la maestría en sistemas computacionales, que a su vez está en Coordinación del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Apizaco.

Agradezco a la Universidad Tecnológica de Tlaxcala donde me dieron la facilidad de hacer investigación en sus laboratorios de mantenimiento predictivo conforme al proyecto de un sistema experto difuso en diagnóstico de envejecimiento de motores de inducción.

Agradezco a mi director de tesis que siempre me asesoro en el lapso de la realización de la tesis, y además de motivarme de no darme por vencido en los obstaculos que encuentre en el transcurso de estos dos años en la maestria, con lo que me llevo en lo personal de sus conocimiento, una palabras que alguna ocasión me comento, que debemos de salir de una confort y que la decisión en uno mismo es más importante para cualquier situación.

Agradezco a mi revisor externo de la universidad tecnológica de tlaxcala por apoyarme cuándo siempre tenia dudas en la utilización de equipos de calidad de energía, en transmitirme su conocimiento y experiencia en lo que es sobre mantenimiento predictivo.

Agradezco a mis padres por el apoyo en lo moral y en lo economico, cuando decidi estudiar la maestria en sistemas computacionales, además de que gracias a ellos este objetivo fue realizado.

# Resumen

El estudio en la calidad de energía es una de las áreas relevantes en la actualidad, debido, a que se han implementado varios estudios que han mejorado y se ha logrado una reducción del costo de energía eléctrica. Con la aplicación del mantenimiento predictivo en la detección de Fallas en una red eléctrica suministrada a las compañías industriales, se determina la corriente que fluye a través de un conductor y produce algunas pérdidas de energía.

Por ejemplo, en nuestro país, la empresa encargada de suministrar energía es Comisión Federal de Electricidad (CFE), con características de tensión, corriente y frecuencia (60hz), si existiera algún cambio que origina un factor de potencia (FP), por debajo del 0.9 en adelante o en atraso, significa que existe una energía reactiva que no es consumida por el usuario, y además trae esto, un incremento en el consumo y costo de la energía por penalización. En caso contrario, si el  $FP \cong 0.9$  a 1, trae un beneficio para el consumidor por CFE.

Este trabajo de investigación, se hizo para apoyar al personal de las áreas de mantenimiento en las industrias, para realizar un diagnóstico de fallas en los motores de inducción, que son producidos por armónicos eléctricos en los devanados de los motores.

Los armónicos eléctricos se presentan como perturbaciones y se observan en las ondas sinusoidales, en relación a la frecuencia de la corriente o la tensión, además son causadas por las cargas no lineales como son: las lámparas fluorescentes, motores eléctricos, transformadores de potencia, interruptores, contactores, y relevadores.

Las fallas más comunes en los motores de inducción son: a) los armónicos eléctricos que provocan el desbalanceo de un rotor, b) las sobre tensiones en las líneas de alimentación, c) el incremento de la temperaturas en los cables de alimentación de estos equipos, y d) el envejecimiento del devanado.

Existen diferentes técnicas para la detección de fallas tempranas, una de ellas es la aplicación de equipos de calidad de energía, que nos permiten medir los diferentes armónicos, a su vez, nos muestra la distorsión de señal por medio de una onda en relación al ruido

generado, además, otros equipos permiten determinar los cambios térmicos, y las vibraciones mecánicas, que son reconocidos.

La gran mayoría de los equipos en calidad de energía, trabajan en el procesamiento de señales, en base a las series de Fourier, en especial la transformada rápida de Fourier, "FFT", que permite determinar las perturbaciones, las fluctuaciones, los armónicos, el incremento de la temperatura, e incluso otras fuentes de fallas en los motores de inducción.

Las variables eléctricas y térmicas necesarias para nuestro estudio, son obtenidas por muestreos en los motores de inducción, empleando los equipos en calidad de energía. Las variables eléctricas están relacionadas con el desfaseamiento del ángulo de fase en la línea de alimentación. Para el análisis de una onda sinusoidal, la frecuencia es relacionada con el tiempo de una oscilación, mostrada con el espectro de frecuencia.

Con la obtención de las mediciones de las variables armónicas y térmicas, se tienen los parámetros para crear una función de entrada de un sistema experto difuso, para el diagnóstico de envejecimiento, que nos permite evaluar y determinar el grado de envejecimiento en estos equipos, además, construyendo algunas reglas de inferencia difusa, que han demostrado un mejor entendimiento en diagnóstico de fallas en los equipos industriales.

Este trabajo de tesis propone la aplicación de un sistema de inferencia tipo Mandani, debido a su fácil cálculo computacional e implementación, ya que utiliza entradas y salidas en relación a las reglas de inferencia propuestas (fusificación), y seguida la desfusificación, que consiste en evaluar un modelo matemático, para obtener el grado de envejecimiento.

El objetivo principal es realizar un análisis comparativo, entre Fuzzy Logic Toolbox Matlab y una Shell FuzzyApp, para determinar una similitud en los resultados del grado de envejecimiento utilizando los distintos parámetros con 5 variables lingüísticas propuestas, en las entradas y salidas, implementado en una carga lineal y dinámica.

# Abstract

The study on energy quality is one of the relevant areas today, due to the fact that several studies have been implemented. Such studies have improved and achieved a reduction in the cost of electricity. The application of predictive maintenance in detecting faults in an electricity grid supplied to industrial companies determines the current that flows through a conductor and produces some energy loss.

For example, in our country, the company in charge of supplying energy is the Federal Electricity Commission (CFE), it supplies it with characteristics of voltage, current and frequency (60hz), If there is any change that originates a power factor (FP), below 0.9 in advance or in backlog, it means that there is a reactive energy that is not consumed by the user and in addition, an increase in the consumption and cost of the energy is brought. Otherwise, if  $FP \cong 0.9$  to 1, it brings a benefit to the consumer by CFE.

This research work was done to support the personnel of the maintenance areas in the industries, to perform a fault diagnosis in the induction motors, which are produced by electric harmonics in the windings of the motors.

The electric harmonics are presented as disturbances and are observed in the sine waves, in relation to the frequency of the current or the voltage, that are also caused by non-linear loads such as: fluorescent lamps, electric motors, power transformers, switches, contactors, and relays.

The most common faults in induction motors are: a) the electrical harmonics that cause the rotor to become unbalanced, b) the over voltages in the power lines, c) the increase in the temperature in power cables of those equipments, and d) the aging of the winding.

There are different techniques for the detection of early failures, one of them is the application of energy quality equipment, that allows us to measure the different harmonics, in turn, it shows the signal distortion by means of a wave in relation to generated noise, in addition, other equipments are able to determine the thermal changes and the mechanical

vibrations that are recognized.

The vast majority of equipment in energy quality works on the signal processing, based on the Fourier series, especially the fast Fourier transform, "FFT", which allows the determination of disturbances, flickering, harmonics, temperature rise, and even other sources of failure in induction motors.

The electric and thermal necessary variables for our study are obtained by sampling in induction motors, using the equipment in energy quality. Electrical variables are related to the phase shift of the phase angle in the power supply line. For the analysis of a sine wave the frequency is related to time of an oscillation, shown with the frequency spectrums.

With the obtaining of the measurements of the harmonic and thermal variables, we have the parameters to create an input function of a fuzzy expert system for the diagnosis of aging, which allows us to evaluate and determine the degree of aging in these equipments, constructing some rules of fuzzy inference, which have demonstrated a better understanding in fault diagnosis in industrial equipment.

This thesis work proposes the application of a Mandani-type inference system, due to its easy computational and implementation calculation, since it uses inputs and outputs in relation to the proposed inference rules (fuzzification), followed by defuzzification, which consists of evaluating a mathematical model, to obtain the degree of aging.

The main objective is to perform a comparative analysis, between Fuzzy Logic Toolbox Matlab and a Shell FuzzyApp, to determine a similarity in the results of the degree of aging using the different parameters with 5 proposed linguistic variables, in the inputs and outputs, implemented in a linear and dynamic load.



# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>4</b>
<b>Resumen</b>	<b>5</b>
<b>Abstract</b>	<b>7</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>VI</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>IX</b>
<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1. Capítulo 1. Planteamiento del problema</b>	<b>6</b>
1.1. Descripción general . . . . .	6
1.2. Justificación . . . . .	7
1.3. Preguntas de investigación . . . . .	8
1.4. Objetivo General . . . . .	8
1.5. Objetivos específicos . . . . .	8
1.6. Alcances y limitaciones . . . . .	9
1.7. Análisis del estado del arte . . . . .	10
1.7.1. Aplicaciones de sistemas expertos difusos . . . . .	10
<b>2. Capítulo 2. Marco teórico</b>	<b>14</b>
2.1. Motores eléctricos . . . . .	14
2.1.1. Algunas leyes que rigen a los motores de inducción . . . . .	14
2.1.1.1. Ley de Faraday de inducción electromagnética . . . . .	14
2.1.1.2. La tensión inducida en un conductor . . . . .	15
2.1.1.3. La fuerza de Lorentz en un conductor . . . . .	16
2.1.1.4. La corriente en un inductor . . . . .	17
2.2. Descripción de las partes de un motor de inducción . . . . .	17
2.2.1. Estator . . . . .	17
2.2.2. Caja de bornes . . . . .	18
2.2.3. Tipos de conexión Estrella y Delta . . . . .	19

2.2.4.	Tipos de rotores . . . . .	20
2.2.4.1.	Rotor jaula de ardilla . . . . .	20
2.2.4.2.	Rotor devanado . . . . .	20
2.2.4.3.	Tipo de rotor de doble jaula de ardilla . . . . .	21
2.2.5.	Tipos de diseño y diferentes clases en los motores de inducción . . . . .	21
2.2.5.1.	Motores de diseño clase A . . . . .	21
2.2.5.2.	Motores de diseño clase B . . . . .	22
2.2.5.3.	Motor de diseño clase C . . . . .	22
2.2.5.4.	Diseño clase D . . . . .	22
2.2.6.	Descripción general de un arranque de motor de inducción . . . . .	23
2.2.7.	Tipos de aislantes en los motores eléctricos . . . . .	23
2.3.	Envejecimiento por vibraciones mecánicas . . . . .	25
2.3.1.	Análisis de armónicos mediante la serie de Fourier relacionado con la frecuencia . . . . .	25
2.3.2.	La descripción de espectros mediante la frecuencia . . . . .	27
2.4.	Envejecimiento por medio de la temperatura en los motores de inducción . . . . .	28
2.4.1.	Ley del termopar . . . . .	29
2.4.1.1.	El efecto Seebeck . . . . .	29
2.4.1.2.	EL efecto Peltier . . . . .	30
2.4.1.3.	El efecto Thomson . . . . .	31
2.4.1.4.	Funcionamiento de un termopar . . . . .	32
2.4.1.5.	Clases de termopares . . . . .	33
2.4.2.	Antecedentes de la termografía . . . . .	34
2.4.3.	Diferencia entre calor y temperatura . . . . .	34
2.4.3.1.	Transferencia de calor por conducción . . . . .	35
2.4.3.2.	Trasferencia de calor por convección . . . . .	36
2.4.3.3.	Transferencia de calor por radiación . . . . .	37
2.4.3.4.	Intercambio de la radiación en una superficie . . . . .	37
2.4.3.5.	Irradiación . . . . .	38
2.4.3.6.	La ley de Bourguer . . . . .	38
2.4.3.7.	Espectro electromagnético . . . . .	39
2.4.3.8.	La ley Stefan-Boltzmann . . . . .	41
2.4.3.9.	La ley de Plank . . . . .	41
2.4.3.10.	La ley de Plank en equilibrio térmico . . . . .	42
2.4.3.11.	La ley de Wien . . . . .	42
2.4.3.12.	Emisividad de los metales en el efecto de temperatura . . . . .	43
2.5.	Envejecimiento de motores eléctricos por medio de armónicos . . . . .	45
2.5.1.	Fuentes de armónicos eléctricos . . . . .	45
2.5.1.1.	Fallas por cargas . . . . .	45
2.5.1.2.	Fallas por fluctuaciones de tensión . . . . .	46
2.5.1.3.	Fallas por resonancia . . . . .	46
2.5.1.4.	Fallas por frecuencia . . . . .	46
2.5.2.	Conceptos básicos de las ondas sinusoidales . . . . .	47

2.5.3.	Parámetros de tensión . . . . .	49
2.5.4.	La transformada rápida de Fourier . . . . .	49
2.5.5.	Análisis de armónicos por medio de graficas . . . . .	50
2.6.	Antecedentes de lógica difusa . . . . .	51
2.6.1.	Teorías de conjuntos . . . . .	52
2.6.1.1.	Conjuntos duros . . . . .	52
2.6.1.2.	Definición de un conjunto difuso . . . . .	53
2.6.1.3.	Tipos de funciones de pertenencia . . . . .	53
2.6.1.4.	Función triangular . . . . .	53
2.6.1.5.	Función trapezoidal . . . . .	54
2.6.1.6.	Función pi . . . . .	55
2.6.1.7.	Norma triangular T-norm . . . . .	56
2.6.1.8.	Norma triangular T-conorm . . . . .	56
2.6.1.9.	Definición de una variable lingüística . . . . .	57
2.6.1.10.	Inferencia basado en reglas . . . . .	57
2.6.1.11.	Relaciones binarias difusas . . . . .	58
2.7.	Sistemas de inferencia difusa . . . . .	59
2.7.1.	Sistema de inferencia difusa Mandani . . . . .	60
2.7.2.	Desdifusificación . . . . .	62
2.7.3.	Sistema de inferencia difuso Takagi-Sugeno . . . . .	63
2.7.4.	Sistema de inferencia difuso Tsukamoto . . . . .	65
<b>3.</b>	<b>Capítulo 3. Adquisición y procesamiento de señales</b>	<b>66</b>
3.1.	Introducción . . . . .	66
3.2.	Métodología . . . . .	67
3.2.1.	Función y características de la cDAQ-9178 en Labview . . . . .	69
3.2.1.1.	Funcionamiento y características de un NI-9219 . . . . .	69
3.2.2.	Procesamiento de señales por medio de Labview . . . . .	71
3.2.3.	Procesamiento de señales por medio de un equipo Fluke 41-B . . . . .	73
3.2.4.	Procesamiento de señales equipo “Extech PQ-3350” . . . . .	77
3.2.4.1.	Partes del equipo “Extech PQ-3350” . . . . .	78
3.2.4.2.	Descripción del panel principal “Extech PQ-3350” . . . . .	79
3.2.4.3.	Conexión trifásica Equipo “Extech PQ-3350” . . . . .	81
3.2.4.4.	Procesamiento de señales por medio del equipo Extech PQ-3350 “carga dinámica” . . . . .	82
3.3.	Adquisición de señales Equipo Flir . . . . .	84
3.3.1.	Una cámara termográfica Flir . . . . .	85
3.3.1.1.	Partes de una cámara Flir del lado frontal . . . . .	87
3.3.1.2.	Elementos de la pantalla en una cámara Flir . . . . .	88
3.3.1.3.	Tabla de emisividad en cámara Flir . . . . .	90
3.3.1.4.	Adquisición de señales por medio de una cámara termográfica Flir . . . . .	91
3.3.2.	Medidas con los distintos equipos de calidad de energía . . . . .	92

3.3.2.1.	Resultados del monitorio por el equipo Fluke 41-B y dos equipos térmicos . . . . .	93
3.3.2.2.	Resultados del monitorio por el equipo Extech PQ-3350 y una cámara termográfica Flir . . . . .	95
<b>4.</b>	<b>Capítulo 4. Modelado e implementación del sistema experto difuso</b>	<b>97</b>
4.1.	Sistema de inferencia Mandani . . . . .	97
4.1.1.	Construcción del sistema experto difuso “carga en vacío” “muestreo 1”. . . . .	100
4.1.1.1.	Entradas y una salida para el sistema experto difuso “carga en vacío” “muestreo 2”. . . . .	103
4.1.1.2.	Entradas y una salida para el sistema experto difuso “carga en vacío” “muestreo 3” . . . . .	104
4.1.1.3.	Entradas y una salida para el sistema experto difuso carga en vacío “muestreo 4”. . . . .	106
4.1.1.4.	Entradas y una salida para el sistema experto difuso carga en vacío “muestreo 5”. . . . .	107
4.1.2.	Reglas para el sistema experto difuso . . . . .	108
4.1.3.	Construcción del sistema experto difuso con “carga dinámica” “muestreo 1”. . . . .	110
4.1.3.1.	Entradas y una salida para el sistema experto difuso “carga dinámica” “muestreo 2”. . . . .	114
4.1.3.2.	Entradas y una salidas para el sistema experto difuso en “carga dinámica” “muestreo 3” . . . . .	115
4.1.3.3.	Entradas y una salidas para el sistema experto difuso “carga dinámica” “muestreo 4”. . . . .	116
4.1.3.4.	Entradas y una salidas para el sistema experto difuso en “carga dinámica” “muestreo 5”. . . . .	118
4.1.4.	Reglas para el sistema experto difuso en “carga dinámica” . . . . .	119
4.1.5.	Modelado del sistema experto difuso en Fuzzy Logic Toolbox Matlab . . . . .	120
4.1.6.	Modelado del sistema experto difuso en Shell FuzzyApp . . . . .	124
<b>5.</b>	<b>Capítulo 5. Resultados del sistema experto difuso</b>	<b>127</b>
5.1.	Introducción . . . . .	127
5.1.1.	Resultados del modelado en Fuzzy Toolbox Matlab “carga en vacío” . . . . .	127
5.1.2.	Resultados del modelado en Shell FuzzyApp en “carga en vacío” . . . . .	129
5.1.3.	Análisis del grado de envejecimiento del sistema experto difuso “carga en vacío” . . . . .	131
5.1.3.1.	Análisis comparativo del “muestreo 1” (Matlab & FuzzyApp) “carga en vacío” . . . . .	132
5.1.3.2.	Análisis comparativo del “muestreo 2” (Matlab & FuzzyApp) “carga en vacío” . . . . .	133
5.1.3.3.	Análisis comparativo del “muestreo 3” (Matlab & FuzzyApp) “carga en vacío” . . . . .	134

5.1.3.4.	Análisis comparativo del “muestreo 4” (Matlab & FuzzyApp) “carga en vacío” . . . . .	135
5.1.3.5.	Análisis comparativo del “muestreo 5” (Matlab & FuzzyApp) “carga en vacío” . . . . .	136
5.1.4.	Resultados del sistema experto difuso en “carga dinámica” por Fuzzy Logic Toolbox Matlab . . . . .	137
5.1.5.	Resultados del sistema experto difuso en “carga dinámica” por Shell FuzzyApp . . . . .	138
5.1.6.	Análisis del grado de envejecimiento del sistema experto difuso “carga dinámica” “muestreo 1” . . . . .	140
5.1.6.1.	Análisis comparativo del “muestreo 1” (Matlab & FuzzyApp) “carga dinámica”. . . . .	141
5.1.6.2.	Análisis comparativo del “muestreo 2” (Matlab & FuzzyApp) “carga dinámica”. . . . .	142
5.1.6.3.	Análisis comparativo del “muestreo 3” (Matlab & FuzzyApp) “carga dinámica”. . . . .	143
5.1.6.4.	Análisis comparativo del “muestreo 4” (Matlab & FuzzyApp) “carga dinámica” . . . . .	144
5.1.6.5.	Análisis comparativo del “muestreo 5” (Matlab & FuzzyApp) “carga dinámica” . . . . .	145
5.1.6.6.	Comportamientos de software (Matlab & FuzzyApp) . . . . .	146
<b>Conclusiones</b>		<b>148</b>
<b>Trabajos Futuros</b>		<b>151</b>
<b>Referencias</b>		<b>152</b>
<b>A. Historial academico</b>		<b>159</b>

# Índice de tablas

2.1. Clasificación de aislamiento en los motores de inducción . . . . .	24
2.2. Tipos de termopares . . . . .	33
2.3. Emisividad de algunos materiales . . . . .	44
2.4. Ejemplo de la función característica en el universo autos deportivos . . . . .	52
2.5. Ejemplos de reglas lingüísticas . . . . .	58
3.1. Abreviaturas de variables eléctricas . . . . .	68
3.2. Funcionamiento del NI-9119 en cada una de las terminales . . . . .	70
3.3. Descripción del panel de control del equipo “Extech PQ-3350” . . . . .	80
3.4. Descripción de la parte superior ”Cámara Flir” 1-2 . . . . .	86
3.4. Descripción de la parte superior “cámara Flir” 2-2 . . . . .	87
3.5. Función de la parte frontal en una cámara Flir . . . . .	88
3.6. Descripción de la pantalla en una cámara termográfica Flir 1-2 . . . . .	89
3.6. Descripción de la pantalla en una cámara termográfica Flir 2-2 . . . . .	90
3.7. Emisividad de algunos materiales en una cámara Flir 1-2 . . . . .	90
3.7. Emisividad de algunos materiales en una cámara Flir 2-2 . . . . .	91
3.8. Base de datos aplicados para una carga en vacío . . . . .	94
3.9. Base de datos aplicados para una carga dinámica 1-2 . . . . .	95
3.9. Base de datos aplicados para una carga dinámica 2-2 . . . . .	96
4.1. Parámetro de armónicos en tensión “muestreo 1” . . . . .	101
4.2. Parámetros de armónicos en corriente “muestreo 1” . . . . .	101
4.3. Parámetros de temperatura “muestreo 1” . . . . .	102
4.4. Parámetros de envejecimiento “muestreo 1” . . . . .	102
4.5. Parámetro de armónicos en tensión “muestreo 2” . . . . .	103
4.6. Parámetros de armónicos en corriente “muestreo 2” . . . . .	104
4.7. Parámetros de temperatura “muestreo 2” . . . . .	104

4.8. Parámetros de envejecimiento “muestreo 2” . . . . .	104
4.9. Parámetro de armónicos en tensión “muestreo 3” . . . . .	105
4.10. Parámetros de armónicos en corriente “muestreo 3” . . . . .	105
4.11. Parámetros de temperatura “muestreo 3” . . . . .	105
4.12. Parámetros de envejecimiento “muestreo 3” . . . . .	105
4.13. Parámetro de armónicos en tensión “muestreo 4” . . . . .	106
4.14. Parámetros de armónicos en corriente “muestreo 4” . . . . .	106
4.15. Parámetros de temperatura “muestreo 4” . . . . .	106
4.16. Parámetros de envejecimiento “muestreo 4” . . . . .	107
4.17. Parámetro de armónicos en tensión “muestreo 5” . . . . .	107
4.18. Parámetros de armónicos en corriente “muestreo 5” . . . . .	107
4.19. Parámetros de temperatura “muestreo 5” . . . . .	108
4.20. Parámetros de envejecimiento “muestreo 5” . . . . .	108
4.21. Reglas para el sistema experto difuso “carga en vacío” . . . . .	109
4.22. Parámetros de armónicos en tensión “carga dinámica” “muestreo 1” . . . . .	111
4.23. Parámetros de armónicos en corriente “carga dinámica” “muestreo 1” . . . . .	112
4.24. Parámetros de temperatura “carga dinámica” “muestreo 1” . . . . .	112
4.25. Parámetros de envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 1” . . . . .	112
4.26. Parámetros de armónicos en tensión “carga dinámica” “muestreo 2” . . . . .	114
4.27. Parámetros de armónicos en corriente “carga dinámica” “muestreo 2” . . . . .	114
4.28. Parámetros de temperatura “carga dinámica” “muestreo 2” . . . . .	115
4.29. Parámetros de envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 2” . . . . .	115
4.30. Parámetros de armónicos en tensión “carga dinámica” “muestreo 3” . . . . .	115
4.31. Parámetros de armónicos en corriente “carga dinámica” “muestreo 3” . . . . .	116
4.32. Parámetros de temperatura “carga dinámica” “muestreo 3” . . . . .	116
4.33. Parámetros de envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 3” . . . . .	116
4.34. Parámetros de armónicos en tensión “carga dinámica” “muestreo 4” . . . . .	117
4.35. Parámetros de armónicos en corriente “carga dinámica” “muestreo 4” . . . . .	117
4.36. Parámetros de temperatura “carga dinámica” “muestreo 4” . . . . .	117
4.37. Parámetros de envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 4” . . . . .	117
4.38. Parámetros de armónicos en tensión “carga dinámica” “muestreo 5” . . . . .	118
4.39. Parámetros de armónicos en corriente “carga dinámica” “muestreo 5” . . . . .	118
4.40. Parámetros de temperatura “carga dinámica” “muestreo 5” . . . . .	118
4.41. Parámetros de envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 5” . . . . .	119
4.42. Reglas para el sistema experto difuso “carga dinámica” 1-2 . . . . .	119

4.42. Reglas para el sistema experto difuso “carga dinámica” 2-2 . . . . .	120
5.1. Grado de envejecimiento en Fuzzy Logic Toolbox Matlab 1-2 . . . . .	128
5.1. Grado de envejecimiento en Fuzzy Logic Toolbox Matlab 2-2 . . . . .	129
5.2. Grado envejecimiento en Shell FuzzyApp “carga en vacío” 1-2 . . . . .	129
5.2. Grado envejecimiento en Shell FuzzyApp “carga en vacío” 2-2 . . . . .	130
5.3. Analisis del envejecimiento “carga en vacío” “muestreo 1” . . . . .	133
5.4. Analisis del envejecimiento “carga en vacío” “muestreo 2” . . . . .	134
5.5. Analisis del envejecimiento “carga en vacío” “muestreo 3” . . . . .	135
5.6. Analisis del envejecimiento “carga en vacío” “muestreo 4” . . . . .	136
5.7. Analisis del envejecimiento “carga en vacío” “muestreo 5” . . . . .	137
5.8. Resultados del grado de envejecimiento “carga dinámica” en Matlab . . . . .	138
5.9. Resultados del grado de envejecimiento “carga dinámica” FuzzyApp . . . . .	139
5.10. Analisis del envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 1” . . . . .	142
5.11. Analisis del envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 2” . . . . .	143
5.12. Analisis del envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 3” . . . . .	144
5.13. Analisis del envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 4” . . . . .	145
5.14. Analisis del envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 5” . . . . .	146



# Índice de figuras

2.1. Fuerza de un conductor . . . . .	16
2.2. Caja de bornes de una conexión estrella . . . . .	18
2.3. Caja de bornes de una conexión delta . . . . .	18
2.4. Esquema de conexión estrella . . . . .	19
2.5. Esquema de conexión delta . . . . .	20
2.6. Movimiento armónico simple . . . . .	26
2.7. Espectro relacionado con la frecuencia, por lo regular a 60 Hz . . . . .	27
2.8. El efecto Seebeck . . . . .	29
2.9. El efecto Peltier . . . . .	30
2.10. El efecto Thompson . . . . .	32
2.11. Funcionamiento de un termopar . . . . .	32
2.12. Transmisión de calor por conducción . . . . .	35
2.13. Intercambio de la radiación . . . . .	38
2.14. Espectro electromagnético . . . . .	40
2.15. Grafica del orden de armónicos en la corriente . . . . .	51
2.16. Función de pertenencia triangular . . . . .	54
2.17. Función de pertenencia trapezoidal . . . . .	54
2.18. Función de pertenencia pi . . . . .	55
2.19. Diagrama de un sistema de inferencia difusa . . . . .	60
2.20. El método Mandani usando la T-norm . . . . .	61
2.21. El método Mandani para la norma T-conorm . . . . .	61
2.22. El modelo difuso Sugeno . . . . .	64
2.23. El modelo difuso Tsukamoto . . . . .	65
3.1. Metodología para adquisición y procesamiento de señales . . . . .	68
3.2. Partes del cDAQ-9178 y accesorios . . . . .	69

3.3. Partes principales del NI-9119 . . . . .	70
3.4. Diagrama de conexión de un termopar . . . . .	72
3.5. Ventana de la adquisición de señales para un termopar . . . . .	72
3.6. Los accesorios del equipo Fluke 41-B . . . . .	73
3.7. Diagrama de una conexión trifásica en un motor de inducción . . . . .	74
3.8. Implementación del equipo Fluke 41-B en un motor de inducción . . . . .	76
3.9. Algunas partes del Equipo Fluke 41-B . . . . .	76
3.10. Equipo Extech PQ-3350 y sus accesorios . . . . .	78
3.11. Partes principales del equipo “Extech PQ-3350” . . . . .	79
3.12. Descripción del panel de control Extech PQ-3350 . . . . .	80
3.13. Ejemplo de una conexión trifásica ”carga en vacío” . . . . .	81
3.14. Prueba en una carga dinamica . . . . .	83
3.15. Entorno del Software Power Harmonic . . . . .	84
3.16. Una cámara termográfica . . . . .	85
3.17. Partes de una cámara termográfica frontal . . . . .	86
3.18. Partes de una cámara termográfica del lado frontal . . . . .	87
3.19. Partes de la pantalla en una cámara Flir . . . . .	89
3.20. Imagen térmica Software Flir Tools . . . . .	92
4.1. Metodología para el sistema experto difuso . . . . .	98
4.2. Grafica de la variable lingüística armónico de tensión “muestreo 1” . . . . .	102
4.3. Grafica de la variable lingüística armónico de corriente “muestreo 1” . . . . .	102
4.4. Grafica de la variable lingüística temperatura “muestreo 1” . . . . .	103
4.5. Grafica de la variable lingüística envejecimiento “muestreo 1” . . . . .	103
4.6. Grafica de la variable lingüística armónico en tensión en “carga dinámica” “muestreo 1” . . . . .	113
4.7. Gráfica de la variable lingüística de armónico en corriente en “carga dinámica” “muestreo 1” . . . . .	113
4.8. Grafica de la variable lingüística temperatura en “carga dinámica” “muestreo 1”	113
4.9. Grafica de la variable lingüística envejecimiento en “carga dinámica” “muestreo 1” . . . . .	114
4.10. Interfaz Fuzzy Toolbox Matlab . . . . .	121
4.11. Sistema experto difuso aplicado en un motor de inducción . . . . .	121
4.12. Parámetros de subconjuntos de armónicos en tensión . . . . .	123
4.13. Gráfica del proceso de desdifusificación en Matlab . . . . .	123

4.14. Interfaz de Shell FuzzyApp . . . . .	124
4.15. Entradas y salidas en Shell FuzzyApp . . . . .	125
4.16. Reglas de inferencia difusa en Shell FuzzyApp . . . . .	125
4.17. Inferencia difusa en Shell FuzzyApp . . . . .	126
5.1. Gráfico de 5 muestreos modelados en Matlab . . . . .	131
5.2. Gráfico de 5 muestreos modelados en Shell FuzzyApp . . . . .	132
5.3. Gráfico de dos softwares “carga en vacío” “muestreo 1” . . . . .	133
5.4. Gráfico de dos softwares “carga en vacío” “muestreo 2” . . . . .	134
5.5. Gráfico de dos softwares “carga en vacío” “muestreo 3” . . . . .	135
5.6. Gráfico de dos softwares “carga en vacío” “muestreo 4” . . . . .	136
5.7. Análisis gráfico por dos softwares “carga en vacío” “muestreo 5” . . . . .	137
5.8. Gráfico de 5 muestreos modelados en Matlab . . . . .	140
5.9. Gráfico de 5 muestreos modelados en Shell FuzzyApp . . . . .	141
5.10. Análisis gráfico de dos softwares en “carga dinámica” “muestreo 1” . . . . .	142
5.11. Análisis gráfico por dos softwares en “carga dinámica” “muestreo 2” . . . . .	143
5.12. Análisis gráfico de dos softwares en “carga dinámica” “muestreo 3” . . . . .	144
5.13. Análisis gráfico por dos softwares en “carga dinámica” “muestreo 4” . . . . .	145
5.14. Análisis gráfico de dos softwares en “carga dinámica” “muestreo 5” . . . . .	146
5.15. Gráfico de % envejecimiento (Matlab & FuzzyApp) “carga en vacío” . . . . .	147
5.16. Gráfico de % envejecimiento (Matlab & FuzzyApp) “carga dinámica” . . . . .	147

# Introducción

Desde la última década nace el concepto en calidad de energía, que se define como la distribución de la energía eléctrica a través de una red eléctrica sin pérdidas de energía, ya se relaciona con el factor de potencia, [Gonzalez et al., 2002].

El área de mantenimiento preventivo ha analizado algunas fuentes de fallas en los motores de inducción, que se relaciona en el problema de la calidad de energía como son las perturbaciones, tensión de parpadeo, huecos de tensión, armónicos eléctricos, desequilibrio de las fases, incremento de temperaturas en algunas partes del motor, fallas mecánicas, entre otras más fuentes de contaminación.

Los motores eléctricos son utilizados en la mayoría de las compañías industriales, dependiendo del trabajo en algunas aplicaciones, que son indispensables en cualquier proceso de producción, ya que por lo general genera un costo si se tiene un factor de potencia menor de 0.9.

Los armónicos han sido estudiados desde la época de los griegos, cuando ellos observaron la vibración de una cuerda en un instrumento musical de viento, una de las primeras aplicaciones sobre los armónicos fue el desarrollo del primer sismógrafo en el mundo, para la detección de movimientos ondulatorios, este instrumento consistía en un jarrón, con dos péndulos que predecían las oscilaciones en la tierra, [Rao, 2012].

En el siglo XVI y XVIII se empezaron a desarrollar las primeras teorías sobre una oscilación, uno de los primeros en realizar una prueba fue Galileo Galilei, quien observó el movimiento de un péndulo donde él encontró la relación de la frecuencia con respecto al tiempo, que lo llamó movimiento ondulatorio.

Una vez definida la teoría de un movimiento ondulatorio, Isaac Newton le sirvió en el desarrollo de las tres leyes de Newton, en especial la segunda ley del movimiento, cuando un cuerpo vibra. Años después un matemático llamado Taylor fue quien encontró la solución teórica de un movimiento ondulatorio.

Euler para desarrollar su teoría tomó de base lo que ya se había desarrollado anteriormente, él fue quien propuso su modelado matemático en cantidades complejas, y por último el matemático llamado Fourier fue quien modeló la ecuación matemática del calor, debido a este descubrimiento en su honor las ecuaciones llevan su nombre (las series de Fourier).

Las series de Fourier son empleadas en distintas áreas de la ingeniería como son: la electrónica de potencia, acústica, las vibraciones mecánicas, la termografía, y el procesamiento de señales entre otra más. Una de las aplicaciones de estas series es en el mantenimiento predictivo, donde se enfoca en los estudios sobre técnicas en el diagnóstico de fallas en los equipos industriales.

El mantenimiento predictivo es una técnica de diagnóstico el cual su objetivo principal, es en detectar posibles fallas tempranas en equipos industriales, por ejemplo, en un motor de inducción existen distintas fuentes de contaminación, en su red eléctrica, que afecta en la vida y el rendimiento en estos dispositivos, [Mosquera et al., 2000].

Las fuentes de contaminación en la red eléctrica se pueden reducir mediante el diagnóstico temprano de fallas principalmente en los motores eléctricos, ya que estos presentan algunos síntomas de fallas como son: la frecuencia, armónicos eléctricos, el desgaste del eje en un motor de inducción, el incremento de temperatura en los devanados, entre otros más, todos estos pueden ser diagnosticados, por medio de los equipos de calidad de energía.

Los equipos en calidad de energía permiten determinar las variables eléctricas y térmicas, mediante algunos modelados matemáticos para la adquisición de señales en la obtención de datos por medio de la conversión de las señales analógicas a digitales, pero un problema es que si uno requiere hacer un monitoreo constante en adquirir los datos con la necesidad un operario para realizar ese monitoreo (humano), es una de las grandes limitaciones en la adquisición y procesamiento de señales.

Hoy en día gracias a los avances de la computación, hay un área de la ingeniería computacional, que se centra en las aplicaciones de automatización mediante el uso de cómputo inteligente que se divide en: lógica difusa, inteligencia artificial, sistema de control difuso, entre otras más.

Un pionero en el área de la lógica difusa es el Dr. Zadeh quien desarrollo su investigación, en la teorías computacional y computo por medio de las palabras, ya que él diferencio entre que es un conjunto duro y un conjunto difuso mediante la aplicación de la teoría de los conjuntos, que sirve de base para el sistema de inferencia difusa, [Zadeh, 1999].

Zadeh definió un conjunto difuso como un mapeo de un universo de discurso, mediante un intervalo de  $[0, 1]$ , para evaluar esto por medio de una función de pertenencia en relación de una intersección misma, [Zadeh, 1995].

Las principales áreas que han aceptado lógica difusa en la ingeniería son: el control de procesos industriales, la robótica, la electrónica, el procesamiento de señales, la aeronáutica, la base de datos entre otras más.

Las aplicaciones más comunes de la lógica difusa están relacionadas al consumo de algunos productos tales como las lavadoras inteligentes, los acondicionadores de aire, el control de cámaras, el control de válvulas, las aspiradoras, los hornos de microondas, los amortiguadores en vehículos, y entre otras más.

A continuación se describen algunas aplicaciones de lógica difusa:

En el trabajo, [Maria et al., 2010], se propone un índice que se llama la media geométrica de tres métricas (GM3M,) con el propósito de preservar la interpretabilidad semántica de la base de datos (DB), en los modelos difusos lingüísticos y una sintonización de las funciones de pertenencia (MFS), que toma la suma de tres métricas, que preservan el significado original de las funciones de pertenencia (MFs), por medio de sus parámetros propuesto.

Después se emplea una selección de las reglas, para tener una mejor interpretabilidad, para el procesamiento de los datos se emplea un algoritmo multiobjetivo, que permite la evaluación de las reglas difusas, para obtener una mejor optimización en los modelos difusos se desarrollan siempre por medio de los sistemas lingüísticos basados en lógica difusa empleando reglas (FBRs) o también llamado Mandani (FRBS).

Las reglas de inferencia difusa son las "si-entonces", las cuales permiten la evaluación de las reglas compuestas de las mismas variables lingüísticas en relación en el proceso de desfusificación, dando como resultado el índice (GM3M), para medir la interpretabilidad, que está asociada con la partición difusa, que permite la precisión del modelo propuesto.

En el trabajo [Seki et al., 2010], se propone la utilización del método de inferencia difusa (método SIRM), que se obtiene mediante la combinación de los productos de una sola entrada, donde ha demostrado la generalización de las funciones con números reales aplicando reglas de inferencia difusa en los módulos de las reglas (SIRMs).

Los métodos de inferencia difusa por lo general se espera, que los resultados de inferencia difusa se obtuvieron de estos métodos, tienen la propiedad monótona en el cual es Investigado, por ejemplo el producto de la suma de gravedad se necesita propiedades de equivalencia de inferencia difusa, se necesitan más estudios para resolver problemas restantes con otro método inferencia difusa.

Este trabajo de tesis se estudia a los armónicos eléctricos, y el incremento de temperatura en especial en el devanado de un motor de inducción, para detectar el grado de envejecimiento en los motores de inducción, con lo que se hizo un monitoreo constante, para el monitoreo de variables eléctricas y térmicas, por medio de los equipos en calidad de energía.

Algunos de estos equipos son: equipos para armónicos de dos diferentes marcas (FLUKE 41-B, y EXTECH PQ-3350) y una cámara termográfica de la marca FLIR, los dos primeros permiten medir las variables de los armónicos de tensión y de corriente, y el segundo equipo permite determinar variables térmicas, en algunas partes de los motores de inducción, y finalmente construir la base de datos por medio de monitoreos constantes, para el sistema experto difuso tipo Mandani.

Una vez construida la base de datos se procede a la construcción del sistema experto difuso para el diagnóstico de envejecimiento en los motores de inducción, por medio de algunas reglas de inferencia difusa, propuestas en el análisis comparativo entre el software Matlab y una Shell FuzzyApp, para determinar el grado de envejecimiento en los motores de inducción, tomando algunas consideraciones, en el cambio de los parámetros de las variables lingüísticas de entradas y salidas en los distintos muestreos propuestos en este trabajo.

Los capítulos de este trabajo de investigación son resumidos a continuación:

- El capítulo 1: se refiere al planteamiento del problema en los motores de inducción, la justificación, las preguntas de investigación que se plantean, el objetivo general y los específicos de esta tesis, los alcances y las limitaciones, así como algunos trabajos relacionados para justificar la importancia de este trabajo.
- El capítulo 2: se refiere al marco teórico, en donde se analiza las partes principales, en un motor de inducción, las leyes que rigen, algunas leyes de la termografía, conceptos de armónicos y análisis de las series de Fourier, conceptos de la lógica difusa, algunas teoría de los conjuntos, y los diferentes tipos de los sistemas de inferencia difusa.
- El capítulo 3: se refiere a la metodología propuesta en la adquisición y procesamiento de señales, por medio de los equipos en la calidad de energía, como son: la tarjeta de adquisición de señales implementando en una NI-DAQ de la familia de National Instrument, los equipos para armónicos eléctricos (FLUKE 41-B, EXTECH PQ-3350), y una cámara termográfica de la marca FLIR, para determinar la variable térmica es decir la temperatura en el devanado de un motor de inducción, todo con la finalidad de la construcción de las bases de datos para el sistema experto difuso.

- El capítulo 4: se refiere a la construcción del sistema de inferencia difusa, donde se proponen las variables lingüísticas de entradas y una salida, aplicando el sistema de inferencia Mandani en relación a las reglas propuestas en este trabajo.  
Considerando un cambio de las entradas y una salida en los distintos intervalos de los parámetros de las variables lingüísticas para observar el resultado mediante los análisis comparativos en un motor en vacío y una carga dinámica (compresor).
- El capítulo 5: se refiere al análisis de los muestreos propuestos difusos en el diagnóstico del envejecimiento en los motores de inducción aplicando el sistema de inferencia Mandani, además también se desarrolló un análisis comparativo, entre dos softwares de lógica difusa para observar si hay una similitud en determinar el grado de envejecimiento.



# Capítulo 1

## Capítulo 1. Planteamiento del problema

### 1.1. Descripción general

Los motores de inducción son la parte fundamental en los procesos industriales, ya que dan el movimiento a los equipo y maquinaria productiva.

En la última década, se ha mostrado un gran interés en mantener en buenas condiciones y salud a los motores de inducción, por ejemplo, algunos estudios han demostrado que detectando las fallas tempranas en estos equipos, puede reducirse el costo de la energía eléctrica, la disminución de tiempos muertos que representa pérdidas económicas en las empresas industriales y la reducción del bajo FP o aumento del FP, por cargas inductivas o capacitivas respectivamente en la red de distribución de la misma compañía industrial.

Existen diferentes tipos de fallas en los motores eléctricos como son: fallas por armónicos eléctricos, fallas mecánicas (vibraciones mecánicas), fallas por perturbaciones de las ondas sinusoidales, y los huecos de tensión entre otras.

En la mayoría de las empresas industriales existe un área, que se dedica a aplicar el mantenimiento, denominado mantenimiento predictivo, ya que esta área consiste en realizar algunas pruebas para detectar fallas tempranas en los motores de inducción, por medio de las técnicas en la adquisición y el procesamiento de señales en los diferentes tipos de fallas en los equipos industriales que tengan las compañías.

Dependiendo de los tipos de fallas en los motores utilizados en las líneas de producción de las compañías industriales, se puede emplear los equipos en calidad de energía y termografía, que permiten determinar las variables eléctricas, para el primero es por medio de una perturbación de una onda sinusoidal y el segundo es el incremento de la temperatura en los devanados de estos equipos

Una solución para determinar el grado de envejecimiento es la determinación de variables que provocan fallos en los motores de inducción, para a partir de estos, implementar un sistema experto difuso tipo Mandani, ya que ha demostrado un mejor rendimiento en prevenir fallas, apoyándonos de la experiencia del personal en el área de mantenimiento preventivo, lo que nos permite, tener una mejor precisión en la detección temprana de fallas, por lo que al desarrollarlo representa un una reducción en los costos al implementarlo en el área de mantenimiento preventivo.

## 1.2. Justificación

Este trabajo tiene la finalidad de conocer el comportamiento de las variables de envejecimiento en motores de inducción, ya que estos equipos, si paran pueden generar un costo elevado debido a los paros en las líneas de producción de las empresas, lo que se traduce en pérdidas económicas.

La aplicación de pruebas no destructivas permiten una alternativa en el diagnóstico de fallas en equipos industriales que es bien aceptada en el área de mantenimiento predictivo, sin tener que detener las líneas de producción, además beneficia el incremento de la producción, y alarga la vida útil de estos mismos equipos.

Los equipos empleados en el diagnóstico de fallas en los motores de inducción son aplicados dependiendo de los tipos de fallas, algunos ejemplos son: los equipos para vibraciones, que permiten el análisis espectral de frecuencia en relación a la amplitud, para monitorear la salud del motor de inducción. Un equipo para armónicos permite determinar el porcentaje en relación con la frecuencia distorsionada de la corriente o la tensión, y hay otro equipo para determinar las variables térmicas, por medio de espectros electromagnéticos en relación a la emisividad, que depende del material que se use.

En este trabajo de tesis se plantea la adquisición y procesamiento de señales, por medio de los equipos en calidad de energía para el desarrollo del modelado en un sistema de inferencia difusa tipo Mandani, que permite diagnosticar el grado de envejecimiento en una carga en vacío y dinámica.

Las aplicaciones de los sistemas de inferencia difusa logran un mayor control en el monitoreo de las fallas una vez detectadas y trata de prevenir o predecir fallas futuras, por ejemplo, en un motor de inducción se alarga su vida de operación, incrementando el factor de potencia, y se reduce el consumo de la energía eléctrica por pérdidas parásitas, o calentamiento.

### 1.3. Preguntas de investigación

- ¿El envejecimiento se relaciona con los armónicos eléctricos y la temperatura en los devanados de los motores de inducción?
- ¿En caso de las variaciones de armónicos de corriente se genera el sobrecalentamiento en algunas partes de los motores de inducción?
- ¿Cuando hay mala calidad de energía este puede ser un factor para acelerar el envejecimiento en los motores de inducción?
- ¿El uso de los sistemas expertos difusos permiten una mejor precisión en la obtención del grado de envejecimiento de los motores de inducción?
- ¿La toma de decisión en mantenimiento predictivo se puede basar en un sistema experto difuso y da lugar a un plan de mantenimiento preventivo?
- ¿La FuzzyApp es mejor que el Toolbox de Matlab para la determinación del grado de envejecimiento?

### 1.4. Objetivo General

Diagnosticar el grado de envejecimiento a través de la aplicación de parámetros eléctricos y térmicos, para la determinación de fallas en los motores de inducción eléctrica, por medio de un sistema experto difuso tipo Mandani.

### 1.5. Objetivos específicos

- Aplicar algunas técnicas de diagnóstico de fallas en los motores de inducción.

- Conocer los distintos armónicos presentes en las instalaciones con aplicación de equipos en calidad de energía.
- Desarrollar una metodología para la obtención de variables para la adquisición y procesamiento de señales de armónicos de tensión y corriente.
- Desarrollar los pasos para la adquisición y procesamiento de señales en variables térmicas en especial en los devanados de un motor de inducción.
- Seleccionar el sistema de inferencia difusa más adecuado, en la construcción de nuestro sistema experto difuso.
- Utilizar las bases de datos adquiridos por medio de los equipos de calidad de energía, para utilizarlos, como entradas de un sistema experto difuso.
- Desarrollar las reglas de inferencia con las variables como son: eléctricas, térmicas y envejecimiento.
- Realizar un análisis comparativo entre dos herramientas para lógica difusa con el Fuzzy Toolbox de Matlab y una Shell FuzzyApp.

## 1.6. Alcances y limitaciones

- En el presente trabajo de investigación se evalúa la propuesta de dos sistemas expertos difusos, para el diagnóstico de envejecimiento en los motores de inducción. El trabajo se desarrolla en la detección de fallas en motores de inducción en "vacío" bajo "carga dinámica".
- Se estudiarán los distintos tipos de fallas en un motor eléctricos de inducción con técnicas de adquisición y procesamiento de señales.
- El desarrollo de la investigación se llevó a cabo en un laboratorio; Si se aplicará en el medio industrial, se podría observar mejores resultados para determinar el grado de envejecimiento en los motores de inducción, evaluando el comportamiento que ocasionan los armónicos eléctricos de tensión y de corriente, incluyendo también la temperatura de los devanados.

## 1.7. Análisis del estado del arte

En esta sección, describimos algunos trabajos relacionados, que dan soporte a nuestro trabajo de investigación, sobre los sistemas expertos difusos aplicados en el diagnóstico de envejecimiento en los motores de inducción, ya que depende de las aplicaciones de los sistemas expertos difusos, en estudios relacionados en la calidad de energía.

### 1.7.1. Aplicaciones de sistemas expertos difusos

En la sección anterior se dio un breve resumen, acerca de la importancia de los sistemas de inferencia difusa, que nos proporciona una mejor aceptación, cuando se evalúa un proceso, por medio de un operario, que es un experto en el proceso en comparación a un sistema experto difuso que permite un monitoreo constante a bajo costo. Algunos de estos casos son descritos a continuación:

En el trabajo, [Azgomi and Poshtan, 2013], se propone un método, para la detección de las fallas en el devanado del estator en los motores de inducción realizando algunos monitoreos en las líneas de los motores de inducción es la principal dificultad por la falta de un modelo analítico exacto, en describir un motor defectuoso.

La lógica difusa puede ayudar a diagnosticar fallas en un motor de inducción, mediante términos lingüísticos en el funcionamiento en distintas circunstancias en la observación de estos mismos.

Lo que da como resultado la combinación del conocimiento experto y los conceptos lingüísticos, en los estándares, que delimitan el estado de operación, en el motor de inducción, y la solución en la detección de fallas, una ventaja se puede ajustar en diferentes parámetros y en condiciones son implementados en la industria moderna.

En el trabajo, [V.P and Ushakumari, 2011], se propone el rendimiento, en el análisis de fallas de un motor de inducción haciendo una simulación en Simulink Matlab. Los motores de inducción son empleados en el monitoreo de las líneas, que cada vez más importante, algunas fallas eléctricas, como son: la baja tensión, el desequilibrio, falla de sobrecarga, y fallas a tierra afectan a los motores de inducción trifásica.

En lógica difusa la condición de fallo de un motor se describe mediante variables lingüísticas, subconjuntos difusos y funciones de pertenencia, que describen las amplitudes de la corriente del estator, componentes de la secuencia negativa de las corrientes del estator y la velocidad. Se ha desarrollado un método de uso en la lógica difusa, para interpretar la señal de la corriente del estator, la velocidad y la señal de corriente en el flujo del motor de inducción,

por las condiciones de fallas eléctricas, en donde el sistema toma la decisión del sistema difusa consiguiendo una alta precisión de diagnóstico en un motor de inducción.

En el trabajo, [Mishra et al., 1998], se propone una simulación y una implementación de los problemas para detectar las fallas iniciales, en las fases de los motores de inducción, ya que estos equipos son expuestos, en diferentes ambientes en las industrias, donde se puede detectar fallas tempranas que afectan estos equipos en las industrias.

La lógica difusa proporcionar un razonamiento mediante la técnica heurística, las reglas de inferencia y las funciones de pertenencia se propone en un sistema difuso, para los motores de inducción.

Los autores utilizan la lógica difusa como las variables de entrada como son: la corriente del estator, la velocidad, entre las reglas de inferencia de entrada como son: bajo, medio, alto, y la salida para el diagnóstico del motor de inducción como son: bueno regular y malo.

Los resultados muestran un esquema, donde pueden ser aplicados, para otros tipos de máquinas, por la formación de funciones de pertenencia apropiada y las reglas por conocimientos con ayuda de un experto en el área, en un rendimiento mejor en los mismo resultados.

En el trabajo, [Kumar et al., 2010], se propone un sistema, para la detección de fallas en el monitoreo temprano, en un motor de inducción, ya que este equipo desempeñan un papel fundamental en la industria, y tiende una fuerte demanda en la aplicación del funcionamiento fiable y seguro, pero al mismo tiempo, hay desgaste y fallas.

Además el costo de mantenimiento se reduce, en donde ha sido demostrado por medio del diagnóstico de fallas en un motor de inducción se le agrega un sistema de inferencia difusa, que no requiere un alto costo, en su implementación, por ejemplo lógica difusa ayuda reducir fallas en, los equipos industriales de las compañías industriales.

La lógica difusa toma decisiones, por medio de algunas reglas de inferencia en este sistema que interpreta la adquisición de una señal, por ejemplo la variable de corriente se procedió hacer un monitoreo en la parte del estator, después se implementa el sistema difuso, en el cual se logra una alta precisión en el diagnóstico de los motores de inducción.

En el trabajo, [Allouche et al., 2010], se propone el problema de la detección de fallas de los sensores en un motor de inducción, las desconexiones de estos producen errores transitorios graves, para el bucle de control e implican efectos nefastos sobre el rendimiento de estos equipos.

El sistema de inferencia difusa tipo Takagi-Sugeno (T-S) se emplea para aproximar al motor de inducción en el marco de su rotación, en el campo electromagnético orientado, donde este sistema difuso se basa en conocimientos expresando reglas y funciones de pertenencia, en el

cual describen el comportamiento del devanado del estator.

La aplicación del sistema de inferencia difusa (T-S), ha demostrado una capacidad de estimar simultáneamente fallas en el sensor y el rotor a partir de la forma de una curva de corriente distorsionada, dando así el tamaño de la superficie, y una idea acerca del grado del defecto en el motor de inducción.

En el trabajo, [Saghafinia et al., 2012], se propone un entrenamiento online mediante lógica difusa y basado en una onda de alta precisión en la detección de las fallas de un rotor, por medio de diagnóstico en la jaula de ardilla en los motores de inducción, mediante la adquisición de señales por medio de la transformada rápida de Fourier "FTT".

La "FTT" sirve, para la detección de las amplitudes y las frecuencias para los distintos tipos de fallas en la carga. El control de la técnica para el entrenamiento de lógica difusa y un adaptativa transformada de onda continua (CWT) es bajo una alta precisión.

El método de detección de fallas para 3 fases en un motor de inducción (IM), han sido analizados mediante el análisis de asignación de corrientes en diferentes fallas y condiciones de carga, con lo que se generó la amplitud de los armónicos y las frecuencias del estator.

El entrenamiento de detección de fallas por medio de un control lógico difuso (FLC) o en condiciones saludables (IM), que pueden detectar las fallas con precisión, además se considera este método un candidato potencial para la detección de fallas en tiempo real.

El trabajo, [Naveena et al., 2015], se propone el método del monitoreo de la corriente en detectar los diferentes tipos de fallas en los motores de inducción empleando lógica difusa. Estos equipos son de gran importancia en las líneas de producción en las empresas industriales, por lo que es necesario de mantener estos equipos saludables por medio algunas técnicas.

Las técnicas para la adquisición y procesamiento de señales dependen del tipo de fallas tales como las térmicas, las vibraciones mecánicas, el sonido, los armónicos y otras más. Una solución es un método, en la detección de la corriente, por medio de las fallas eléctricas, en relación al conocimiento basado en el aprovechamiento difuso.

En el diagnóstico de fallas en los motores de inducción, ya que actualmente es como un proceso de inteligencia humana y permite tomar una decisión en el lenguaje natural cuando se construye, algunas reglas inferencia.

Los valores que son tomados de las entradas y las salidas, para el sistema de inferencia difusa, por las diferentes condiciones de fallas, evaluando las reglas de inferencia se considera un alta precisión en el diagnóstico de las fallas en los motores de inducción y además son justificadas en el uso, para la detección temprana de fallas en estos equipos.

En el trabajo, [V et al., 1993], se propone un sistema híbrido entre lógica difusa y una red neuronal para la detección de fallas en los motores de inducción, ya que estos equipos están sujetas a fallas iniciales que pueden ser justificadas, por seguridad y las razones económicas.

La lógica difusa es una solución, en el diagnóstico de fallas en los motores de inducción debido a su fácil implementación, por medio de un conocimiento cualitativo, en los humanos y el cualitativo en las maquinas.

El cambio en el sistema de detección de fallas, mediante la red/difusa fue analizado heurísticamente, para determinar las funciones de pertenencia propuestas, y algunas reglas apropiadas en la detección de fallas en el rotor de un motor, el sistema difuso ha permitido un mejor desempeño en la detección de fallas en estos equipos.

En el trabajo, [Li et al., 2011], se centra en el diseño de un controlador difuso fiable, para los sistemas de suspensión activa, en un actuador de retardo de fallas, con lo su enfoque es un modelo de inferencia difusa Takagi-Sugeno (T-S), para un subsistema lineal simple, con lo que es posible analizarlo, y tener un sistema difuso fiable.

Los modelos difusos (T-S) se describen como una suma ponderada de algunos subsistemas lineales simples y, por lo tanto, son fácilmente analizables, el éxito en problemas de análisis de control fue en el diseño del controlador.

Un modelo de suspensión en un vehículo ha sido utilizado, para validar la eficacia del método del diseño propuesto. Dando como el resultado de la simulación, que ha mostrado claramente, que el controlador difuso diseñado es fiable, con lo que tiene la capacidad de garantizar un mejor rendimiento de la suspensión arqueada baja y las variaciones de la masa no suspendida, que provocan un retardo del actuador, y algunas fallas.

En el trabajo, [Killian et al., 2011], se presenta un control difuso de modelo predictivo de cooperación (CFMPC). La planta no lineal en lo general se supone que consiste en varios paralelos de entradas acopladas a un modelo difuso tipo Takagi-Sugeno (T-S), para cada subsistema difuso (T-S) se representan en la forma de una red local lineal (LLMN).

El control de cada modelo lineal local en cada (LLMN) se realiza, por el control de un modelo predictivo (MPC), donde cada (LLMN) representa las salidas (MPC), que están asociadas y combinadas las funciones de pertenencia difusa, que a la vez lleva un control del modelo predictivo difuso (PMPC). Se presenta una prueba de convergencia, para el bucle de iteración cooperativa, en el estudio de la muestra también que el (CFMPC) es un algoritmo capaz de manejar las restricciones duras.



## Capítulo 2

# Capítulo 2. Marco teórico

### 2.1. Motores eléctricos

Los motores eléctricos son los que convierten la energía eléctrica a mecánica es decir en un trabajo útil, estos equipos los encontramos en las compañías industriales, ya que su mantenimiento es a bajo costo y fácil mantenimiento con lo que describiremos brevemente algunos conceptos como son: algunas leyes que rigen a estos equipos, la descripción de sus partes principales, los tipos de conexiones, los tipos de rotores, la descripción de un arranque general y los tipos de aislantes en estos mismos equipos.

#### 2.1.1. Algunas leyes que rigen a los motores de inducción

Para el funcionamiento en los motores de inducción, tenemos que conocer algunas leyes que permiten tales como la ley de Faraday de electromagnetismo, el voltaje inducido en un conductor, la fuerza de Lorentz en un conductor, y la corriente en un inductor, las cuales se describen a continuación:

##### 2.1.1.1. Ley de Faraday de inducción electromagnética

En 1831, Michael Faraday hizo un descubrimiento importante en el área del electromagnetismo, donde él descubrió la relación fundamental, entre el voltaje y el flujo en un circuito a lo que él denominó inducción electromagnética, que a su vez es llamada: la ley de Faraday, que establece, [Wildi, 2007]:

1. Si el flujo que vincula un lazo (o vuelta) varía como una función de tiempo, se induce un voltaje entre sus terminales.

2. El valor del voltaje inducido es proporcional a la velocidad de un cambio de flujo.

Por definición y, de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI), cuando el flujo dentro de un lazo varía a razón de un weber por segundo, se induce una tensión de un volt entre sus terminales. Por esto, si el flujo varía, dentro de una bobina de  $N$  vueltas, la tensión inducida está dado por la ecuación 2.1:

$$E = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Donde

$E$ =Tensión inducida (V)

$N$ =Número de vueltas en las bobina

$\Delta \Phi$ =Cambio de flujo dentro de la bobina (Wb)

$\Delta t$ = Intervalo de tiempo durante el cual cambia el flujo(s)

La ley de Faraday de inducción electromagnética abrió la puerta a un sin número de aplicaciones como son los transformadores de potencia, los generadores, y los motores de inducción.

#### 2.1.1.2. La tensión inducida en un conductor

En la mayoría de los motores y generadores, se necesita una espira, que se mueve con respecto al flujo al que está fijo en el espacio. El movimiento relativo produce un cambio en el flujo que vincula las bobinas, por lo que se induce un voltaje de acuerdo con la ley de Faraday.

Sin embargo, en este caso especial, es más fácil calcular la tensión inducida con respecto a los conductores que con la bobina. De hecho, siempre que un conductor corta un campo magnético, se induce una tensión entre sus terminales y ese valor de la tensión inducida está dado por la ecuación 2.2, [Wildi, 2007]:

$$E = Blv \quad (2.2)$$

Donde

$E$ =Tensión inducida (V)

$B$ =Densidad de flujo (T)

$l$ =Longitud activa del conductor en el campo magnético (m)

$v$ =Velocidad relativa del conductor (m/s)

### 2.1.1.3. La fuerza de Lorentz en un conductor

Cuando un conductor que transporta la corriente es colocado en un campo magnético, en donde se somete a una fuerza llamada fuerza electromagnética o fuerza de Lorentz. Esta fuerza es de fundamental importancia porque constituye la base de operación de motores, generadores y de muchos instrumentos eléctricos. La magnitud de la fuerza depende de la orientación del conductor con respecto a la dirección de un campo.

La fuerza es mayor cuando el conductor es perpendicular al campo en la figura 2.1, y cero cuando es paralelo hacia él. Entre estos dos extremos, la fuerza tiene valores intermedios. La fuerza máxima que actúa en un conductor recto está dada en la ecuación 2.3, [Wildi, 2007]:

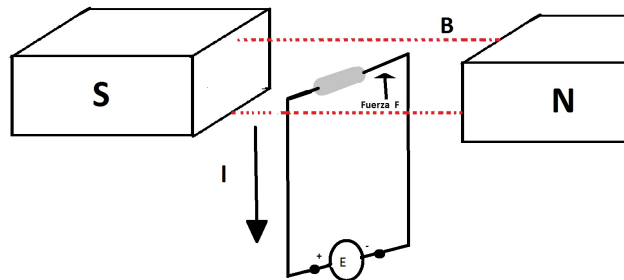


Figura 2.1: Fuerza de un conductor

$$F = B l I \quad (2.3)$$

Donde

$F$ =Fuerza que actúa en el conductor (N)

$B$ =Densidad de flujo del campo (T)

$l$ =Longitud activa del conductor (m)

$I$ = Corriente en el conductor (A)

#### 2.1.1.4. La corriente en un inductor

En un circuito inductivo el voltaje y la corriente están relacionados por la ecuación 2.4:

$$e = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (2.4)$$

Donde:

$e$ =Tensión instantáneo inducido en el circuito (V)

$L$ =Inductancia del circuito (H)

$\Delta i/\Delta t$  = Velocidad de cambio de la corriente (A/s)

La ecuación 2.4 nos permite calcular el voltaje instantáneo  $e$ , cuando conocemos la velocidad de cambio de la corriente. Sin embargo, a menudo sucede que conocemos  $e$  y deseamos calcular la corriente resultante  $I$ . Podemos utilizar la misma ecuación, pero la solución requiere un conocimiento de matemáticas avanzadas aplicando el método de volt-segundo mediante representación gráfica [Wildi, 2007].

## 2.2. Descripción de las partes de un motor de inducción

En esta sección describiremos las partes principales de un motor de inducción trifásico como son el estator, que es la parte fija del motor, los distintos tipos de rotores de jaula de ardilla en máquinas asíncronas, la caja de bornes donde permite las conexiones de alimentación, para estos dispositivos eléctricos, y las conexiones delta o estrella con lo que se permite la variación de la tensión dependiendo del trabajo realizado.

### 2.2.1. Estator

El estator es la parte del motor fija, que sirve como aislamiento para diferentes tipos de agentes contaminantes (polvo y humedad), esta pieza tiene una protección llamada carcasa que está hecho de hierro colado principalmente, que a su vez contiene un núcleo magnético dentro del devanado estatórico o llamado inductor.

Algunas de las ventajas de la carcasa son para proteger los inductores y devanados, disipar el calor del motor por medio de sus aletas. El núcleo estatórico se compone de una apilación de chapas de hierro, después hay un cilindro hueco, que en su interior se aloja el llamado rotor o eje.

### 2.2.2. Caja de bornes

En la caja de bornes en los motores de inducción tiene un mínimo de 6 hasta un máximo de 12 terminales, también los podemos identificar por su enumeración de 1 hasta 12 hilos por una etiqueta sujeta en el mismo cable.

Ejemplo cuando realizamos una conexión estrella, se identifican las líneas  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ , de alimentación, después identificamos las entrada de bornes  $A_1, A_2, A_3$  y los bornes finales  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  en seguida se hace la conexión en estrella como se observa en la figura 2.3:

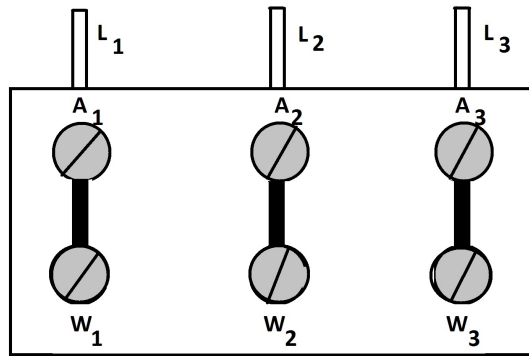


Figura 2.2: Caja de bornes de una conexión estrella

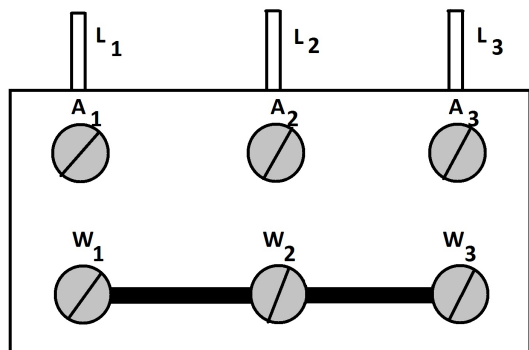


Figura 2.3: Caja de bornes de una conexión delta

### 2.2.3. Tipos de conexión Estrella y Delta

Una conexión estrella se puede calcular por medio de la ecuación 2.5:

$$\begin{aligned} V_L &= \sqrt{3} V_1 \\ I_L &= I_1 \end{aligned} \quad (2.5)$$

Dónde:  $V_L$ =Tensión de línea,  $V_1$ =Tensión de la caída de tensión en la línea uno,  $I_L$ =Corriente de línea,  $I_1$ =Corriente de la línea uno, nota que el voltaje estrella llega hasta 400 volts. También se representa por medio de un diagrama eléctrico, como se muestra en la figura 2.4:

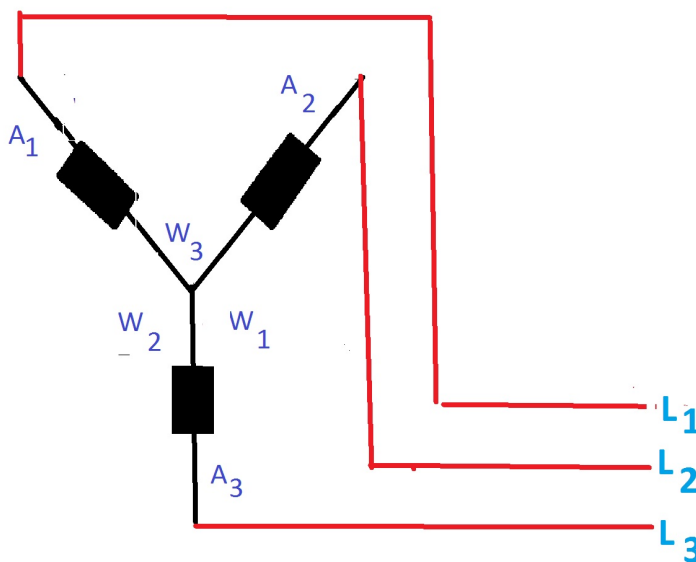


Figura 2.4: Esquema de conexión estrella

Mientras que la conexión delta se puede hacer el cálculo matemático por medio de la ecuación 2.6:

$$\begin{aligned} V_L &= V_1 \\ I_L &= \sqrt{3} I_1 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Además su conexión en delta se muestra en la figura 2.5:

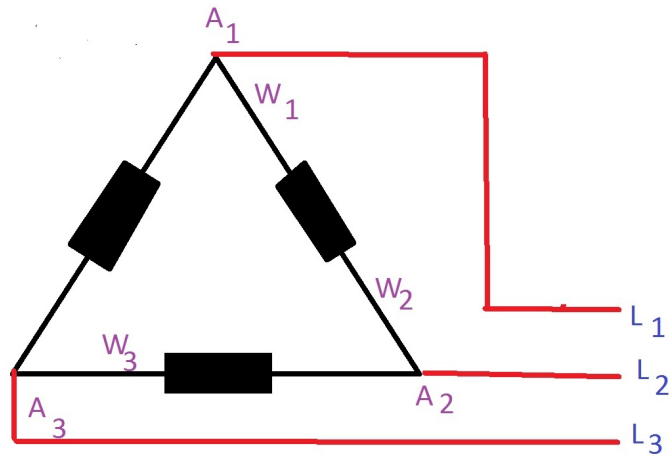


Figura 2.5: Esquema de conexión delta

#### 2.2.4. Tipos de rotores

En los motores de inducción hay distintos tipos de rotores dependiendo de la aplicación en las compañías industriales, ya que las más comunes son los de jaula de ardilla, rotor devanado, rotor de doble jaula de ardilla, que se describen brevemente a continuación:

##### 2.2.4.1. Rotor jaula de ardilla

Un rotor de jaula de ardilla consiste en una serie de barras conductoras dispuestas entre ranuras labradas en la cara del rotor y cortocircuitado en cada extremo, por los anillos de cortocircuitadas. Este diseño se hace referencia a un rotor de jaula de ardilla debido a que los conductores examinados en sí mismos se parecerían a la rueda de ejercicio de un hamster.

##### 2.2.4.2. Rotor devanado

Un rotor devanado tiene un grupo completo de devanados trifásicos, que son espectacularmente grandes los devanados del estator. Las fases de los devanados del rotor están

conectadas usualmente en Y, y los extremos de los alambres del rotor están unidos a anillos rozantes dispuestos sobre el eje del rotor. Los devanados del rotor están cortocircuitados a través de las escobillas montadas en los anillos rozantes, [J.Chapman, 2000].

### **2.2.4.3. Tipo de rotor de doble jaula de ardilla**

El rotor de doble jaula se desarrolló respondiendo a una fuerte demanda de un motor de inducción de construcción simple y de arranque directo, que no produce fluctuaciones inadmisibles de la tensión de línea, su construcción del rotor puede verse como un rotor fundido de gran capacidad, en la que se emplean dos grupos de barras retóricas de distintas aleaciones, [J.Chapman, 2000].

### **2.2.5. Tipos de diseño y diferentes clases en los motores de inducción**

Hay distintas posibilidades, para producir la gran variedad de curvas par-velocidad cambiando las distintas características del rotor de los motores de inducción, en las industrias algunas veces se debe hacer selección de acuerdo a su aplicación, los caballos de fuerza, para realizar un trabajo. Existe una norma que la rigen a los motores de inducción en base a la norma NEMA utilizada en los Estados Unidos y la Comisión Electromecánica Internacional (IEC), ésta se emplea más en Europa. Estas dos normas definieron una serie de diseños estándar, para diferentes curvas del par velocidad, estos diseños estándar tienen una relación estrecha con las clases de diseño, [J.Chapman, 2000].

#### **2.2.5.1. Motores de diseño clase A**

Los motores de diseño clase A son de diseño estándar, con un par de arranque normal, corriente de arranque normal y bajo deslizamiento. El deslizamiento, a plena carga de los motores de diseño clase A debe ser menor de 5% y menor que el del motor de tamaño equivalente de diseño clase B.

El par máximo equivale está entre 200 y 300 % del par de plena carga y ocurre a un bajo deslizamiento (menor de 20%).

El par de arranque de este diseño equivale por lo menos, al nominal de los motores grandes y es 200% o más del par nominal de los motores pequeños. El problema principal de esta clase de diseño es la extremadamente alta corriente de interrupción en el arranque.

Los flujos de corriente en el arranque equivale, entre 500 y 800 % de la corriente nominal. Si



la potencia sobrepasa 7.5 hp, se debe utilizar alguna forma de voltaje reducido en el arranque de estos motores, para evitar problemas de caída de tensión en el sistema de potencia al cual se hallan conectados, [J.Chapman, 2000].

#### **2.2.5.2. Motores de diseño clase B**

Los motores de diseño clase B tienen un par de arranque normal, baja corriente de arranque y bajo deslizamiento. Este motor produce casi el mismo par de arranque que el motor de clase A con cerca de 25% menos corriente. El par máximo es mayor o igual a 200% del par de carga nominal, pero menor que el de diseño clase A, debido al aumento de la reactancia del rotor.

El deslizamiento del rotor es relativamente bajo (menor del 5%), a una plena carga. Las aplicaciones son similares a las de los motores de diseño clase A, pero los diseño de clase B han remplazado ampliamente a los motores de diseño clase A, en nuevas instalaciones, [J.Chapman, 2000].

#### **2.2.5.3. Motor de diseño clase C**

Los motores de diseño clase C tienen alto par de arranque con bajas corrientes de arranque y bajo deslizamiento (menor de 5%) a plena carga. El par máximo es un poco menor que el de los motores de clase A.

Mientras que el par de arranque es hasta 250% del par de plena carga. Estos motores son construidos con rotores de doble jaula, por lo tanto son más costosos que los motores de las clases ya mencionadas anteriormente, este equipo se utiliza. Para las cargas con un alto par de arranque, como las bombas, los compresores, y las bandas transportadoras en un proceso industrial, [J.Chapman, 2000].

#### **2.2.5.4. Diseño clase D**

Los motores de diseño clase D tienen alto par de arranque (275% o más del par nominal) y una baja corriente de arranque, pero también tienen alto desplazamiento a plena carga. Los motores de inducción del tipo de clase A son los más utilizados, pero sus barras del rotor son más pequeñas y la resistencia del material es más elevada. La alta resistencia del rotor desplaza el par máximo hacia una velocidad muy baja.

También es posible que el par máximo ocurra a velocidad cero (100% de deslizamiento). En estos motores, el deslizamiento a plena carga es bastante alta debido a la alta resistencia

rotórica, que está típicamente entre 7 y 11 %, pero puede llegar al 17 % o más.

Estos motores se utilizan en aplicaciones que requieren acelerar cargas de inercias muy altas, en especial grandes volantes utilizados en las troqueladoras o las cortadoras. En tales aplicaciones, estos motores aceleran un gran volante de modo gradual hasta alcanzar su plena velocidad, que luego se transmite hacia la troqueladora. Después de la operación de troquelado, el motor se desacelera el volante durante un moderado tiempo hasta la próxima operación, [J.Chapman, 2000].

### **2.2.6. Descripción general de un arranque de motor de inducción**

En la mayoría de las aplicaciones industriales y residenciales se emplean pequeños motores, por ejemplo en nuestra casa utilizamos equipos electrodomésticos como son los taladros, licuadoras, batidoras, entre otros.

Otra aplicación son los motores grandes, estos por lo regular se definen en caballos de fuerza dependiendo al trabajo asignado en el ramo industrial.

Los motores eléctricos necesitan ser protegidos por medio de diferentes tipos de arrancadores, que se encuentran disponibles en el mercado industrial, por ejemplo cuando se conecta un motor de inducción requiere un dispositivo de control, para su protección en algunos casos, tales como la sobre tensión, la sobre corriente, el corto circuito en la red de distribución de una empresa y la variación de la velocidad en los motores de inducción.

Una aplicación de un motor de inducción se utiliza, para abrir y cerrar la compuerta de una presa, donde este equipo va conectado directo hacia la terminal de la red eléctrica, que permite a una central generadora no utilizar otro equipo arranque en su funcionamiento, [L.Kosow, 1993].

### **2.2.7. Tipos de aislantes en los motores eléctricos**

Los motores de inducción tienen distintos tipos de aislantes que son en base a la norma NEMA (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos), mediante de letras la cual fue creada el 1 de septiembre de 1926 por dos empresas como son los fabricantes de suministro eléctrico y Electric Power Club.

Su objetivo principal fue la de crear un estándar en los motores de inducción de acuerdo a las características del rotor y los tipos de aislantes eléctricos, que ayudan a proteger estos dispositivos.

Comúnmente los diferentes tipos de aislantes eléctricos son una parte esencial en la generación de campos magnéticos a través de una bobina, recordemos, que una bobina es un material de hilo de cobre, que está cubierto por un aislante (barniz), además estos aíslan a las bobinas de las partes metálicas como son las ranura en el estator.

Para esto la norma NEMA, permite clasificar los diferentes tipos de materiales aislantes a utilizar dependiendo de la clase, y el tipo de un motor como se muestra en la tabla 2.1, [NA, 2010]:

Tabla 2.1: Clasificación de aislamiento en los motores de inducción

Tipo de aislante	Temperatura máxima	Descripción del aislamiento
A	$105^{\circ}C$	Los aislamientos impregnados son cuando están sumergidos en un dieléctrico tal como un dieléctrico. Por ejemplo los barnices aislantes.
B	$130^{\circ}C$	los materiales son como la mica, la fibra de vidrio, amató etcétera siempre y cuando tenga aglomerantes adecuados.
C	$>180^{\circ}C$	Los materiales tales como la mica, la porcelana cuarzo, o sin aglomerados eléctricos
E	$120^{\circ}C$	Estos aislamiento es por medio de una aleación de metal con lo que se obtiene un mejor metal con mejores características eléctricas por ejemplo el bronce ya que esta aleación metálica de cobre y estaño.
F	$155^{\circ}C$	Estos aislamientos están constituidos por materiales o asociados de materiales tales como mica, la fibra de vidrio, amianto.
H	$180^{\circ}C$	Estos aislamientos están constituidos por materiales compuestos como las siliconas, o asociaciones de materiales tales como la fibra de vidrio, amianto, etcétera

## 2.3. Envejecimiento por vibraciones mecánicas

El mantenimiento predictivo se encarga de detectar fallas en los equipos de las líneas de producción de las compañías industriales, donde algunas técnicas de monitoreos de las variables como son: corriente eléctrica, tensión eléctrica, calidad de energía, vibraciones mecánicas, temperatura, ruido en los motores de inducción, entre otras más.

Estudios en la calidad de la energía han mostrado, que hay diferentes fuentes de contaminación en la red de distribución eléctrica, que están asociadas a las fallas mecánicas en los motores eléctricos, en relación a la frecuencia.

Por ejemplo, en la detección de fallas por medio de las vibraciones mecánicas, permite un diagnóstico temprano y la reducción de envejecimiento, en los devanados de los motores eléctricos, mediante el análisis de las series de Fourier, en especial la transformada rápida de Fourier "FFT".

Una aplicación de la "FFT" es en un motor de inducción, que permite determinar el espectro de la frecuencia (Hz), más alto en relación a la amplitud de la tensión y con esto determina si el equipo esta saludable o requiere un mantenimiento este mismo equipo.

En esta investigación se considera, describir la serie de Fourier de un movimiento armónico simple así como su parte compleja, con la finalidad de tener una mejor precisión en el monitoreo de las señales.

### 2.3.1. Análisis de armónicos mediante la serie de Fourier relacionado con la frecuencia

Para poder describir la oscilación periódica de la frecuencia ideal de 60 Hz, se genera una oscilación en un periodo determinado. El primer análisis que realizaron fueron los griegos donde observaron cuando una cuerda vibra.

Siglos después, el matemático Euler fue quien desarrollo las formulas trigonométricas complejas en un plano de una circunferencia, más adelante otro matemático llamado Jean-Baptiste Joseph Fourier, demostró mediante un modelado matemático, el comportamiento de un movimiento armónicos simple se muestra en la figura 2.6, donde se describe el movimiento de una oscilación, que es modela, por la ecuación 2.7, ya sea para determinar un coseno o seno de una onda sinusoidal,[Rao, 2012].

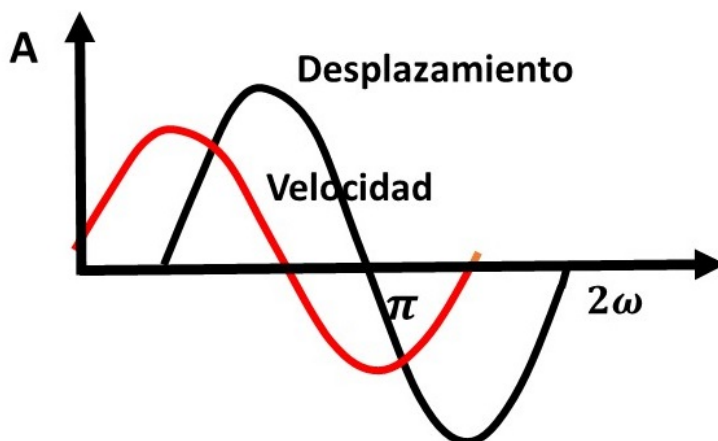


Figura 2.6: Movimiento armónico simple

$$\begin{aligned}
 x(t) &= \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots \\
 &\quad + b_1 \operatorname{sen} \omega t + b_2 \operatorname{sen} 2\omega t \dots \\
 &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \operatorname{sen} n\omega t)
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Donde  $\omega = 2\pi/T$  es la frecuencia fundamental, y  $a_0, a_1, a_2 \dots, b_1, b_2$ , son coeficientes constantes. Para determinar los coeficientes  $a_0$  y  $b_0$ , que multiplicamos en la ecuación 2.8 por  $\cos n\omega t$  y  $\operatorname{sen} n\omega t$  respectivamente, e integramos a lo largo de un periodo  $T=2\pi/\omega$ , por ejemplo, de 0 a  $2\pi/\omega$ .

Entonces notamos que todos los términos excepto uno en el lado derecho de la ecuación será un cero, y obtenemos:

$$a_0 = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} x(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) dt \tag{2.8}$$

$$a_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} x(t) \cos n\omega t dt = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos n\omega t dt \tag{2.9}$$

$$b_n = \frac{\omega}{\pi} \int_0^{2\pi/\omega} x(t) \operatorname{sen} n\omega t dt = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \operatorname{sen} n\omega t dt \tag{2.10}$$

La interpretación física de la ecuación 2.8 en cualquier función periódica puede representarse como una suma de funciones armónicas. Aunque esta misma ecuación 2.8 es una

función infinita, podemos aproximar la mayoría de las periódicas con la ayuda de sólo algunas funciones de armónicos.

La serie de Fourier también puede representarse por medio de la suma de sólo términos seno o coseno. Por ejemplo, la serie de sólo términos cosenos se calcula en las ecuaciones 2.11, 2.12:

$$x(t) = d_0 + d_1 \cos(\omega t - \phi_1) + d_2 \cos(2\omega t - \phi_2) + \dots \quad (2.11)$$

Donde:

$$\begin{aligned} d_0 &= a_0 \\ d_n &= (a_n^2 + b_n^2)^{1/2} \\ \phi_n &= \tan^{-1} \left( \frac{b_n}{a_n} \right) \end{aligned} \quad (2.12)$$

### 2.3.2. La descripción de espectros mediante la frecuencia

Las funciones de armónicos  $a_0 \cos n\omega t$  y  $b_n \sin n\omega t$  en la ecuación 2.7 se llaman armónicos de orden  $n$  de la función periódica  $x(t)$ . El armónico de orden  $n$  tiene un periodo  $T/n$ .

Estos armónicos se trazan como si fueran líneas verticales en un diagrama de amplitud ( $a_0$  y  $b_n$  o  $d_n$  y  $\phi_n$ ) en contra de la frecuencia ( $\omega$ ), lo que se hace llamar espectro de frecuencia o diagrama espectral. La figura 2.7, se muestra un espectro de frecuencia típico, en donde se toma en consideración la amplitud (A), [Rao, 2012].

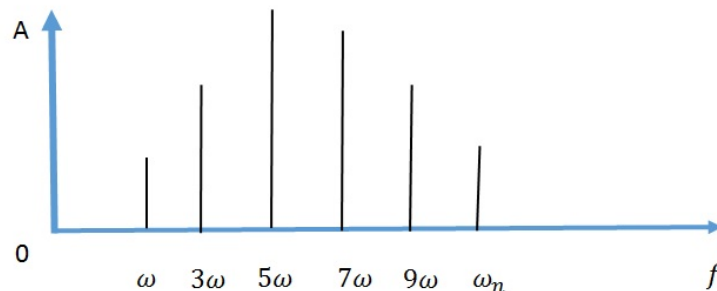


Figura 2.7: Espectro relacionado con la frecuencia, por lo regular a 60 Hz

## 2.4. Envejecimiento por medio de la temperatura en los motores de inducción

Las causas de envejecimiento en los motores de inducción son debidas a los diferentes tipos de fallas tales como el incremento de la temperatura en el devanado de estos equipos, y los armónicos eléctricos en la red de una alimentación de una compañía industrial.

El principal problema es el aumento de temperatura en los motores de inducción, cuando están en funcionamiento, donde se ve afecta la resistencia del aislante y del conductor, ya que hay un coeficiente de temperatura ( $K_T$ ), por ejemplo, si el material ( $K_T$ ) es positivo, cuando el equipo está en operación la resistencia aumentará y de forma inversa ocurre de manera contrario es decir la resistencia disminuye con lo que se ve afectado toda la corriente. Conociendo estas fuentes que provocan el aumento de temperatura se mencionan a continuación:

- Envejecimiento por armónicos eléctricos es la perturbación de la onda senoidal relacionado con la frecuencia, que son provocadas por las cargas no lineales como son los motores de inducción, lámparas fluorescentes, subestaciones eléctricas debido a la pérdida de tensión o corriente en un cable, los hornos de arco eléctrico, entre otra más.
- Envejecimiento en los devanados del estator: son provocados por los sobre voltaje o sobre corriente en la alimentación, que estos generan un desgaste del aislamiento de las bobinas en un motor de inducción.
- Envejecimiento de una línea de alimentación eléctrica: es cuando la fase se retroalimenta hacia el neutro provocando un desfase de tensión, en la misma línea de alimentación.

Para todo esto se emplean los modelos matemáticos para un mejor monitoreo en detección de fallas con lo que debemos de conocer algunas de las teorías que rigen a la termografía como son: conceptos de la medida temperatura, el efecto Seebeck, el efecto Thomson, el efecto Peltier, funcionamiento de un termopar, clases de termopares, antecedentes de la termografía, diferencia entre calor y temperatura, transferencia de calor por (conducción, convección, radiación), intercambio de la radiación, irradiación, algunas leyes de la termografía como se resumen a continuación:

### 2.4.1. Ley del termopar

Un termopar es un transductor, que permite diferenciar, entre la unión de dos metales donde se produce un diferencial de potencial (mili volts), por se describen algunas leyes que lo constituye tales como el efecto Seebeck, el efecto Thompson, el efecto Peltier, así como el funcionamiento de este mismo dispositivo, y las clases de termopares dependiendo del material que se use en una aplicación.

#### 2.4.1.1. El efecto Seebeck

En 1821, Thomas Johann Seebeck (físico alemán), quien descubrió que se producía una FEM(fuerza electromotriz), por un procedimiento puramente térmico, en un circuito compuesto por dos metales diferentes cuyas soldaduras se mantienen a distintas temperaturas, tal como en la figura 2.8, se emplean dos metales que constituyen un par termoeléctrico y la FEM(Fuerza electromotriz) de Seebeck se mantiene a una temperatura constante de la soldadura en referencia (T1), que esta en función de (T2), [Sánchez, 2003]:

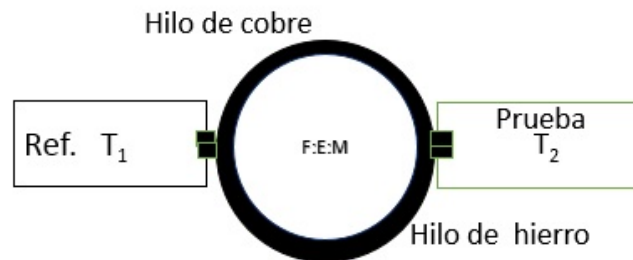


Figura 2.8: El efecto Seebeck

EL efecto Seebeck se puede obtener por medio de la siguiente integral:

$$\xi_{AB} = \int_{T_1}^{T_2} (Q_A - Q_B) dT \quad (2.13)$$

Donde

$\xi_{AB}$  = fem producida por el par (mili volts)

T1,T2 = Temperaturas (K)



$Q_A, Q_B =$  Constante de transporte térmico de los metales.

A veces se simplifica, por medio de dos constantes  $Q_A$  y  $Q_B$ , que son aproximadamente independientes de la temperatura, si existe una relación lineal en la forma, que se puede calcular por la siguiente ecuación 2.14:

$$\xi_{AB} = \alpha * (T_2 - T_1) \quad (2.14)$$

Siendo:  $\alpha =$  Constante del par(mili volts K)

$T_1, T_2 =$  Temperatura de las uniones (K)

#### 2.4.1.2. EL efecto Peltier

En 1834, Jean Charles Peltier (Físico Francés), quien descubrió que cuando pasa una corriente eléctrica a través de la unión de dos metales existen una liberación o absorción de calor en la unión, dependiendo de la dirección de flujo de corriente. Este es el efecto inverso de Seebeck. En el caso de que un lazo este abierto se le aplica una corriente, en el sistema como se aprecia en la figura 2.9, donde la tensión es aplicada para pasar por una unión de dos hilos que son hilo (a), hilo (b), en el lado izquierdo se produce un enfriamiento en la temperatura inicial ( $T_I$ ) y en el lado derecho sufre un calentamiento Temperatura final ( $T_F$ ), donde se produce el efecto joule en la unión de los dos hilos, [Sánchez, 2003].

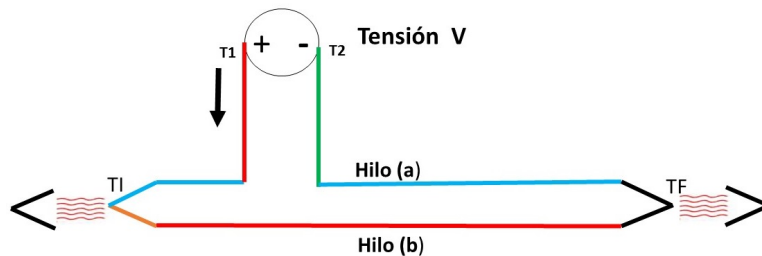


Figura 2.9: El efecto Peltier

Una aplicación sobre este efecto es cuando en cualquier soldadura es proporcional a la cantidad de electricidad que la atraviesa, y provoca un sentido inverso del flujo calorífico, se puede determinar los números de julios de energía calorífica que es absorbida o liberada en la soldadura de dos metales que son A y B, por lo que la electricidad transportada a través

de ella en su unidad de Coulomb (C), se puede calcular matemáticamente por medio de la ecuación 2.15.

$$\pi_{AB} = \frac{(\text{julios}) \text{ Efecto Peltier}}{C} Q \quad (2.15)$$

Nota que C=Coulomb, la Fem Peltier no sólo depende de la naturaleza de los metales, sino también de la temperatura de la soldadura.

### 2.4.1.3. El efecto Thomson

En 1854, William Thomson (Físico Inglés conocido como Lord Kelvin) descubrió que en un hilo único cuyos extremos se mantienen a distintas temperaturas, la densidad de electrones varía de un punto a otro. Cada elemento de hilo y temperatura no uniforme es, por lo tanto, un origen de la fem. Cuando se mantiene una corriente en un hilo de temperatura no uniforme, se libera o se absorbe calor en todos los puntos del hilo, y este efecto Thomson es proporcional a la cantidad de electricidad que atraviesa una parte del hilo y a la diferencia de temperaturas entre los extremos de parte. Si una parte infinitesimal del hilo A tiene una diferencia de temperatura  $dT$  el número de julios de energía calorífica absorbidos o liberados de esta longitud de hilo, por coulomb de electricidad transportada, se denomina Fem Thomson, se puede calcular matemáticamente por medio de la ecuación 2.16, para determinar el calor específico eléctrico [Sánchez, 2003]:

$$\sigma_A dT = \frac{\text{julios}}{\text{Efecto Thomson}} C Q \quad (2.16)$$

El coeficiente  $\sigma_A$  se denomina a veces calor específico eléctrico. La Fem Thomson total  $K_m$  en un hilo cuyos extremos se encuentran a las temperaturas T1 y T2 está dada por la ecuación 2.17:

$$\int \frac{T2}{T1} \sigma_A dT \quad (2.17)$$

El efecto Thomson se demuestra por medio de un montaje como en la figura 2.10, donde se muestra dos distintos materiales, que produce un flujo de calor disipando una temperatura en la entrada y otra diferente en la salida, donde el galvanómetro mide la diferencia de temperatura entre A y B, por medio de dos termopares y finalmente se encuentra el conmutador de tensión reversible que permite atravesar una corriente de pocos amperes en cualquier dirección de la barra.

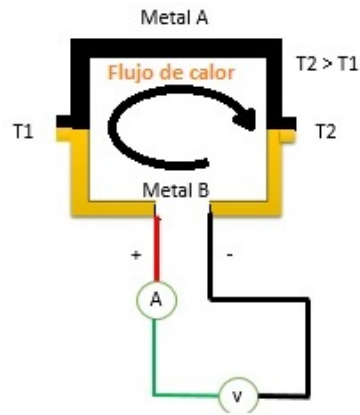


Figura 2.10: El efecto Thompson

#### 2.4.1.4. Funcionamiento de un termopar

En el termopar es esencial, que la suma algebraica de la fem Peltier y Thompson sea suficiente para mostrar una variación proporcional a la temperatura. La figura 2.11, muestra un sistema de medida, en el que (a) es el hilo positivo, y (b) es el hilo negativo, donde el galvanómetro de los cables de prolongación o extensión del termopar. Por ejemplo, ¿Qué sucede si se calienta un hilo o ambos hilos del termopar, en otras palabras, un hilo caliente y un hilo frío? La respuesta es que este dispositivo sigue midiendo la temperatura, en el punto caliente, correspondiente [Sánchez, 2003].

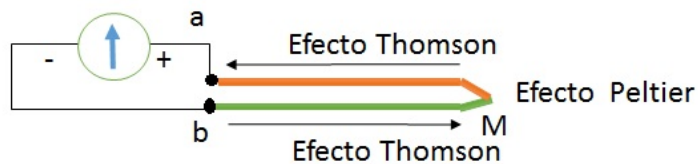


Figura 2.11: Funcionamiento de un termopar

### 2.4.1.5. Clases de termopares

Desde el punto de vista de construcción, y con el objeto de protegerlos, los termopares suelen estar encapsulados en un tubo de material apropiado al entorno, donde se va a efectuar la medida, normalmente si es acero inoxidable.

Asimismo, la unión caliente puede estar unida al extremo de una funda de protección o aislada de la si misma, para que exista comunicación a tierra de la planta. Dependiendo de los materiales utilizados (metales puros o aleación de metales), se han configurado varios tipos de termopares a los cuales se les ha asignado una letra característica, tal como aparece en la tabla 2.2, se representa el tipo de termopar, material, y el rango de temperatura en grados centígrados  $^{\circ}C$ , [Sánchez, 2003].

Tabla 2.2: Tipos de termopares

TIPO DE TERMOPAR	MATERIALES	RANGO NORMAL
J	HIERRO-CONTANTAN	-190 $^{\circ}C$ A 760 $^{\circ}C$
T	COBRE-CONSTANT-COBRE-(COBRE-NIQUEL)	-200 $^{\circ}C$ A 370 $^{\circ}C$
k	CROMEL-(COBRE-NIQUEL)-(CROMO-NIQUEL)-ALUMNIO-NIQUEL	-190 $^{\circ}C$ A 1.260 $^{\circ}C$
E	CROMO-CONSTANTAN	-100 $^{\circ}C$ A 1.260 $^{\circ}C$
S	90 % PLATINO + 10 % RODIO)-PLATINO	0 $^{\circ}C$ A 1.480 $^{\circ}C$
R	(87 % PLATINO + 13 % RODIO)-PLATINO	0 $^{\circ}C$ A 1.480 $^{\circ}C$

Cada uno de estos tiene características tales como es el rango, linealidad, sensibilidad, etc. En cada uno de los tipos se pueden seleccionar diversos grosores de hilos, en su utilización por ejemplo, si se iutiliza grosores pequeños de hilos los rangos de temperatura no están conforme el estandar de la tabla anterior, con lo que recomienda identificar estas características como se describe acontinuación, [Sánchez, 2003]:

- Identificar el hilo positivo del material, en un rango superior al de referencia.
- El hilo negativo siempre es de color rojo (conexión).
- En los termopares tipo K el hilo negativo es ligeramente magnético.
- En los termopares tipo S el hilo negativo es más balanceado que el positivo.

### 2.4.2. Antecedentes de la termografía

Cuando los materiales al calentarse a una temperatura de  $(100^{\circ}C)$ , estos irradian energía visible como la energía térmica (IR), el cambio de color en su superficie del metal es un indicador razonable de su temperatura.

Por ejemplo, en la antigüedad un herrero marcaba una espada a partir del color del metal, después seguía el proceso de enfriamiento, donde era necesario el tiempo. Hoy en día la óptica de precisión, tiene una aplicación que son los pirómetros, estos son usados, para jugar, a partir del color del brillo de un filamento encendido, su brillo es controlado y ajustado por un potenciómetro, que permite calibrar la temperatura, [Kaplan, 2003].

Con la aparición de los detectores modernos en termografía (IR), la precisión de la medición de la radiación de la energía térmica de superficies, que no "enciende" visiblemente, en las mediciones de las superficies frías, por muy abajo de los  $0^{\circ}C$ , que son alcanzados habitualmente con incluso menos caros en la utilización de sensores IR.

El formal descubrimiento del comportamiento de la energía IR, la porción de luz visible del espectro es creado Willian Harschel (1738-18222) quien fue un músico quien estudio ciencia, óptica y astronomía como vocación; quien desarrollo un experimento para aprender si los rayos de diversos colores a partir de un haz de la luz solar dispersados por un prisma debe diferir en su potencia para calentar una superficie.

Su experimento incluyó un prisma en una mesa de trabajo, y tres termómetros, cosa que en ese entonces relativamente nuevo en los instrumentos científicos. Después colocando los termómetros debajo de luz roja, y luz verde, le dio una luz 24, para la luz verde y violeta le dio una luz de 6, en el cual él Sospecho el efecto de calor, que puede seguir aumentando más allá de la luz roja.

Herschel repitió su experimento utilizando papel rayado y él encontró, que el calor máximo ocurrido en alguna distancia del comportamiento de la luz roja (cerca  $1/2$  de pulgada). No fue un calor detectado, en el comportamiento final del violeta. Además Herschel estableció, que el calor es la radiación, por ejemplo, la luz, puede refractarse en los materiales y reflejarse en las superficies de estos mismos materiales, [Kaplan, 2003].

### 2.4.3. Diferencia entre calor y temperatura

Frecuentamos referirnos cómo una fuente de calor (ejemplo en el horno de petróleo o un calentador eléctrico) es una forma a otra conversión de energía; La energía almacenada en un objeto se convierte a calor y fluye, para otro objeto. El calor puede ser definido como la

energía térmica en transición, que fluye de un lugar u objeto para otro como un resultado de diferencias de temperatura, y el calor fluye para cambiar los niveles de energía en los objetos, la temperatura es una propiedad de la materia y no una medición de energía interna. Se define la dirección del flujo de calor cuando la temperatura es conocida [Kaplan, 2003].

### 2.4.3.1. Transferencia de calor por conducción

La conducción es la transferencia de calor en la media estacionaria, es sólo un modelo de flujo de calor en sólidos, pero puede también tener un lugar en líquidos o gases. Ocurre como el resultado de las colisiones moleculares (en líquidos) y vibraciones atómicas (en sólidos) por lo cual la energía es movida, una molécula en un tiempo, de los sitios de temperaturas más altas a los sitios de temperaturas más bajas. En la figura 2.12 se muestra el flujo de calor por conducción, la ley por conducción expresa el flujo de calor por conducción mediante la siguiente ecuación 2.18, [Kaplan, 2003]:

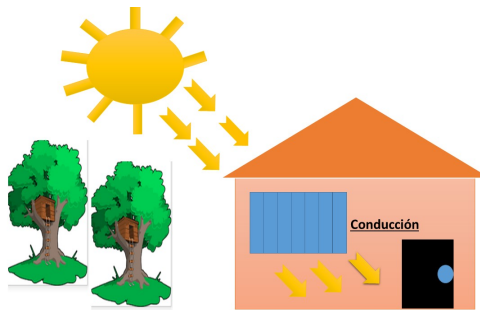


Figura 2.12: Transmisión de calor por conducción

$$\frac{Q}{A} = \frac{k(T_1 - T_2)}{L} \quad (2.18)$$

Donde  $Q/A$  es la relación de la transferencia de calor mediante el bloque por unidad de área ( $\text{BTU}/\text{h}\cdot\text{ft}^2$ ) perpendicular al flujo,  $L$  es el espesor del bloque (ft),  $T_1$  (deg F) es la más alta temperatura (en el lado izquierdo),  $T_2$  es la más baja temperatura (en el lado derecho), y  $k$  es la conductividad térmica del bloque del material, La conductividad térmica es análogo a la conductividad eléctrica e inversamente proporcional a la resistencia térmica, la temperatura  $T_1$  y  $T_2$  son análogos a las tensiones  $V_1$  y  $V_2$ , y el flujo de calor  $Q/A$  es

análogo a la corriente eléctrica (I), donde se utilizan las ecuaciones 2.19, 2.20:

$$R_{elctrica} = \frac{V1 - V2}{I} \quad (2.19)$$

Después

$$R_{trmica} = \frac{T1 - T2}{Q/A} = \frac{L}{k} \quad (2.20)$$

El flujo de calor es usualmente expresado en las unidades inglesas , donde k se expresa en  $BTU-ft^2 - ^0F$  y su resistencia térmica está dada en  $^0F-hr-ft^2/BTU$ .

#### 2.4.3.2. Tráferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección tiene lugar en un movimiento medio y es casi siempre asociado con la transferencia entre un sólido y un fluido en movimiento (tal como el aire), la convección forzada tiene lugar cuando una fuerza externa controlada, tal como un viento o en una bomba de aire, mueve el fluido.

La convección libre tiene lugar cuando la diferencia de temperatura necesaria para la transferencia de calor produce un cambio de densidad en el fluido y el fluido más caliente se eleva como un resultado de aumento de la flotabilidad.

El espesor de una capa límite depende en velocidad libre (V) del fluido, que es mayor para la libre convección y más pequeño para la fuerza de convección. La relación del flujo de calor depende en activar el espesor de la capa de convección.

La diferencia entre la temperatura  $T_s$  y  $T_\infty$  ( $T_s$ ) es la temperatura de superficie,  $T_\infty$  es el campo libre del fluido fuera de la placa plana. La ley de enfriamiento de Newton define el coeficiente en la transferencia de calor por convección, para utilizar la ecuación 2.21, [Kaplan, 2003]:

$$h = \frac{Q}{T_s - T_\infty} \quad (2.21)$$

Donde h se expresa en  $BTU/hr-ft^2-^0F$ . Por reordenación la ecuación 2.21, se obtiene la nueva ecuación 2.22

$$\frac{Q}{A} = T_s - \frac{T}{R_c} \quad (2.22)$$

Donde  $R_c=1/h$ : es la resistencia, en el flujo de calor por convección,  $R_c$  es una comparación analógica, en una resistencia eléctrica y es más fácil, para usar cuando se determina una combinación, por conducción, y en la transferencia de calor por convección.

### 2.4.3.3. Transferencia de calor por radiación

La transferencia de calor por radiación es diferente a los otros 2 modelos en varios aspectos:

- Puede llevarse a cabo a través del vacío.
- Ocurre por la absorción y emisión.
- Ocurre en la velocidad de la luz.
- La transferencia de la energía es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura entre los objetos.

### 2.4.3.4. Intercambio de la radiación en una superficie

La medición de la radiación térmica (IR) es la base, para la medición de temperatura sin contacto por medio de la termografía. La radiación térmica (IR) en una superficie ( $W$ ), donde este puede ser emitido en una superficie reflectora o transmisión de superficie.

La radiación total es igual a la suma de los componentes emitidas ( $W_e$ ), la componente de la reflexión ( $W_r$ ) y la componente de transmisión ( $W_t$ ) en la temperatura de superficie, que se relaciona  $W_e$  que es una componente que se emite sola por si misma .

La radiación térmica (IR), que incide en una superficie puede ser absorbida, reflejada, o transmitida en la figura 2.13. La ley del estado de Kirchhoff establece, que la suma de las 3 componentes es siempre igual para la radiación recibida (El porcentaje de la suma de las 3 componentes iguales unidades) [Kaplan, 2003]:



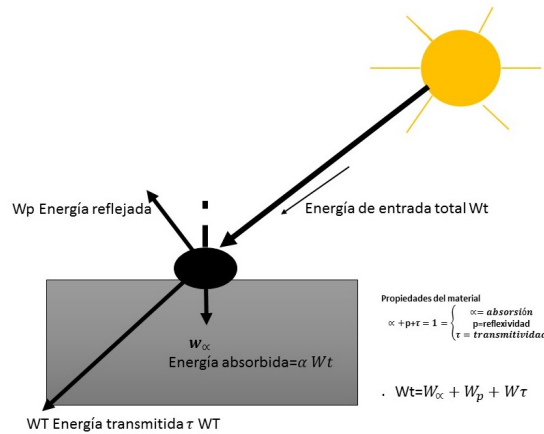


Figura 2.13: Intercambio de la radiación

$$\alpha(\text{Absorción}) + p(\text{reflectividad}) + \tau(\text{transmisividad}) = 1 \quad (2.23)$$

#### 2.4.3.5. Irradiación

Ésta se define como el valor local del radio del flujo  $dF_R$ , que recibido el detector en el área  $dR$ , por ejemplo la potencia recibida por unidad de área ( $Wm^{-2}$ ), simbólicamente como se observa en la siguiente ecuación 2.24, [Gaussorgues, 1994]:

$$E_{(X,Y)} = \frac{dF_R}{dR} = \int L(\xi, n) \cos\theta_n d\omega_n \quad (2.24)$$

Donde la integral se evalúa sobre la mitad del espacio,  $E_{X,Y}$  está en  $W m^{-2}$  y X,Y son las coordenadas relativas, para los puntos en que la luminosidad se evalúa y las cantidades  $\xi, n$  se define a la dirección de un haz de luz.

#### 2.4.3.6. La ley de Bourguer

La ley de Bourguer es la relación entre la irradiación (E) de una superficie receptor, debido a una fuente (S), y la intensidad I de que la fuente en la dirección del tendido receptor en una distancia (d). Se puede calcular matemáticamente por la ecuación 2.25:

$$E = \frac{I \cos\theta_R}{d^2} \quad (2.25)$$

El cuadrado inverso depende en distancia de la fuente es válido si las dimensiones lineales de la fuente son pequeñas comparado con la distancia (d).

### 2.4.3.7. Espectro electromagnético

Las leyes fundamentales de la teoría del electromagnetismo clásica muestran que el campo eléctrico (E) es debido a una carga en movimiento uniforme (q) es un poco diferente del campo estático, donde se puede utilizar la ecuación 2.26, [Gaussorgues, 1994]:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2.26)$$

Donde la distancia r en el cual están hechas las observaciones es grande comparado con el desplazamiento de la carga, y  $\epsilon_0$  es la permisividad del espacio vacío. Si la carga eléctrica es acelerada, se puede emplear la ecuación, 2.27 de Maxwell:

$$\text{curl}H = \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (2.27)$$

Dónde muestra que la energía es liberada en la forma de radiación conforme va aumentando la temperatura causando un incremento en la excitación molecular sin el material, en el cual favorece la aceleración en especial cuando una carga eléctrica es llevada, y por lo tanto, genera una radiación. La energía liberada en forma de radiación se puede expresar por la ecuación, 2.28:

$$W = \frac{h_c}{\lambda} \quad (2.28)$$

Donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $h=6.63 \times 10^{-34}$ , y (Js) es la constante de Planck se define por  $c = 3.0 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ , que es la velocidad de la luz, la longitud de una onda de la radiación emitida que varía inversamente con energía de transmisión.

Es importante notar que en la región infrarroja, las longitudes de ondas son largas y la energía de radiación es baja, por lo tanto, queda con claras dificultades que podrían ser encontradas en la detección de la radiación infrarroja. Si el material permite todas las posibles transiciones (la excitación térmica de moléculas).

La absorción de radiación por materia resulta en el proceso contrario, la absorción de ser más o menos selectivas, dependiendo en la longitud de onda y el material. El espectro de radiación se divide arbitrariamente en un número de regiones que corresponde a un rango de funcionamiento de particular fuentes y detectores en la siguiente figura 2.14 se ilustra el espectro electromagnético:

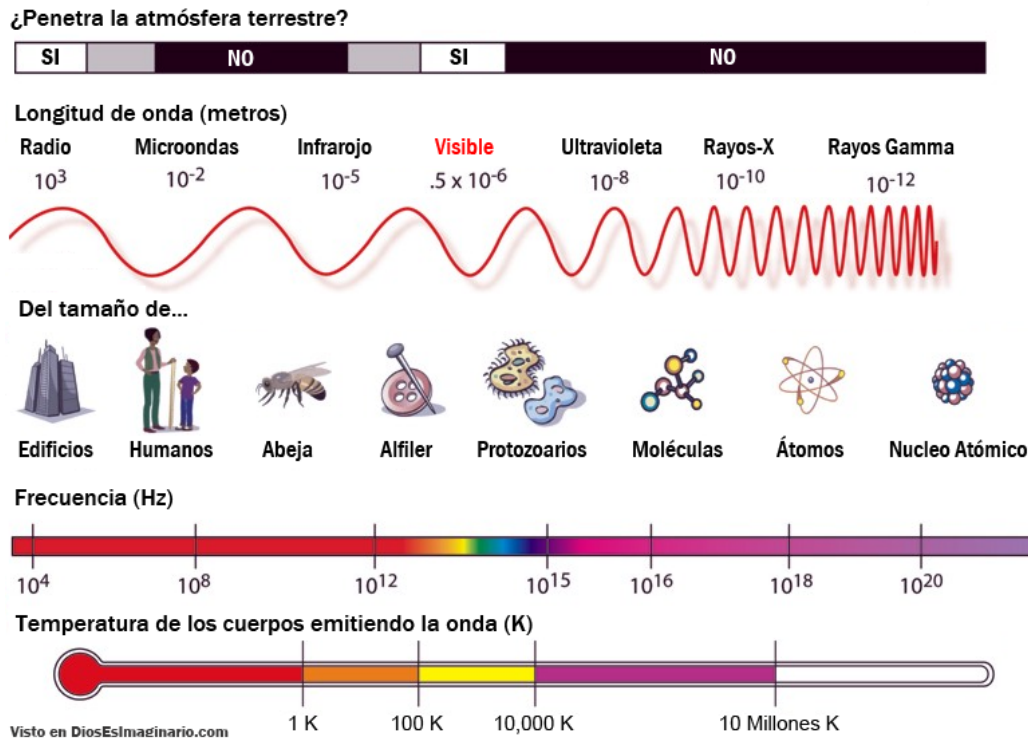


Figura 2.14: Espectro electromagnético

El espectro infrarrojo se emite por las sustancias en las temperaturas normalmente encontradas en la superficie de la tierra. Todos los cuerpos irradian copiosamente en estas llamadas temperaturas normales. Un objeto no podría parecer ser negro en el infrarrojo a menos que se enfrié. Para reducir para un 1% la cantidad de la radiación generada en  $4\mu$  para un cuerpo en  $20^{\circ}\text{C}$ , su temperatura debe ser reducido por  $100^{\circ}\text{C}$ .

El espectro infrarrojo puede ser dividido en 3 largas regiones acorde a los detectores utilizados a capturar. El infrarrojo cercano se detecta por emisiones fotográficas (arriba de  $1\mu\text{m}$ ), por medio de las células foto emisoras, y por los detectores fotovoltaicos, y fotoconductores. El infrarrojo medio es detectado por la termografía, la radiación en el infrarrojo es más alejado, donde puede ser medido por los detectores térmicos, además la longitud de una onda infrarroja es siempre medida en una micra ( $\mu\text{m}$ ), el número de onda es empleado comúnmente en caso particular en la Espectroscopia infrarroja, y se definen por las ecuaciones 2.29, 2.30,[Gaussorgues, 1994]:

$$\sigma = \frac{1}{\lambda} \quad (2.29)$$

Donde  $\lambda$  está en metros o  $\lambda$  está en micras.

$$\lambda = \frac{10^4}{\lambda} \quad (2.30)$$

#### 2.4.3.8. La ley Stefan-Boltzmann

Ésta ley establece que la energía total radiada por unidad de área de superficie de un cuerpo negro, por unidad de tiempo (I) es directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta (T) de un cuerpo negro, ya que en diferentes trabajos de investigación definen a (I) como el cuerpo negro de irradiación, la densidad de flujo de energía, el flujo radiante, el flujo térmico, ó la energía emisiva puede ser calculado por la ecuación 2.31, [Stipetic et al., 2012]:

$$I = \sigma T^4 \quad (2.31)$$

La constante de proporcionalidad es  $\sigma$ , que se llama como la constante de Stefan-Boltzaman, y ésta tiene un valor de:

$$\sigma = 5.6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K} \quad (2.32)$$

Un caso más general cuando un cuerpo gris, en el cual la primera no absorbe o emite la cantidad completa de irradiación, en lugar que se aplica en un cuerpo, que es caracterizado, por su emisividad se puede emplear la ecuación 2.33:

$$I = \epsilon \sigma T^4 \quad (2.33)$$

La emisividad de una superficie de cuerpo dado es una función del ángulo de observación  $\alpha$ , longitud de onda  $\lambda$ , temperatura en un cuerpo (T) y el tiempo (t).

#### 2.4.3.9. La ley de Plank

En cada cuerpo en una temperatura T emite una radiación con una longitud de onda dentro de un espectro electromagnético. La radiación emitida puede ser medida, por un valor llamado luminosidad y nota como  $L_0$ , es el valor de  $L_0$ , dado analíticamente, por la ley de Plank, en la ecuación 2.34, [Suesut et al., 2011]:

$$L_0 = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\pi [\exp(C_2/\lambda T) - 1]} \quad (2.34)$$

Donde  $C_1$  es la primera constante de radiación de valor  $3.741832 \times 10^{-16} \text{Wm}^2$ ,  $C_2$  es la segunda constante de radiación de valor  $1.4388 \times 10^{-2} \text{mk}$ ,  $\lambda$  es la longitud de onda metro [m]. T es el valor absoluto de la temperatura en kelvin [k], y  $L_0$  es la energía de luminosidad espectral [ $\text{Wm}^{-3}\text{Sr}^{-1}$ ].

Sin embargo para un cuerpo real en alguna temperatura (T), donde la medición de la luminosidad podría no ser igual para  $L_0$ , pero  $L = \epsilon L_0$ , en donde  $\epsilon$  se llama la emisividad del material, y este letra griega toma su valor, en el rango de [0,1], dependerá del tipo de material, y la característica de una superficie de un objeto.

#### 2.4.3.10. La ley de Plank en equilibrio térmico

Siempre la parte del espectro electromagnético involucrado, en el estudio de la termografía se localiza en el rango de  $1\text{-}10\mu\text{m}$  e incluso si las longitudes más largas ( $\lambda$ ) son atractivamente apropiados en la instrumentación reciente.

Este rango como se menciona anteriormente es comúnmente referenciado en las cámaras infrarrojas o térmicas (IR), que son hechas por arreglos, cuando el sensor está detectando la radiación de un cuerpo éstas lo censan, para transfórmala en una señal digital.

Un cuerpo oscuro en equilibrio térmico, por medio de una temperatura dada, es la que emite una radiación electromagnética acorde a la ley de Plank se utiliza la ecuación 2.35, [Chengyan et al., 2013]:

$$W_B = (\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1} \quad (2.35)$$

Dónde  $W_B$  es la radiación espectral, (T) es el valor absoluto del cuerpo oscuro,  $\lambda$  es la longitud de onda de la radiación emitida, K es la constante de Boltzmann, h es la constante de Plank, y c es la velocidad de la luz.

#### 2.4.3.11. La ley de Wien

La excitación de una curva espectral  $dR(\lambda, T)/d\lambda$ , en una temperatura constante, que se pasa por medio de un máximo, mientras en el desplazamiento de este máximo es la función de una temperatura descrita, por la ley de Wien, obtenida, para diferenciar la ley de Plank, utilizando las ecuaciones 2.36, 2.37, [Gaussorgues, 1994]:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \mu m \quad (2.36)$$

$$\frac{dR(\lambda m T)}{d\lambda} = 1.286 \times 10^{-5} T^5 W m^{-3} \quad (2.37)$$

Donde Temperatura (T) está en grados kelvin, de este modo un objeto en una temperatura ambiente es  $\approx 290K$  tiene su excitación máximo espectral en  $\lambda \approx 10 \mu m$ , mientras el sol frecuentemente aparenta una temperatura que esta  $6000K$ , además tiene un máximo en la  $\lambda_{max} = 0.05 \mu m$ .

La longitud de onda es exacta en el centro de la visibilidad espectral, por ejemplo, rellenos, por medio de nitrógeno líquido (T=77K), el cual produce una radiación máxima en  $\lambda_{max} = 38 \mu m$ , en el desplazamiento de emisión hacia la longitud de onda corta (visible o no), con lo representa un incremento de la temperatura que satisface la explicación para esta misma ley.

#### 2.4.3.12. Emisividad de los metales en el efecto de temperatura

Los metales generalmente tienen una emisividad infrarroja, que tienden a incrementarse, con la temperatura del metal, donde pueden mostrar la deflexión de un metal, que está dado por la ecuación 2.38, [Gaussorgues, 1994]:

$$\Re = 1 - \sqrt{\frac{2\omega}{\gamma \mu c^2}} \quad (2.38)$$

Donde  $\omega = 2\pi c / \lambda$  es la frecuencia angular de un movimiento periódico de una onda óptica,  $\gamma$  es la conductividad eléctrica del metal,  $\mu$  es la permeabilidad magnética de un material, y (c) es la velocidad de la luz. Sin embargo, la emisividad de un metal está dado por la ecuación 2.39, y también es el incremento de su conductividad eléctrica.

$$\epsilon(\lambda) = 1 - \Re = \sqrt{\frac{2\omega}{\lambda \mu c^2}} \quad (2.39)$$

Donde  $\gamma$  representa un incremento, en la temperatura que corresponde, para una disminución, en la conductividad eléctrica debido a un movimiento térmico de un enrejado molecular, donde produce un aumento en la emisividad.

La emisividad espectral  $\epsilon_\lambda(T)$ , y la emisividad total  $\epsilon(T)$  estan dados por la ecuación 2.40, [Gaussorgues, 1994]:

$$\begin{aligned}
\epsilon_\lambda &= 0.365\sqrt{p[1 + \alpha(T - 293)]} \frac{1}{\lambda} - 0.06667p[1 + \alpha(T - 293)] / \lambda \\
&+ 0.006\sqrt{[p/(1 + \alpha[T - 293])\lambda]^3} \\
\epsilon(T) &= 0.5737\sqrt{p[1 + \alpha(T - 293)]} T - 0.1769p[1 + \alpha(T - 293)T]
\end{aligned}
\tag{2.40}$$

En la tabla 2.3, se muestra algunos valores que han sido analizados en laboratorios que son tomados como los valores estándares de la emisividad. Una letra griega  $\epsilon$  representa un valor de emisividad de algunos materiales dependiendo de sus temperaturas del mismo material utilizados en algunas pruebas de laboratorio.

Tabla 2.3: Emisividad de algunos materiales

MATERIAL	TEMPERATURA $^{\circ}\text{C}$	EMISIVIDAD $\epsilon$
Nieve	0	0.80
Agua	1	0.92
Piel Humana	32	0.98
Hollin	20	0.95
Vidrio pulido	20	0.94
Papel oscuro	20	0.93
Madera	20	0.90
Acero oxidado ( $800^{\circ}\text{C}$ )	100	0.79
Cobre negro oxidado	20	0.78
Cobre oxidado	130	0.76
Hierro oxidado	100	0.64
Aluminio anodizado	100	0.55
Hierro pulido	40	0.21
Acero pulido	100	0.07
Aluminio pulido	100	0.05
Cobre ligeramente mate	20	0.04
Cobre pulido	20	0.04
Aluminio pulido	0	0.03
Plata	20	0.02
Oro pulido	0	0.02

## 2.5. Envejecimiento de motores eléctricos por medio de armónicos

La calidad de energía es un término general, que no hay pérdida de energía, en una red de distribución eléctrica, sin embargo, si hay una baja calidad de energía es debido a las fuentes de contaminación como son los armónicos eléctricos, las fluctuaciones de la tensión, fallas por resonancia, y fallas por frecuencia entre otras más. Un área de la ingeniería que se dedica a estudiar estas fuentes es la electrónica de potencia.

En las últimas décadas se han incrementado el consumo de los equipos de potencia y de control eléctrico, lo que han provocado, que el factor de potencia (FP), sea menor de 0.9, y el costo de la energía eléctrica se incrementa, pero si el FP, es mayor de 0.9, tiene algunos beneficios tales como el ahorro de energía, ya que en la actualidad es muy importante, en el ramo industrial, la disminución del costo de la energía eléctrica, la reducción de fallas en equipos industriales, y entre otras más.

Los armónicos eléctricos son una de las principales causas de fallas en los motores de inducción, ya que están relacionados en el envejecimiento de estos equipos, algunas de estas fuentes se describen en la siguiente sección como son: fallas en cargas, fallas por resonancia, fallas por fluctuaciones de la tensión, y fallas por frecuencia.

También se describen los modelados matemáticos aplicados, en los armónicos eléctricos, por ejemplo, los armónicos de tensión y de corriente, aplicando la transformada rápida de Fourier "FFT".

### 2.5.1. Fuentes de armónicos eléctricos

La mayoría de los dispositivos de electrónica de potencia empleados en la industria, son fuentes de armónicos: las fallas por cargas, las fallas por fluctuaciones de tensión, fallas por resonancia, y las fallas por frecuencia como se mencionan a continuación:

#### 2.5.1.1. Fallas por cargas

Las cargas son difíciles de representar con precisión se han podido modelar aproximadamente haciendo las suposiciones adecuadas. Un modelo de motor y una derivación en paralelo la resistencia se utiliza para representar la carga en un bus, la histéresis y la resistencia a las corrientes, son medios, para modelar una frecuencia de una oscilación, [DAY and MAHMOUD, 1987].



### **2.5.1.2. Fallas por fluctuaciones de tensión**

Las fluctuaciones de tensión son perturbaciones, que se encuentran dentro de los límites normales de tensión, debidos a que producen cambios de luz desagradables en una región de 10 Hz o perturbaciones en el parpadeo de tensión causando un incremento de armónicos en los equipos electrónicos y eléctricos.

Algunos ejemplos son las computadoras, las variaciones de una tensión cíclicas, dando como resultado la variación de las cargas en comparación con la capacidad del cortocircuito en el punto de carga.

Otros problemas sobre las fluctuaciones producen en los sistemas de distribución y se transfieren prácticamente a través de transformadores de distribución a los consumidores de baja tensión, las principales estas fuentes son las cargas industriales, [X.Lei et al., 1987]

### **2.5.1.3. Fallas por resonancia**

Los bancos de capacitores son empleados en la mayoría de las plantas industriales para el propósito de la compensación de energía reactiva, para la corrección del factor de potencia (FP), es decir se mejora al emplear los capacitores.

Está corrección del FP, por medio de los retardadores de tensión reaccionan adversamente en presencia de la distorsión armónica en el sistema, a pesar de que estos, son cargas lineales, no son fuentes de armónicos, que tienden a amplificar lo existente sin perturbación.

La amplificación de los armónicos por condensadores son causadas a través de la electricidad, donde se produce un fenómeno llamado resonancia”, que es similar a una vibración sinfónica en un instrumento musical de una cuerda, algunos fuentes son los condensadores, inductores, cargas no lineales, entre otras más, [Saravanan et al., 2012].

### **2.5.1.4. Fallas por frecuencia**

Estas fallas afectan la tensión de alimentación, que sufren algunas anomalías notables, como la tensión de alimentación se aumenta a una condición de que la máquina no funciona debido a la saturación [Perez et al., 2015].

El aumento del consumo de componentes de electrónica de potencia, para la protección de los equipos en las compañías industriales ha permitido el crecimiento de la tensión y corriente sinusoidales.

La mayoría de las cargas no lineales son las fuentes, que provocan la perturbación de una onda sinusoidal, como son: los motores de inducción, transformadores de potencia,

convertidores de potencia, lámparas fluorescentes y otras más, [Wagner et al., 1993].

### 2.5.2. Conceptos básicos de las ondas sinusoidales

Para el procesamiento la adquisición y procesamiento de señales, por medio de las transformadas de Fourier, ya que es fácil de implementar, en nuestro caso se utilizó la transformada rápida de Fourier "FFT", por su bajo costo en aplicaciones computacionales.

La aplicación de la "FFT" es en observa un gráfico, por medio de una forma de onda de tensión o corriente con una distorsión de la está misma, ya que por lo general en un sistema de potencia ideal (frecuencia=50 o 60 Hz).

Existen diferentes normas internacionales como son: la Europea, la Asiática, la de América Latina, y la de estados Unidos, estas definen, que la mayoría de las cargas no lineales son las fuentes que provocan una perturbación en una onda sinusoidal de tensión o corriente en relación a la frecuencia. Para calcular una onda con respecto al tiempo (t), puede ser expresado, en una serie de Fourier, por las ecuaciones 2.41, 2.42, 2.43, [Shafiu et al., 2015]:

$$v(t) = a_0 \sin \omega t + b_n \cos \omega t \quad (2.41)$$

Donde

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.42)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.43)$$

Para el cálculo de un onda con respecto al tiempo i(t), puede ser expandido dentro una de las series de Fourier, por las ecuaciones 2.44, 2.45, 2.46:

$$i(t) = a_0 \sin \omega t + b_n \cos \omega t \quad (2.44)$$

Donde

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.45)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i(t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (2.46)$$

La Serie de Fourier para las señales eléctricas de tensión y corriente se puede calcular con las ecuaciones 2.47, 2.48 como sigue [Lopez, 1994]:

$$v(t) = V_0 + \sum_{k=1}^n \sqrt{2}V_k \text{Cos}(k\omega t + \theta_{vk}) \quad (2.47)$$

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^n \sqrt{2}I_k \text{Cos}(k\omega t + \theta_{Ik}) \quad (2.48)$$

$V_0$  =Valor medio de la señal de tensión

$I_0$  =Valor medio de la señal de corriente

$V_k$  =Valor eficaz de la componente k de la señal tensión

$I_k$  =Valor eficaz de la componente k de la señal de corriente

$\theta_{vk}$ =Ángulo de fase de la k componente de tensión

$\theta_{Ik}$ =Ángulo de fase de la k componente de corriente

El orden armónico se define como un número entero múltiplo de la fundamental, por ejemplo, un armónico de 180 Hz de frecuencia de una onda de una fuente de 60 Hz, sería llamado el tercer armónico. Las siguiente ecuación 2.49, se muestra como encontrar la raíz media cuadrada(RMS) de una forma de onda, en donde  $I_h$  es el valor de la componente de armónico de h en la corriente, [M et al., 1996]:

$$I_{RMS} = \left[ \sum_{h=1}^N (I_h)^2 \right]^{1/2} \quad (2.49)$$

Una medición de la distorsión en una forma de onda, por medio de la distorsión de armónicos total (THD). El THD es la relación del valor RMS de las corrientes de armónicos (no fundamental de la parte en la forma de una onda), y el valor RMS es la porción fundamental, de la corriente en uno  $I_1$  en la forma de una onda, Este valor es siempre expresado como un porcentaje de la corriente fundamental, y la tensión fundamental, para calcular la distorsión de armónico de la corriente total ( $THD_I$ ) se utiliza la ecuación 2.50, y en el caso de la distorsión de armónico de la tensión total ( $THD_V$ ), en la ecuación 2.51:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N I_h^2}}{I_1} X 100 \% \quad (2.50)$$

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} X 100 \% \quad (2.51)$$

### 2.5.3. Parámetros de tensión

Los parámetros de tensión son: el factor de amplitud que puede ser evaluado por la ecuación 2.52, el factor de desequilibrio por la ecuación 2.53, y el factor de parpadeo están relacionados a evaluar estrés dieléctricos por medio de la ecuación 2.54, el balance de un circuito trifásico, y la fuente de rigidez de alimentación con respecto a mantener una adecuada regulación de tensión, respectivamente [Rosa, 2006]:

$$Factor\ cresta = \frac{V_{pico}}{V_{rms}} \quad (2.52)$$

$$Factor\ de\ desbalanceo = \frac{|V_-|}{|V_+|} \quad (2.53)$$

$$Factor\ parpadeo = \frac{\Delta V}{|V|} \quad (2.54)$$

Donde: El factor cresta es la relación entre el pico de una forma de onda a su valor RMS. Para una forma de onda sinusoidal lineal, el factor de cresta sería la raíz cuadrada de 2 o 1.414.

$|V|$ =Tensión cuando no hay perturbación de una onda.

$\Delta V$ =Salidas de fluctuaciones de tensión.

### 2.5.4. La transformada rápida de Fourier

La transformada de Fourier es un medio eficaz para la conversión de una señal en el dominio del tiempo, para el dominio de la frecuencia, mientras que la transformada inversa de Fourier convierte la componente en el dominio de la frecuencia de vuelta a una señal del dominio de tiempo original, [Chen and Chen, 2014].

Entre las diversas transformadas de Fourier en los algoritmos, la transformada discreta de Fourier (DFT) es muy popular para la representación de las series de Fourier con una señal de longitud infinita.

La DTF también se convierte en el dominio del tiempo de la frecuencia, en relación de un espectro de medición, que depende de una variable, por ejemplo, en una variable eléctrica, la característica de la DFT es adecuada, para la solución de problemas de las series de tiempo, tales como las cotizaciones y las variaciones.

Asumir una señal  $x[n]_{N=0}^{N-1}$ . La DFT de una señal es una secuencia  $X[k]$ , para  $k=0,1,2,\dots,N-1$ , y  $n=0,1,\dots,N-1$ , y es definida en la ecuación 2.55:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{\frac{-2\pi jnk}{N}} \quad (2.55)$$

La secuencia de una señal  $X[n]$  es también la suposición, para ser valores complejos. La transformada inversa de Fourier (IDFT), en la ecuación 2.56:

$$X[k] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[k] e^{\frac{2\pi jnk}{N}} \quad (2.56)$$

Las ecuaciones anteriores son del área de la computación que toma el valor de  $X[k]$ , lo que implica la multiplicación compleja en  $N$ , y las adiciones complejas  $(N-1)$ , para cada valor de  $k$ . Entre lo que se necesita una multiplicación compleja en  $(N-1)$ , y  $(N^2-1)$  mediante una adición compleja, para calcular todos los valores de  $N$  de la DTF.

La FFT es un método de mejora, para el calcular la DFT y IDTF, por lo que es uno de los algoritmos más útiles en la computación y algunas áreas de la ingeniería tales como la electrónica de potencia, vibraciones mecánicas, acústicas, óptica, termografía, y entre otra más.

Las series de Fourier dependen del número de  $N \log_2$  multiplicaciones complejas, no es una manera eficaz de calcular directamente la (DFT), sin una simetría y un factor de periodo en  $W_N^{nk}$ , por lo tanto, la definición de la transformada rápida de Fourier (FFT) se puede derivar y es reescrita en la ecuación 2.57:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] W_N^{nk} \quad (2.57)$$

Dónde  $W_N^{nk} = e^{\frac{-2\pi j.n.k}{N}}$ . Los mismo valores de  $W_N^{nk}$  son calculados.

### 2.5.5. Análisis de armónicos por medio de graficas

El espectro armónico es la descomposición de una señal en sus armónicos en el dominio de la frecuencia. Por lo general se representa en un diagrama de barras mediante el porcentaje de cada una de las señales armónicas, cuya suma produce la señal total analizada.

Por ejemplo, cuando realizamos una medición de una variable eléctrica (corriente) se puede observar una distorsión de la señal en la figura 2.15, donde se representa el orden espectral, por medio de un porcentaje en la medición de la corriente de armónicos totales  $THD_I$  en %:

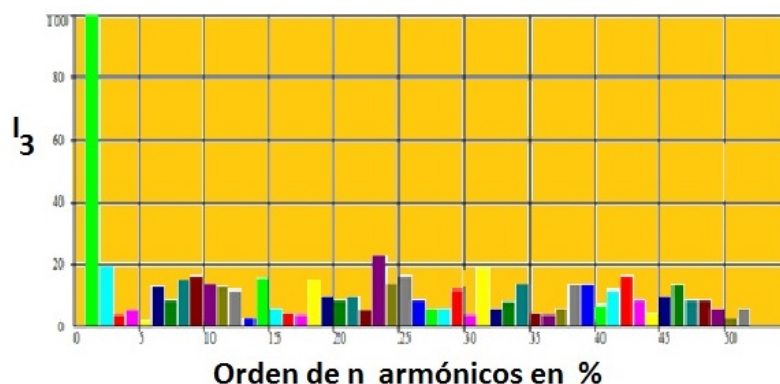


Figura 2.15: Grafica del orden de armónicos en la corriente

## 2.6. Antecedentes de lógica difusa

El computo inteligente es una mezcla de varias técnicas preexistentes tales como los sistemas expertos difusos, las redes neuronales, los algoritmos genéticos, y los sistemas híbridos, [Seising, 2010], con lo que se ha desarrollado algunas aplicaciones industriales principalmente en áreas de la automatización, y en la robotica.

Algunos países han adoptado la investigación y el desarrollo de la tecnología industrial tales como japon, Corea del sur, Europa, y Estados Unidos. Por ejemplo, en Japon los consumidores son muy conscientes del gran potencial del computo inteligente en el área de la lógica difusa.

Las aplicaciones de la lógica son: el aire acondicionado en casas, los refrigeradores, el calentador de gas, las lavavajillas, las lavadoras, la olla de arroz, los microondas, y entre otras más [Gao, 2001].

El surgimiento de la logia difusa fue hasta 1965, en el trabajo del Dr. Zadeh, quien desarrollo las teorías de sistemas y el análisis en la toma de decisiones, desde entonces sus investigaciones se han centrado en la teoría de los conjuntos difusos y las aplicaciones en la inteligencia artificial.

Las distintas subáreas de la toma de decisiones tales como la lingüística, la lógica, el análisis de decisiones, la teoría de control, sistemas expertos y redes neuronales. En la actualidad, su investigación de él se centra en la lógica difusa, soft computing, la computación con las palabras, y la teoría computacional de nuevo desarrollo de la percepcion y la precisión de un lenguaje natural, [Zadeh, 2008].

## 2.6.1. Teorías de conjuntos

### 2.6.1.1. Conjuntos duros

Los conjuntos clásicos contienen objetos que satisfacen propiedades de pertenencia, tal como, en la ecuación 2.58, en caso de los conjuntos duros, donde un elemento  $x$  en el universo de  $X$  es otro miembro de algún conjunto duro  $A$  o no pertenece a  $A$ , se llama una función características, [Fracalanza et al., 2016]:

$$f(n) \begin{cases} 1 & x \in A \\ 0 & x \notin A \end{cases} \quad (2.58)$$

En el caso que los universos de discurso esta dado como son: los autos de carrera deportivos, los autos de carreras rapidos, y los autos de carreras costoso, en donde un usuario define por lógica, y toma una decisión, si es deportivo o no lo es, si es lujoso o no lo es, si es costoso o no lo es, despues se procede a utlizar la función característica de la ecuación 2.58. Por ejemplo si definimos los subconjuntos del universo de discurso autos de carrera deportivo como son: un Ferrari, un McLaren, un Mustang, un Lamborgini, un Jaguar, y un Porches en este caso el usuario toma una respuesta lógica, en caso de que un auto deportivo es costoso, y el usuario dice que si lo es entonces se evalua con la función características por un uno y en caso de que el usuario no esta de acuerdo lo evalua con un cero tal como se muestra en la tabla 2.4:

Tabla 2.4: Ejemplo de la función característica en el universo autos deportivos

	Universo de discurso	Salidas de funciones características	
	Autos deportivos	Rapidos	Costosos
1	Ferrari	(Ferrari, 1)	(Ferrari,1)
2	Manclaren	(Manclare, 1)	(Mclaren,0)
3	Mustang	(Mustang, 0)	(Mustang,0)
4	Lamborgini	(Lamborgini, 1)	(Lamborgini,1)
5	Jaguar	(Jaguar, 0)	(Jaguar,1)
6	Lottus	(Lottus,0 )	(Lottus,1)
7	Porches	(Porches, 0)	(Porches, 0)

### 2.6.1.2. Definición de un conjunto difuso

Un subconjunto difuso del conjunto  $X$  (universo de discurso), el conjunto de pares ordenados  $(x, \mu_A(x))$ , donde  $\mu_A$  es una función de pertenencia, para el conjunto difuso  $A$ , se define por la ecuación 2.59:

$$\mu_A : X \rightarrow [0, 1] \quad (2.59)$$

En este caso, la función puede tomar valores dentro del intervalo de  $[0$  a  $1]$ . Un valor de 0 implica la no pertenencia del conjunto  $A$  y un valor de 1 implica la pertenencia del conjunto, si consideramos que "x está en  $A$ ", el segundo término en el par  $(x, \mu_a(x))$ , permite entender si esta a su vez es falso ó parcialmente cierto, en el caso que  $x$  pertenezca con un grado de pertenencia  $(x)$  en el mismo intervalo, [K.V Zuñiga and Aguilar, 2014].

### 2.6.1.3. Tipos de funciones de pertenencia

Una función de pertenencia permite evaluar un conjunto duro, en un elemento del universo de discurso en un subconjunto de una variable lingüística convirtiéndola, en un grado de pertenencia difuso, además está en función de los intervalos  $[0,1]$ , siendo un valor máximo, para realizar la intersección de dos funciones de pertenencia en un mismo plano. Por lo general las más utilizadas debido a una fácil implementación son: trapezoidal, triangular, y pi, se describen a continuación:

### 2.6.1.4. Función triangular

La función triangular consiste en un disparo, que por lo general se representa con  $x$ , después los valores de los parámetros como se observa en la figura 2.16, se representa por medio de las letras  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , donde  $a$ =punto inicial,  $b$ =punto medio, y  $c$ = punto final, en numeros enteros tomando en consideración los limites como son el valor  $a \leq b$ , y  $b \geq c$ , además, para el cálculo matemático se utiliza la ecuación 2.60:



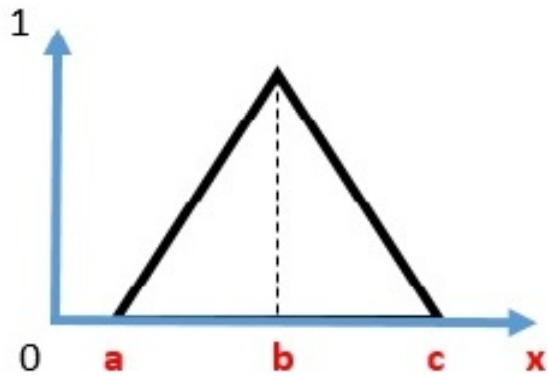


Figura 2.16: Función de pertenencia triangular

$$Triangular(x, a, b, c) = \min \left( \max \left( \frac{x - a}{b - a}, \frac{c - x}{c - b}, 0 \right), 1 \right) \quad (2.60)$$

### 2.6.1.5. Función trapezoidal

La función trapezoidal consiste en un disparo, por lo general se representa con  $x$ , después los valores de los parámetros se muestra en la figura 2.17, donde se representa por medio de las letras  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , y  $d$ , donde  $a$ =punto inicial,  $b$ =punto 2,  $c$ =punto 3, y  $d$ =el punto final, en números enteros tomando en consideración los límites como son: el valor  $a \leq b$ ,  $b \geq c$ , y  $c \geq d$ , además, para el cálculo matemático se usa la ecuación 2.61:

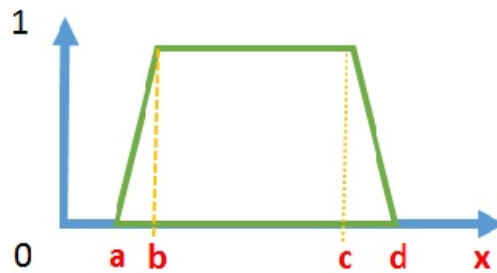


Figura 2.17: Función de pertenencia trapezoidal

$$\text{Trapezoidal}(x, a, b, c, d) = \max \left( \min, \frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}, 0 \right) \quad (2.61)$$

### 2.6.1.6. Función pi

Se especifica con los siguientes parámetros A, B, C, D cómo se muestra en la figura 2.18, donde A=punto 1, B=punto 2, C= punto 3, y D=punto 4, en números enteros tomando en consideración los límites como son:  $A \leq B$ ,  $B \leq C$ , y  $C \leq D$ , además, para el cálculo matemático se usa la ecuación 2.62:

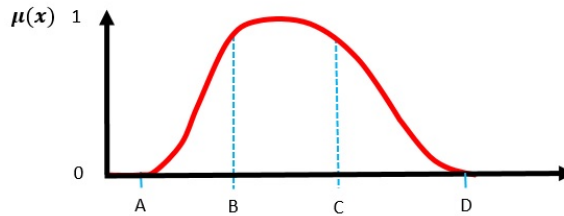


Figura 2.18: Función de pertenencia pi

$$\pi(x, A, B, C, D) = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq A \\ 2 \left( \frac{x-A}{B-A} \right)^2 & \text{if } A < x < \frac{A+B}{2} \\ 1 & \text{if } B \leq x \leq C \\ 1 - 2 \left( \frac{x-C}{D-C} \right)^2 & \text{if } C < x < \frac{C+D}{2} \\ 2 \left( \frac{x-D}{D-C} \right)^2 & \text{if } \frac{C+D}{2} < x < D \\ 0 & \text{if } x > D \end{cases} \quad (2.62)$$

### 2.6.1.7. Norma triangular T-norm

Una norma triangular es una operación  $T: [0, 1]^2$ , tal que para todas  $x, y, z \in [0, 1]$  las siguientes condiciones son las más representativas, [Ouyang et al., 2008]:

$$i) \text{Conmutativa} \quad T(x, y) = T(y, x) \quad (2.63)$$

$$ii) \text{Asociativa} \quad T(x, (T(y, z))) \quad (2.64)$$

$$iii) \text{Monotonicidad} \quad T(x, y) \leq T(x, z) \quad y \leq z \quad (2.65)$$

$$iV) \text{Condición lmite} \quad T(x, 1) = y \quad (2.66)$$

Para 4 T-normas básicas son dados por:

$$1) \text{ T - norm Minimo} \quad T_M(x, y) = \min(x, y); \quad (2.67)$$

$$2) \text{ T - norm Triangular producto} \quad T_p(x, y) = (x * y) \quad (2.68)$$

$$3) \text{ T - norm Triangular Lukaseiewick} \quad T_L(x, y) = \max(x + y - 1.0) \quad (2.69)$$

$$4) \text{ T - Norm Drastico} \quad T_D(x, y) = \begin{cases} x & \text{if } y = 1, \\ y & \text{if } x = 1, \\ 0 & \text{if otros valores.} \end{cases} \quad (2.70)$$

### 2.6.1.8. Norma triangular T-conorm

Una triangular T-conorm es una operación binaria definida en  $[0, 1]$ , que es asociativa, conmutativa, además no decreta en ambos argumentos, y teniendo 0, como elemento de unidad, decimos que una T-norm y una T-conorm  $\oplus$  es dual con respecto, para una negación de  $n$  si para, cada  $(x, y, \in) [0, 1]$ , por medio de las leyes de Morgan, que se representa la ecuación 2.71, [Eva Armengol, 2016]:

$$n(x * y) = n(x) \oplus n(y), \quad n(x \oplus y) = n(x) * n(y) \quad (2.71)$$

La preposición: para cada  $x, y, z \in [0, 1]$ , sostiene las siguientes condiciones:

$$iV) \quad x * y \leq yx * y \leq y \quad (2.72)$$

$$iVII) \quad x \rightarrow_x y = 1 \Leftrightarrow x \leq y \quad (2.73)$$

$$iVIII) \quad 1 \rightarrow_* x = x \quad (2.74)$$

$$iIX) \quad \max(x, y) = \min(x_{**y})_* y, \quad (y_*x)_*x \quad (2.75)$$

Las 4 T-conorm son:

$$5) T - \text{conorm Mximo} \quad S(x, y) = \max(x, y) \quad (2.76)$$

$$6) T - \text{conorm Producto} \quad S_p(x, y) = (x + y) - (x * y) \quad (2.77)$$

$$7) T - \text{conorm Lukaseiwick} \quad S_L(x, y) = \min((x + y), 1) \quad (2.78)$$

$$8) T - \text{conorm Drstico} \quad S_D(x, y) = \begin{cases} x & \text{if } y = 0, \\ y & \text{if } x = 0, \\ 1 & \text{if } 0 \text{ en otros valores.} \end{cases} \quad (2.79)$$

#### 2.6.1.9. Definición de una variable lingüística

Cuando Zadeh desarrolló su teoría de la incertidumbre acerca de la lógica difusa, donde él tenía un problema en la representación lingüística, con lo que él indica en retirarse de la precisión ante una complejidad abrumadora, es decir las variables cuyos valores no son números, sino frases como las palabras en un lenguaje natural o de forma artificial, la motivación de la utilización de palabras o frases en vez de números es por medio de representaciones lingüísticas, que son en general menos específico que los valores numéricos, [Jerry M, 1995]. Por ejemplo, la variable lingüísticas temperatura, se representa por su valor numérico de una variable (T), que es el universo de discurso, que a su vez, se divide en subconjunto de éste mismo como son (Frio, Caliente, y Muy caliente) todos estos tienen los valores lingüísticos de (T).

#### 2.6.1.10. Inferencia basado en reglas

Un sistema basado en reglas consiste en las reglas "si-entonces", donde un intérprete controla las reglas de inferencia. Estas sentencias de reglas son comúnmente utilizadas, para formular sentencias condicionales, que componen en la base del conocimiento del interprete depende de la aplicación.

Una regla simple "si-entonces" asume la forma "si x es A, entonces y es B", y en la parte si la regla "x es A" se le llama antecedente o premisa, mientras que el entonces parte de la regla "y es B" se llama consecuente o conclusión, [Abraham, 2005]. Por ejemplo, vamos a construir algunas reglas lingüísticas en donde tenemos 2 entradas, y una salida, la primera variable lingüística se llama Temperatura (T), que se divide en subconjuntos (Frio, tibio, y caliente), la segunda variable lingüística se llama Humedad (H), que se divide en subconjuntos (Baja,

media, y alta), y por último la salida llamada variable lingüística velocidad (V), con sus subconjuntos (bajo, media, alta).

Para empezar a construir las reglas de inferencia tomando en cuenta las subvariables lingüísticas como son: temperatura, humedad y velocidad, donde se evalúa por medio de una condicional "si-entonces", por medio de la T-norm ( $\wedge$ ), o T-conorm ( $\vee$ ) como se muestra en la tabla 2.5:

Tabla 2.5: Ejemplos de reglas lingüísticas

	if	Temperatura (T)	T-norm( $\wedge$ )	Humedad (H)	entonces	T-conorm ( $\vee$ )	Velocidad (V)
$A_1$	si	T es fría	$\wedge$	H es baja	entonces	$\vee$	V es baja
$A_2$	si	T es caliente	$\wedge$	H es alta	entonces	$\vee$	V es baja
$A_3$	si	T es tibia	$\wedge$	H es media	entonces	$\vee$	V es baja

### 2.6.1.11. Relaciones binarias difusas

Las relaciones binarias difusas son definidas, en un universo de discurso, donde están definidos los valores de pertenencia de éstas asumiendo, un  $R$  pequeño, que representa una relación difusa binaria si se define, en  $X$  por  $X$ , que se representa en la ecuación ??, [Pedrycz and Gomide, 1998]:

$$R : X \text{ por } X [0, 1]$$

Algunas propiedades básicas de las relaciones binarias se muestran a continuación:

$$\textit{Reflexiva} R(x, x) = 1$$

$$\textit{Irreflexiva} R(x, x) = 0$$

$$\textit{Simetria} R(x, y) = R(y, x)$$

Si se satisface, para todo  $x$  y  $y \in X$ . La transitividad está asociado con la operación de una composición aplicada, para las relaciones difusas. Es decir que  $R$  es T-superior (T-sup) en caso contrario la transitiva es una desigualdad:

$$R \circ R \subseteq$$

Renombrando:

$$\sup_{z \in X} [R(x, z) \text{ t } R(z, y)] \leq R(x, y)$$

En particular, si la ecuación anterior tiene para un  $T = \min$ , se llama la relación transitiva superior mínimo (sup-min).

## 2.7. Sistemas de inferencia difusa

Un sistema difuso es un grupo de funciones de pertenencia y reglas, estas funciones y reglas son utilizados para el razonamiento de los datos duros, mientras que los sistemas de inferencia difusa son orientados en un conjunto duro. Un universo de discurso por ejemplo: la Estatura, que a su vez tiene las variables lingüísticas como son chaparro, medio, alto, a todo esto se le llama universo de discurso de entrada.

Después de haber definido los universos de discurso de entrada, a su vez estos tienen datos duros, que son evaluados en relación a las funciones de pertenencia, con lo que se convierten en datos difusos. Una vez teniendo los datos difusos se construyen una reglas de inferencia basado en las variables lingüísticas de las entradas y de las salidas, a este proceso se le llama fusificación.

Por ultimo algunas de las reglas de inferencia difusa son evaluadas por medio de un método de desfusificación el más común es el área del centroide, para los datos difusos, en la figura 2.19, se representa el proceso por medio de diagramas de bloques, para un proceso de inferencia difusa, [Singla, 2015]:

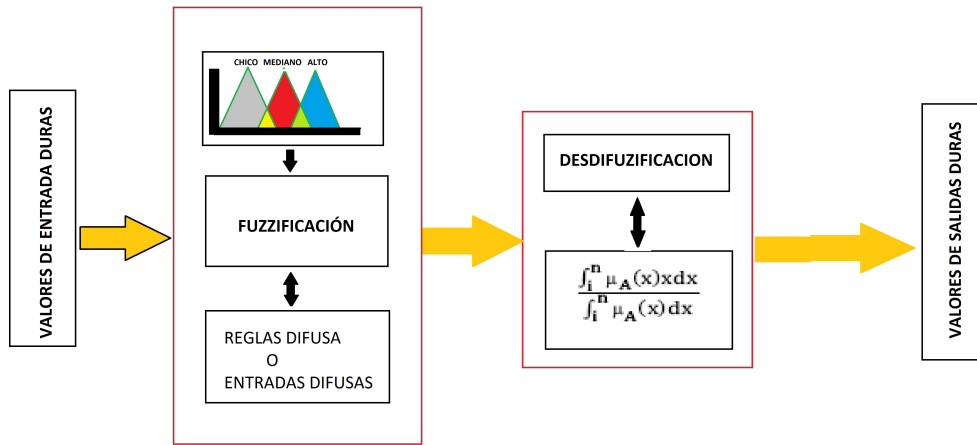


Figura 2.19: Diagrama de un sistema de inferencia difusa

### 2.7.1. Sistema de inferencia difusa Mandani

Inferencia difusa Mandani fue implementado para el control de un motor de vapor en combinación de una caldera, en donde se implementaron variables lingüísticas para un modelado industrial de una planta(motor de vapor), basado en reglas para describir un funcionamiento menos humano con una mayor automatización, dentro de las estrategias de control, [Mandani and Assilan, 1975].

En la figura 2.20, se muestran 2 sistemas de inferencia difusa Mandani derivadas, en una salida general S, cuando un subconjunto, para dos entradas duras x y y, en donde se analiza si puede adoptar el máximo del producto algebraico, por ejemplo, en la operario y un experto toma la decisión de usar una T-norm o una T-conorms respectivamente, además se observa en la figura 2.21, se emplea la composición máxima del producto en lugar de una composición mínima del original, [Roger et al., 1997]:

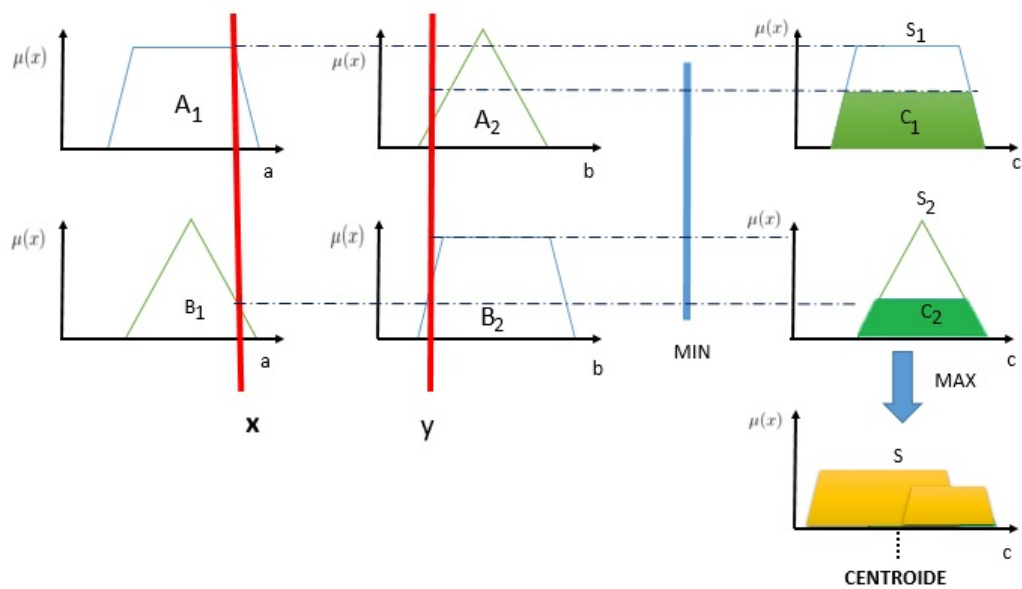


Figura 2.20: El método Mamdani usando la T-norm

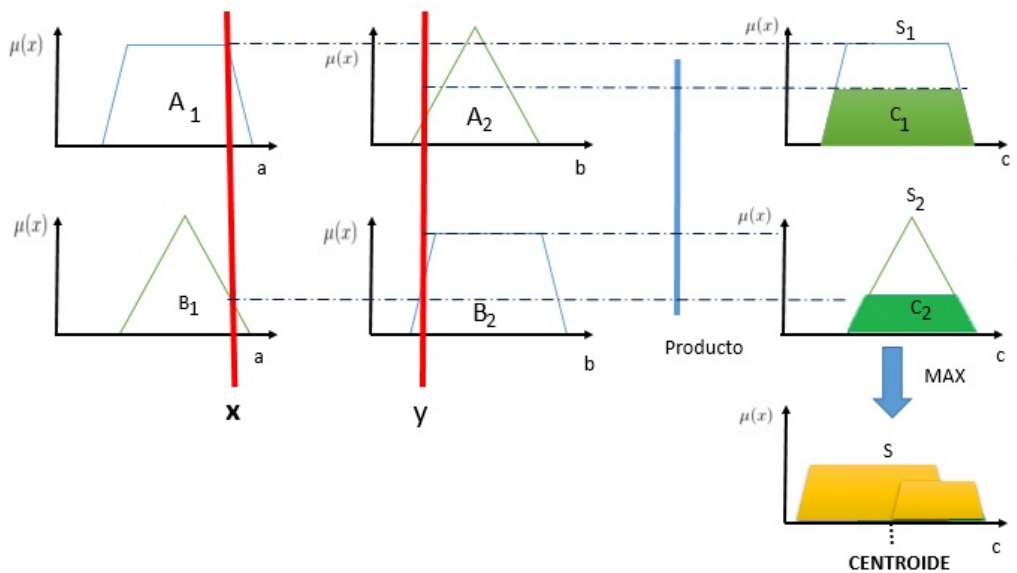


Figura 2.21: El método Mamdani para la norma T-conorm



Para calcular el procedimiento Mandani puede ser empleado las dos reglas con sus respectivas ecuaciones 2.81, 2.82, [Akgun et al., 2012]:

1. Calcular el grado de cumplimiento en la entrada  $\mu(x)$  de la regla de entrada (i) considerando el grado de pertenencia( $\mu$ ) se emplea la ecuación 2.81:

$$\mu(x) = \mu_{Ai1} \wedge \mu_{Ai2} \wedge \mu_{Ain\dots} \wedge \mu_{Ain}(X_n) \quad (2.81)$$

2. Para cada regla se deriva, una salida difusa del conjunto  $B_1$  utilizando la T-norma mínima se emplea la ecuación 2.82:

$$\mu_{B1} = \mu(x) \vee \mu_{B1}(y) \quad (2.82)$$

La aplicación Mandani, fue [Alavi, 2013], aplicado en una técnica haciendo medición, para la clasificación de los datos Mozafato basados en la calidad, donde se incluyen dos parámetros tales como el ancho y la frescura, que fueron medidos, para 500 datos de frutas, con lo que se demostró, que los datos evaluados, en la calidad de la fruta se basa en métodos más exacto que los expertos, y proporciona una mejor representación de los datos leídos.

### 2.7.2. Desdifusificación

La desdifusificación hace una referencia, en la manera de un valor duro, que es extraído de un conjunto difuso como un valor representativo, en general se puede hacer, por 5 métodos, para la desdifusificación de un conjunto difuso A, en un universo de discurso Z, [Roger et al., 1997]:

1. El centroide del área  $z_{COA}$ :

$$z_{COA} = \frac{\int \mu_A(z)zdz}{\int \mu_A(z)dz} \quad (2.83)$$

Donde  $\mu_A(z)$  es una salida agregada de la función de pertenencia (MF). Este es más ampliamente adoptado, en las estrategias de las desdifusificación, que recuerda al cálculo de valores expectativos de distribución en probabilidad:

2. Bisector del área: Si se satisface  $z_{BOA}$ :  $z_{BOA}$ :

$$\int_{\alpha} \wedge z_{BOA} \mu_A(Z) dz = \int_{z_{BOA}} \wedge \beta \mu_A(z) dz \quad (2.84)$$

Donde  $\alpha = \min z | x \in Z$  y  $\beta = \max z | z \in Z$ , que es la línea vertical  $z = z_{BOA}$  en la región de particiones  $z = \alpha$ ,  $z = \beta$ ,  $y = 0$  y  $y = \mu_A(z)$  entre dos regiones con algunas áreas.

3. Media del máximo: Si se satisface  $Z_{MOM}$ :  $Z_{MOM}$  donde es el promedio del máximo de  $z$  en el que alcanza la función de pertenencia (MF), en un máximo  $\mu^*$ :

$$z_{MOM} = \frac{\int_{z'} z dz}{\int_{z'} dz}, \quad (2.85)$$

Donde  $Z' = z | \mu_A(z) = \mu^*$ . En particular, si  $\mu_A$ ,  $\mu_A(z)$  tiene un sólo máximo en el  $z = z^*$ , después  $z_{MOM} = z^*$ . Sin embargo, si  $\mu_A(z)$  alcanza su máximo entre  $z = \in z_{izquierdo}, z_{derecho}$ .

4. Pequeño de los máximos: Si se satisface  $z_{SOM}$ :  $z_{SOM}$ , donde es el máximo (términos de magnitud) de la maximización de  $z$ .
5. El más largo de los máximos: Si se satisface  $z_{LOM}$ :  $z_{LOM}$  donde es el máximo (en términos de magnitud) de la maximización es debido a su evidente sesgo, de  $z_{SOM}$ , y  $LOM$ , ya que no son frecuentemente utilizados cómo los otros métodos de desfusificación.

### 2.7.3. Sistema de inferencia difuso Takagi-Sugeno

El modelo difuso TSK fue propuesto por Takagi Sugeno y Kan, para desarrollar un sistema de aprovechamiento, para la generación de reglas difusa de una conjunto de datos de entrada o salida, un modelo difuso Sugeno se muestra en la siguiente ecuación 2.86, [Roger et al., 1997]:

$$\text{Si } x \text{ es } A \text{ y es } B \text{ entonces } z = f(x, y). \quad (2.86)$$

Donde  $A$  y  $B$  son conjuntos difusos en el antecedente, mientras  $z = f(x, y)$ , es una función dura en el consecuente. Siempre  $f(x, y)$  es un polinomio en la variable entrada  $x$  y  $z$ . Podemos describir la salida del modelo sin la región difusa específica, por los antecedentes de la reglas, con lo que se pueden generar algunos casos como se mencionan a continuación:

- Cuando  $F(x, y)$  es un primer orden polinomio: es el resultado de un sistema de inferencia difusa, que es llamado un modelo difuso Sugeno de primer orden.

- Cuando  $f$  es una constante: entonces tiene un modelo difuso Sugeno de orden cero, ya que puede ser visto, como un caso especial de un sistema de inferencia difusa, en que cada una de sus reglas consecuentes se especifica, por un sigleton difuso, o un caso especial del modelo difuso Tsukamoto, en cada regla consecuyente es específica, por una función de pertenencia (MF) de un punto central en una función constante.

La salida de un modelo Sugeno de orden cero es una función suave de sus variables de entrada siempre que el MF es el antecedente tiene una suficiente superposición, es decir, la superposición de MF en un consecuente de un modelo Mandani no tiene una efectiva decisión en la suavidad.

En la siguiente figura 2.22 se muestra el procedimiento de la resonancia difusa, para un modelo difuso Sugeno de primer orden, para cada regla tiene una salida dura, la salida completa se obtiene por la media del promedio de los pesos, por lo tanto, se evita el proceso de la desfusificación, que requiere en un modelo Mandani.

En la práctica, el operador del promedio de los pesos a veces son reemplazados con el operador suma del peso (que es,  $W = V_1W_1 + V_2W_2$ ), para reducir a cálculo computacional, especialmente, en el entrenamiento de un sistema de inferencia difusa:

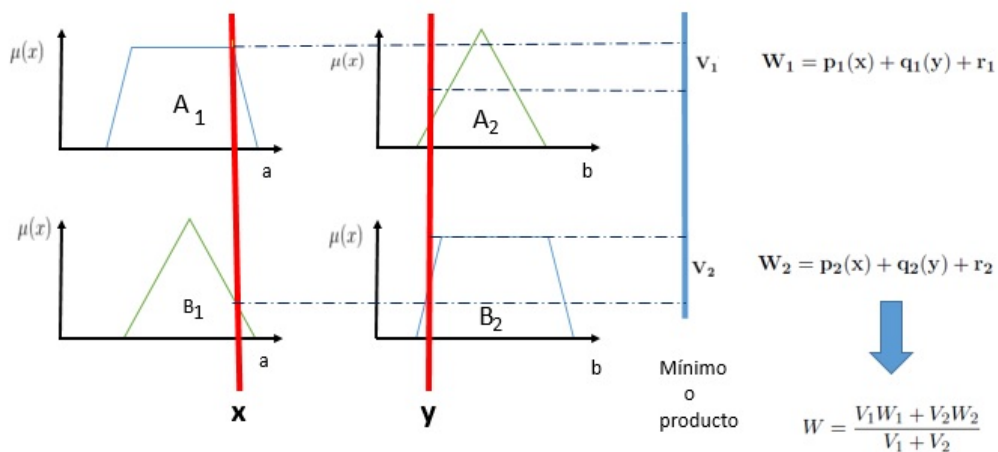


Figura 2.22: El modelo difuso Sugeno

### 2.7.4. Sistema de inferencia difuso Tsukamoto

En el modelo difuso Tsukamoto se toma el consecuente de cada regla difusa "si-entonces", para su representación por medio de un conjunto difuso con una monotocidad en la función de pertenencia (MF) se muestra en la figura 2.23, dando como resultado la salida inferida de cada regla definida como un valor inducido duro, por medio de su regla en la fuerza de disparo, la salida general se toma, en el promedio del peso de cada regla de la salida, [Roger et al., 1997]:

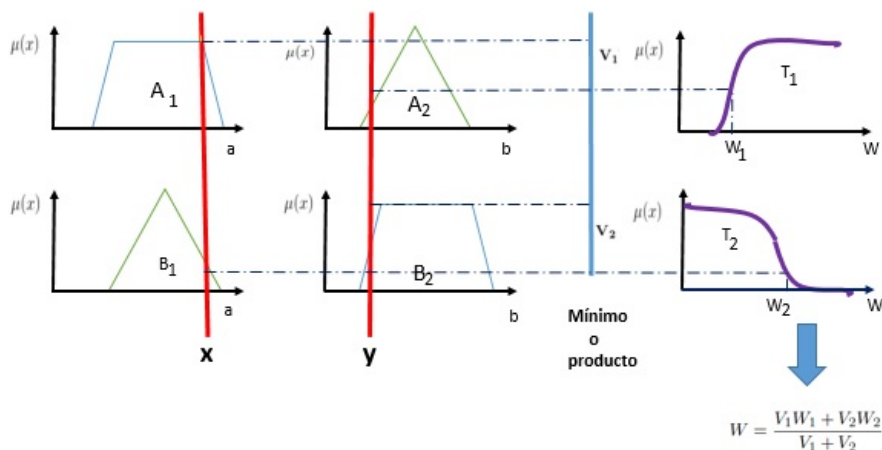


Figura 2.23: El modelo difuso Tsukamoto

En la subsección 2.7 de lógica difusa se ha visto diferentes tipos de funciones de inferencia, en este trabajo se toma un sistema de inferencia difuso Mandani, para la determinación del porcentaje en el envejecimiento ocurrido en los motores de inducción.

Una vez obtenidas las variables de entrada tales como los armónicos y las variables térmicas, se utiliza la transformada rápida de Fourier "FFT", para el análisis de señales discretas, que son evaluadas en los espectros en relación a la distorsión de la frecuencia y algunas leyes de la termografía, que permite la medición y visualización de las superficies con una gran precisión de un objeto en una zona de calor.

Para diagnosticar el grado de envejecimiento, se realizara un análisis comparativo entre la Fuzzy Toolbox Matlab y una Shell FuzzyApp, en una carga en vacío y una carga dinámica, en los resultados de estos mismos softwares.

## Capítulo 3

# Capítulo 3. Adquisición y procesamiento de señales

### 3.1. Introducción

Los primeros en estudiar el fenómeno de los armónicos, fueron los griegos cuando ellos se interesaron en el análisis de los instrumentos musicales, en especial en aquellos instrumentos que producen sonidos como lo fueron los tambores, algunos instrumentos de cuerdas, por ejemplo, una guitarra que producía una onda de oscilación.

En la antigüedad surge la necesidad de construir un dispositivo, para la detección de sismos, el cual consistía, en una jarra que en su interior tenía un péndulo, que sirve para indicar las direcciones de los movimientos en la superficie de la tierra (sismógrafo).

Durante los Siglos XVII y XVIII aparece las primeras teorías de los armónicos de Galileo Galilei, en la cual se explica el movimiento ondulatorio de una cuerda, y hoy en día se conoce, como el movimiento armónico simple.

Posteriormente, Isaac Newton desarrolla sus leyes universales en la cual la segunda está relacionada, con el fenómeno, que tiene lugar en los cuerpos que vibran, misma que recibe el nombre de la segunda ley o principio dinámico, y que tomaría de base a Taylor, para encontrar la solución teórica de un movimiento de una cuerda, quien por su trabajo es conocido, por su teorema de Taylor referente a las series infinitas.

Más adelante las teorías de Taylor fueron perfeccionadas, con el desarrollo de las derivadas parciales, por Daniel Bernoulli, Jeans D'Alembert, y Leonard Euler, sin embargo fue hasta que Josep Batista Fourier, cuando él estudiaba la propagación de calor y desarrollo las series de Fourier que son ampliamente utilizadas en el procesamiento de señales.

Las series de Fourier han sido aceptadas en diferentes áreas de la ingeniería como son: la electrónica de potencia, acústica, vibraciones mecánicas, termografía, reconocimiento automático del habla, procesamiento digital de señales, y entre otras más.

La adquisición de una señal analógica es continua y toma valores infinitos, algunos ejemplos de señales analógicas las encontramos en nuestro entorno son las variaciones de temperaturas en el ambiente, la presión, la velocidad, el desplazamiento de un cuerpo, el sonido, la frecuencias, etcétera.

Mientras que la adquisición de una señal digital y desde el de vista de la lógica, los valores son 0 y 1, pero cuando se discretiza una señal toma valores de acuerdo a la tensión de alimentación, por ejemplo, los impulsos eléctricos son alta y baja en la tensión, en la activación de una válvula, por medio de un controlador lógico programable (PLC).

Algunas aplicaciones de adquisición de señales son empleadas en el diagnóstico de fallas en los equipos eléctricos a nivel industrial, para determinar, los tipos de señales como son: las variables eléctricas, espectros de frecuencia en la distorsión de una señal, por medio del ruido, las variables térmicas, por medio de los espectros electromagnéticos en relación a la emisividad de un material, las variables armónicas, y entre otras más, [K.Alameh et al., 2015].

Para los monitores de las fallas en etapa temprana, es una de las mejores alternativas, en la prevención de fallas en el área de mantenimiento predictivo, en la cual es mediante la implementación de técnicas a bajo costos como son los equipos de ultrasonido, equipo para armónicos, equipos para vibraciones mecánicas, equipo termograficos, todos estos son pruebas no destructivas, que no afectan el proceso en una línea de producción industrial, [Shome et al., 2012].

Hoy en día los avances tecnológicos, mediante el procesamiento de señales digitales como las estadísticas de series de tiempo, análisis de correlación, y transformada rápida de Fourier (FFT) se han utilizado, para detectar fallas en los componentes del sistema, por ejemplo, en los motores de inducción, [Seker et al., 2008].

## 3.2. Metodología

La definición de las variables son aplicadas en está trabajo de investigación, para las medidas eléctricas como se muestra, en la tabla 3.1, donde se representa, por medio de abreviaciones los armónico de tensión y de corriente.

Otra consideración es la variable térmica, por medio de un espectro electromagnético, en relación a la emisividad de un material propuesto, para hacer una medición térmica, por lo

que se recomienda ver la tabla 2.3 del capítulo 2, en este caso se toma el cobre oxidado de referencia en el devanado de un motor de inducción con una emisividad  $\epsilon=0.76$ .

La metodología propuesta para determinar las variables de envejecimiento que afecta a un motor de inducción se muestran en la figura 3.1.

En este trabajo se utilizan los equipos de calidad de la energía, tarjeta de adquisición de señales, dos equipos para las mediciones de armónicos de tensión y corriente, y una cámara termográfica, para determinar las variables de estudio.

El propósito es la construcción de las bases de datos de las variables armónicas, y térmicas, para posteriormente su implementación, en un sistema experto difuso en el diagnóstico de envejecimiento en motores de inducción.

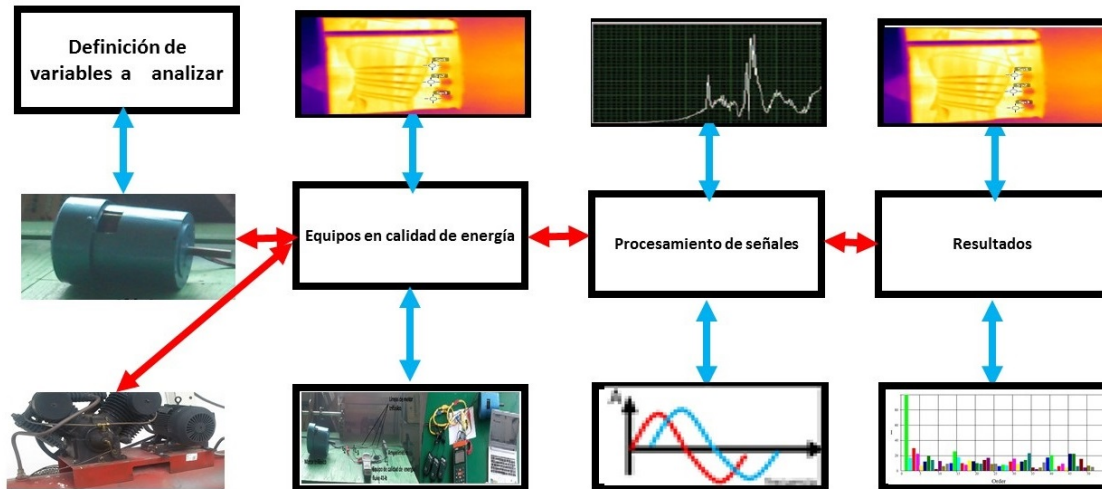


Figura 3.1: Metodología para adquisición y procesamiento de señales

Tabla 3.1: Abreviaturas de variables eléctricas

Abreviación eléctrica	Descripción de la variable eléctrica
& THD-F (V)	Distorsión armónica total de tensión (V)
% THD-F (C)	Distorsión armónica total de corriente (C)

### 3.2.1. Función y características de la cDAQ-9178 en Labview

Hay distintas técnicas de adquisición de señales para las detecciones de fallas en los motores de inducción, para lograr un rendimiento mejor en las líneas de producción de las empresas, siendo de bajo costo su implementación, en esta investigación se utilizó la tarjeta de procesamiento de señales cDAQ-9178, que está diseñada para colocar módulos de la misma familia de National Instrument, cómo son los NI-series, que incluyendo otros accesorios, como se observa en la figura 3.2, se muestra una interfaz de comunicación USB-2.0 de alta velocidad, un cargador de alimentación, 3 leds para detectar fallas en la conexión del cDAQ-9178, [Com, 2009]:

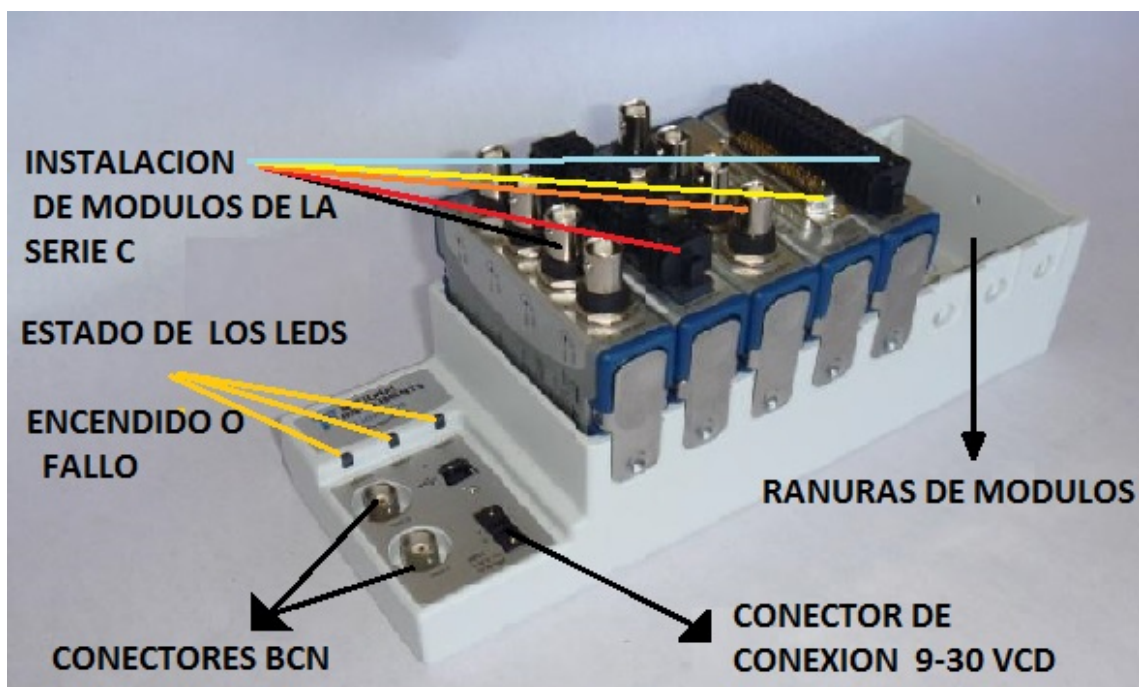


Figura 3.2: Partes del cDAQ-9178 y accesorios

#### 3.2.1.1. Funcionamiento y características de un NI-9219

El NI-9219 es un accesorio de la tarjeta cDAQ-9178. Éste equipo se muestra en la figura 3.3, donde tiene 4 conectores de 6 terminales, además proporciona la comunicación de 4 entradas analógicas.

A continuación se describen cada una de las terminales del NI-9219 para un canal, en la



siguiente tabla 3.2, ya que cada una de ellas tiene una función específica, por ejemplo al usar un termopar del tipo K, [OPE, 2007]:

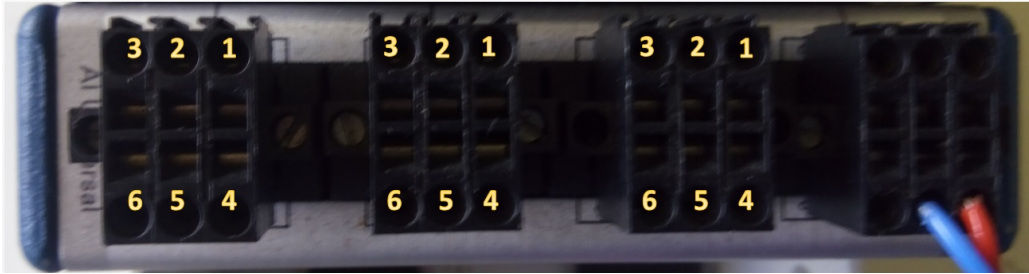


Figura 3.3: Partes principales del NI-9119

Tabla 3.2: Funcionamiento del NI-9119 en cada una de las terminales

No. terminal	Abreviación de la señal	Descripción de la señal
1	T+	Dato TEDS
2	T-	COM TEDS
3	EX+/HI	Excitación positiva o señal de entrada
4	HI	Entrada de señal positiva
5	EX-/LO	Excitación negativa o señal de entrada
6	LO	Entrada de señal negativa

Se puede uno ayudar, en las características del NI-9219, para tener resultados satisfactorios en una prueba. Las características son: los rangos de temperatura de  $-40$  a  $100$   $^{\circ}C$ , el límite de los canales analógicos, donde se usa una corriente de  $\pm 25$  mili Amper (mA) o voltaje de  $\pm 125$  mili Volt (mV), una velocidad máxima de 10 mili segundo (ms), en la utilización de todos los canales. Nota: se puede consultar, cualquier duda técnica, en la página Web de National Instrument en la sección NI-series, [OPE, 2007].

### 3.2.2. Procesamiento de señales por medio de Labview

Una vez detectada la falla en un motor de inducción se procede a realizar un muestreo en tiempo real, para determinar la variable térmica, por medio de una tarjeta de adquisición de señales c-DAQ 9178 de Labview, siguiendo los pasos, que se describen a continuación:

- Identificar en el chasis de la tarjeta cDAQ-9178, donde está el NI-9119.
- Identificar en el NI-9119, los bornes de su terminal se aprecia en la

Una vez realizadas los pasos anteriores, se procede a utilizar la interfaz de National Instrument, por medio de los siguientes pasos, que se describen a continuación:

- EL primer paso es verificar, que los componentes en la tarjeta cDAQ-9178, están bien conectadas, para no tener una falla al realizar la comunicación, en caso de ocurrir una falla en la tarjeta se identifica este, en una barra de leds que cambian a color rojo.
- El segundo paso es conectar el cable USB de la tarjeta cDAQ-9178, hacia el puerto USB de una computadora (PC), nota en caso de no detectar la comunicación entre el cable de comunicación y PC, entonces el sistema operativo de la PC instalara los controladores automáticamente, y, para verificar si la comunicación se realizó, con éxito es muy fácil, con solo ir a mi PC se identifica un icono del dispositivo instalado del dispositivo.
- Tercer paso para una fácil forma de buscar un programa en el entorno de Windows es por medio de una barra de tareas, donde se muestra, un icono de Windows, después dar un clic y aparece una nueva ventana, el siguiente paso es identificar en la ventana de Windows, y el programa de Sound National Vibration y dar un clic, y finalmente aparece la interfaz de este software.
- Cuarto paso una vez hecho el paso anterior, se procede a identificar, en la parte superior de la interfaz, en especial, en el lado izquierdo, el icono con la leyenda Add Step, después dar un clic, y se aparece una nueva ventana tal y como se observa en la figura 3.5.

- Quinto paso en la ventana Add Step se despliega las diferentes entradas analógicas y digitales, que se pueden utilizar, en este caso se utiliza un termopar se tiene que seleccionar la palabra en inglés "Termocouple", como se muestra en la figura 3.5, después dar un clic y aparece una nueva ventana, donde se verifica los canales disponibles del NI-919.

Por ejemplo, se hace una medición con un termopar dar un clic en el primer canal, y aceptar, y identificar la leyenda Run Step en la interfaz de Sound National Vibration y dar un clic sobre este mismo, para finalmente colocar el dispositivo en el devanado del motor de inducción se observa el dato adquirido de la temperatura de este equipo.

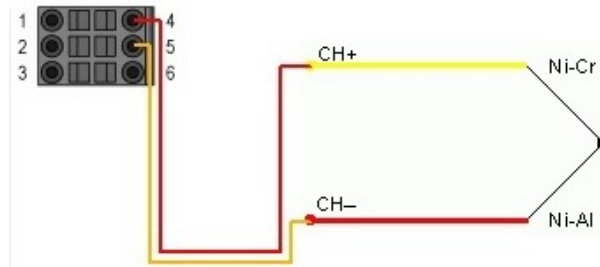


Figura 3.4: Diagrama de conexión de un termopar

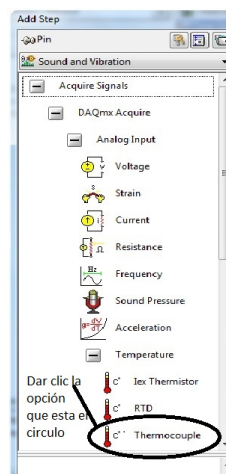


Figura 3.5: Ventana de la adquisición de señales para un termopar

Una vez hecho los pasos anteriores, se realiza la medición propuesta en este trabajo de investigación, para determinar la variable térmica, en la detección de fallas en los motores de inducción, que provocan el envejecimiento, donde se considera un incremento de la temperatura en el devanado de este equipo, y la finalidad de construir una base de datos adquiridos, por medio del equipo en calidad de la energía, que se describirán en las secciones de los resultados de este capítulo 3.

### 3.2.3. Procesamiento de señales por medio de un equipo Fluke 41-B

Los equipos en calidad de energía, desarrollan análisis de armónicos en tiempo real, en redes de alimentación trifásica, bifásica, y monofásica, por ejemplo, en nuestra aplicación para un motor de inducción, se puede usar un equipo Fluke 41-B, que permite observar una distorsión de la corriente total, que circula en las líneas de alimentación. Con el equipo Fluke 41-B se pueden hacer pruebas, identificando las líneas, L1, L2, y L3, depende de la conexión requerida en la prueba, y además en la figura 3.6, se muestra algunos accesorios como son: una interfaz RC-232, un gancho, 2 cables de color rojo y negro para una fácil identificación de las líneas de alimentación. Además este equipo soporta hasta 32 armónicos de corriente, de tensión, y de potencia [Flu, 1995]:

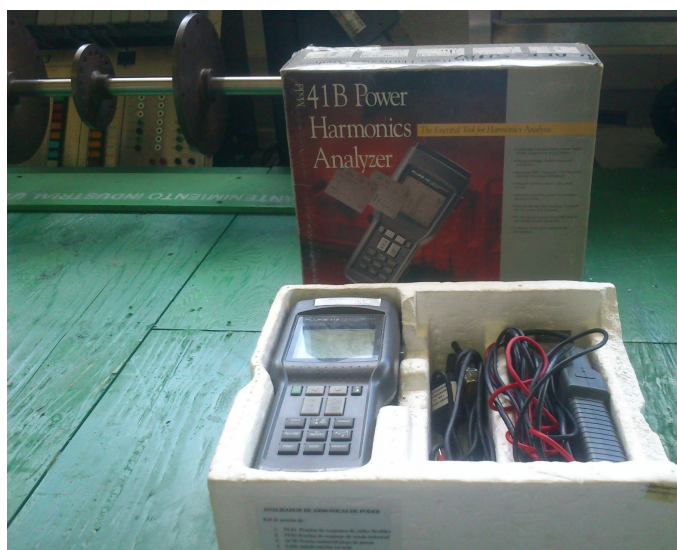


Figura 3.6: Los accesorios del equipo Fluke 41-B

Una vez familiarizado con los accesorios del equipo Fluke 41-B se procede a identificar los dos cables de diferentes colores, y un cable más en donde este tiene un amperímetro de gancho en el otro extremo, además estos son muy fáciles conectarlos, debido a que el equipo de armónicos en su parte superior se identifica por medio de colores de estos accesorios. Por ejemplo, en una conexión trifásica de un motor de inducción, lo primero que uno debe de hacer es verificar el tipo de conexión de acuerdo al manual de usuario del equipo Fluke 41-B, se muestra en la figura 3.7, [Flu, 1995]:

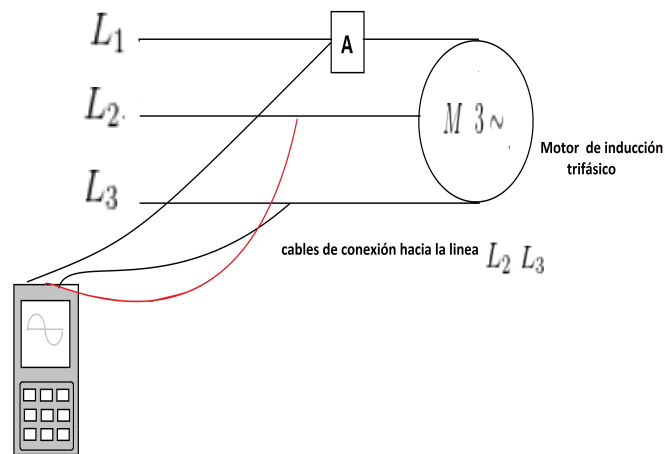


Figura 3.7: Diagrama de una conexión trifásica en un motor de inducción

Para determinar las variables de armónicos eléctricos como son: la tensión, y la corriente, por medio de una conexión delta, en un motor de inducción, previamente desconectado de la red alimentación eléctrica. Una vez desconectado el motor de inducción se procede a hacer un pequeño corte, en el aislante de los cables de alimentación de este equipo.

Después de haber hecho los pasos anteriores se conecta el motor de inducción hacia la línea trifásica, y este equipo se pone en operación, para iniciar con las mediciones armónicas.

La velocidad nominal (RPM) se alcanza, y se procede a conectar el equipo Fluke 41-B, por medio de los siguientes pasos, que se describen a continuación:

- Se identifica las líneas de alimentación, que dependen del tipo de conexión eléctrica en un motor de inducción o en el diagrama de conexión propuesto del equipo, para este caso se identifica las tres líneas como son: la línea 1  $L_1$ , la línea 2  $L_2$ , y la línea tres  $L_3$ .
- Una vez hecho el paso anterior se procede a hacer una conexión eléctrica trifásica como se mostró, en la figura 3.7 anterior, con la finalidad de medir los armónicos eléctricos en la  $L_1$ , como se muestra en la figura 3.8 se utiliza un equipo Fluke 41-B y su respectiva conexión eléctrica, en el motor de inducción.
- Identificar en el equipo Fluke 41-B, un botón de color verde que permite encender al oprimir este.
- Después Identificar en el equipo Fluke 41-B, un rectángulo de color gris, que permite visualizar las diferentes variables armónicas como son: la tensión, la corriente, y la potencia como se muestra en la figura 3.9.
- En el botón de color gris del equipo Fluke 41-B se identifica la simbología como: la tensión (V), la corriente (I), y la potencia (W), donde se muestra en la figura 3.9, ya que estos símbolos permiten determinar parámetros con solo al oprimir este.
- En el lado derecho del equipo Fluke 41-B se encuentra un botón gris, que tiene símbolos gráficos como: una gráfica que representa una onda sinusoidal, una gráfica de barras, y una tabla que se describen a continuación:
  - En la primera se observa en la pantalla del equipo Fluke 41-B, una onda sinusoidal en relación a las variables de armónicos de (V),(I),(P).
  - En la segunda se observa en la pantalla del equipo Fluke 41-B algunos porcentajes de armónicos de (V),(I),(P) en relación a las variables RMS de estas.
  - En la tercera se muestra en la pantalla de este equipo los valores de los armónicos de (V),(I),(P).
  - Todas estas condiciones mencionadas anteriormente se obtienen con solo presionar una vez el botón, en la medición de armónicos de (V),(I),(P), como se muestra en la figura, 3.9.

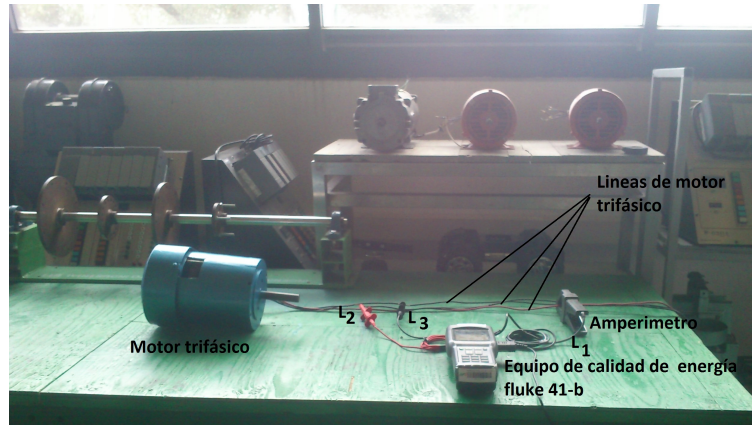


Figura 3.8: Implementación del equipo Fluke 41-B en un motor de inducción



Figura 3.9: Algunas partes del Equipo Fluke 41-B

Para una conexión de una línea trifásica, que alimenta a un motor de inducción, solo se requiere intercambiar las líneas de alimentación del equipo, es decir, se cambia el amperímetro de gancho a otra línea de este equipo, por ejemplo si requieres los valores

armónicos de la  $L_3$ , debes poner el amperímetro de gancho en la  $L_3$ , después el cable de color rojo con una punta se va hacia la  $L_1$ , y finalmente el cable de color negro con una punta hacia  $L_2$ .

En este trabajo de tesis se propone una conexión trifásica, en 2 motores de inducción de diferentes clasificaciones de aislantes de estos equipos tales como el de tipo B y tipo F, con la finalidad de construir las bases de datos que se describen en la sección de resultados de este capítulo.

Después de haber construido las bases de datos de los motores de inducción, por medio del equipo Fluke 41-B, para posteriormente estos datos obtenidos servirán, en la construcción del sistema experto difuso en el diagnóstico de envejecimiento de motores de inducción.

#### **3.2.4. Procesamiento de señales equipo “Extech PQ-3350”**

El equipo Extech PQ-3350 es especialmente utilizado en los sistemas de potencia de las compañías industriales, por ejemplo, una de sus aplicaciones consiste en medir los armónicos eléctricos, e incluso las perturbaciones que generan los motores de inducción y todo aquel equipo con carga no lineal, conectado a la red, para obtener las variables de tensión y de corriente.

En la figura 3.10, se muestra algunos accesorios del equipo Extech PQ-3350 como son: los conectores de tensión, tres donas de corriente, tres puntas o caimanes para los conectores de tensión, la comunicación USB y un cargador del este equipo.

Nota: el equipo Extech PQ-3350 soporta hasta 100 armónicos al hacer una medición de los armónicos eléctricos en instalaciones industriales, [EXT, 2013]:



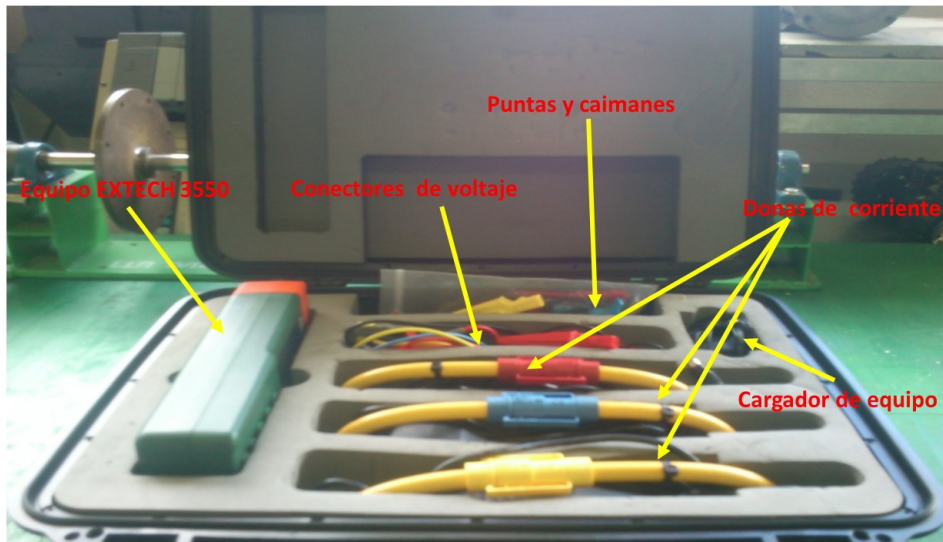


Figura 3.10: Equipo Extech PQ-3350 y sus accesorios

#### 3.2.4.1. Partes del equipo “Extech PQ-3350”

En la figura 3.11, se muestra las características del equipo Extech PQ-3350, en su parte superior se encuentran los conectores de tensión y de corriente, en la parte central se encuentra la pantalla, donde se visualiza los valores de armónicos eléctricos al hacer una medición.

La parte de teclas, se utiliza para modificar los parámetros para realizar diversas mediciones de los armónicos eléctricos, donde se pueden observar graficos o salida de datos numéricos, la representación de una onda sinusoidal de corriente con una perturbación a esto le llama ruido, o una gráfica de barras, que indica el orden de armónicos de la tensión presente.

En la parte inferior se encuentra las distintas funciones, por medio de botones, que sirven, para hacer el uso correcto del equipo Extech PQ-3350, [EXT, 2013]:



Figura 3.11: Partes principales del equipo “Extech PQ-3350”

#### 3.2.4.2. Descripción del panel principal “Extech PQ-3350”

En la figura 3.12, se muestra el funcionamiento de los botones que son representados por medio de iconos teniendo una función específica en el equipo, en este caso se toma en consideración algunas opciones que permite hacer una prueba para medir armónicos electricos, como se describen en la tabla 3.3, donde está la función del botón y su descripción del equipo, [EXT, 2013]:

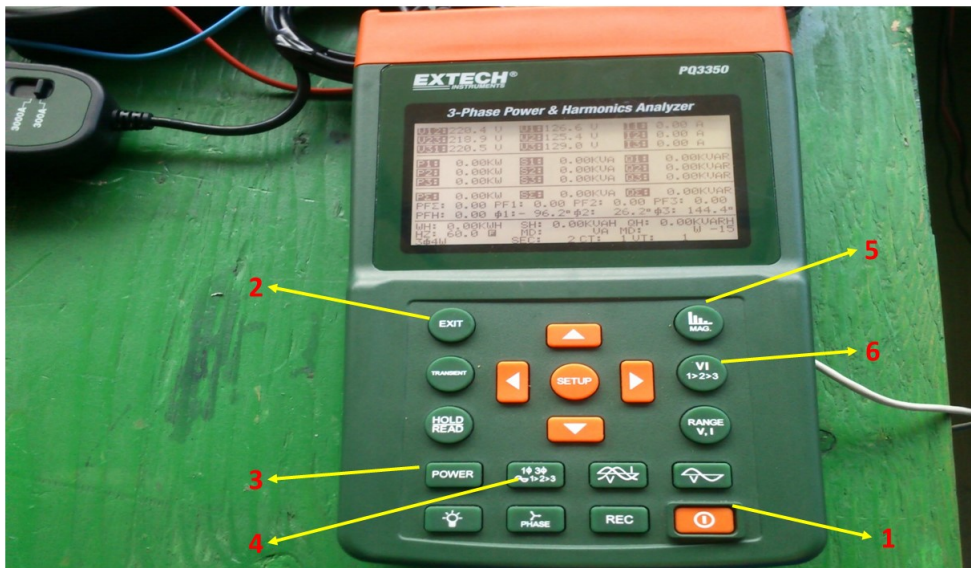


Figura 3.12: Descripción del panel de control Extech PQ-3350

Tabla 3.3: Descripción del panel de control del equipo “Extech PQ-3350”

Partes del equipo “Extech PQ-3350”	Característica
1	Encendido y apagado del equipo.
2	Salir de la opción SETUP (cambiar configuración del equipo)
3	Potencia
4	Cambiar a números de líneas que depende del tipo de conexión requerida para una prueba.
5	Gráfica de barras para la representación de los armónicos de líneas
6	Cambio de líneas de tensión o corriente

### 3.2.4.3. Conexión trifásica Equipo “Extech PQ-3350”

En este trabajo se utilizó un motor trifásico de inducción, ya que es muy importante identificar las líneas de alimentación en la caja de bornes o tableros de control eléctricos (relevadores o contactores), en la figura 3.13, se muestra los diferentes colores de los conectores de la tensión y la corriente, para determinar el porcentaje de armónicos de corriente y de tensión, [EXT, 2013]:

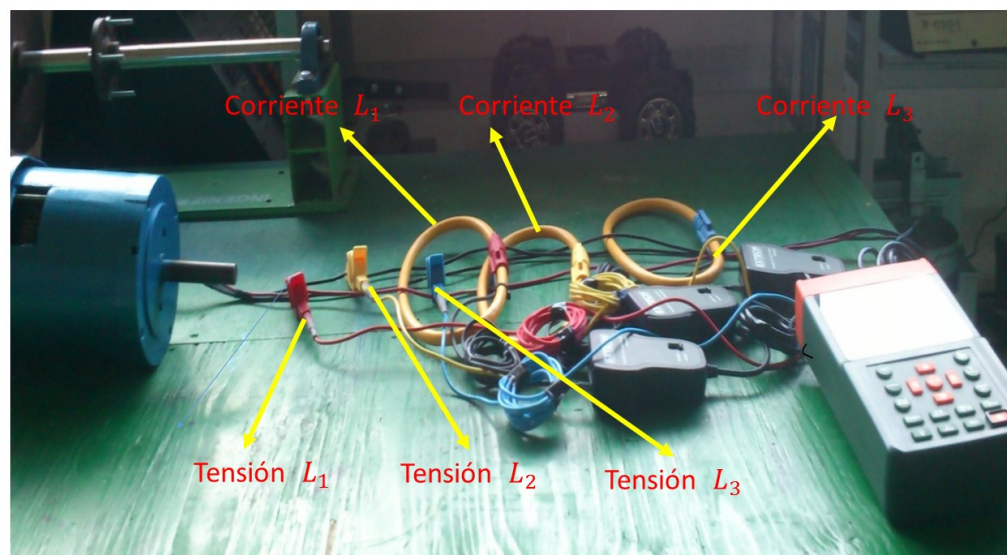


Figura 3.13: Ejemplo de una conexión trifásica "carga en vacío"

#### **3.2.4.4. Procesamiento de señales por medio del equipo Extech PQ-3350 “carga dinámica”**

Para hacer una prueba es necesario haber consultado la sección 3.2.4 anterior, donde se describió las características y la descripción general de los botones de control, y se hace una propuesta de una conexión trifásica, para hacer una prueba en una carga dinámica, con el objetivo de determinar los armónicos de tensión y de corriente por medio de los siguientes pasos, que se describen a continuación:

- Se debe conectar el equipo Extech PQ-3350, para cada una de las entradas en este caso las tensiones, y las corrientes como se especificó anteriormente, en la conexión trifásica.
- Debes Identificar las línea de alimentación del motor de inducción en el tablero de control eléctrico como se observa en la figura 3.14.
- Una vez hecho el paso anterior con mucho cuidado conecta en el tablero de control eléctrico las tres donas de corriente en las líneas de alimentación, y los tres cables de tensión del equipo Extech, ya que estos se pueden conectar en los bornes de las líneas trifásicas de alimentación, en un contacto o un relevador.
- Se debe verificar, que los cables, y donas están bien conectados, en las tres líneas de alimentación, después se enciende el equipo Extech, y en su pantalla aparece una gráfica con una onda sinusoidal y muestra el valor de los armónicos de tensión en ese instante de tiempo de la medición.
- Después se debe Identificar el botón, que tiene una gráfica de barras, que muestra un gráfico en relación al orden de los armónicos de corriente o tensión.
- Se debe Identificar el botón con las simbologías de tensión-corriente (V-I), y observar como automáticamente en la pantalla cambia la variable, que se requiere medir, es decir de la tensión o corriente.

Una vez hecho los pasos anteriores para medir las variables de armónicos eléctricos se puede utilizar el software del equipo Extech PQ-3350 como se describen a continuación:

- Se debe conecta el cable con puerto USB hacia la Computadora Personal (PC).

- Buscar el icono con la leyenda Power Harmonic, después dar un clic y aparece una nueva ventana (interfaz del software).
- En el software Power Harmonic, se debe identificar en la parte izquierda de la barra de tareas la leyenda Harmonic entonces dar un clic, y tiene dos opciones de orden de los armónicos de 50 % y 100 %.  
Por ejemplo, se propone 50 %, como se muestra en la figura 3.15, donde se representa el porcentaje total de los armónicos de tensión en el instante de tiempo a medir.
- Se debe identificar la tensión-corriente (V-I), y dar un clic para ver un cambio automático de la tensión a corriente.



Figura 3.14: Prueba en una carga dinamica

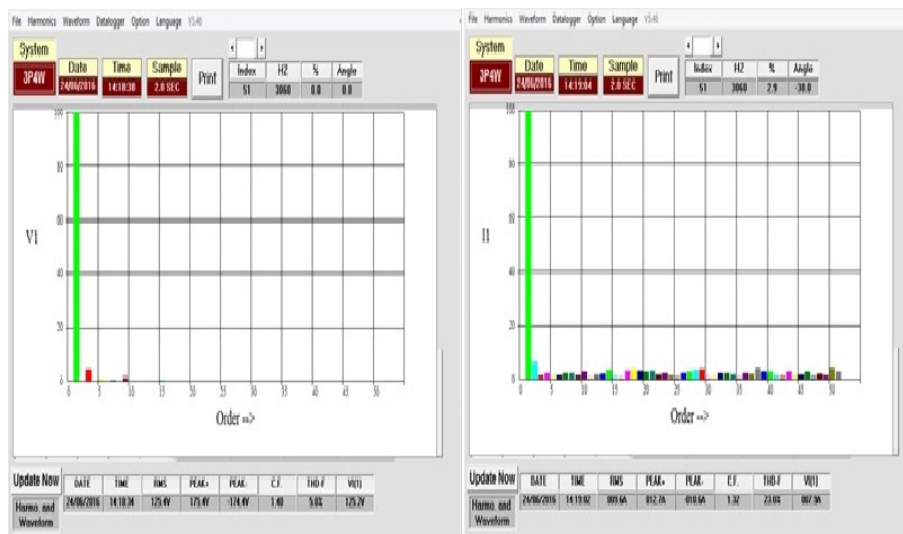


Figura 3.15: Entorno del Software Power Harmonic

### 3.3. Adquisición de señales Equipo Flir

Con esta prueba obtenemos el grado de calentamiento en los devanados en los motores de inducción (problemas de calidad de energía), la mayoría de las fuentes bibliográficas consideran los incrementos de la temperatura del 10 %, como un problema serio de envejecimiento.

Se genera calor excesivo en el interior de un motor, una de las fallas más comunes es el sobrecalentamiento de sus devanados , y también otros problemas en las instalaciones eléctricas industriales, tales como fallas en: tableros de control, switches, contactores. Una técnica para el diagnóstico de fallas, es por zonas de calor medio al utilizar las cámaras termográficas. Una ventaja es que no se necesita contacto en las partes a analizar, además de utilizar la emisividad en relación a los espectros electromagnéticos. En este trabajo se va usar una cámara termográfica de la marca FLIR, para el análisis espectral de calor, que consiste en identificar la zona de calor y tomar el espectro de la zonas del motor de inducción, y finalmente hacer un fácil procesamiento, por medio del software Flir Tools.

### 3.3.1. Una cámara termográfica Flir

Con la aplicación de la cámara termográfica detectamos fallas por calor sin afectar el proceso de una línea de producción, este equipo se muestra en la figura 3.16:



Figura 3.16: Una cámara termográfica

En la figura 3.17 se representa, por medio de letras mayúsculas cada una de las funciones del equipo Flir, en la tabla 3.4 se describen las letras y el funcionamiento [Fli, 1995]:





Figura 3.17: Partes de una cámara termográfica frontal

Tabla 3.4: Descripción de la parte superior "Cámara Flir" 1-2

Partes de una cámara Flir	Característica
A	Pantalla tipo screen LCD.
B	Antena para la comunicación inalámbrica.
C	Botón de ampliación digital.
D	Botón de tipo programable.
E	Palanca para seleccionar diferentes menús.
F	Botón tipo menú en la caja de la pantalla.
G	Permite seleccionar tipos diferentes en una imagen como son: térmica, digital, visuales, y de la fusión térmica.
H	Botón de tipo A/M: este botón tiene 2 funciones es decir si presionamos el botón automáticamente cambia de automático (A) a manual (M) o viceversa.

Continúa en la página siguiente.

Tabla 3.4: Descripción de la parte superior “cámara Flir” 2-2

Partes de una cámara Flir	Característica
I	Botón para un archivo: si presiona el botón nos permite abrir o cerrar una galería de las imágenes disponibles.
J	Cinta sujetadora para la mano
K	Botón de tipo encendido o apagado

### 3.3.1.1. Partes de una cámara Flir del lado frontal

En la figura 3.18, se muestra una cámara Flir del lado frontal, con su partes relacionadas, por medio de letras, que tiene cada letra una función en la descripción, en la tabla 3.5, [Fli, 1995]:

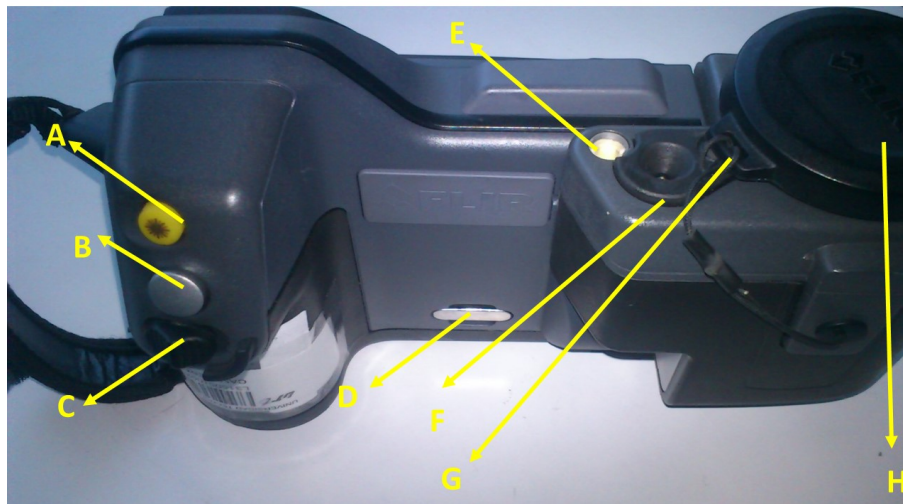


Figura 3.18: Partes de una cámara termográfica del lado frontal

Tabla 3.5: Función de la parte frontal en una cámara Flir

Partes de una cámara termográfica	Descripción general
A	Botón apuntador de tipo láser.
B	Vista preliminar y como guardar una imagen
C	Auto enfoque
D	Punto de la unión de la cinta para el cuello de la cámara
E	Lámpara para un video
F	Lente de la cámara digital
G	Botón de liberación para las lentes de infrarrojos adicionales
H	Lentes de tipo infrarrojo

### 3.3.1.2. Elementos de la pantalla en una cámara Flir

Al utilizar una cámara Flir se debe usar la pantalla ya que es del tipo táctil, en la pantalla se ven desplegados algunos iconos, que tienen funciones específicas, como se muestra en la figura 3.19, y además se describen cada uno por los números, en la tabla 3.6, [Fli, 1995]:

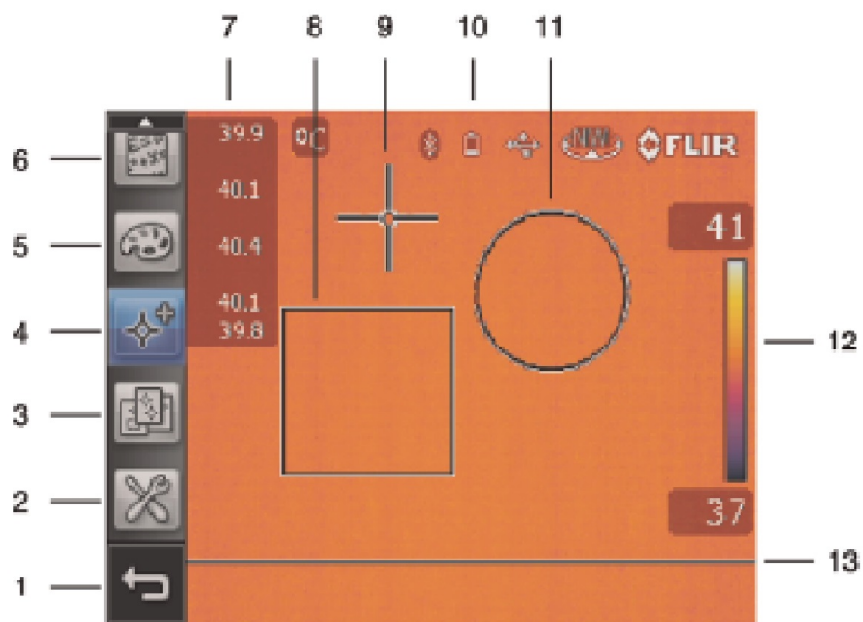


Figura 3.19: Partes de la pantalla en una cámara Flir

Tabla 3.6: Descripción de la pantalla en una cámara termográfica Flir 1-2

Pantalla Flir	Descripción
1	Botón de retroceso en la barra de herramientas.
2	Modo de un botón en la barra de herramientas.
3	Botón que está preestablecido en la barra de herramienta.
4	Botón en la barra de herramientas.
5	Botón en la barra de paleta.
6	Botón que sirve de parámetro en la barra de herramienta.
7	Tabla de resultado.
8	Caja de medición.
9	Medidor en un punto de medición.

Continúa en la página siguiente.

Tabla 3.6: Descripción de la pantalla en una cámara termográfica Flir 2-2

Pantalla de una cámara Flir	Descripción
10	Diferentes estatus y modos de iconos por ejemplo Bluetooth, pila, USB, y compas.
11	Medición de un círculo
12	Escala de una temperatura
13	Línea de una medición

### 3.3.1.3. Tabla de emisividad en cámara Flir

La efectividad del uso de una cámara termográfica depende del tipo de alcance (píxeles). Tomándose en cuenta a partir del tipo de material a medir, su emisividad. En este trabajo se va utilizar una cámara termográfica Flir, que proporciona los valores de la emisividad ( $\epsilon$ ), en la tabla 3.7, por medio algunos materiales depende del tipo de prueba a realizar, [Fli, 1995]:

Tabla 3.7: Emisividad de algunos materiales en una cámara Flir 1-2

Materiales	Emisividad $\epsilon$	Materiales	Emisividad $\epsilon$
Aluminio rugoso	0.07	Vidrio	0.97
Aluminio materializado	0.81	Hierro fundido	0.64
Ladrillo	0.81	Hierro oxidado	0.69
Ladrillo	0.81	Hierro oxidado	0.69
Carbón	0.95	Madera de roble	0.90
Cemento	0.95	Película de aceite	0.003 o 0.27
Cobre oxidado	0.78	Película de aceite	0.13 o 0.27
Cobre pulido	0.05	Aceite crudo	0.82
Pintura plástica	0.94	Acero ino-oxidado	0.85
Papel blanco	0.70	Acero oxidado	0.79
Escayola	0.86	Acero pulido	0.07

Continúa en la página siguiente.

Tabla 3.7: Emisividad de algunos materiales en una cámara Flir 2-2

Materiales	Emisividad $\epsilon$	Materiales	Emisividad $\epsilon$
Goma, negra	0.95	Agua destilada	0.96
Piel humana	0.98	Escarcha	0.98
Tierra seca	0.92	Nieve	0.85
Tierra sat. Agua	0.95		

#### 3.3.1.4. Adquisición de señales por medio de una cámara termográfica Flir

El objetivo de determinar los incrementos de la temperatura, en el devanado de un motor de inducción, por medio de monitoreos constantes en tiempo real y por tiempo definido, para la adquisición y procesamiento de señales. el muestreo se desarrolló en cada hora, por un lapso de 60seg., los datos obtenidos servirán para la construcción de un sistema experto difuso en el diagnóstico de envejecimiento. Por lo que se recomienda, estar familiarizado con la cámara termográfica, siguiendo los pasos que se describen a continuación:

- El motor de inducción tiene que estar en operación continua para poder observar el comportamiento de calor en los devanados de este equipo.
- Se toma la cámara termografica y se enciende. Pantalla del display está encendida se muestra los diferentes iconos, donde se debe identificar el icono de parámetros, después dar un clic, y se abre una nueva ventana.
- Identificar en la nueva ventana, y buscar la opción de la emisividad en este caso se debe usar el valor de cobre oxidado=0.78, después dar un clic y listo, ya se tiene el espectro electromagnético en relación con el material a evaluar.
- Identificar la zona de falla, en este caso el devanado de un motor de inducción, después toma la cámara termográfica, y coloca tu mano en la cinta, con la finalidad de que no se te caiga, además también puedes desplazar, en un ángulo no mayor de 180<sup>0</sup>C, en donde está un lenta infrarrojo, ya que este se despliega, para una mejor captura de la imagen térmica.

- Para capturar una imagen térmica en la zona de falla propuesta se puede uno desplazar, por medio de un cursor, para determinar el valor térmico.
- Después guarda la imagen térmica con solo dar un clic en el botón, de la parte frontal, y en caso de que la imagen capturada, no es la ideal para la medición, se puede tomar otra, con la opción de auto enfoque, para tener una mejor nitidez, y más precisión en la medición térmica.
- Una vez guardada la imagen térmica, el siguiente paso es descargar la imagen, por medio del software del equipo térmico, lo primero es ir a inicio de Windows y buscar un ícono, que dice Flir Tools, dar un clic, y aparece una nueva ventana, donde te dan 4 opciones, y dar un clic, en la leyenda que se llama importar imagen de cámara, y finalmente aceptar.
- Se debe visualizar la imagen térmica en un PDF, en la parte superior de la interfaz Flir Tools, identifica la leyenda crear informe, y dar un clic en la opción exporta, y se guarda un PDF, con la extensión, por ejemplo, el nombre del PDF es prueba.pdf, enseguida aceptar, para finalmente se muestre en la figura 3.20:

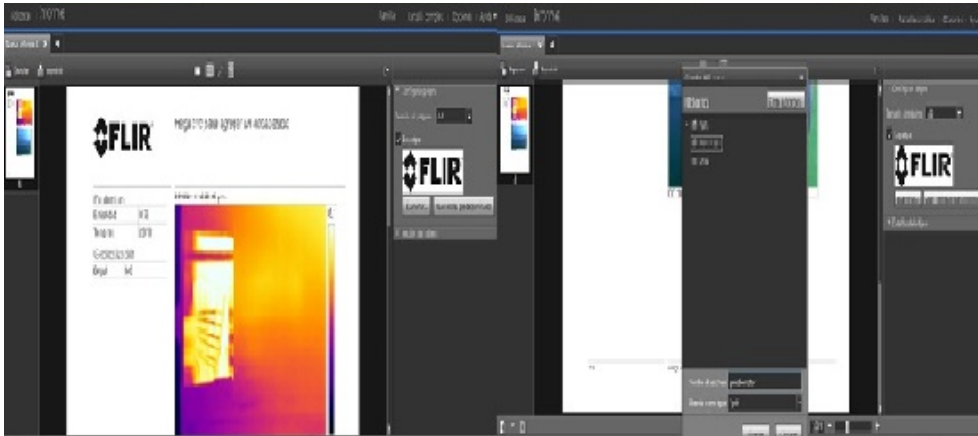


Figura 3.20: Imagen térmica Software Flir Tools

### 3.3.2. Medidas con los distintos equipos de calidad de energía

Para entender los resultados de las variables eléctricas, en un motor eléctrico como la tabla 3.1 anterior, donde se explica cada una de estas como son: la tensión armónica

y la corriente armónica, además también la variable de temperatura obtenida en los devanados de este mismo equipo, como se mencionan a continuación:

- Para las mediciones de armónicos eléctricos se hizo algunos monitores constantes, que permiten determinar las variables eléctricas en un motor de inducción, al utilizar dos equipos diferentes, para los armónicos como son: el equipo Fluke 41-B, y el equipo Extech PQ-3350, para una mejor comprensión consulte la sección 3.2.3, 3.2.4.
- Para las mediciones de temperatura se hizo algunos monitores constantes, que permiten determinar la variable térmica en el devanado de un motor de inducción, al utilizar dos equipos térmicos diferentes como son: una tarjeta de adquisición de señales, y una cámara termográfica Flir, para una mejor comprensión consulte la sección 3.2.1, 3.3.
- Los equipos en calidad de energía, permiten determinar las variable eléctricas y térmica, en este trabajo de investigación se toma en consideración un muestreo de 30 datos y 20 datos, ya que algunas veces no es necesario tomar en cuenta todas las reglas de inferencia difusa, en observar el grado de envejecimiento en un motor de inducción, para que el experto en el área de mantenimiento verifique si es necesario hacer un mantenimiento preventivo a este equipo.

### **3.3.2.1. Resultados del monitorio por el equipo Fluke 41-B y dos equipos térmicos**

El muestreo para determinar la variable eléctrica y térmica, por medio de un motor de inducción, en vacío se hace en un intervalo de tiempo de 35 minutos, cada uno.

La finalidad de monitorear los valores armónicos de tensión y de corriente, en las líneas de alimentación del motor de inducción en vacío en la línea 1, además la temperatura del devanado de este equipo, ya que más adelante estos datos son las entradas, en la construcción del sistema experto difuso.

Las entradas son los armónicos de tensión ( $AV\%$ ), los armónicos de corriente ( $AI\%$ ), y por último la temperaturas en el devanado del motor ( $TD^{\circ}C$ ), en la tabla 3.8:



Tabla 3.8: Base de datos aplicados para una carga en vacío

Muestras	Fluke 41-B		NI-9119	Cámara Flir
	AV %	AI %	TD <sup>0</sup> C	TD <sup>0</sup> C
1	1	2.3	28.5	24.2
2	0.9	2.1	28.4	26.6
3	0.8	2.7	31.7	27.2
4	1.1	2.3	28.3	26.6
5	1.1	3.7	29.3	26.2
6	1.1	2.8	30.2	27
7	1.2	2.5	31.2	28.2
8	1	2.4	30.9	28.4
9	0.8	6.1	28.5	28.0
10	0.8	3.6	28.4	25.8
11	1	4.5	29	26
12	0.9	4.8	29.3	26.2
13	1	5.1	29.6	26.4
14	1.1	4.8	29.2	26.7
15	1	5.2	29.4	27.8
16	1	5	28.89	27.5
17	1.1	2.2	28.5	27.7
18	1	3.5	28.4	27.9
19	0.9	3.3	29	28.5
20	0.8	2.8	29.3	28.6
21	0.9	6.1	29.6	29
22	0.9	3.4	29.2	28.9
23	0.9	1.2	29.4	28.95
24	0.9	3.4	28.89	28.82
25	0.7	5.1	23.3	22.5
26	0.8	5	27.3	25.4
27	0.9	4.4	28.3	26.7
28	0.9	4.9	30.2	29.5
29	0.8	2.3	26.3	25.6
30	0.7	2.2	27	26

### 3.3.2.2. Resultados del monitorio por el equipo Extech PQ-3350 y una cámara termográfica Flir

El muestreo para determinar la variable eléctricas y térmica, por medio de un motor de inducción con una carga dinámica se hace en un intervalo de tiempo de 1 hora, además el equipo trabaja 10 horas, en abastecer aire comprimido en algunos equipos neumáticos instalados en el laboratorio de mantenimiento predictivo.

La finalidad de monitorear los valores armónicos de tensión y de corriente, en las líneas de alimentación del motor de inducción con una carga dinámica en la línea 1, además la temperatura del devanado de este equipo, ya que más adelante se toma estos datos como las entradas, en la construcción del sistema experto difuso.

Las entradas son: los armónicos de tensión (AV %), los armónicos de corriente (AI %), y por último la temperatura en el devanado del motor ( $TD^{\circ}C$ ), en la tabla 3.9:

Tabla 3.9: Base de datos aplicados para una carga dinámica 1-2

Muestras	Extech PQ3350		Camara Flir
	AV %	AI %	$TD^{\circ}C$
1	5.00	25.0	30.5
2	4.9	24.5	38.9
3	5.2	26.1	40.1
4	5	24.3	41.5
5	4.9	27.2	42.8
6	4.9	27.5	44.6
7	4.75	28	45.9
8	5.2	28.8	49.6
9	5.6	26.6	51.2
10	5	25.2	35.4
11	5.6	24.6	37.5
12	5.4	24.6	39.7
13	5.3	29.2	40.3
14	5.6	30.2	41.9
15	4.9	29.2	42.7
16	5.8	31.6	43.86
17	5.2	26	31.3

Continua en la página siguiente.

Tabla 3.9: Base de datos aplicados para una carga dinámica 2-2

Muestras	Extech PQ3350		Camara Flir
	AV %	AI %	TD <sup>0</sup> C
18	5.8	25.5	37.7
19	5.5	26.1	40.9
20	5.3	24.3	43.7

## Capítulo 4

# Capítulo 4. Modelado e implementación del sistema experto difuso

### 4.1. Sistema de inferencia Mandani

En esta investigación se modela un sistema de inferencia Mandani, este es uno de los más aplicados por su fácil programación, al utilizar las teorías de lógica difusa como son: la T-norm, y la S-conorm, relacionados con reglas de inferencias hechas, al estudiar diversos casos.

Las reglas de inferencia difusa “si-entonces”, tienen la función de tomar las decisiones de acuerdo a un subconjunto de una entrada, y una salida del universo, a los parámetros de la función de pertenencia, al combinar las T-norms, se le llama proceso de fusificación.

La siguiente etapa, es el proceso de la desdifusificación, una vez hecha la fusificación se utiliza el método del centroide o centro de gravedad, que permite obtener un valor difuso.

En la figura 4.1 se representa por medio de bloques las distintas etapas en el desarrollo del sistema experto difuso, esto para el diagnóstico de envejecimiento en los motores de inducción.

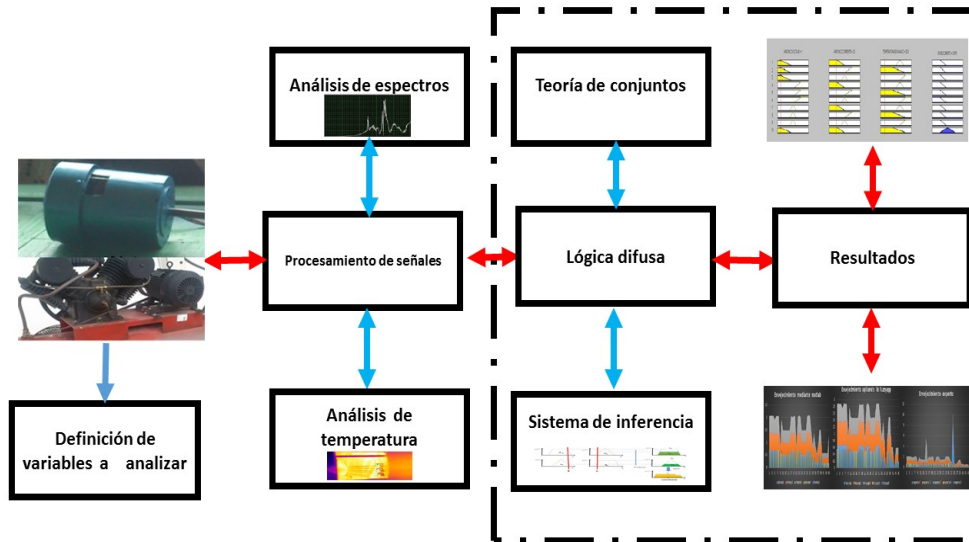


Figura 4.1: Metodología para el sistema experto difuso

Los dos primeros bloques son: el procesamiento y la adquisición de señales aplicando las series de Fourier, en especial la transformada rápida de Fourier, por su fácil implementación en cálculos computacionales.

La mayoría de los equipos para análisis o adquisición de variables de comportamiento utilizan las series de Fourier, para determinar: variables eléctricas, térmicas, y acústicas. En este trabajo se obtuvieron mediciones eléctricas de tensión, corriente y frecuencia y térmicas con aplicación de una cámara termográfica.

Para el cuadro mostrado con guion largo y punto se tienen dos bloques, el primero representa la base de datos que permite la construcción del sistema experto difuso en relación a las funciones de pertenencia, el segundo muestra los resultados en forma gráfica. En este trabajo se proponen algunas especificaciones en el funcionamiento de los motores de inducción, como se describen a continuación:

- Se toma la temperatura máxima de los motores de inducción en base a la norma NEMA, que se mencionó en la tabla 2.1 del capítulo 2, en el que se identifica los diferentes tipos de equipos.

- Se debe tomar la tensión máxima, la corriente máxima, en los motores de inducción, con la finalidad de tener los rangos de las funciones de pertenencia propuestas, para el sistema experto difuso.
- Los fabricantes en motores de inducción consideran los armónicos de tensión y corriente entre 5 % nominal, además, garantizan un funcionamiento estable en su operación.
- Se toma en cuenta el tipo de aislante B y F, que dependen directamente de las pruebas que se realizaron y son: pruebas para carga en vacío y carga dinámica.

La metodología para este trabajo de investigación es el desarrollo de una propuesta para el diagnóstico de envejecimiento en los motores de inducción, a través de:

- Adquisición de variables de energía eléctrica y térmica.
- Determinación de variables de frontera.
- Desarrollo de sistema de inferencia difusa con aplicación de Fuzzy Toolbox de Matlab y Shell FuzzyApp.
- Creación de reglas de inferencia.
- Obtención de resultados.

En las siguientes subsecciones de este capítulo se definirán las variables lingüísticas de entrada y salida para una carga en vacío, y una carga dinámica, con la finalidad de construir las entradas y salidas del sistema experto difuso tipo Mandani, para determinar el grado de envejecimiento de motores de inducción.

Para observar un mejor resultado en el grado de envejecimiento, se desarrollaron diversos muestreos, tomando como ejemplo para mi estudio 5 muestreos, con diferentes parámetros para la construcción de las variables lingüísticas de entradas y salidas, por lo que es necesario la utilización de las funciones pertenencia (convertir un dato duro a difuso).

La justificación de utilizar funciones de pertenencia en la lógica difusa, depende de la aplicación. En este trabajo se van a utilizar la función triangular, la trapezoidal, y pi, para cuantificar las variables lingüísticas.

#### 4.1.1. Construcción del sistema experto difuso “carga en vacío” “muestreo 1”.

Para la construcción del sistema experto difuso se proponen tres entradas y una salida, donde las entradas son: los armónicos de tensión, los armónicos de corriente, y la temperatura en el devanado, y por último una salida que se llama envejecimiento como se definen a continuación:

La primera entrada es la variable lingüística armónicos de tensión, toma los valores de referencia la red de alimentación eléctrica  $THD_V$ , después se definen los subconjuntos de este universo como son: los armónico de tensión bajo (AVB), los armónico de tensión medio (AVM), y el armónico de tensión alto (AVA), tomando para este caso al quinto armónico, con un factor de potencia (FP)= $0.95 \pm$ , que especifican los fabricantes, para un funcionamiento estable en los motores de inducción, [Weinbissinger, 2010].

La primera variable lingüística es la parte esencial de la construcción de un diagrama, donde se toma de referencia el armónico nominal de tensión, como se aprecia en la tabla 4.1 se representa los parámetros de armónicos en tensión. Una vez construidos los límites de la función de pertenencia anterior se procede a la graficación, como se aprecia en la siguiente figura 4.2, en donde se representan las funciones de pertenencia graficadas en los distintos intervalos propuesto en la tabla 4.1, armónicos de tensión baja (AIB), armónico de tensión medio (AIM), armónico de tensión alta (AIA).

La segunda variable lingüística son los armónicos de corriente  $THD_I$ , a su vez, esta se divide en subconjuntos como son: armónicos de corriente baja (AIB), armónico de corriente medio (AIM), armónico de corriente alta (AIA), en la tabla 4.2 se representan los subconjuntos de armónicos de corriente, con las funciones de pertenencia, y sus respectivo parámetros. Una vez conocido los parámetros se procede a construir la gráfica de funciones de pertenencia con sus respectivos parámetros, para observar los distintos intervalos en la figura 4.3.

La tercera variable lingüística es temperatura, que está definida por medio de sus respectivos subconjuntos como son: la temperatura del devanado baja (TDA), la temperatura en devanado medio (TDM), y la temperatura del devanado alto (TDA). Se considera la temperatura máxima en el motor de  $130^{\circ}C$ , en base a la norma NEMA, como se aprecia en la tabla 2.1 donde está el tipo de aislante denominado B, además, se le asignan los parámetros de la temperatura propuesta como se muestra en la siguiente

tabla 4.3. Una vez definido los parámetros se muestra en la figura 4.4, mediante una gráfica que representa los intervalos de las funciones de pertenencia propuestas, con relación a la tabla 4.3.

La variable lingüística de envejecimiento es una salida, que corresponde a los subconjuntos como son: el envejecimiento del motor de inducción bajo (ENB), envejecimiento del motor de inducción medio (ENM), envejecimiento del motor de inducción alto (ENA), donde el rango es considerado de 0 a 1, en el cual el cero es bajo y 1 es el máximo, como se muestra en la tabla 4.4, se representa los parámetros envejecimiento. El parámetro se puede evaluar por medio de los límites de 0 a 1, en relación a los intervalos de la función de pertenencia, en donde cada intervalo representa a la función de pertenencia que se muestra en la figura 4.5.

Tabla 4.1: Parámetro de armónicos en tensión “muestreo 1”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AV %
Armónico de voltaje bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 0, .5, 5.5)
Armónico de voltaje medio	AIM	Triangular	(4, 5, 6)
Armónico de voltaje alto	AIA	Trapezoidal	(5, 7.5, 10, 10)

Tabla 4.2: Parámetros de armónicos en corriente “muestreo 1”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AI %
Armónico de corriente bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 0, 2.5, 5)
Armónico de corriente medio	AIM	Triangular	(4, 5, 6)
Armónico de corriente alto	AIA	Trapezoidal	(5, 7.5, 10, 10)



Tabla 4.3: Parámetros de temperatura “muestreo 1”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS °C
Temperatura del devanado bajo	TDB	Trapezoidal	(0, 0, 75, 162.5)
Temperatura del devanado medio	TDM	Triangular	(100, 125, 150)
Temperatura del devanado alto	TDA	Trapezoidal	(125, 162, 200, 200)

Tabla 4.4: Parámetros de envejecimiento “muestreo 1”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS EN
Envejecimiento nominal bajo	ENB	Trapezoidal	(0, 0, 0.25, 0.45)
Envejecimiento nominal medio	ENM	Triangular	(0.25, 0.5, 0.75)
Envejecimiento nominal alto	ENA	Trapezoidal	(0.6, 0.9, 1, 1)

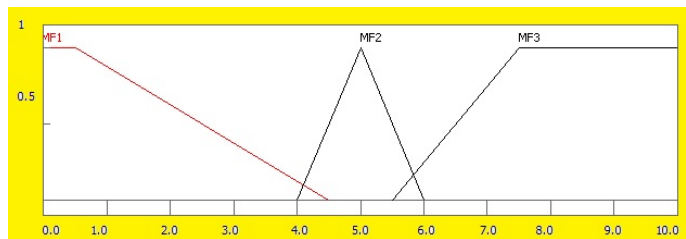


Figura 4.2: Gráfica de la variable lingüística armónico de tensión “muestreo 1”

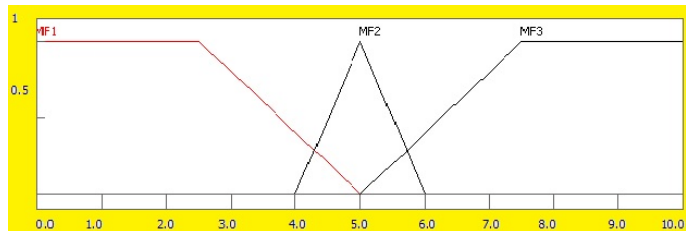


Figura 4.3: Gráfica de la variable lingüística armónico de corriente “muestreo 1”

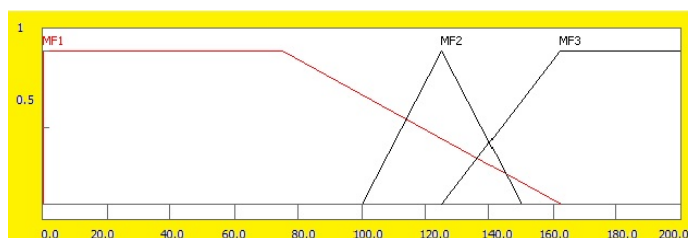


Figura 4.4: Grafica de la variable lingüística temperatura “muestreo 1”

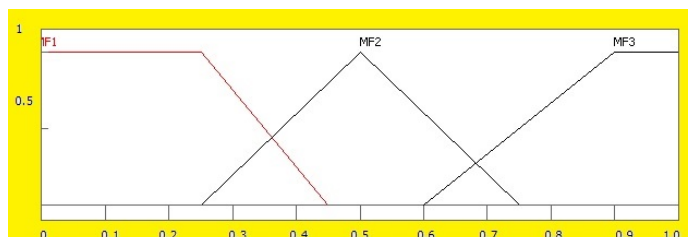


Figura 4.5: Grafica de la variable lingüística envejecimiento “muestreo 1”

#### 4.1.1.1. Entradas y una salida para el sistema experto difuso “carga en vacío” “muestreo 2”.

En el muestreo 2, se cambian los parámetros de las funciones de pertenencia mediante las entradas y salidas, mostrándose los intervalos en las tablas 4.5, 4.6, 4.7, 4.8:

Tabla 4.5: Parámetro de armónicos en tensión “muestreo 2”

Variabes lingüísticas	Abreviación	Función de pertenencia	Parámetros AV %
Armónico de voltaje bajo	AVB	Trapezoidal	(0, 0, 3, 5)
Armónico de voltaje medio	AVM	Triangular	(3, 5, 7)
Armónico de voltaje alto	AVA	Trapezoidal	(5.5, 8, 10, 10)

Tabla 4.6: Parámetros de armónicos en corriente “muestreo 2”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AI%
Armónico de corriente bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 0, 1.5, 5)
Armónico de corriente medio	AIM	Triangular	(3.5, 5, 8)
Armónico de corriente alto	AIA	trapezoidal	(5, 9.5, 10, 10)

Tabla 4.7: Parámetros de temperatura “muestreo 2”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS °C
Temperatura de devanado bajo	TDB	Trapezoidal	(0, 0, 40, 130)
Temperatura de devanado medio	TDM	Triangular	(80, 130, 160)
Temperatura de devanado alto	TDA	Trapezoidal	(140, 160, 200, 200)

Tabla 4.8: Parámetros de envejecimiento “muestreo 2”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS EN
Envejecimiento nominal bajo	ENB	Trapezoidal	(0, 0, 0.35, 0.45)
Envejecimiento nominal medio	ENM	Triangular	(0.35, 0.5, 0.65)
Envejecimiento nominal alto	ENA	Trapezoidal	(0.5, 0.7, 1, 1)

#### 4.1.1.2. Entradas y una salida para el sistema experto difuso “carga en vacío” “muestreo 3”

En el muestreo 3, se cambian los parámetros de las funciones de pertenencia mediante las entradas y salidas, mostrándose los intervalos en las tablas 4.9, 4.10, 4.11, 4.12:

Tabla 4.9: Parámetro de armónicos en tensión “muestreo 3”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AV %
Armónico de voltaje bajo	AVB	Trapezoidal	(0, 0, 0.5, 4.5)
Armónico de voltaje medio	AVM	Triangular	(3.974, 4.974, 5.974)
Armónico de voltaje alto	AVA	Trapezoidal	(5.5, 7.5, 10, 10)

Tabla 4.10: Parámetros de armónicos en corriente “muestreo 3”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AI %
Armónico de corriente bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 0, 2.5, 5)
Armónico de corriente medio	AIM	Triangular	(4, 5, 6)
Armónico de corriente alto	AIA	Trapezoidal	(5, 7.5, 10, 10)

Tabla 4.11: Parámetros de temperatura “muestreo 3”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS °C
Temperatura de devanado bajo	TDB	Trapezoidal	(0, 0, 75, 162.5)
Temperatura de devanado medio	TDM	Triangular	(100, 130, 150)
Temperatura de devanado alto	TDA	Trapezoidal	(125, 162.5, 200, 200)

Tabla 4.12: Parámetros de envejecimiento “muestreo 3”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS EN
Envejecimiento nominal bajo	ENB	trapezoidal	(0, 0, 0.25, 0.5)
Envejecimiento nominal medio	ENM	Triangular	(0.25, 0.5, 0.75)
Envejecimiento nominal alto	ENA	Trapezoidal	(0.5, 0.76, 1, 1)

#### 4.1.1.3. Entradas y una salida para el sistema experto difuso carga en vacío “muestreo 4”.

En el muestreo 4, se cambian los parámetros de las funciones de pertenencia mediante las entradas y salidas, mostrándose los intervalos en las tablas 4.13, 4.14, 4.15, 4.16:

Tabla 4.13: Parámetro de armónicos en tensión “muestreo 4”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AV %
Armónico de voltaje bajo	AVB	Trapezoidal	(0, 0, 2.5, 5)
Armónico de voltaje medio	AVM	Triangular	(3, 5, 7)
Armónico de voltaje alto	AVA	Trapezoidal	(6, 6.5, 10, 10)

Tabla 4.14: Parámetros de armónicos en corriente “muestreo 4”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AI %
Armónico de corriente bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 0, 1.5, 4)
Armónico de corriente medio	AIM	Triangular	(3.5, 5, 6.5)
Armónico de corriente alto	AIA	Trapezoidal	(6, 7.5, 10, 10)

Tabla 4.15: Parámetros de temperatura “muestreo 4”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS °C
Temperatura del devanado bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 0, 75, 130)
Temperatura de devanado medio	AIM	Triangular	(60, 130, 160)
Temperatura del devanado alto	AIA	Trapezoidal	(100, 150, 200, 200)

Tabla 4.16: Parámetros de envejecimiento “muestreo 4”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS EN
Envejecimiento nominal bajo	ENB	Trapezoidal	(0, 0, 0.15, 0.5)
Envejecimiento nominal medio	ENM	Triangular	(0.35, 0.5, 0.8)
Envejecimiento nominal alto	ENA	Trapezoidal	(0.6, 0.85, 1, 1)

#### 4.1.1.4. Entradas y una salida para el sistema experto difuso carga en vacío “muestreo 5”.

En el muestreo 5, se cambian los parámetros de las funciones de pertenencia mediante las entradas y salidas, mostrándose los intervalos en las tablas 4.17, 4.18, 4.19, 4.20:

Tabla 4.17: Parámetro de armónicos en tensión “muestreo 5”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AV %
Armónico de voltaje bajo	AVB	Trapezoidal	(0, 0, 3.5, 5)
Armónico de voltaje medio	AVM	Triangular	(4, 5, 6)
Armónico de voltaje alto	AVA	Trapezoidal	(5, 7, 10, 10)

Tabla 4.18: Parámetros de armónicos en corriente “muestreo 5”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AI %
Armónico de corriente bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 0, 2.5, 5)
Armónico de corriente medio	AIM	Triangular	(4, 5, 6)
Armónico de corriente alto	AIA	Trapezoidal	(5, 7.5, 10, 10)

Tabla 4.19: Parámetros de temperatura “muestreo 5”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS $^{\circ}C$
Temperatura de devanado bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 0, 100, 130)
Temperatura de devanado medio	AIM	Triangular	(100, 130, 160)
Temperatura de devanado alto	AIA	Trapezoidal	(140, 180, 200, 200)

Tabla 4.20: Parámetros de envejecimiento “muestreo 5”

VARIABLES LINGÜÍSTICA	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS EN
Envejecimiento nominal bajo	ENB	Trapezoidal	(0, 0, 0.15, 0.5)
Envejecimiento nominal medio	ENM	Triangular	(0.3, 0.5, 0.7)
Envejecimiento nominal alto	ENA	Trapezoidal	(0.5, 0.9, 1, 1)

#### 4.1.2. Reglas para el sistema experto difuso

Una vez definidos los parámetros de entradas y salidas, y con la finalidad de construir las reglas de inferencia difusa, y realizar la programación para una mejor precisión en la optimización de resultados.

Las variables lingüísticas de las entradas y salidas vistas en la sección 4.1.1 anterior de este capítulo, sirven para modelar el sistema. Después de conocer cada una las abreviaciones de los universos de los subconjuntos de las entradas y salidas, se procede a hacer la inferencia para tener los antecedentes y consecuentes que están relacionadas, con la T-norm y la T-conorm; la primera representa por medio del símbolo ( $\wedge$ ) y la segunda representa por medio del símbolo ( $\vee$ ), y el resultado es aplicando al método de inferencia que proporciona el grado de envejecimiento (EN). La tabla 4.21 representa la primera entrada, la segunda, y la tercera se le denomina consecuente y proporciona la salida como resultado final:

Tabla 4.21: Reglas para el sistema experto difuso “carga en vacio”

	AV	$\wedge \vee$	AI	$\wedge \vee$	TD	EN	
1	AVB	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDM	entonces	ENB
2	AVB	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDB	entonces	ENB
3	AVB	$\wedge$	AIM	$\wedge$	TDA	entonces	ENB
4	AVA	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDM	entonces	ENB
5	AVA	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDB	entonces	ENB
6	AVA	$\wedge$	AIM	$\wedge$	TDA	entonces	ENB
7	AVM	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDM	entonces	ENB
8	AVM	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDB	entonces	ENB
9	AVM	$\wedge$	AIM	$\wedge$	TDA	entonces	ENB
10	AVB	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDB	entonces	ENM
11	AVB	$\wedge$	AIM	$\wedge$	TDM	entonces	ENM
12	AVB	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDA	entonces	ENM
13	AVM	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDB	entonces	ENM
14	AVM	$\wedge$	AIM	$\wedge$	TDM	entonces	ENM
15	AVM	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDA	entonces	ENM
16	AVA	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDB	entonces	ENM
17	AVA	$\wedge$	AIM	$\wedge$	TDM	entonces	ENM
18	AVA	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDA	entonces	ENM
19	AVA	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDA	entonces	ENM
20	AVB	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDB	entonces	ENA
21	AVB	$\wedge$	AIM	$\wedge$	TDM	entonces	ENA
22	AVB	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDA	entonces	ENA
23	AVM	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDB	entonces	ENA
24	AVM	$\wedge$	AIM	$\wedge$	TDM	entonces	ENA
25	AVM	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDA	entonces	ENA
26	AVA	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDB	entonces	ENA
27	AVA	$\wedge$	AIM	$\wedge$	TDM	entonces	ENA
28	AVA	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDA	entonces	ENA
29	AVM	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDA	entonces	ENA
30	AVM	$\wedge$	AIM	$\wedge$	TDM	entonces	ENA



### 4.1.3. Construcción del sistema experto difuso con “carga dinámica” “muestreo 1”.

Para la construcción del sistema experto difuso se proponen tres entradas y una salida, para la obtención del grado de envejecimiento en los motores de inducción con carga dinámica, se toma en cuenta algunos factores como se menciona a continuación para el tipo de aislante F:

- Se debe de considerar la temperatura máxima en los motores de inducción, en base a la norma NEMA, que se mencionaron en la tabla 2.1 del capítulo 2, en el cual se identifican distintos tipos de aislantes en los motores eléctricos de inducción, con una temperatura nominal de  $155^{\circ}\text{C}$  hasta un máximo de  $200^{\circ}\text{C}$ .
- Para determinar los rangos de los armónicos de tensión se considera el 5 % como nominal y un máximo de hasta el 10 %.
- Para la salida difusa se considera un rango de 0 hasta 1.

La primera entrada es la variable lingüística armónicos de tensión, toma los valores de referencia la red de alimentación eléctrica  $THD_V$ , después se definen los subconjuntos de este universo como son: los armónico de tensión bajo (AVB), los armónico de tensión medio (AVM), y el armónico de tensión alto (AVA), tomando para este caso al quinto armónico, con un factor de potencia (FP)= $0.95 \pm$ , que especifican los fabricantes, para un funcionamiento estable en los motores de inducción, [Weinbissinger, 2010].

La primera variable lingüística es la parte esencial de la construcción de un diagrama, donde se toma de referencia el armónico nominal de tensión, como se aprecia en la tabla 4.22 se representa los parámetros de armónicos en tensión. Una vez construidos los límites de la función de pertenencia anterior se procede a la graficación, como se aprecia en la siguiente figura 4.6, en donde se representan las funciones de pertenecía graficadas en los distintos intervalos propuesto en la tabla 4.1, armónicos de tensión baja (AIB), armónico de tensión medio (AIM), armónico de tensión alta (AIA).

La segunda variable lingüística son los armónicos de corriente  $THD_I$ , a su vez, esta se divide en subconjuntos como son: armónicos de corriente baja (AIB), armónico de corriente medio (AIM), armónico de corriente alta (AIA), en la tabla 4.23 se representan los subconjuntos de armónicos de corriente, con las funciones de pertenecía, y

sus respectivos parámetros. Una vez conocido los parámetros se procede a construir la gráfica de funciones de pertenencia con sus respectivos parámetros, para observar los distintos intervalos en la figura 4.7.

La tercera variable lingüística es temperatura, que está definida por medio de sus respectivos subconjuntos como son: la temperatura del devanado baja (TDA), la temperatura en devanado medio (TDM), y la temperatura del devanado alto (TDA). Se considera la temperatura máxima en el motor de  $155^{\circ}C$ , en base a la norma NEMA, como se aprecia en la tabla 2.1 donde está el tipo de aislante denominado F, además, se le asignan los parámetros de la temperatura propuesta como se muestra en la siguiente tabla 4.24. Una vez definido los parámetros se muestra en la figura 4.8, mediante una gráfica que representa los intervalos de las funciones de pertenencia propuestas, con relación a la tabla 4.24.

La variable lingüística de envejecimiento es una salida, que corresponde a los subconjuntos como son: el envejecimiento del motor de inducción bajo (ENB), envejecimiento del motor de inducción medio (ENM), envejecimiento del motor de inducción alto (ENA), donde el rango es considerado de 0 a 1, en el cual el cero es bajo y 1 es el máximo, como se muestra en la tabla 4.25, se representa los parámetros envejecimiento. El parámetro se puede evaluar por medio de los límites de 0 a 1, en relación a los intervalos de la función de pertenencia, en donde cada intervalo representa a la función de pertenencia que se muestra en la figura 4.9:

Tabla 4.22: Parámetros de armónicos en tensión “carga dinámica” “muestreo 1”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AV %
Armónico de voltaje bajo	AVB	Trapezoidal	(0, 0, 1.5, 5.5)
Armónico de voltaje medio	AVM	Triangular	( 4, 5, 6.5)
Armónico de voltaje alto	AVA	Trapezoidal	(4.5, 9, 10, 10)

Tabla 4.23: Parámetros de armónicos en corriente “carga dinámica” “muestreo 1”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AI%
Armónico de corriente bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 0, 15, 30)
Armónico de corriente medio	AIM	Triangular	(15, 25, 40)
Armónico de corriente alto	AIA	Trapezoidal	(30, 40, 50, 50)

Tabla 4.24: Parámetros de temperatura “carga dinámica” “muestreo 1”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS °C
Temperatura de devanado bajo	TDB	Trapezoidal	(0, 0, 50, 160)
Temperatura de devanado medio	TDM	Triangular	(135, 155, 185)
Temperatura de devanado alto	TDA	Trapezoidal	(160, 185, 200, 200)

Tabla 4.25: Parámetros de envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 1”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS (EN)
Envejecimiento nominal bajo	ENB	Pi	(0.1, 0.25, 0.35, 0.6)
Envejecimiento nominal medio	ENM	Triangular	(0.35, 0.5, 0.65)
Envejecimiento nominal alto	ENA	Trapezoidal	(0.6, 0.7, 1, 1)

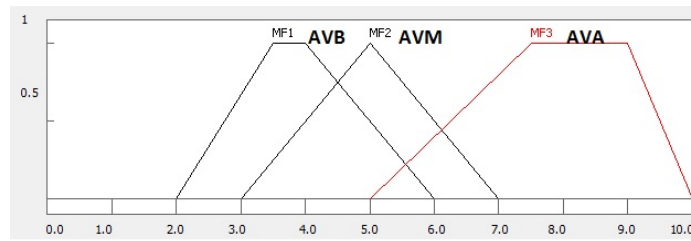


Figura 4.6: Gráfica de la variable lingüística armónico en tensión en “carga dinámica”  
“muestreo 1”

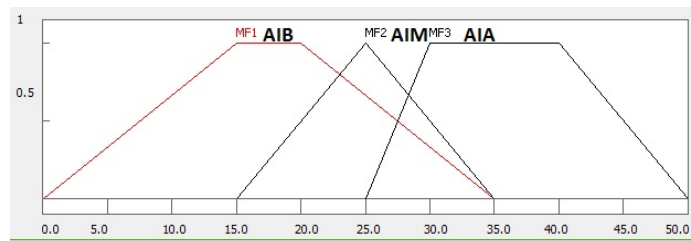


Figura 4.7: Gráfica de la variable lingüística de armónico en corriente en “carga dinámica”  
“muestreo 1”

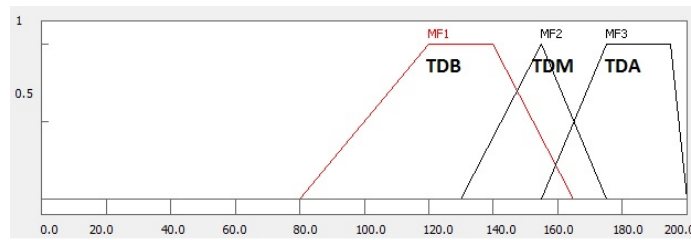


Figura 4.8: Gráfica de la variable lingüística temperatura en “carga dinámica”  
“muestreo 1”

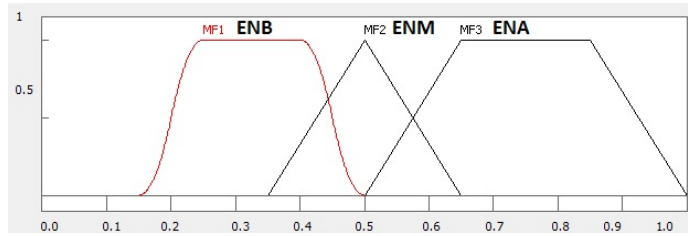


Figura 4.9: Grafica de la variable lingüística envejecimiento en “carga dinámica”  
“muestreo 1”

#### 4.1.3.1. Entradas y una salida para el sistema experto difuso “carga dinámica” “muestreo 2”.

En el muestreo 2, se cambian los parámetros de las funciones de pertenencia mediante las entradas y salidas, mostrándose los intervalos en las tablas 4.26, 4.27, 4.28, 4.29:

Tabla 4.26: Parámetros de armónicos en tensión “carga dinámica” “muestreo 2”

Variables lingüísticas	Abreviación	Función de pertenencia	Parámetros AV %
Armónico de voltaje bajo	AVB	Trapezoidal	(0, 0, 1, 6.5)
Armónico de voltaje medio	AVM	Triangular	( 2, 5, 8)
Armónico de voltaje alto	AVA	Trapezoidal	(4, 6, 8.5, 10)

Tabla 4.27: Parámetros de armónicos en corriente “carga dinámica” “muestreo 2”

Variables lingüísticas	Abreviación	Función de pertenencia	Parámetros AI %
Armónico de corriente bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 0, 5, 25)
Armónico de corriente medio	AIM	Triangular	(10, 25, 45)
Armónico de corriente alto	AIA	Trapezoidal	(20, 30, 50, 50)

Tabla 4.28: Parámetros de temperatura “carga dinámica” “muestreo 2”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS °C
Temperatura de devanado bajo	TDB	Trapezoidal	(10, 70, 120, 170)
Temperatura de devanado medio	TDM	Triangular	(140, 155, 185)
Temperatura de devanado alto	TDA	Trapezoidal	(150, 165, 190, 200)

Tabla 4.29: Parámetros de envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 2”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS (EN)
Envejecimiento nominal bajo	ENB	Pi	(0.1, 0.25, 0.35, 0.6)
Envejecimiento nominal medio	ENM	Triangular	(0.35, 0.5, 0.65)
Envejecimiento nominal alto	ENA	Trapezoidal	(0.6, 0.7, 1, 1)

#### 4.1.3.2. Entradas y una salidas para el sistema experto difuso en “carga dinámica” “muestreo 3”

En el muestreo 3, se cambian los parámetros de las funciones de pertenencia mediante las entradas y salidas, mostrándose los intervalos en las tablas 4.30, 4.31, 4.32, 4.33:

Tabla 4.30: Parámetros de armónicos en tensión “carga dinámica” “muestreo 3”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AV %
Armónico de voltaje bajo	AVB	Trapezoidal	(0, 1, 5, 3.5, 5)
Armónico de voltaje medio	AVM	Triangular	(3, 5, 6)
Armónico de voltaje alto	AVA	Trapezoidal	(4, 5.5, 8, 10)

Tabla 4.31: Parámetros de armónicos en corriente “carga dinámica” “muestreo 3”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AI%
Armónico de corriente bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 0, 5, 25)
Armónico de corriente medio	AIM	Triangular	(10, 25, 45)
Armónico de corriente alto	AIA	Trapezoidal	(20, 30, 50, 50)

Tabla 4.32: Parámetros de temperatura “carga dinámica” “muestreo 3”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS °C
Temperatura de devanado bajo	TDB	Trapezoidal	(40, 70, 140, 160)
Temperatura de devanado medio	TDM	Triangular	(110, 155, 165)
Temperatura de devanado alto	TDA	Trapezoidal	(130, 160, 180, 200)

Tabla 4.33: Parámetros de envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 3”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS (EN)
Envejecimiento nominal bajo	ENB	Pi	(0.1, 0.20, 0.35, 0.5)
Envejecimiento nominal medio	ENM	Triangular	(0.40, 0.5, 0.60)
Envejecimiento nominal alto	ENA	Trapezoidal	(0.45, 0.60, .95, 1)

#### 4.1.3.3. Entradas y una salidas para el sistema experto difuso “carga dinámica” “muestreo 4”.

En el muestreo 4, se cambian los parámetros de las funciones de pertenencia mediante las entradas y salidas, mostrándose los intervalos en las tablas 4.34, 4.35, 4.36, 4.37:

Tabla 4.34: Parámetros de armónicos en tensión “carga dinámica” “muestreo 4”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AV %
Armónico de voltaje bajo	AVB	Trapezoidal	(2, 3, 5, 4, 6)
Armónico de voltaje medio	AVM	Triangular	(3, 5, 7)
Armónico de voltaje alto	AVA	Trapezoidal	(5, 7.5, 9, 10)

Tabla 4.35: Parámetros de armónicos en corriente “carga dinámica” “muestreo 4”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AI %
Armónico de corriente bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 15, 20, 25)
Armónico de corriente medio	AIM	Triangular	(15, 25, 35)
Armónico de corriente alto	AIA	Trapezoidal	(25, 30, 40, 50)

Tabla 4.36: Parámetros de temperatura “carga dinámica” “muestreo 4”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS °C
Temperatura de devanado bajo	TDB	Trapezoidal	(80, 120, 140, 165)
Temperatura de devanado medio	TDM	Triangular	(130, 155, 175)
Temperatura de devanado alto	TDA	Trapezoidal	(155, 175, 195, 200)

Tabla 4.37: Parámetros de envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 4”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS (EN)
Envejecimiento nominal bajo	ENB	Pi	(0.15, 0.25, 0.40, 0.5)
Envejecimiento nominal medio	ENM	Triangular	(0.35, 0.5, 0.65)
Envejecimiento nominal alto	ENA	Trapezoidal	(0.5, 0.65, .85, 1)



#### 4.1.3.4. Entradas y una salidas para el sistema experto difuso en “carga dinámica” “muestreo 5”.

En el muestreo 5, se cambian los parámetros de las funciones de pertenencia mediante las entradas y salidas, mostrándose los intervalos en las tablas 4.38, 4.39, 4.40, 4.41:

Tabla 4.38: Parámetros de armónicos en tensión “carga dinámica” “muestreo 5”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AV %
Armónico de voltaje bajo	AVB	Trapezoidal	(0, 0, 2, 4.5)
Armónico de voltaje medio	AVM	Triangular	(3.5, 5, 7)
Armónico de voltaje alto	AVA	Trapezoidal	(5.5, 8, 10, 10)

Tabla 4.39: Parámetros de armónicos en corriente “carga dinámica” “muestreo 5”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS AV %
Armónico de corriente bajo	AIB	Trapezoidal	(0, 0, 12.5, 25)
Armónico de corriente medio	AIM	Triangular	(20, 25, 35)
Armónico de corriente alto	AIA	Trapezoidal	(25, 35, 50, 50)

Tabla 4.40: Parámetros de temperatura “carga dinámica” “muestreo 5”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS °C
Temperatura de devanado bajo	TDB	Trapezoidal	(0, 0, 75, 155)
Temperatura de devanado medio	TDM	Triangular	(100, 155, 175)
Temperatura de devanado alto	TDA	Trapezoidal	(155, 165, 200, 200)

Tabla 4.41: Parámetros de envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 5”

VARIABLES LINGÜÍSTICAS	ABREVIACIÓN	FUNCIÓN DE PERTENENCIA	PARÁMETROS (EN)
Envejecimiento nominal bajo	ENB	Pi	(0, 0.2, 0.3, 0.5)
Envejecimiento nominal medio	ENM	Triangular	(0.3, 0.5, 0.75)
Envejecimiento nominal alto	ENA	Trapezoidal	(0.6, 0.9, 1, 1)

#### 4.1.4. Reglas para el sistema experto difuso en “carga dinámica”

Una vez definidos los parámetros de entradas y salidas, y con la finalidad de construir las reglas de inferencia difusa, y realizar la programación para una mejor precisión en la optimización de resultados.

Las variables lingüísticas de las entradas y salidas vistas en la sección 4.1.3 anterior de este capítulo, sirven para modelar el sistema. Después de conocer cada una las abreviaciones de los universos de los subconjuntos de las entradas y salidas, se procede a hacer la inferencia para tener los antecedentes y consecuentes que están relacionadas, con la T-norm y la T-conorm; la primera representa por medio del símbolo ( $\wedge$ ) y la segunda representa por medio del símbolo ( $\vee$ ), y el resultado es aplicando al método de inferencia que proporciona el grado de envejecimiento nominal. La tabla 4.42 representa la primera entrada, la segunda, y la tercera se le denomina consecuente y proporciona la salida como resultado final:

Tabla 4.42: Reglas para el sistema experto difuso “carga dinámica” 1-2

	AV	$\wedge$ ó $\vee$	AI	$\wedge$ ó $\vee$	TD	EN	
1	AVB	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDB	entonces	ENB
2	AVB	$\vee$	AIM	$\vee$	TDB	entonces	ENB
3	AVB	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDM	entonces	ENM
4	AVB	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDM	entonces	ENA
5	AVM	$\vee$	AIM	$\wedge$	TDM	entonces	ENM
6	AVM	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDB	entonces	ENB

Continúa en la página siguiente.

Tabla 4.42: Reglas para el sistema experto difuso “carga dinámica” 2-2

	AV	$\wedge \text{ ó } \vee$	AI	$\wedge \text{ ó } \vee$	TD	EN	
7	AVM	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDM	entonces	ENB
8	AVM	$\vee$	AIA	$\wedge$	TDA	entonces	ENM
9	AVM	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDA	entonces	ENA
10	AVA	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDA	entonces	ENM
11	AVA	$\wedge$	AIM	$\vee$	TDB	entonces	ENA
12	AVA	$\vee$	AIA	$\vee$	TDM	entonces	ENB
13	AVA	$\wedge$	AIB	$\vee$	TDM	entonces	ENM
14	AVA	$\wedge$	AIM	$\wedge$	TDA	entonces	ENA
15	AVB	$\wedge$	AIM	$\vee$	TDB	entonces	ENB
16	AVM	$\wedge$	AIB	$\vee$	TDB	entonces	ENB
17	AVA	$\vee$	AIA	$\vee$	TDM	entonces	ENM
18	AVM	$\wedge$	AIB	$\wedge$	TDA	entonces	ENM
19	AVA	$\wedge$	AIM	$\vee$	TDB	entonces	ENA
20	AVM	$\wedge$	AIA	$\wedge$	TDA	entonces	ENA

#### 4.1.5. Modelado del sistema experto difuso en Fuzzy Logic Toolbox Matlab

Una vez definidas las reglas de inferencia difusa se hace la siguiente etapa, que es modelar el sistema experto difuso en Fuzzy Logic Toolbox Matlab, por medio de los siguientes pasos que se describen a continuación, [works, 2016]:

- Abrir Matlab desde Windows, y aparece una nueva ventana e identificar la leyenda que se llama Command Windows después escribir la palabra Fuzzy, enseguida dar un clic, y aparece la interfaz de Fuzzy Logic Toolbox Matlab.
- En la interfaz se observa en la figura 4.10, que tiene tres bloques con diferentes funciones, por ejemplo el primer bloque define cada una de las entradas propuestas, que se proponen al construir un sistema experto difuso, en el segundo bloque se evalúa las reglas de inferencia de los subconjuntos de las variables lingüísticas,

y el tercer bloque define cada una de las salida propuestas, donde se lleva a cabo el proceso de la desdifusificación, por medio del método del centroide del área.

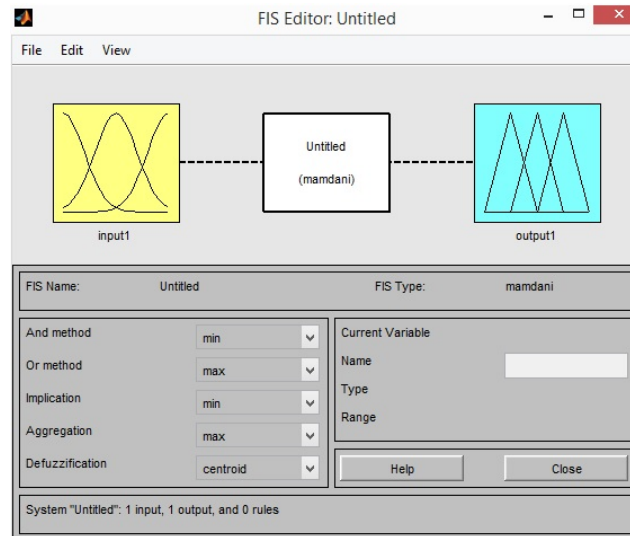


Figura 4.10: Interfaz Fuzzy Toolbox Matlab

Para hacer una prueba en el diagnóstico de motores de inducción se debe tomar las funciones de pertenencia de las tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, que representan las entradas y una salida como son: armónicos de tensión, armónicos de corriente, temperatura en el devanado, y determinar el grado de envejecimiento en un motor de inducción como se muestra en la figura 4.11, [works, 2016]:

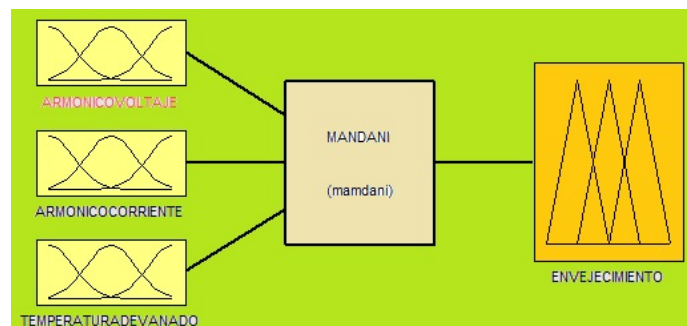


Figura 4.11: Sistema experto difuso aplicado en un motor de inducción

Una vez definidas las variables lingüísticas de entradas y una salidas donde se toma la tabla 4.1, que representa los parámetros en los armónicos de tensión, y finalmente modelarlo en Fuzzy Logic Toolbox Matlab, mediante, los siguientes pasos como se describen a continuación, [works, 2016]:

- Identificar la variable lingüística de entrada (los armónicos de tensión) y después escribir en la leyenda name de la interfaz.
- Buscar en la barra de tareas Edit de Fuzzy Logic Toolbox Matlab, y dar un clic después aparecen dos opciones como son: entradas, y salidas, después dar un clic sobre la leyenda entrada.
- En la interfaz Fuzzy Logic Toolbox Matlab, buscar el bloque que dice armónicos de tensión y un clic, después una nueva ventana aparece (editor) donde se encuentran las funciones de pertenencia para construir los subconjuntos de la variable lingüísticas utilizadas en este trabajo de investigación.
- En el editor de funciones de pertenencia, se modelan funciones de pertenencias como son: función triangular (trimf) y trapezoidal (trapmf), para el modelado por medio de la interfaz se describe como sigue:
  - Buscar en la interfaz de Matlab la leyenda Edit.
  - En el menu Edit dar un clic y aparece un subventana e identificar la Add MFs(Función de pertenencia) y finalmente dar un clic en Okey.

Para los demás entradas y salidas se hacen los mismos pasos. En la figura 4.12 se muestra el gráfico de los armónicos de tensión aplicando los pasos anteriores para Fuzzy Logic Matlab:

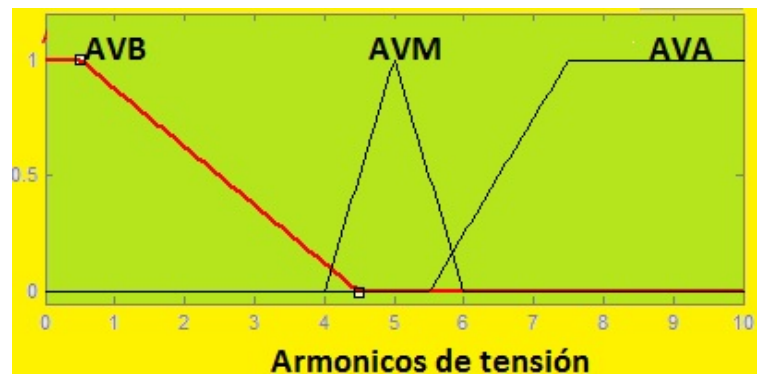


Figura 4.12: Parámetros de subconjuntos de armónicos en tensión

Después de haber hecho todos los pasos anteriores, se requiere buscar en la interfaz de la barra de herramientas la leyenda view y dar un clic en rules, para evaluar las variables lingüísticas de entrada en relación a la salida como se muestra en la figura 4.13:

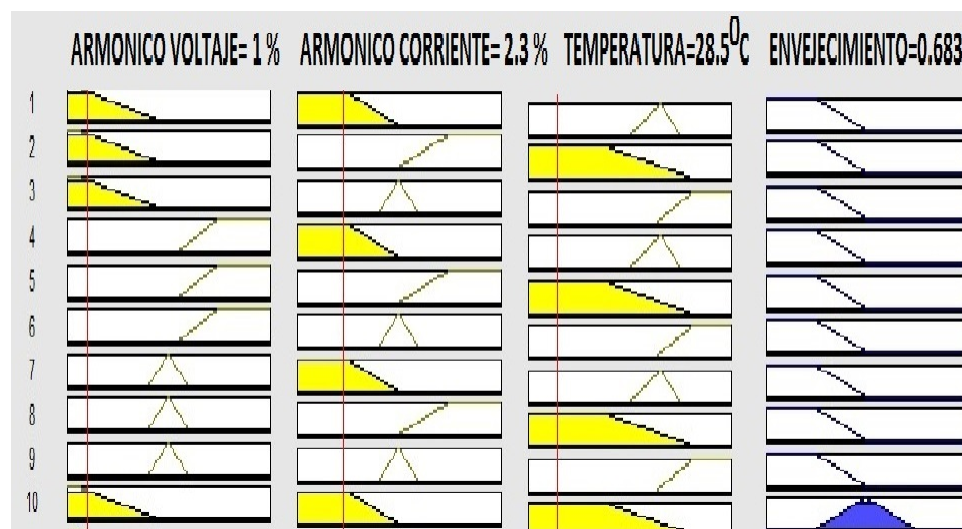
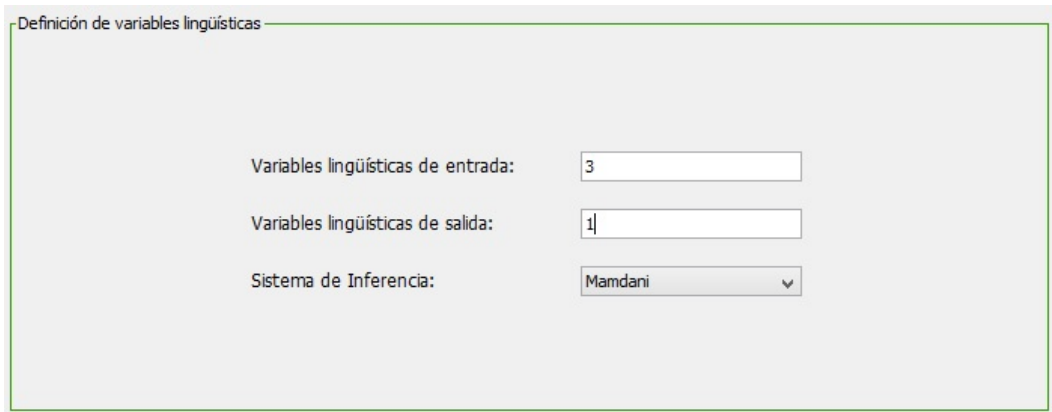


Figura 4.13: Gráfica del proceso de desfuzificación en Matlab

#### 4.1.6. Modelado del sistema experto difuso en Shell FuzzyApp

Una vez definidas las reglas, se procede a modelarlo en FuzzyApp mediante los siguientes pasos: primero abrir FuzzyApp desde Windows, después se abre una nueva ventana, y aparece un cuadro en el interior de la interfaz, que permite definir entradas y salidas tomadas en cuenta como se muestra en la figura 4.14, [Flores et al., 2016]:



Definición de variables lingüísticas

Variables lingüísticas de entrada:

Variables lingüísticas de salida:

Sistema de Inferencia:

Figura 4.14: Interfaz de Shell FuzzyApp

Después dar un clic aparece una nueva ventana, como se muestra en la figura 4.15, donde en el lado izquierdo se definen los subconjuntos del universo de discurso, y los parámetros de las funciones de pertenencia, mientras que en lado derecho se muestra un gráfico, y un editor de variables lingüísticas, con la finalidad de modelar el sistema experto difuso, [Flores et al., 2016]:

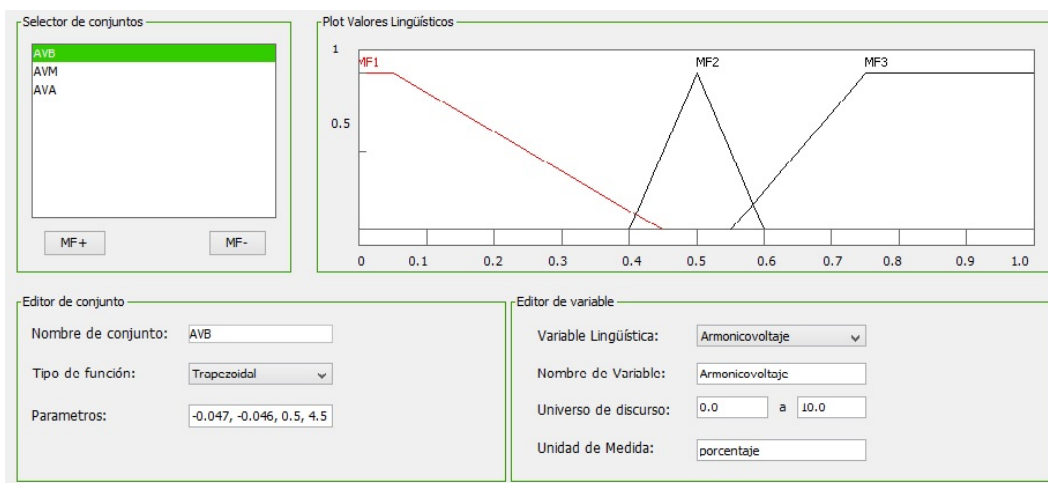


Figura 4.15: Entradas y salidas en Shell FuzzyApp

En la interfaz de FuzzyApp, se puede agregar las reglas de inferencia difusas tal y como se muestra en la figura 4.16, en la parte superior se representa las reglas y la parte inferior las condiciones por medio de T-conorm y T-norm respectivamente:

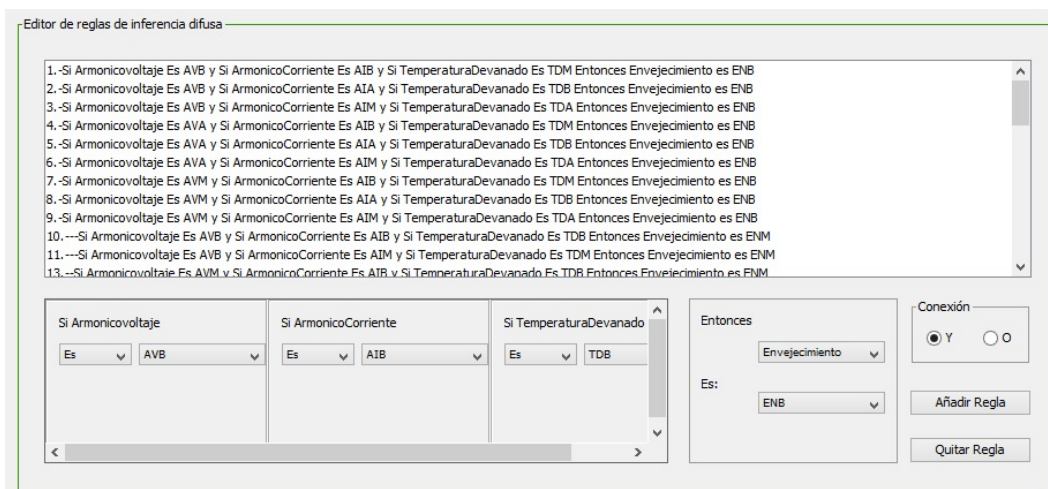


Figura 4.16: Reglas de inferencia difusa en Shell FuzzyApp

Los pasos anteriores sirvieron para la construcción del sistema experto difuso del tipo Mandani como se muestra en la figura 4.17, [Flores et al., 2016]:



The screenshot displays the Shell FuzzyApp interface, divided into three main sections:

- Configuración de inferencia difusa:**
  - Desdifusificación: Centroide
  - Agregación: Maximo
  - Metodo o: Sm
  - Metodo y: Tm
- Ingreso de valores de entrada:**
  - Armonico voltaje: 1 porcentaje
  - Armonico Corriente: 2.3 porcentaje
  - Temperatura Devanado: 28.5 cen
- Resumen de resultados:**
  - Desdifusificación: 0.5 porcentaje
  - Buttons: Calcular, Center of sets
  - Output text:
 

```
-Si Armonicovoltaje Es AVM y Si ArmonicoCorriente Es AIA y Si TemperaturaDevanado Es AIA
Regla44=μ AVM(1.0)=0.0//μ AIA(2.3)=0.0//μ TDB(28.5)=1.0//Fuerza de disparo =0.0
-Si Armonicovoltaje Es null y Si ArmonicoCorriente Es null y Si TemperaturaDevanado Es AIA
Regla45=μ AVM(1.0)=0.0//μ AIA(2.3)=0.0//μ TDB(28.5)=1.0//Fuerza de disparo =0.0
Modelo tipo Mamdani
Centroide= 12.302500000000007/24.604999999999997= 0.5
```

Figura 4.17: Inferencia difusa en Shell FuzzyApp

El modelado se realiza con los cinco muestreos propuestos y los dos software propuestos, para finalmente hacer una comparación entre Fuzzy Logic Matlab y Shell FuzzyApp.

La finalidad de haber propuesto las variables lingüísticas de entradas y salidas en el sistema experto difuso tipo Mandani, permiten determinar el grado de envejecimiento en los motores de inducción, dependiendo de las reglas de inferencia y evaluados por medio de la desdifusificación convirtiendo los valores duros a difusos, y logrando obtener el porcentaje de envejecimiento.

## Capítulo 5

# Capítulo 5. Resultados del sistema experto difuso

### 5.1. Introducción

En el capítulo anterior, se describió la construcción del sistema experto difuso, por medio de una metodología propuesta, donde las entradas y salidas lingüísticas se transforman a valores difusos, (funciones de pertenencia, y reglas de inferencia difusa) a todo esto se llama fusificación, y el siguiente paso es la desdifusificación, (método del centroide), para determinar el grado de envejecimiento en los motores de inducción, en un análisis de dos softwares en lógica difusa tales como son Fuzzy Logic Matlab, [works, 2016], y Shell FuzzyApp, [Flores et al., 2016], mediante los datos proporcionado de un experto.

Los dos softwares permiten determinar el grado de envejecimiento de los motores de inducción, en comparación de un experto del área de mantenimiento preventivo, que serán mostrados en las siguientes secciones de este capítulo como son: los resultados del sistema experto difuso.

#### 5.1.1. Resultados del modelado en Fuzzy Toolbox Matlab “carga en vacío”

En la tabla 5.1 se muestran las variables lingüísticas de entrada y salida como son: los armónicos de tensión ( $THD_V$ ), los armónicos de corriente ( $THD_I$ ), y la temperatura

del devanado (TD), y la salida de envejecimiento (EN) del motor de inducción. Los distintos parámetros de las funciones de pertenencia en los subconjuntos de las variables lingüísticas, se toman 5 muestreos propuestos, del capítulo 4 de este trabajo de investigación son evaluados por medio de Fuzzy Logic Toolbox Matlab, [works, 2016], con la finalidad de observar el comportamiento de envejecimiento en los motores de inducción:

Tabla 5.1: Grado de envejecimiento en Fuzzy Logic Toolbox Matlab 1-2

	Entradas duras			Salidas				
	Variables lingüísticas			Muestreos y grado de envejecimiento				
	$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^0C$	1	2	3	4	5
1	1	2.3	28.5	0.676	0.711	0.683	0.704	0.706
2	0.9	2.1	28.4	0.678	0.714	0.685	0.707	0.706
3	0.8	2.7	31.7	0.679	0.704	0.686	0.697	0.702
4	1.1	2.3	28.3	0.675	0.711	0.681	0.704	0.706
5	1.1	3.7	29.3	0.658	0.603	0.659	0.5	0.679
6	1.1	2.8	30.2	0.675	0.703	0.681	0.695	0.699
7	1.2	2.5	31.2	0.674	0.707	0.681	0.7	0.706
8	1	2.4	30.9	0.676	0.709	0.683	0.702	0.706
9	0.8	6.1	28.5	0.201	0.5	0.221	0.5	0.211
10	0.8	3.6	28.4	0.66	0.647	0.661	0.587	0.681
11	1	4.5	29	0.495	0.5	0.5	0.499	0.499
12	0.9	4.8	29.3	0.485	0.499	0.5	0.498	0.496
13	1	5.1	29.6	0.482	0.498	0.499	0.498	0.492
14	1.1	4.8	29.2	0.485	0.499	0.5	0.721	0.706
15	1	5.2	29.4	0.485	0.498	0.499	0.498	0.496
16	1	5	28.89	0.482	0.498	0.499	0.498	0.492
17	1.1	2.2	28.5	0.675	0.713	0.681	0.705	0.706
18	1	3.5	28.4	0.662	0.693	0.664	0.685	0.683
19	0.9	3.3	29	0.666	0.693	0.699	0.688	0.688
20	0.8	2.8	29.3	0.667	0.703	0.683	0.695	0.699
21	0.9	6.1	29.6	0.201	0.5	0.221	0.5	0.211
22	0.9	3.4	29.2	0.664	0.694	0.666	0.687	0.686
23	0.9	1.2	29.4	0.676	0.726	0.685	0.721	0.706
24	0.9	3.4	28.89	0.664	0.694	0.666	0.687	0.686

Continúa en la página siguiente.

Tabla 5.1: Grado de envejecimiento en Fuzzy Logic Toolbox Matlab 2-2

	Entradas duras			Salidas				
	Variables lingüísticas			Muestreos y grado de envejecimiento				
	$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^{\circ}C$	1	2	3	4	5
25	0.7	5.1	23.3	0.481	0.498	0.499	0.498	0.494
26	0.8	5	27.3	0.479	0.498	0.499	0.498	0.492
27	0.9	4.4	28.3	0.498	0.5	0.5	0.5	0.5
28	0.9	4.9	30.2	0.481	0.498	0.499	0.498	0.494
29	0.8	2.3	26.3	0.679	0.711	0.687	0.704	0.706
30	0.7	2.2	27	0.681	0.713	0.689	0.705	0.706

### 5.1.2. Resultados del modelado en Shell FuzzyApp en “carga en vacío”

En la tabla 5.2 se muestran las variables lingüísticas de entradas y salida tales como los armónicos de tensión ( $THD_V$ ), los armónicos de corriente ( $THD_I$ ), y la temperatura del devanado (TD), y la salida de envejecimiento (EN) del motor de inducción.

Los distintos parámetros de las funciones de pertenencia de los subconjuntos de las variables lingüísticas, se toman 5 muestreos propuestos del capítulo 4 de este trabajo de investigación, por medio de Shell FuzzyApp, [Flores et al., 2016], para observar el comportamiento de envejecimiento:

Tabla 5.2: Grado envejecimiento en Shell FuzzyApp “carga en vacío” 1-2

	Entradas duras			Salidas				
	Variables lingüísticas			Muestreos y grado de envejecimiento				
	$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^{\circ}C$	1	2	3	4	5
1	1	2.3	28.5	0.67	0.706	0.5	0.544	0.175
2	0.9	2.1	28.4	0.672	0.709	0.5	0.552	0.175
3	0.8	2.7	31.7	0.672	0.699	0.5	0.558	0.55
4	1.1	2.3	28.3	0.669	0.706	0.5	0.554	0.55

Continúa en la página siguiente.

Tabla 5.2: Grado envejecimiento en Shell FuzzyApp “carga en vacío” 2-2

	Entradas duras			Salidas				
	Variables lingüísticas			Muestreos y grado de envejecimiento				
	$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^0C$	1	2	3	4	5
5	1.1	3.7	29.3	0.652	0.597	0.5	0.495	0.558
6	1.1	2.8	30.2	0.699	0.698	0.5	0.559	0.551
7	1.2	2.5	31.2	0.67	0.702	0.5	0.556	0.55
8	1	2.4	30.9	0.67	0.704	0.5	0.555	0.55
9	0.8	6.1	28.5	0.201	0.495	0.221	0.495	0.55
10	0.8	3.6	28.4	0.654	0.642	0.5	0.521	0.557
11	1	4.5	29	0.49	0.495	0.495	0.494	0.498
12	0.9	4.8	29.3	0.479	0.494	0.495	0.492	0.493
13	1	5.1	29.6	0.475	0.493	0.494	0.49	0.492
14	1.1	4.8	29.2	0.479	0.494	0.494	0.492	0.493
15	1	5.2	29.4	0.479	0.493	0.494	0.492	0.493
16	1	5	28.89	0.475	0.492	0.494	0.492	0.492
17	1.1	2.2	28.5	0.669	0.707	0.5	0.553	0.55
18	1	3.5	28.4	0.656	0.688	0.5	0.568	0.556
19	0.9	3.3	29	0.66	0.691	0.5	0.565	0.554
20	0.8	2.8	29.3	0.67	0.698	0.5	0.559	0.551
21	0.9	6.1	29.6	0.201	0.495	0.221	0.495	0.211
22	0.9	3.4	29.2	0.658	0.689	0.5	0.5	0.555
23	0.9	1.2	29.4	0.672	0.721	0.5	0.55	0.55
24	0.9	3.4	28.89	0.658	0.689	0.5	0.567	0.555
25	0.7	5.1	23.3	0.474	0.493	0.494	0.492	0.492
26	0.8	5	27.3	0.473	0.492	0.494	0.492	0.492
27	0.9	4.4	28.3	0.493	0.495	0.495	0.495	0.495
28	0.9	4.9	30.2	0.474	0.493	0.494	0.492	0.492
29	0.8	2.3	26.3	0.673	0.706	0.5	0.554	0.55
30	0.7	2.2	27	0.674	0.707	0.5	0.553	0.55

### 5.1.3. Análisis del grado de envejecimiento del sistema experto difuso “carga en vacío”

Para medir el comportamiento del grado de envejecimiento del motor de inducción, se llevaron a cabo 5 muestreos, como se aprecia en la figura 5.1, donde, las líneas de colores representan cada uno de de los muestreos realizados en Fuzzy Logic Toolbox Matlab.

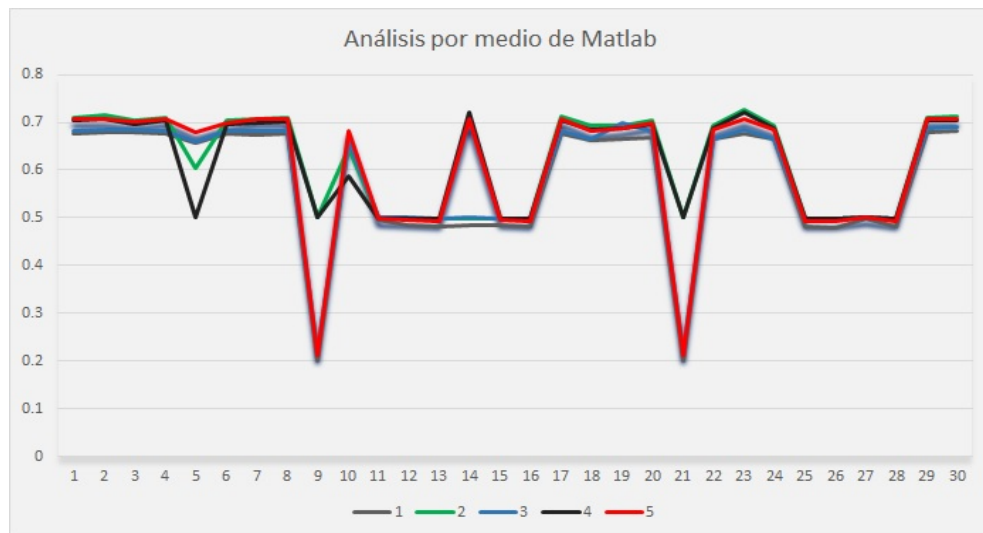


Figura 5.1: Gráfico de 5 muestreos modelados en Matlab

Para el comportamiento del grado de envejecimiento se aprecia en la figura 5.2 donde las líneas de colores representan cada uno de los muestreos propuestos evaluados en Shell FuzzyApp:

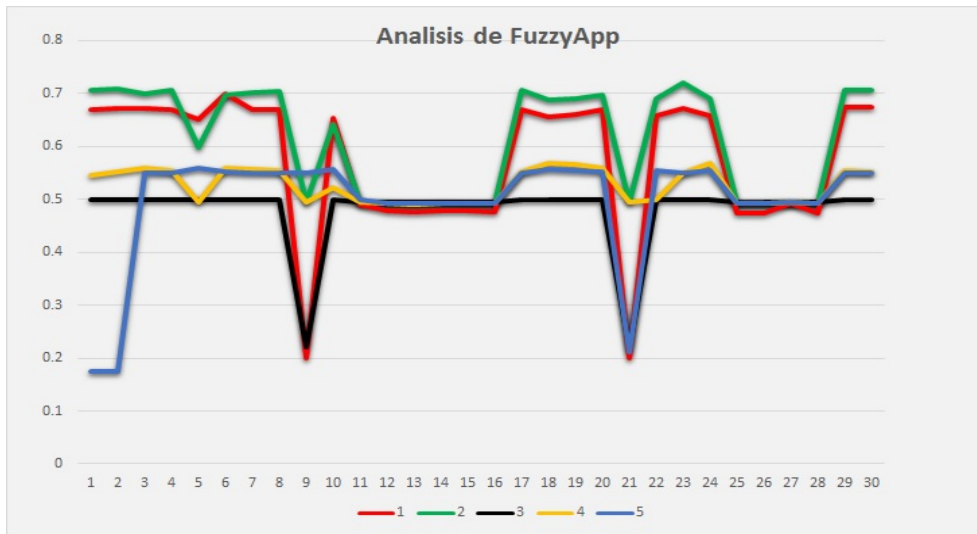


Figura 5.2: Gráfico de 5 muestreos modelados en Shell FuzzyApp

#### 5.1.3.1. Análisis comparativo del “muestreo 1” (Matlab & FuzzyApp) “carga en vacío”

En la figura 5.3, se muestra el comportamiento entre Fuzzy Toolbox Matlab y Shell FuzzyApp, donde se observa el rendimiento calculado al modelar el grado de envejecimiento, se observa la funcionalidad de cada software y representan, un margen de 0.75 % de diferencia para una carga en vacío como se muestra en la tabla 5.3:

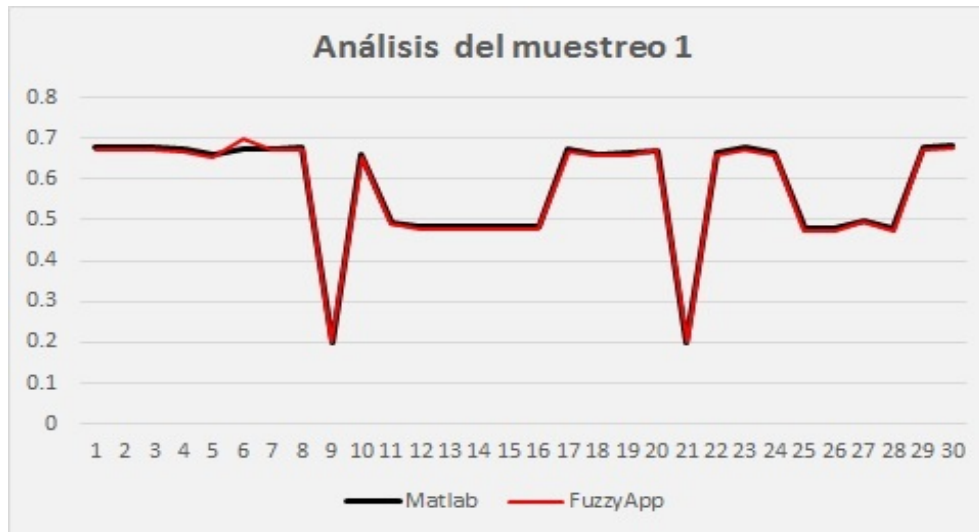


Figura 5.3: Gráfico de dos softwares “carga en vacío” “muestreo 1”

Tabla 5.3: Analisis del envejecimiento “carga en vacío” “muestreo 1”

VARIABLES DE ENTRADAS DURAS			MUESTREO 1		
$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^{0C}$	Softwares	% Envejecimiento	Diferencia Softwares %
0.93	3.65	28	Matlab	57.8	0.75
			FuzzyApp	57.37	

### 5.1.3.2. Análisis comparativo del “muestreo 2” (Matlab & FuzzyApp) “carga en vacío”

En la figura 5.4, se muestra el comportamiento entre Fuzzy Toolbox Matlab y Shell FuzzyApp, donde, se observa el rendimiento calculado, al modelar los valores obtenidos, mostrando un grado de envejecimiento con un margen de 0.83 % entre estos softwares como se muestra en la tabla 5.4.



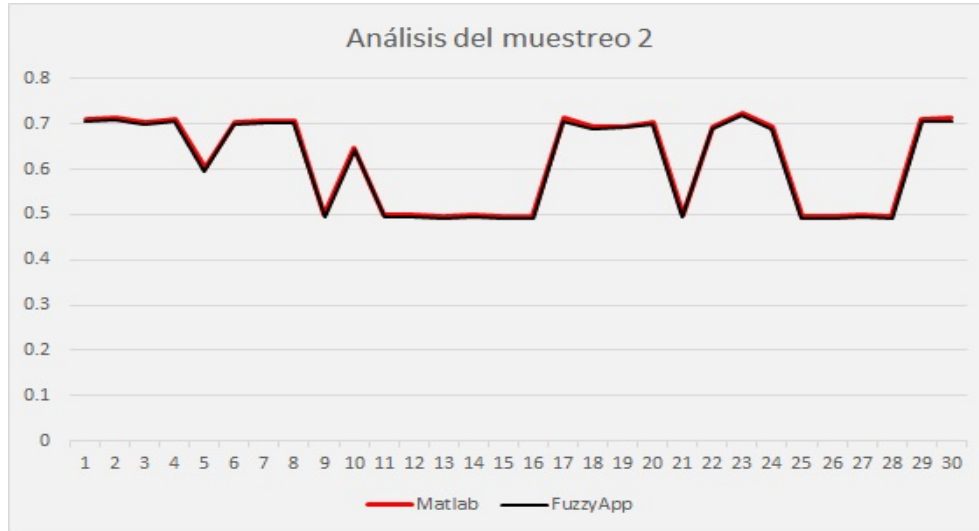


Figura 5.4: Gráfico de dos softwares “carga en vacío” “muestreo 2”

Tabla 5.4: Analisis del envejecimiento “carga en vacío” “muestreo 2”

VARIABLES DE ENTRADAS DURAS			MUESTREO 2		
$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^0C$	Softwares	% Envejecimiento	Diferencia Softwares %
0.93	3.65	28	Matlab	61.78	0.83
			FuzzyApp	61.27	

### 5.1.3.3. Análisis comparativo del “muestreo 3” (Matlab & FuzzyApp) “carga en vacío”

En la figura 5.5, se muestra el comportamiento entre Fuzzy Toolbox Matlab y Shell FuzzyApp, donde, se observa el rendimiento calculado, al modelar los valores obtenidos, mostrando un grado de envejecimiento con un margen de 18.58 % de diferencia para una carga en vacío del muestreo 3 como se muestra en la tabla 5.5.

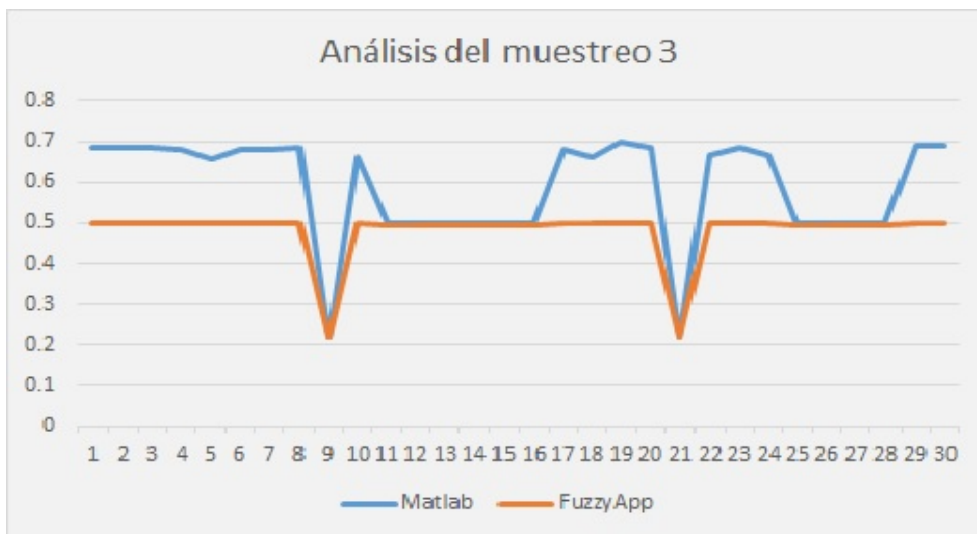


Figura 5.5: Gráfico de dos softwares “carga en vacío” “muestreo 3”

Tabla 5.5: Analisis del envejecimiento “carga en vacío” “muestreo 3”

VARIABLES DE ENTRADAS DURAS			MUESTREO 3		
$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^0C$	Softwares	% Envejecimiento	Diferencia Softwares %
0.93	3.65	28	Matlab	58.85	18.53
			FuzzyApp	47.95	

**5.1.3.4. Análisis comparativo del “muestreo 4” (Matlab & FuzzyApp) “carga en vacío”**

En la figura 5.6, se muestra el comportamiento entre Fuzzy Toolbox Matlab y Shell FuzzyApp, donde, se observa el rendimiento calculado, al modelar los valores obtenidos, mostrando un grado de envejecimiento con un margen de 14.64% de diferencia para una carga en vacío del muestreo 4 como se muestra en la tabla 5.6.

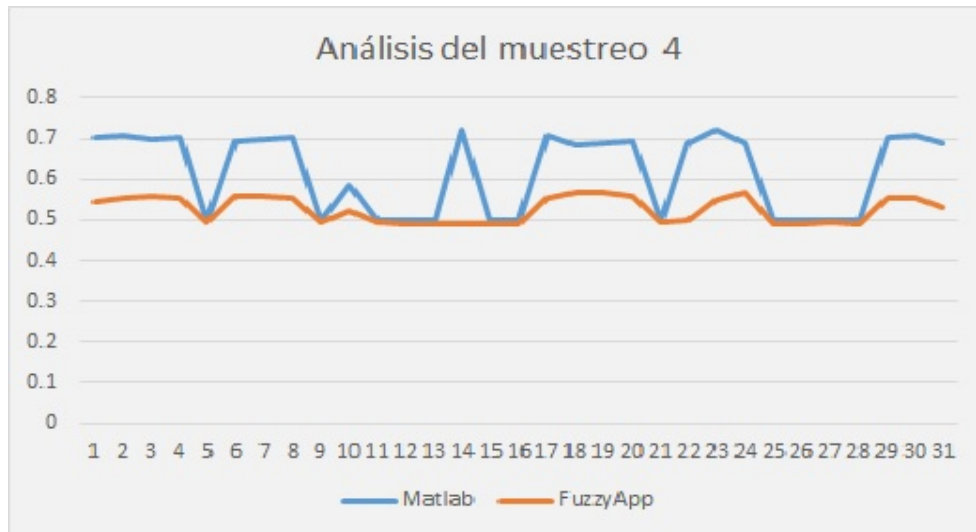


Figura 5.6: Gráfico de dos softwares “carga en vacío” “muestreo 4”

Tabla 5.6: Analisis del envejecimiento “carga en vacío” “muestreo 4”

VARIABLES DE ENTRADAS DURAS			MUESTREO 4		
$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^0C$	Softwares	% Envejecimiento	Diferencia Softwares %
0.93	3.65	28	Matlab	61.5	14.64
			FuzzyApp	52.5	

#### 5.1.3.5. Análisis comparativo del “muestreo 5” (Matlab & FuzzyApp) “carga en vacío”

En la figura 5.7, se muestra el comportamiento entre Fuzzy Toolbox Matlab y Shell FuzzyApp, donde, se observa el rendimiento calculado, al modelar los valores obtenidos, mostrando un grado de envejecimiento con un margen de 19.83 % de diferencia para una carga en vacío del muestreo 5 como se muestra en la tabla 5.7.

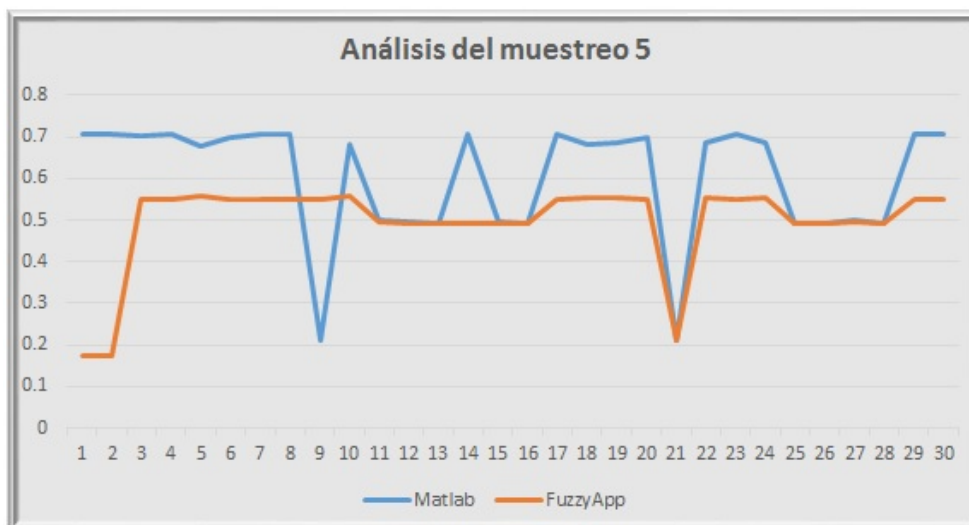


Figura 5.7: Análisis gráfico por dos softwares “carga en vacío” “muestreo 5”

Tabla 5.7: Analisis del envejecimiento “carga en vacío” “muestreo 5”

VARIABLES DE ENTRADAS DURAS			MUESTREO 5		
$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^{0C}$	Softwares	% Envejecimiento	Diferencia Softwares %
0.93	3.65	28	Matlab	68.6	19.83
			FuzzyApp	55	

#### 5.1.4. Resultados del sistema experto difuso en “carga dinámica” por Fuzzy Logic Toolbox Matlab

En la tabla 5.8 se muestran las variables lingüísticas de entrada y salida como son: los armónicos de tensión ( $THD_V$ ), los armónicos de corriente ( $THD_I$ ), y la temperatura del devanado (TD), y la salida de envejecimiento (EN) del motor de inducción.

Los distintos parámetros de las funciones de pertenencia en los subconjuntos de las variables lingüísticas, se toman 5 muestreos propuestos, del capítulo 4 de este trabajo de investigación son evaluados por medio de Fuzzy Logic Toolbox Matlab, [works, 2016], con la finalidad de observar el comportamiento de envejecimiento en los motores de inducción:

Tabla 5.8: Resultados del grado de envejecimiento “carga dinámica” en Matlab

	Entradas duras			Salidas				
	Variables lingüísticas			Muestreos y grado de envejecimiento				
	$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^{\circ}C$	1	2	3	4	5
1	5	25	30.5	0.459	0.541	0.52	0.398	0.5
2	4.9	24.5	38.9	0.433	0.541	0.506	0.397	0.25
3	5.2	26.1	40.1	0.515	0.573	0.562	0.526	0.811
4	5	24.3	41.5	0.449	0.703	0.535	0.393	0.25
5	4.9	27.2	42.8	0.489	0.571	0.565	0.599	0.819
6	4.9	27.5	44.6	0.499	0.585	0.575	0.614	0.821
7	4.75	28	45.9	0.445	0.608	0.596	0.632	0.824
8	5.2	28.8	49.6	0.612	0.652	0.646	0.673	0.829
9	5.6	26.6	51.2	0.576	0.613	0.599	0.573	0.755
10	5	25.2	35.4	0.462	0.613	0.524	0.426	0.85
11	5.6	24.6	37.5	0.532	0.593	0.586	0.505	0.533
12	5.4	24.6	39.7	0.511	0.577	0.553	0.474	0.25
13	5.3	29.2	40.3	0.639	0.674	0.666	0.689	0.832
14	5.6	30.2	41.9	0.687	0.726	0.706	0.72	0.813
15	4.9	29.2	42.7	0.509	0.671	0.671	0.675	0.847
16	5.8	31.6	43.86	0.688	0.729	0.712	0.732	0.659
17	5.2	26	31.3	0.513	0.572	0.56	0.517	0.81
18	5.8	25.5	37.7	0.568	0.615	0.642	0.547	0.659
19	5.5	26.1	40.9	0.554	0.597	0.582	0.526	0.811
20	5.3	24.3	43.7	0.493	0.572	0.536	0.453	0.25

### 5.1.5. Resultados del sistema experto difuso en “carga dinámica” por Shell FuzzyApp

En la tabla 5.9 se muestran las variables lingüísticas de entrada y salida como son: los armónicos de tensión ( $THD_V$ ), los armónicos de corriente ( $THD_I$ ), y la temperatura del devanado (TD), y la salida de envejecimiento (EN) del motor de inducción.

Los distintos parámetros de las funciones de pertenencia en los subconjuntos de las

variables lingüísticas, se toman 5 muestreos propuestos, del capítulo 4 de este trabajo de investigación son evaluados por medio de Shell FuzzyApp, [Flores et al., 2016], con la finalidad de observar el comportamiento de envejecimiento en los motores de inducción:

Tabla 5.9: Resultados del grado de envejecimiento “carga dinámica” FuzzyApp

	Entradas duras			Salidas				
	Variables lingüísticas			Muestreos y grado de envejecimiento				
	$THD_V\%$	$THD_I\%$	$TD^{\circ}C$	1	2	3	4	5
1	5	25	30.5	0.452	0.31	0.534	0.687	0
2	4.9	24.5	38.9	0.423	0.332	0.533	0.685	0.25
3	5.2	26.1	40.1	0.513	0.313	0.732	0.64	0
4	5	24.3	41.5	0.441	0.344	0.511	0.689	0.25
5	4.9	27.2	42.8	0.483	0.309	0.651	0.584	0
6	4.9	27.5	44.6	0.495	0.39	0.605	0.584	0
7	4.75	28	45.9	0.467	0.307	0.56	0.551	0
8	5.2	28.8	49.6	0.49	0.313	0.556	0.578	0
9	5.6	26.6	51.2	0.562	0.32	0.562	0.699	0
10	5	25.2	35.4	0.456	0.31	0.694	0.676	0
11	5.6	24.6	37.5	0.531	0.35	0.509	0.656	0.472
12	5.4	24.6	39.7	0.509	0.342	0.513	0.668	0.25
13	5.3	29.2	40.3	0.435	0.315	0.692	0.584	0.25
14	5.6	30.2	41.9	0	0.32	0	0.614	0.25
15	4.9	29.2	42.7	0.502	0.309	0.544	0.544	0
16	5.8	31.6	43.86	0	0.324	0	0.611	0
17	5.2	26	31.3	0.51	0.313	0.68	0.644	0
18	5.8	25.5	37.7	0.569	0.324	0.684	0.674	0
19	5.5	26.1	40.9	0.553	0.318	0.712	0.651	0
20	5.3	24.3	43.7	0	0.355	0.528	0.674	0.25

### 5.1.6. Análisis del grado de envejecimiento del sistema experto difuso “carga dinámica” “muestreo 1”

Para el comportamiento del grado de envejecimiento del motor de inducción por medio de 5 muestreos como se aprecia en la figura 5.8, donde las líneas de colores representan cada uno de de los muestreos propuestos evaluados en Fuzzy Logic Toolbox Matlab:

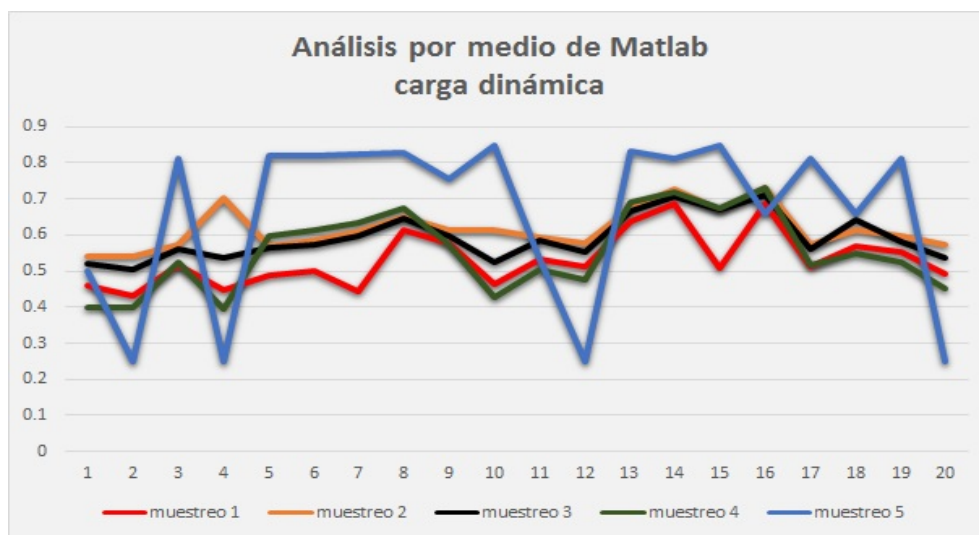


Figura 5.8: Gráfico de 5 muestreos modelados en Matlab

Para el comportamiento del grado de envejecimiento se aprecia en la figura 5.9, donde las líneas de colores representan cada uno de de los muestreos propuestos evaluados en Shell FuzzyApp:

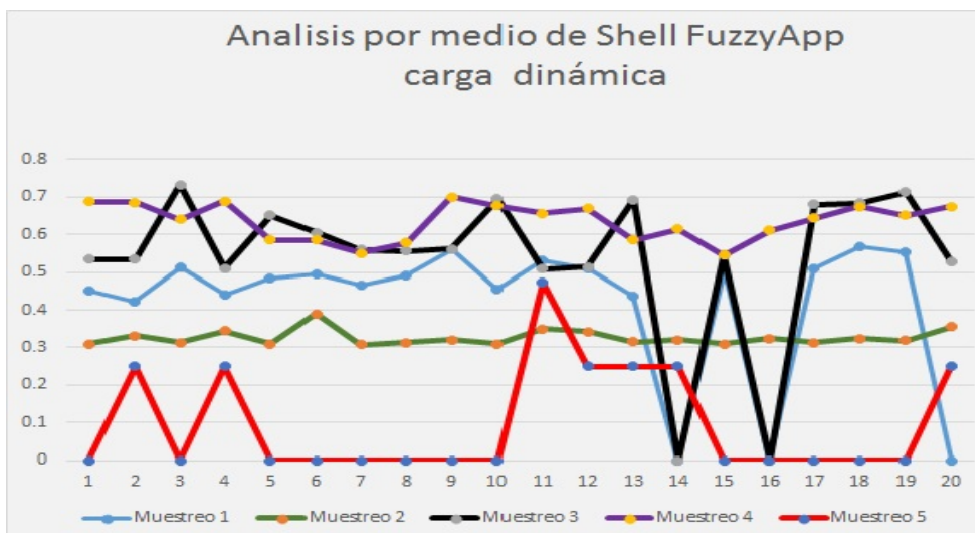


Figura 5.9: Gráfico de 5 muestreos modelados en Shell FuzzyApp

#### 5.1.6.1. Análisis comparativo del “muestreo 1” (Matlab & FuzzyApp) “carga dinámica”.

En la figura 5.10, se muestra el comportamiento entre Fuzzy Toolbox Matlab y Shell FuzzyApp, donde, se observa el rendimiento calculado, al modelar los valores obtenidos, mostrando un grado de envejecimiento con un margen de 21.58% de diferencia para una carga en dinámica del muestreo 1 como se muestra en la tabla 5.10.



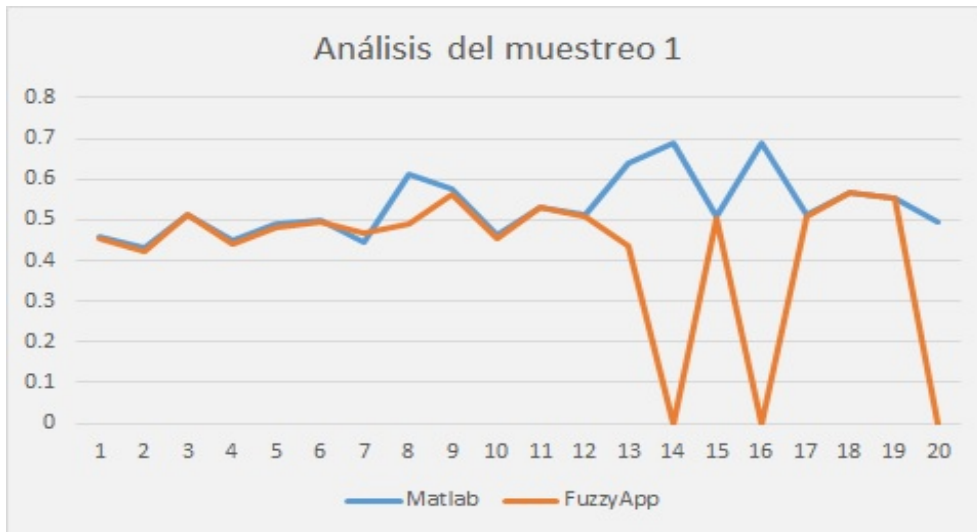


Figura 5.10: Análisis gráfico de dos softwares en “carga dinámica” “muestreo 1”

Tabla 5.10: Analisis del envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 1”

VARIABLES DE ENTRADAS DURAS			MUESTREO 1		
$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^0C$	Softwares	% Envejecimiento	Diferencia Softwares %
5.42	26.72	41	Matlab	53.5	21.58
			FuzzyApp	41.95	

#### 5.1.6.2. Análisis comparativo del “muestreo 2” (Matlab & FuzzyApp) “carga dinámica”.

En la figura 5.11, se muestra el comportamiento entre Fuzzy Toolbox Matlab y Shell FuzzyApp, donde, se observa el rendimiento calculado, al modelar los valores obtenidos, mostrando un grado de envejecimiento con un margen de 47.11 % de diferencia para una carga en dinámica del muestreo 2 como se muestra en la tabla 5.11.

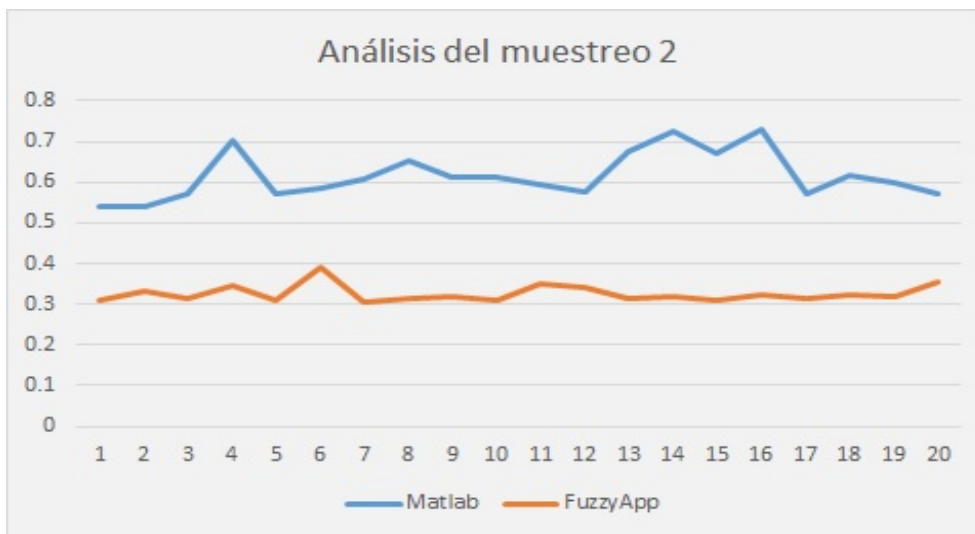


Figura 5.11: Análisis gráfico por dos softwares en “carga dinámica” “muestreo 2”

Tabla 5.11: Analisis del envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 2”

VARIABLES DE ENTRADAS DURAS			MUESTREO 2		
$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^0C$	Softwares	% Envejecimiento	Diferencia Softwares %
5.42	26.72	41	Matlab	61.63	47.11
			FuzzyApp	32.59	

### 5.1.6.3. Análisis comparativo del “muestreo 3” (Matlab & FuzzyApp) “carga dinámica”.

En la figura 5.12, se muestra el comportamiento entre Fuzzy Toolbox Matlab y Shell FuzzyApp, donde, se observa el rendimiento calculado, al modelar los valores obtenidos, mostrando un grado de envejecimiento con un margen de 8.79% de diferencia para una carga en dinámica del muestreo 3 como se muestra en la tabla 5.12.

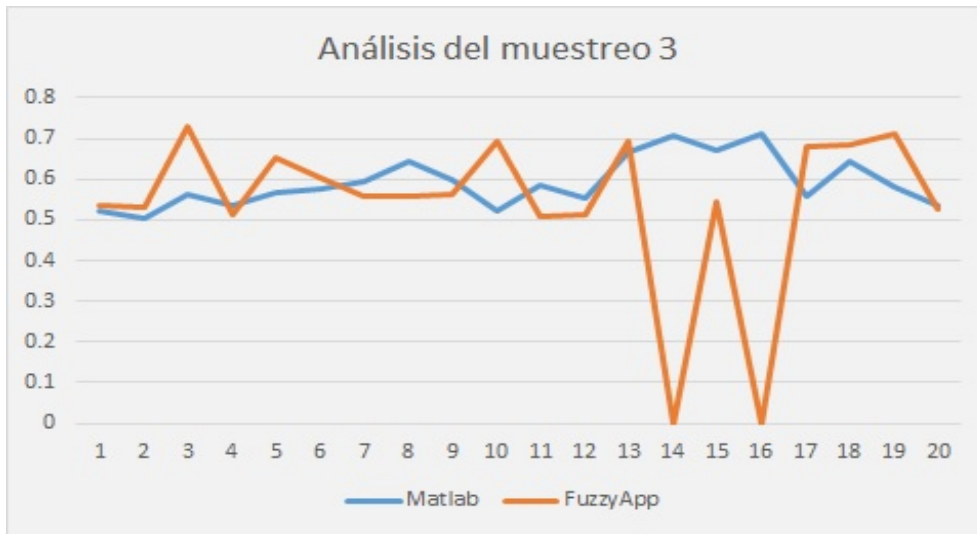


Figura 5.12: Análisis gráfico de dos softwares en “carga dinámica” “muestreo 3”

Tabla 5.12: Analisis del envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 3”

VARIABLES DE ENTRADAS DURAS			MUESTREO 3		
$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^0C$	Softwares	% Envejecimiento	Diferencia Softwares %
5.42	26.72	41	Matlab	59.21	8.79
			FuzzyApp	54	

#### 5.1.6.4. Análisis comparativo del “muestreo 4” (Matlab & FuzzyApp) “carga dinámica”

En la figura 5.13, se muestra el comportamiento entre Fuzzy Toolbox Matlab y Shell FuzzyApp, donde, se observa el rendimiento calculado, al modelar los valores obtenidos, mostrando un grado de envejecimiento con un margen de 14.67% de diferencia para una carga en dinámica del muestreo 4 como se muestra en la tabla 5.13.

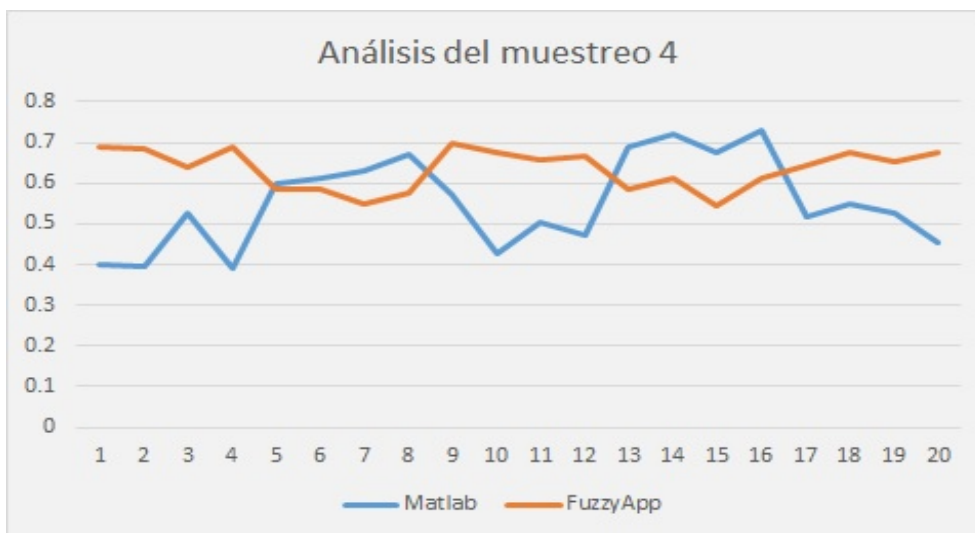


Figura 5.13: Análisis gráfico por dos softwares en “carga dinámica” “muestreo 4”

Tabla 5.13: Analisis del envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 4”

VARIABLES DE ENTRADAS DURAS			MUESTREO 4		
$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^0C$	Softwares	% Envejecimiento	Diferencia Softwares %
5.42	26.72	41	Matlab	55.34	14.67
			FuzzyApp	63.46	

#### 5.1.6.5. Análisis comparativo del “muestreo 5” (Matlab & FuzzyApp) “carga dinámica”

En la figura 5.14, se muestra el comportamiento entre Fuzzy Toolbox Matlab y Shell FuzzyApp, donde, se observa el rendimiento calculado, al modelar los valores obtenidos, mostrando un grado de envejecimiento con un margen de 85.04% de diferencia para una carga en dinámica del muestreo 5 como se muestra en la tabla 5.14.

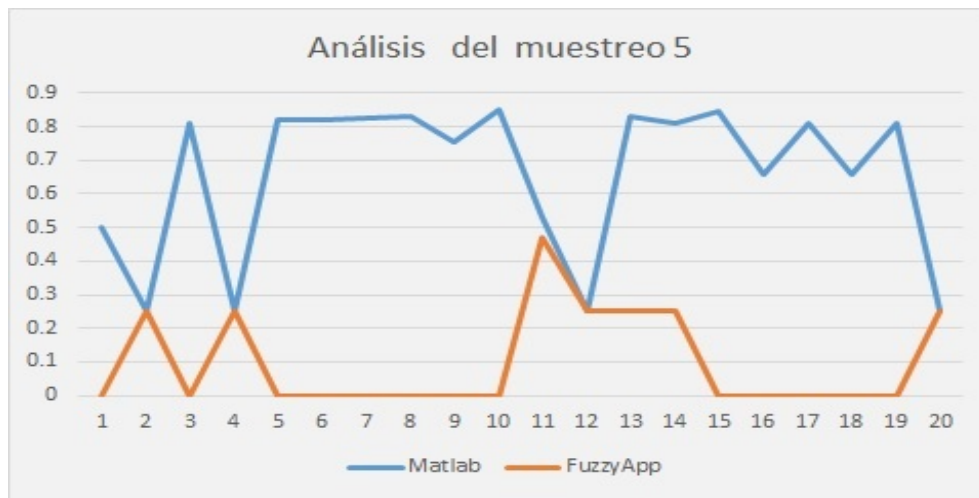


Figura 5.14: Análisis gráfico de dos softwares en “carga dinámica” “muestreo 5”

Tabla 5.14: Analisis del envejecimiento “carga dinámica” “muestreo 5”

VARIABLES DE ENTRADAS DURAS			MUESTREO 5		
$THD_V$ %	$THD_I$ %	$TD^0C$	Softwares	% Envejecimiento	Diferencia Softwares %
5.42	26.72	41	Matlab	65.86	85.04
			FuzzyApp	9.85	

#### 5.1.6.6. Comportamientos de software (Matlab & FuzzyApp)

El comportamiento analizado en Matlab y FuzzyApp, nos muestra una variación totalmente diferente, al evaluar el rendimiento en una carga en vacío y una carga dinámica, al realizar el modelado, nos arroja en los muestreos uno y dos para una carga en vacío, que los dos software dan un resultado casi homogéneo, pero en el muestreo tres, cuatro y cinco se disparan. Para una carga dinámica se observa que no existe una homogeneidad en los resultados, para la obtención del envejecimiento en los devanados, el software FuzzyApp muestra un comportamiento mucho muy diferente al de Matlab. El Matlab es un software comercial, ya evaluado para lógica difusa. Los modelados realizados con sus resultados son tomados como base para determinar la funcionalidad de FuzzyApp, como se muestran en las figuras 5.15 , 5.16. Donde la línea de color azul representan los resultados del software Matlab y la línea de color negro representan los resultados del Shell FuzzyApp.

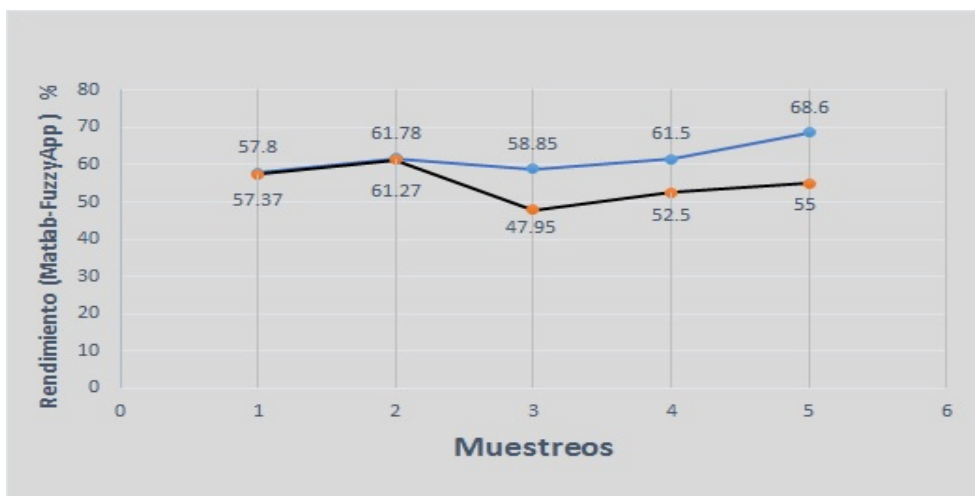


Figura 5.15: Gráfico de % envejecimiento (Matlab & FuzzyApp) “carga en vacío”

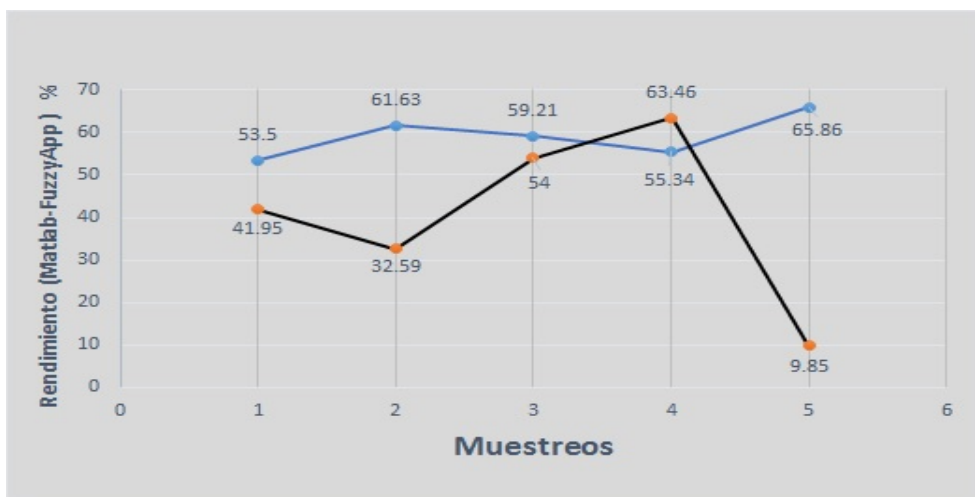


Figura 5.16: Gráfico de % envejecimiento (Matlab & FuzzyApp) “carga dinámica”

Por los resultados mostrados en la evaluación anterior y estando el software FuzzyApp con un promedio 40% de diferencia, se recomienda hacer otras evaluaciones en otros sistemas expertos.

Se mostró en las figuras 5.15, 5.16 la estabilidad con Matlab debido a que es un software comercial además de que ya ha sido probado ampliamente en múltiples sistemas expertos difusos.

# Conclusiones

En este trabajo de investigación se cumplió el objetivo general, al estudiar el comportamiento que afecta el envejecimiento de motores de inducción, analizando los armónicos eléctricos de tensión, corriente, y temperatura, al llevar a cabo el análisis mediante los equipos especializados de: termografía, y calidad de energía, se determinaron las variables de estudio, para su aplicación en el sistema de inferencia difusa.

Los equipos de calidad de energía son aplicados en las industrias para conocer el comportamiento de la energía eléctrica suministrada por CFE y a su vez, como los equipos instalados la distorsionan. También se aplican equipos para medir las vibraciones mecánicas y la termografía, entre otras más, para llevar a cabo el mantenimiento predictivo, en buscar de volver a las empresas más eficientes.

Las vibraciones mecánicas permiten conocer la frecuencia natural en una oscilación, estos equipos trabajan bajo la aplicación de las series de Fourier que genera algunos movimientos oscilatorios con respecto al tiempo y por lo general, se identifica éste comportamiento mediante diagramas espectrales, que también nos permite conocer la amplitud de la distorsión de armónicos eléctrica.

La aplicación de termografía me permitió determinar la temperatura reflejada del devanado y para los distintos tipos de transmisión de calor por conducción, convección, radiación, se aplicaron distintas emisividades dependiendo de los materiales utilizados.

Para la adquisición y procesamiento de las señales, la más utilizada es la serie de Fourier, en especial la transformada rápida de Fourier (FFT), para el análisis de las ondas sinusoidales por su fácil implementación, además en combinación de los equipos de la calidad de energía que permiten determinar las variables de los armónicos eléctricos y térmicos.

En éste trabajo de investigación se propuso los pasos en la utilización de los equipos, en calidad de energía para determinar las variables de armónicos eléctricas (tensión o corriente), y térmicas (temperatura), en éste caso se utilizó equipos para medición de armónicos (Fluke 41-B, Extech PQ-3350), y una cámara termográfica (Flir). Todos estos con la finalidad de la construcción de la base de datos de las entradas para sistema experto difuso, al modelarlo se obtuvo el diagnóstico de envejecimiento en los motores de inducción.

La lógica difusa está definida mediante las teorías de conjunto difusos, que sirven como la base a los sistemas de inferencia difusa, como lo son: el sistema de inferencia difusa Mandani, el sistema de inferencia Sugeno, y el sistema de inferencia Sukamoto. Para está tesis se utilizó el sistema tipo Mandani, por su rápida implementación, además de ser una de los más ampliamente utilizados, además es la base de los parámetros de las funciones de pertenencia de las variables lingüísticas de entradas y salidas, después se evalúan éstas por las reglas de inferencia "si-entonces", en combinación del método del centroide, para finalmente obtener los datos difusos. Una vez que se ha justificado el porqué de la implementación del sistema experto difuso en el diagnóstico de envejecimiento en los motores de inducción, donde se proponen las bases de los parámetros de las funciones de pertenencia, en relación a tres entradas lingüísticas y una salida lingüística, por medio de los rangos de los armónicos de tensión y de corriente, la temperatura del devanado, y el envejecimiento del rango obtenido por las mediciones realizadas.

En este trabajos se hizo el análisis del sistema experto difuso utilizando los 5 diferentes muestreos de las variables lingüísticas de las entradas y una salida, por medio de dos softwares de lógica difusa (Fuzzy Logic Toolbox Matlab, y FuzzyApp) se describieron las metodologías de estos softwares además se combinan las reglas de inferencia propuestas, con la finalidad de determinar el grado de envejecimiento de los motores de inducción.

En el análisis de los resultados se mostró el rendimiento de dos software de lógica difusa, donde se observaron gráficamente el comportamiento de cada uno estos, permitiendo evaluar el grado de envejecimiento en los motores de inducción.

Los dos software de lógica difusa han demostrado una gran diferencia de uno con respecto a otro en la obtención del grado de envejecimiento en los motores de inducción, en el diagnóstico de fallas de mantenimiento preventivo en el área de mantenimiento



industrial.

Además se identificaron las fallas propuestas tales como son: los armónicos de tensión, y de corriente, temperatura en el devanado de los motores de inducción, en donde se encontró las que afectan menos son los armónicos de la tensión, mientras los más dañinos de estos equipos son los armónicos de corriente, y la temperatura del devanado de estos equipos.

Los beneficios de conocer el porcentaje de envejecimiento nos permiten:

- Programar un mantenimiento preventivo a fin de evitar paros inesperados.
- Proponer sistemas de filtrado para la eliminación de armónicos.
- Si se eliminan los armónicos se reduce el desperdicio de energía pérdida en forma de calor.
- Se aumenta la seguridad de personal y las instalaciones por fallas que pudieran ocurrir.
- Se incrementa el factor de potencia en las compañías industriales.

# Trabajos Futuros

En el área de mantenimiento preventivo se han hecho algunos estudios sobre la calidad de energía, que es de gran interés en las compañías industriales, con lo que se siguen empleando nuevos equipos en calidad de la energía, para el diagnóstico de fallas en componentes industriales.

En un futuro se podría conocer las pérdidas de energía, por medio de los fasores eléctricos, en la red de alimentación de las compañías industriales, que se pueden determinar las variables eléctricas de potencia, por medio de los equipos para armónicos eléctricos y las tarjetas de adquisición de señales de la Familia Labview (C-DAC-series).

Una vez adquiridos los datos se podría hacer un sistema experto difuso tipo 2, para diagnosticar las pérdidas de energía en una red de alimentación, además se obtiene una mejor precisión de los datos evaluados.

La lógica difusa tipo 1 ha sido aceptada en las diferentes áreas de la ingeniería, debido a su fácil implementación en el cálculo, ya que consiste en definir las entradas y salidas aplicadas en un sistema de inferencia difusa por medio de reglas de inferencia difusa evaluados, por un método de desdifusificación.

La lógica difusa tipo 2 es parecido a la lógica difusa tipo 1 donde la diferencia del tipo 2 se requiere una doble fusificación y doble desdifusificación además entre más se acerca al rango de la función de pertenencias da una mayor exactitud, por medio de un promedio, que en el sistema de lógica difusa tipo 1 no es posible.

# Bibliografía

- [Flu, 1995] (1995). *FLUKE 39/41B Power Harmonic Tester*. FLUKE.
- [Fli, 1995] (1995). *User's Manual FLIR T4XX series*. FLIR.
- [OPE, 2007] (2007). *OPERATING INSTRUCTIONS AND SPECIFICATIONS NI 9219*. National Instrument.
- [Com, 2009] (2009). *NI CompactDAQ, cDAQ-9171/9178/9174/9178 USB Chasis*. National Instrument.
- [EXT, 2013] (2013). *Analizador de Potencia y Armónicos Modelo PQ-3350*. EX-TECH.
- [Abraham, 2005] Abraham, A. (2005). *Handbook of Measuring System Design*. Wiley Sons.
- [Akgun et al., 2012] Akgun, A., Nefeslioglu, E. A., Gokceoglu, C., and Pradhan, B. (2012). An essay-to-use matlab program (mamland) for the assessment of landslide susceptibility using a mandani algorithm. *ELSEVIER, Computer Geosciences*, 38(1):23–34.
- [Alavi, 2013] Alavi, N. (2013). Quality determination of mozafati dates using mandani fuzzy inference system. *ELSEVIER, Journal of the saudi society of Agricultural sciences*, 12(2):137–142.
- [Allouche et al., 2010] Allouche, M., Chaabane, M., Soussi, M., Mehdi, D., and Hajjaji, A. (2010). Takagi-sugeno fuzzy sensor faults estimation of an induction motor. *IEEE, Control Automation (MED), 2010 18th Mediterranean Conference on*, pages 243–248.

- [Azgomi and Poshtan, 2013] Azgomi, H. F. and Poshtan, J. (2013). Induction motor stator faults detection via fuzzy logic. *IEEE, 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, pages 1–5.
- [Chen and Chen, 2014] Chen, M.-Y. and Chen, B.-T. (2014). Online fuzzy time series analysis based on entropy discretization and a fast fourier transform. *El Sevier, Applied Soft Computing*, 14:156–166.
- [Chengyan et al., 2013] Chengyan, L., Fei, Q., and Zhaower, B. (2013). Non-destructive testing for defects in electronic package based on infrared thermography. *IEEE, Electronics Packaging Tenchnology (ICEPT) 2013 14th International Conference on*, pages 865–869.
- [DAY and MAHMOUD, 1987] DAY, A. L. and MAHMOUD, A. A. (1987). Improvement of power quality with advanced power electronic equipment. *IEEE, TRANSACTIONS ON INDUTRY APPLICATIONS*, IA-23(03):498–503.
- [Eva Armengol, 2016] Eva Armengol, and Pilar Dellunde, a. A. G.-C. a. (2016). On similarity in fuzzy desription logics. *ELSEVIER, Fuzzy Sets and Systems*, 292:49–74.
- [Flores et al., 2016] Flores, S. C. P., Flores, P. M. Q., and luis Hernandez Corona, J. (2016). Modelado de un sistema de inferencia difusa tipo mandani para el diagnóstico de envejecimiento en motores de inducción. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, 21(1):34–42.
- [Fracalanza et al., 2016] Fracalanza, E., Borg, J. C., and Constantinescu, C. (2016). A fuzzy logic based approach to explore manufacturing system changeability level decisions. *ELSEVIER, 48th CIRP Conference on Manufacturing System -CIRP CMS 2015*, IA-23(03):3–8.
- [Gao, 2001] Gao, S. J. O. X.-Z. (2001). Soft computing in industrial innovation: case study on home appliance technology. *IEEE, Systems, Man, and Cybernetics, 2001 IEEE International Conference on*, 1:70–76.
- [Gaussorgues, 1994] Gaussorgues, G. (1994). *Infrared Thermography*. SPRINGER.
- [Gonzalez et al., 2002] Gonzalez, G. D., Alvarez, A. B., and aleixandre fernández, J. G. (2002). *Variación de la velocidad de los motores eléctricos*. Universidad de Oviedo. Servicio de publicaciones.

- [J.Chapman, 2000] J.Chapman, S. (2000). *Máquinas eléctricas tercera edición*. MAC GRAW HILL.
- [Jerry M, 1995] Jerry M, M. (1995). Fuzzy logic system for engineering : A tutorial. *IEEE, Proceeding of the IEEE*, 83(3):345–377.
- [K.Alameh et al., 2015] K.Alameh, N.Cite, G., and G.Barakat (2015). Vibration based faults diagnosis for permanent magnet synchronous motors. *IFAC-PapersOnline*, 48-21:1444–1450.
- [Kaplan, 2003] Kaplan, H. (2003). *Practical Applications of Infrared Thermal sensing and Imaging Equipment*. SPIE.
- [Killian et al., 2011] Killian, M., Mayer, B., Schirrer, A., and Kozek, M. (2011). Cooperative fuzzy model predictive control. *IEEE Transactions on Fuzzy System*, 24(2):471–482.
- [Kumar et al., 2010] Kumar, K. V., Suresh, D. S., Praveena, B., P.John, J., and Paul, J. E. (2010). Soft computing based faults diagnosis. *IEEE, Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 2010 International Conference on*, pages 1–7.
- [K.V Zuñiga and Aguilar, 2014] K.V Zuñiga, a. I. C. and Aguilar, R. (2014). Using fuzzy logic to model the behavior of residential electronical utilyti customers. *ELSEVIER, Apply Energy*, 115:384–393.
- [Li et al., 2011] Li, H., Liu, H., Gao, H., and Shi, P. (2011). Reliable fuzzy control for active suspension systems with actuator delay and fault. *IEEE Transactions on Fuzzy System*, 20(2):342–357.
- [L.Kosow, 1993] L.Kosow, I. (1993). *Máquinas eléctricas y transformadores*. PRENTICE HALL Hispanoamerica.
- [Lopez, 1994] Lopez, E. E. P. (1994). *Análisis de armónicos en sistemas de distribución*. Universidad Nacional de Colombia.
- [M et al., 1996] M, L., Tolbert, Hollis, H. D., and Hale, P. S. (1996). Survey of harmonics measuments in electrical distribution system. *IEEE, Industry Applications Conference 1996, Thirty-First IAS Annual Meeting IAS'96, Conference Record of the 1996 IEEE*, pages 2333–2339.

- [Mandani and Assilan, 1975] Mandani, E. and Assilan, S. (1975). An experiment in linguistic syntesis with a fuzzy logic controller. *ELSEVIER, International Journal of Man- Machine studies*, 7(1):1–13.
- [Maria et al., 2010] Maria, J. G., Alcalá, R., and Herrera, F. (2010). Interpretability in the multiobjective evolutionary rule selection and tuning of linguistic fuzzy systems. *IEEE, Transactions on Fuzzy System*, 18(3):515–531.
- [Mishra et al., 1998] Mishra, M. K., Tarnerkar, S., and D.P. Kothari, A. G. (1998). Detection of incipient faults in single phase induction motors using fuzzy logic. *IEEE, Power Quality '98*, pages 117–121.
- [Mosquera et al., 2000] Mosquera, G., DÃaz, M. P., and ul Armas Cardona, R. (2000). *Las vibraciones mecánicas y su aplicaci on al mantenimiento predictivo*. En talleres de Gráficas Le on. S.R.L.
- [NA, 2010] NA, M. G. Q. N. E. (2010). Criterios para la selección de un motor y controles eléctricos como prevención de riesgos en la industria. Technical report, ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.
- [Naveena et al., 2015] Naveena, Dodakundi, G. M., and Layadgundi, A. (2015). Faults diagnosis of vsi fed induction motor drive using fuzzy logic approach. *IEEE, Power and Advanced Control Engineering (ICPACE), 2015 International Conference on*, pages 315–321.
- [Ouyang et al., 2008] Ouyang, Y., Fang, J., and Zhao, Z. (2008). A generalization of additive generator of triangular norms. *ELSEVIER, International Journal of Approximate Reasoning*, 49(2):417–421.
- [Pedrycz and Gomide, 1998] Pedrycz, W. and Gomide, F. (1998). *An Introduction to Fuzzy Sets Analysis and Design*. A. Bradford Book.
- [Perez et al., 2015] Perez, O. D., Escudero, L. A. G., Sotelo, D. M., Gardel, P. E., and Alonso, M. P. (2015). Analysis of faults signatures dor diagnosis of induction motors fed by voltage sour e invertes using anova and additive models. *Elsevier, Electric Power System Research*, 121:1–13.
- [Rao, 2012] Rao, S. S. (2012). *Vibraciones mecanicas*. PEARSON.

- [Roger et al., 1997] Roger, J. S., Chuen-Tsai, J., and Mizutnami, S. E. (1997). *Nuero Fuzzy and soft Computing A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*. Prantice Hall.
- [Rosa, 2006] Rosa, F. C. D. L. (2006). *HARMONICS AND POWER SYSTEM*. Taylor and Francis Group, 7th edition.
- [Saghafinia et al., 2012] Saghafinia, A., Kahourzade, S., Mahmoudi, A., Hew, W., and Uddin, M. N. (2012). On line trained fuzzy logic and adaptive continuous wavelet transform based high precision faults detection of im with broken rotors bars. *IEEE, Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2012 IEEE*, pages 1–8.
- [Sánchez, 2003] Sánchez, J. A. (2003). *Control avanzado de procesos (Teoría y práctica)*. Ediciones Díaz de Santos.
- [Saravanan et al., 2012] Saravanan, K., Stanlin, A. D., Rajalakshmi, A., and AP, G. S. A. P. (2012). Ower electronics genesis, trends and improvement. *IEEE, International Conference On Advances In Engineering Science And Management (ICAESM-2012) March 30,31,2012*, pages 595–599.
- [Seising, 2010] Seising, R. (2010). “soft concepts” for soft computing in “soft sciences” on 20 years of soft computing. *IEEE, Fuzzy Systems (FUZZ), 2010 IEEE International Conference on*, pages 1–8.
- [Seker et al., 2008] Seker, S., Selim, G. d. l. d., and Ayaz, E. (2008). Transfer function approach based upon wavelet transform for bearing damage detection in electric motors. *IEEE, International Symposium on Industrial Electronics*, pages 749–752.
- [Shafiul et al., 2015] Shafiul, M., Chowdhury, N. A., Sakil, A. K., Khandakar, A., Iqbal, A., and Abu-Rub, H. (2015). Power quality effect of using incandescent fluorescent, cfl and led lamps on utility grid. *IEEE, First Workshop on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE 2015)*, pages 1–5.
- [Shome et al., 2012] Shome, S. K., Datta, U., and Vadali, S. (2012). Fpga based signal prefiltering system for vibration analysis of induction motor failure detection. *SciVerse ScienceDirect, Procedia Technology*, 4:442–448.
- [Singla, 2015] Singla, J. (2015). Comparative study of mandani-type and sugeno-type fuzzy inference systems for diagnosis of diabetes. *IEEE, International Conference on*

*Advances in Computer Engineering and Applications (ICACEA) IMS Engineering, Ghaziabad, India, pages 517–522.*

- [Stipetic et al., 2012] Stipetic, S., Kovacic, M., Hanic, Z., and Vrazic, M. (2012). Measurement of excitation winding temperature on synchronous generator in rotation using infrared thermography. *IEEE, Transactions on Industrial Electronics*, 59(5):2888–2298.
- [Suesut et al., 2011] Suesut, T., Nunank, N., T.Numak, A.Rotrugs, and Y.Tuppadung (2011). Emissivity measurements on material and equipment in electrical distribution system. *IEEE, Control, Automation and System (ICCAS), 2011 11th International Conference on*, pages 2888–2298.
- [V et al., 1993] V, P., Goode, and yuen Chow, M. (1993). Neural/fuzzy system for incipient faults detection in induction motors. *IEEE, Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1993. Proceedings of the IECON '93., International Conference on*, 1:332–337.
- [V.P and Ushakumari, 2011] V.P, M. and Ushakumari, D. S. (2011). Incipient fault detection and diagnosis of induction motor using fuzzy logic. *IEEE, Recent Advances in Intelligent Computational Systems (RAICS), 2011 IEEE*, pages 675–681.
- [Wagner et al., 1993] Wagner, V. E., Chairman, Balda, J., Barnes, T., Emanuel, A., Ferraro, R., Griffith, D., Hartman, D., Horton, W., W.T.Jewell, A.McEachern, Philleggi, D., and Reid, W. (1993). Effects of harmonic on equipment. *IEEE, Transactions on Power Delivery.*, 8:672–680.
- [Weinbissinger, 2010] Weinbissinger, F. (2010). *ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA DE MOTORES ASINCRONOS*. SOCOMEC Innovative Power Solutions UPS.
- [Wildi, 2007] Wildi, T. (2007). *Máquinas eléctricas y sistema de potencia*. PEARSON PRENTICE HALL.
- [works, 2016] works, M. (2016). Fuzzy logic toolbox matlab. [Web; accedido el 28-05-2016].
- [X.Lei et al., 1987] X.Lei, Retzmann, D., and M.Weinhold (1987). improvement of power quality with advanced power electronic equipment. *IEEE, Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2000 Proceedings DRPT 2000 International Conference on*, pages 437–442.



- [Zadeh, 1999] Zadeh, L. (1999). Fuzzy logic and calculi of fuzzy rules, fuzzy graphs , and fuzzy probabilities. *ScienceDirec, Computers & Mathematics with Applications*, 37(11-12):5.
- [Zadeh, 1995] Zadeh, L. A. (1995). Discussion: Probability theory and fuzzy logic are complementary rather than competitive. *Technometrics*, 37(3):271–276.
- [Zadeh, 2008] Zadeh, L. A. (2008). Is there a need for fuzzy logic. *IEEE, Fuzzy Information Processing Society, 2008. NAFIPS 2008. Annual Meeting of the North American*, pages 1–3.

## Apéndice A

# Historial academico

En este apéndice A se cumple el requisito de la publicación de artículos de divulgación científica, y la satisfacción del proyecto en donde se realizó en la Universidad Tecnológica de Tlaxcala, como son mostrados a continuación.

**T.S.U. en Mantenimiento Área Industrial  
Ingeniería en Mantenimiento Industrial**

El Carmen Xalpatlahuaya, Huamanilla, Tlax., 09 de Marzo de 2016.

Asunto: **carta de satisfacción**

**MTRO. FELIPE PASCUAL ROSARIO AGUIRRE  
DIRECTOR  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO  
PRESENTE.**

Sea este el medio para hacerle llegar un cordial saludo, de igual manera le hago saber que la Estancia Técnica del alumno, el C. Ing. Gelacio Copaicua Nava, alumno de la Maestría en Sistemas Computacionales de la Institución que Usted dignamente dirige, desarrolló satisfactoriamente las actividades encomendadas durante su estancia, contando con la asesoría del M. en C. José Luis Hernández Corona, Responsable del Cuerpo Académico de Mantenimiento Industrial, en el Laboratorio de Mantenimiento Predictivo y del Dr. Perfecto Malaquías Quintero Flores, Profesor Investigador del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Apizaco, logrando una publicación en el Journal of Tlaxcala 2016, próxima a ser publicada, con título: Determinación de variables de envejecimiento en motores de inducción, por lo que, por mi parte, no existe inconveniente alguno, para dar por concluido su proyecto de estancia.

Sin otro particular que tratar por el momento, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE**  
**"Ciencia y Técnica para el Desarrollo"**



**ING. CARLOS HERNÁNDEZ CARRILLO  
DIRECTOR DE CARRERA**



**GOBIERNO DEL ESTADO DE TLAXCALA  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE TLAXCALA  
INGENIERIA EN MANTENIMIENTO  
INDUSTRIAL**

c.c.p. M. en C. Gediro Cano Lima. Coordinador de Directores.  
c.c.p. Archivo.  
CHC/hpf



**Desarrollo  
para Todos**  
UNA NUEVA REALIDAD

**T.S.U. en Mantenimiento Área Industrial  
Ingeniería en Mantenimiento Industrial**

El Carmen Xalpatlahuaya, Huamantla, Tlax., 09 de Marzo de 2016.


Asunto: **carta de liberación**

**MTRO. FELIPE PASCUAL ROSARIO AGUIRRE  
DIRECTOR  
INSTITUTO TECNOLÓGICO DE APIZACO  
PRESENTE.**

Sea este el medio para hacerle llegar un cordial saludo, de igual manera, informo que el C. Ing. Gelacio Copalcua Nava, alumno de la Maestría en Sistemas Computacionales de la Institución que Usted dignamente dirige, ha cumplido satisfactoriamente el proyecto de su estancia técnica; "Sistema experto difuso y diagnóstico de envejecimiento de motores eléctricos", teniendo como asesores al M. en C. José Luis Hernández Corona, Responsable del Cuerpo Académico de Mantenimiento Industrial, en el Laboratorio de Mantenimiento Predictivo y al Dr. Perfecto Malaquías Quintero Flores, profesor investigador del Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Apizaco, cubriendo el periodo comprendido del 27 de Julio de 2015 al 31 de Enero de 2016, de lunes a jueves con un horario de 9:00 a 17:00 hrs.

Sin otro particular que tratar por el momento, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE**  
**"Ciencia y Técnica para el Desarrollo"**



**ING. CARLOS HERNÁNDEZ CARRILLO  
DIRECTOR DE CARRERA**



GOBIERNO DEL ESTADO DE TLAXCALA  
UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA  
DE TLAXCALA  
INGENIERIA EN MANTENIMIENTO  
INDUSTRIAL

c.c.p. M. en C. Gadiro Cano Lima, Coordinador de Directores.  
c.c.p. Archivo.  
CHC/hof



ACADEMIA JOURNALS



Primer Congreso Internacional de Academia Journals  
en Educación Superior Tecnológica Pública  
Tlaxcala 2016

*Certificado*

otorgado a

Ing. Gelacio Copalcua Nava  
Dr. Perfecto Malaquías Quintero Flores  
M.C José Luis Hernández Corona  
Dr. Rafael Ordoñez Flores.

por su artículo intitulado

Determinación de variables de envejecimiento en motores de inducción

(Artículo No. Tlax037)

el cual fue presentado en el Congreso desarrollado del 16 al 18 de marzo 2016 en Tlaxcala, México,  
y publicado en el portal de Internet *AcademiaJournals.com*,  
con número de registro ISSN 1946-5351, VOL. 8, NO. 2  
y en el libro electrónico online con ISBN 978-1-939982-21-6 intitulado  
*Compendio de Investigación Academia Journals Tlaxcala 2016*

Dr. Rafael Moras  
Editor, Academia Journals  
Profesor de Ing. Industrial, St. Mary's University



# Determinación de variables de envejecimiento en motores de inducción

Ing. Gelacio Copalcua Nava<sup>1</sup>, Dr. Perfecto Malaquías Flores Quintero<sup>2</sup>,  
M.C José Luis Hernández Corona <sup>3</sup> y Dr. Rafael Ordoñez Flores<sup>4</sup>

**Resumen**— Una de las principales perturbaciones son los armónicos de voltaje y corriente ya que estas a su vez se dividen en subíndices armónicos, como se menciona a continuación,  $THD_v$ ,  $THD_i$ ,  $V_{RMS}$ ,  $I_{RMS}$ , F.C,  $V_{pico}$ , en este trabajo se analiza la forma de tensión y corriente con equipos de calidad de energía, evaluando todas las variables que intervienen, ya que los parámetros de medida de las cargas no lineales son las causantes de envejecimiento en motores de inducción. La mayoría de las cargas no lineales son una de las fuentes principales de contaminación de armónicos y se relaciona con el factor de potencia, que está establecido por las compañías suministradoras de energía eléctrica y a su vez éstas se regulan por medio de normas internacionales sobre armónicos, otro factor estudiado y de gran importancia es la temperatura, analizada por medio de elementos de adquisición de temperatura como termopares y fueron comparados con sistemas de medición térmica infrarroja y termografía.

**Palabras clave**— Armónicos, envejecimiento, no lineal, energía, temperatura.

## Introducción

El surgimiento de los armónicos, nace desde la época griega, cuando se realizó un experimento de una cuerda, donde, se demostró que se genera una perturbación de una onda sinusoidal armónica simple, de aquí, cuando surge más interés de un Matemático, llamado Euler quien hace un modelado matemático que posteriormente sirve de base para la utilización de la Serie de Fourier, para el análisis de ondas sinusoidales y es entonces, donde se realizan las primeras pruebas en distintas áreas de aplicación, como la termografía, vibraciones mecánicas, calidad de energía, el sonido, y todas aquellas aplicaciones que se utilizan la adquisición de señales por salida de espectros. Las vibraciones mecánicas por medio de un análisis y sistemas de pruebas deben proporcionar información esencial para la detección temprana de fallas o malfuncionamiento, debido a todas las condiciones de equipos eléctricos. De esta manera que un daño mayor o incluso fallas, pueden prevenirse, puede afectar el rendimiento del equipo (Loan Lita et al. 2010).

La clave de utilizar adquisición de señales son empleados, para el diagnóstico, y entre otras aplicaciones, por ejemplo en la capacidad, para diferenciar, entre trayectorias de vibración subnormal y normal de ensamble eléctrico, Desde el punto de vista práctico, las funciones de vibraciones armónicos simples son relacionados, para la frecuencias circulares de la rotación o movimientos de los componentes. Determinando estas frecuencias es el primer punto básico en analizar la condición de funcionamiento en este caso equipos eléctricos (T. Szolc y A. Ponchake, 2010 y E. Suhir, 2000). Las redes de armónicos, tienden a aumentar las pérdidas del sistema, pueden excitarse frecuencias de resonancia, y causa el mal funcionamiento de equipos y provoca envejecimiento, por lo tanto como las proporciones de las cargas no lineales son esencialmente, ubicadas en las redes continuas que pueden incrementarse, hay una forma para predecir la generación de armónicos por estos elementos convirtiéndose en importantes incrementos de esto mismo (P.A. Gray y P. W Lehn, 2012).

Una de las áreas principalmente en el mantenimiento predictivo, actualmente es una de herramienta, que se emplea en técnicas de diagnóstico, para monitoreo del envejecimiento de motores de inducción (Gao, Bingkungn et al. 2013).

<sup>1</sup> Ing. Gelacio Copalcua Nava, Estudiante de Maestría en Sistemas Computacionales en el Tecnológico Nacional de México- Instituto Tecnológico de Apizaco, México [gelacio\\_copalcua@outlook.es](mailto:gelacio_copalcua@outlook.es)

<sup>2</sup> Dr. Perfecto Malaquías Quintero Flores, Profesor Investigador en el Posgrado en Sistema Computacionales en el Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Apizaco, México [kmalakof@yahoo.fr](mailto:kmalakof@yahoo.fr)

<sup>3</sup> M.C. José Luis Hernández Corona, Profesor Investigador, del Departamento de Ingeniería en Mantenimiento Industrial, Universidad Tecnológica de Tlaxcala, México, [coronahluis@hotmail.com](mailto:coronahluis@hotmail.com)

<sup>4</sup> Dr. Rafael Ordoñez Flores, Profesor Investigador en el Posgrado en Sistema Computacionales en el Tecnológico Nacional de México - Instituto Tecnológico de Apizaco, México [rafaelpordonesf@gmail.com](mailto:rafaelpordonesf@gmail.com)

Se ha investigado y analizado, por medio de artículos, sobre motores de cd y ca para la condición de monitoreo, que han sido presentados alrededor del mundo en las últimas décadas, estas condiciones de monitoreo son de más alta prioridad entre prevalecer y dar continuidad sobre la extensión de los motores eléctricos (Zhao Hua, 2011). Una de las herramientas para la obtención de parámetros son equipos especializados y personal calificado, con las bases de conocimiento en programación ya que representa un costo en su implementación en algunas empresas, una de las áreas de aplicación, donde se emplea en el mantenimiento predictivo, abarca distintas sub-áreas, dentro del mantenimiento predictivo, hay una que se encarga en el estudio de la calidad de energía para obtener algunos parámetros de adquisición de señales, por medio de algunas áreas de ingeniería, por ejemplo, si necesitamos adquirir señales por medio de vibraciones mecánicas, en donde, se adquiere el dato por medio de componentes como los acelerómetros, entre otros, cada una de las señales obtenidas mostrara los parámetros de operación del equipo, los softwares son herramientas eficaces, que permiten monitoreo en tiempo real, conjuntamente con el hardware, por lo regular, cada fabricante del equipo predictivo o de medición tiene su software para el análisis de datos, regularmente con salida a gráfico, comúnmente denominado espectro, para poder aumentar la vida útil de los motores (Mikhail Tsyarkin, 2012).

El estudio consistió en obtener y analizar algunas de las fuentes de envejecimiento en los motores de inducción, algunas de las más comunes son los armónicos, estos afectan la calidad de energía y provoca serios problemas en la industria, además que por su existencia provocan un aumento en el consumo de energía eléctrica. Las ondas de consumo se dividen en lineales y no lineales. Las primeras señales de onda son denominadas ideales y en las segundas generadas por la distorsión de señal, además de afectaciones, esencialmente por componentes electrónicos en la industria, provocando costos en el consumo de la energía eléctrica. Abordaremos algunos modelados matemáticos para adquisición de señales, por medio de las series de Fourier y un desglose general del mismo, En la metodología, describimos los pasos para la adquisición de señales en tiempo real, y el comportamiento de las ondas sinusoidales, por medio de software mediante el equipo de calidad de energía. En el desarrollo se hizo un análisis comparativo de una carga lineal resistiva y una comparación con los resultados medidos de una subestación eléctrica.

### Marco teórico

Los motores de inducción son conocidos por su alta rentabilidad en su uso, sin embargo, en estos tipos de motores puede presentar la degradación de sus partes mecánicas y eléctricas, con lo que es necesario detectar estas condiciones de averías, en su estado, para prevención, algunas de las fallas más comunes se presentan por la sobrecarga de corriente en motores con relación al valor nominal, estos tipos de fallas surgen debido a una caída de tensión, una sobre corriente, también por la potencia del motor eléctrico cuando las temperaturas sobre pasan los límites de operación, dando origen a un calentamiento de los conductores ocasionando un sobre voltaje (Mariana Lorgolescu, y Robert Beloiu, 2014).

En la adquisición de señales hay diversos equipos especializados que pueden ser manipulados por medio de software y hardware, los parámetros son diferentes debido a la fallas y como se podría solucionar estos además son muy comunes en el área de mantenimiento de una empresa, cuando se necesita medir alguna variables analógicas (por ejemplo: presión, aceleración, temperatura, potencia eléctrica, entre otras). Los más utilizados son los diferentes tipos de sensores o también llamados transductores, estos han demostrado que la adquisición de la señal de datos son muy precisos o exactos en monitoreo, siendo adaptable para cada instrumento de medición y relacionado con la adquisición de señal en tiempo real (M. Musardo et al 2014). Por ejemplo en las vibraciones mecánicas mediante frecuencia, se usan acelerómetros, estos miden la aceleración, y por medio de espectros notamos, el comportamiento de la señal obtenida, y monitorear una señal y su distorsión de la onda en un instante de tiempo, hay otros equipos especializados que nos muestran el comportamiento de las señales eléctricas tal es el caso de los equipos de calidad de la energía (Insan Arafat Jamil1 et al 2014).

La adquisición de señales y tratamiento por modelos matemáticos como las series de Fourier, nos permiten visualizarla en forma espectral, para evaluar el comportamiento de la misma. La serie de Fourier es una serie infinita que converge puntualmente a una función periódica y continua dividida por partes. Las series de Fourier constituyen una herramienta matemática básica del análisis matemático empleado para analizar funciones periódicas a través de la descomposición de dicha función en una suma infinita de funciones sinusoidales mucho más simples (como

combinación de senos y cosenos con frecuencias enteras). El nombre se debe al matemático francés Jean-Baptiste Joseph Fourier, que desarrolló la teoría cuando estudiaba la ecuación del calor. Fue el primero que estudió tales series sistemáticamente, y publicó sus resultados iniciales en 1807 y 1811. Esta área de investigación se llama algunas veces análisis armónico. Uno de los principales métodos de análisis es por medio de las series de Fourier, como describiremos cada una de estas como sigue:

- a) La serie de Fourier de onda: La serie para un periodo regular, integrable, de una función periódica  $f(t)$  de un periodo de  $T$  en segundos y la frecuencia fundamental  $f=1/T$  en Hz o  $\omega = 2\pi f$  en rad/s puede ser rescritos como sigue (S.J. Radane, y W.xu, 2007):

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (1)$$

Donde  $C_0$ , Es el valor de la función,  $C_n$ , es el valor pico de la componente armónica  $n^{th}$  y  $\theta_n$  es la fase del ángulo.

- b) La transformada discreta Fourier: La transformada para para señales continuas pueden ser escrito en la forma siguiente:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (2)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{-i2\pi ft} df \quad (3)$$

Para  $-\infty < f < \infty$ ,  $-\infty < t < \infty$  y  $i = \sqrt{-1}$ . La letra mayúscula  $X(f)$  representa el dominio de la función; La letra minúscula  $x(t)$  es la función dominio tiempo. La analogía de la transformada discreta de Fourier que aplica para versiones de medición de estas funciones pueden ser reescritos en la forma siguiente:

$$X(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{-i2\pi jk/N} \quad (4)$$

$$X(k) = \sum_{j=0}^{N-1} x(j)e^{-i2\pi jk/N} \quad (5)$$

Para  $j=0, 1, \dots, N-1$ ;  $k=0, 1, \dots, N-1$ , ambos  $X(j)$  y  $x(k)$  son, en general, las series complejas. Una derivación de la transformada discreta de Fourier, la continuidad de la transformada de Fourier puede ser encontrado. Cuando la expresión  $e^{2\pi i/N}$  se reemplaza por el término  $W_N$ , la transformada par DTF toma la forma siguiente (G.D. Bergland, 1969):

$$X(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k)W_N^{-jk} \quad (6)$$

$$x(k) = \sum_{j=0}^{N-1} X(j)W_N^{+jk} \quad (7)$$

Los Problemas y causas de los armónicos, uno de los principales problemas en la industria, es la generación de armónicos de cargas no lineales principalmente; se observa una forma de onda sinusoidal ideal que se obtiene principalmente de las cargas resistivas y las ondas no lineales perturban la señal de la onda sinusoidal, además las cargas no lineales en un sistema de potencia es la raíz de la generación de los armónicos, y puede ser dividida, dentro de tres categorías, incluye los tipos de saturación magnética del hierro (equipos de varios núcleos), tipos de pulsadores electrónicos (diferentes tipos de equipos eléctricos y electrónicos), y los tipos de arcos de fundición (arcos de fundición alternos y máquinas de soldadura alterna); con el desarrollo de la tecnología de la electrónica de potencia, la escala de contaminación la red es más grande, los problemas asociados a contaminación de armónicos en los sistema son más serios, la contaminación de armónicos en la red de distribución de voltaje es mucho más obvio, a continuación describiremos brevemente algunas de las fuentes de armónicos:

- El efecto en equipos de potencia: La influencia de armónicos en un grupo de capacitadores en paralelo es más significativo. De acuerdo para estadísticas, aquí está alrededor 70% fallas de armónicos ocurrido en grupo de capacitores.
- Resonancia: Los capacitores con la compensación del factor de potencia son ampliamente utilizados en sistemas de potencia, como componente esencial del sistema (por ejemplo, línea, la reactancia del transformador), los armónicos de resonancia son los más comúnmente encontrados en el bus con fuentes de armónicos, porque no existe solo fuentes armónicos pero también Capacitores Shunt / cables/ suministro de potencia por transformadores y motores en el bus, y estos dispositivos son cambios frecuentes, fácil para formar la condición de resonancia (Kelín Deng et al 2014).
- Los Conductores eléctricos: hay dos mecanismos en que la corriente de armónicos puede causar sobrecalentamiento en conductores, para el valor rms de la corriente. El primer mecanismo es entre la redistribución de la corriente sin el conductor e incluye el efecto superficial y el efecto proximidad.
- Luminiscencia: de lámparas incandescentes tendrá una pérdida definitiva de la vida cuando se opera con una tensión distorsionada porque las lámparas son sensibles al nivel de tensión del servicio Las lámparas de descargas, como el sodio bajo presión, halogenuros o fluorescente necesitan reactancias inductivas como una



corriente serie elemento limitante (J.C. Balda et al 1993). Tal y como se muestra la información en el Cuadro 1. (M.I Abu Bakar, 2008).

Carga no lineal	PF	$THD_I$ (%)	$3^{th}$ (%)	$5^{th}$ (%)	$7^{th}$ (%)	$9^{th}$ (%)	$11^{th}$ (%)
	Lámpara flou.	0.57	11.1	10.7	2.0	1.8	0.9
Amplificador	0.71	48.1	32.1	30.7	14.2	7.8	2.6
Televisión	0.66	72.5	55.1	36.8	20.3	11.4	10.8
Fotocopiadora	0.68	69.9	37.7	40.2	30.7	21.9	15.2
Laptop	0.52	80.1	52.8	43.5	31.6	19.3	8.4
PC	0.53	80.1	52.8	43.5	31.6	19.3	8.4
Impresora	0.49	83.6	46.7	41.3	36.2	28.6	21.5

Cuadro 1. Fuentes de cargas no lineales que provocan armónicos en corriente.

### Metodología

El desarrollo de la investigación se basó en la aplicación de equipos de medición térmica, analizador de armónicos, y equipo de calidad de la energía, se estudió una carga lineal y una carga no lineal de esta forma analizamos el comportamiento de la onda en sistemas eléctricos.

Se conectó una carga resistiva, con alimentación de 120volts, como se muestra en la Figura 1, se obtienen los valores de amperaje y voltaje, con aplicación de software del equipo de medición nos muestra el gráfico sinusoidal de ambas mediciones en su forma ideal.

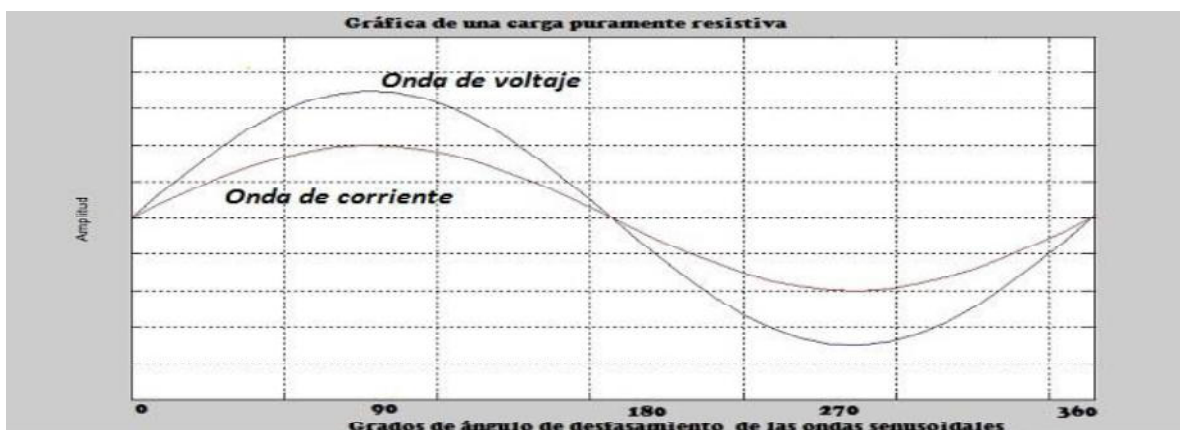


Figura 1: La relación entre voltaje y corriente en una carga resistiva

La medición realizada para cargas no lineales se desarrolló, con una línea de alimentación saturada con equipo de cómputo. Al medir las cargas no lineales observamos diferentes armónicos de corriente, los que más se observan, son el tercer, quinto, séptimo, noveno y onceavo, que pueden provocar disturbios en los equipos, pérdidas de energía, calentamientos.

El desarrollo de la adquisición de señales con el equipo de calidad de la energía para la obtención de las variables  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  y  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , armónicas, los resultados obtenidos con el equipo de calidad de energía nos proporcionan la forma de onda de corriente y voltaje con sus respectivas variaciones armónicas de ondas, en la Figura 2 se observa el resultado de una onda corriente en un lapso de tiempo, con sus distorsión armónica.



Figura 2. Forma de onda de corriente con perturbación de armónicos en la subestación eléctrica.

La Figura 3, muestra un gráfico de barras con el % Distorsión Total Armónica (THD) y los resultados totales de armónicos presentes en las líneas de alimentación, determinándose 55 armónicos totales, los que más afectan al envejecimiento son el tercer y quinto, siendo estos los más altos.



Figura 3. Los armónicos de orden en una carga no lineal.

### Resultados

Los resultados finales de la adquisición de señales en tiempo real, monitoreando las cargas no lineal conectadas a la red se muestran en el Cuadro 2, los cuales son: valores RMS, Peak + y -, CF, THD, V, y el Cuadro 3, se muestra los valores de temperatura en cada uno de los conductores y tres puntos tomados como muestra de la bobina de un motor de inducción.

	RMS	PEAK +	PEAK -	C.F	THD-F %	V---I
$V_1$	127	177.3	177.2	1.40	2.4	126.9
$i_1$	25.9	41.2	41.2	1.59	21.7	24.8
$V_2$	127.9	181.2	180.1	1.42	2.5	127.8
$I_2$	30.3	47.9	49.5	1.58	17.5	29.2
$V_3$	126.5	174.6	176.3	1.30	2.2	126.4
$I_3$	40.7	70.7	64.3	1.74	19.7	39.6

Cuadro 2. Algunos parámetros obtenidos en una carga no lineal por medio de equipos en análisis de armónicos.

No. de muestras	Variables térmicas de una carga no lineal (°C)						
	Núcleo	P1 Bobina	P2 Bobina	P3 Bobina	L1	L2	L3
1	24.6	25.0	24.9	24.9	16.3	16.3	16.3
2	24.6	25.9	25.7	25.5	16.1	16.7	16.3
3	25.5	26.4	26.9	24.2	16.8	17.1	16.9
4	25.5	25.9	26.9	24.4	16.5	16	16.1

Cuadro 3. Algunos parámetros obtenidos en una carga no lineal por medio de termografía.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos con las variables mostradas en los Cuadros 2 y 3, nos han permitido realizar modelados aplicando sistemas de inferencia difusa, para obtener el diagnóstico de envejecimiento en los devanados de motores de inducción. Los beneficios de la aplicación del modelado de sistema de inferencia difusa nos permitirán mejorar la reducción de tiempo en diagnósticos de mantenimiento realizados por operadores humanos, reducción del factor del 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.

Por otra parte, estas mismas variables nos permitirán determinar matemáticamente el envejecimiento en los devanados de los motores, para continuar desarrollando investigación en esta área, al determinar su vida útil, mejorar su eficiencia y su proceso de mantenimiento.

La forma de onda sinusoidal pura no debe de tener distorsión de armónicos se analizó y observamos el comportamiento de los armónicos que nos interesa en nuestro estudio que son el 3, 5, 7.

## Referencias

- E. Suhir, "Predicted Fundamental Frequency of Vibration of a Heavy Electronic Component Mounted on a Printed Circuit Board" ASME Journal of Electronic Packaging, Vol. 122, 2000, 3-5.
- Gao, Bingkungn. Yanjia, Song, Zhaoyun Mingzi "Vibration Testing and Analysis of Motor Based on Virtual Instrument", IEEE, 2013, 205-210.
- G.D. Bergland, "A guided tour of the fast Fourier Transform" IEEE Spectrum Vol 6, 1969, 41-52.
- Insan Arafat Jamil, Minhaz Ibna Abedin, Himan Kumar Sarker, Jahedul Islam "Vibration Data Acquisition and Visualization System using MEMS Accelerometer" IEEE 2014, 34-60.
- J. C. Balda, D. C. Griffithki, A. Mc Eachern, T. M. Barnes, D. P. Hartmann, D. J. Phileggi, A. E. Emmanuel, W.F. Horton, W. E. Reid, R. J. Ferraro W. T. Jewell, "Effects of Harmonic on Equipment", IEEE, 1993, 672-680.
- Kelin Deng, Junwei Cao, Peng Guo, Xingtao Xu., "Energy Saving Analysis of Harmonic Suppression in a Distribution Network", IEEE, 2014, 672-680.
- Loan Lita, Daniel Alexandru Visan, y Ion Bogdan Cioc. "Virtual Instrumentation Application for Vibration Analysis in Electrical Equipment's testing" Spring Seminar on Electronics Technology, IEEE, 2010, 216 - 219.
- M. Musardo, D.Harder, P.He, C.A kitegi and T. Tanabe "A New Data Acquisition software and Analysis for Accurate Magnetic Field Integral Measurement at BLN Insertion Devices Laboratory Karlsruhe Germany", Brookhaven National Laboratory, 2014, 28-30.
- M.I Abu Bakar, "Assesments for the Impact of Harmonic Current Distortion of Non Linear Load in Power System Harmonics" IEEE, August 2008, 1-6.
- Mariana Iorgulescu, Robert Beloiu "Faults diagnosis for electrical machines based on analysis of motor current", IEEE, 2014, 291-297.
- Mikhail Tsypkin, "Induction Motor Condition Monitoring: Vibration Analysis Technique-a Practical Implementation", IEEE, 2012, 406-411.
- P.A. Gray, student Member, IEEE, P.W. Lehn, Senior Member IEEE, "Time-Domain Derived Frequency- Domain Voltage Source Converter Model for Harmonic Analysis", IEEE, 2012, 512-517.
- S.J. Radane, W.xu. "An Overview of Harmonic Modeling and Simulation", IEEE, 2007, 1-7.
- T. Szolc, A Pochanke, "Transient and steady-state coupled electromechanical vibration analysis of micro-drive system" Symposium Vibrations in Physical, Vol. 24, 2010.
- Zhao Hua, "Application of Labview in the Design of Data Acquisition and Signal Processing System of Mechanic vibration", IEEE, 2011, 2551-2554.



No. de Oficio:DPyDI/063/16

El Carmen Xalpatlahuaya, Huamantla, Tlaxcala a 22 de noviembre de 2016

**AUTORES:** ING. GELACIO COPALCUA NAVA, M. EN C. JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ CORONA,

**ARTICULO:** DETERMINACIÓN DE VARIABLES ELÉCTRICAS QUE AFECTAN LA VIDA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN"

**ARTICULO Núm. ISSN:2395-4893**

#### Estimados autores

Con agrado les informamos que, con fecha de hoy, el artículo arriba citado ha sido revisado y aprobado para ser publicado en la revista RED-TES en el mes de diciembre del año en curso, siendo en el volumen no. 4, con registro ISSN: 2395-4893.

Saludos cordiales

**M. en C. Ismael Nava Lumbreras**  
Director Ejecutivo de la Revista RED-TES



## Determination of electrical variables that affect the life of induction motors

### Determinación de variables eléctricas que afectan la vida de los motores de inducción.

Ing. G. Copalcua Nava <sup>1</sup>, M.C. J. L. Hernández Corona <sup>2</sup>, Dr. P. M. Quintero Flores <sup>3</sup>  
Ing. S.C. Ponce. Flores<sup>4</sup> Dr. R. Ordoñez Flores <sup>5</sup>, M.C. J. J. Hernández Mora <sup>6</sup>, Dr. J. F. Hernández Cruz<sup>7</sup>  
Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Apizaco  
División de Estudios de Posgrado e Investigación  
Avenida Instituto Tecnológico s/n C.P.90300, Apizaco, Tlaxcala  
gelacio\_copalcua@outlook.es <sup>1</sup> kmalakof@yahoo.fr<sup>3</sup>, ssergio\_7898@hotmail.com<sup>4</sup>  
rafael.ordonezf@gmail.com <sup>5</sup>, jjhmora@itapizaco.edu.mx<sup>5</sup>, federico\_ramirez@yahoo.com<sup>7</sup>  
Universidad Tecnológica de Tlaxcala  
Departamento de Ingeniería en Mantenimiento Industrial  
Carretera a Él Carmen Xalpatlahuaya, Tlaxcala México  
coronah Luis@hotmail.com<sup>2</sup>

Recibido:

**Resumen:** Este trabajo de investigación se realizó para la determinación de variables que afectan a los motores trifásicos de inducción aplicando un sistema experto difuso, la determinación de variable se obtuvieron al realizar muestreos con equipos de medición térmica, calidad de la energía, y equipo para medir variable eléctricas. Las mediciones con las variables térmicas están relacionadas con la emisividad de un material. Existen ya fundamentadas tablas de emisividad para ajustar la medición infrarroja para la obtención del espectro electromagnético de la temperatura. Los equipos trabajan con aplicación de procesamiento de señales a base de las series de Fourier, en especial la transformada rápida de Fourier "FFT". El muestreo con equipo de calidad de la energía nos permitió determinar: perturbaciones, fluctuaciones, parpadeos, huecos e interrupciones. Un referente es la aplicación de equipos para vibraciones que nos permitieron relacionar las ondas de energía y realizar un monitoreo espectral de las señales de corriente y tensión. Una vez obtenidas las variables, son aplicadas a un sistema experto difuso, para encontrar el porcentaje de envejecimiento de los motores y diagnosticar el grado en el que ocurre. Se desarrolló un análisis comparativo con Toolbox Matlab y una Shell FuzzyApp, para comparar el porcentaje de error en los resultados obtenido en cada aplicación de envejecimiento.

#### 1 Introducción

Los motores eléctricos de inducción son los más utilizados a nivel industrial, estos equipos funcionan bajo severos ambientes de contaminación en sus diferentes aplicaciones. Algunas de estas contaminaciones en estos dispositivos son el polvo, la humedad, los aceites y grasas, entre otras más [1].

Las principales fuentes de fallas en los motores eléctricos son por energía eléctrica y fallas mecánicas.

Aprobado:

**Abstract:** This research was performed to determine variables that affect three phase induction motors using a fuzzy expert system, determination variable were obtained in samples with equipment thermal measurement, power quality, and equipment means for electrical variables. Measurements with thermal variables are related to the emissivity of a material. There already informed emissivity tables to adjust the infrared measurement for obtaining temperature electromagnetic spectrum. The teams work with application of signal processing based on Fourier series, especially the Fast Fourier Transform "FFT". The sampling equipment power quality allowed us to determine: disturbances, fluctuations, flicker, dips and interruptions. A reference is the application of vibration equipment that allowed us to relate the energy waves and perform a spectral monitoring of current and voltage signals. Once obtained variables are applied to a fuzzy expert system to find the percentage of aging motors and diagnosing the degree. Is developing a comparative analysis with Matlab Toolbox and a Fuzzyapp Shell to compare the percentage of error in the results obtained in each application the aging.

#### 1 Introduction

Electrical induction motors are the most used at an industrial level these teams function under severe environments of pollution in different applications.

Some of these contaminations in these devices are dust, humidity, oils and fats, among others more [1].

The main sources of failures in electric motors are electric power and mechanical failures.

Some problems caused by the electrical power is the poor quality of energy manifesting in the form of harmonics, voltage

Algunos problemas que provoca la energía eléctrica es la pobre calidad de energía, manifestándose en forma de armónicos, huecos de tensión y corriente, perturbación de una onda, pérdida de potencia, switches, parpadeo de voltaje. Mientras que las fallas mecánicas son las vibración mecánica, oscilaciones en un par motor, y el incremento de temperatura en algunas partes del mismo equipo (Envejecimiento) [2,3].

En el área de mantenimiento industrial, hay distintas técnicas para diagnosticar fallas en los motores de inducción, mediante un plan de mantenimiento predictivo, que permite la reducción costos y evitar tiempos de inactividad no programada [4].

Se han demostrado la aplicación de nuevas técnicas de adquisición de señales, para la detección de fallas, en los motores de inducción, tales como: equipos de calidad de energía, analizador de variables térmicas o termografía y la aplicación de analizadores de variables de la frecuencia.

Un analizador térmico permite la medición y visualización de las superficies con una gran precisión de un objeto [5].

Una cámara termografía, tiene un sensor infrarrojo en el cual su función principal es medir la temperatura por espectro electromagnético infrarrojo en un objeto o material mediante [6].

Un analizador de frecuencias permite un análisis de vibraciones mecánicas más empleadas en la industria en donde se detectan fallas por aumento de frecuencia, por fallas mecánicas, eléctricas y ruido.

Algunas aplicaciones para la detección de fallas en motores eléctricos, nos permite estudiar la desalineación de ejes, el desgaste en baleros entre otras más [7].

Una técnica para la adquisición de señales de frecuencia, es por medio de la utilización de un acelerómetro, que mide las ondas de ruido para convertirla a espectros de frecuencia, mediante el procesamiento de señal, con ayuda de su mismo software especializado [8].

En el procesamiento de señales, son reconocidas las series de Fourier, en especial la transformada rápida de Fourier "FTF" para el análisis de señales discretas que son evaluadas con los espectros en relación a la frecuencia [9]. En esta investigación se emplearon las variables de voltaje, corriente, frecuencia y temperatura para sus respectivas series para su modelado matemático por medio de las siguientes ecuaciones 1,2, 3,4 [10,11].

sags and current wave disturbance, loss of power, switches, voltage flicker. While mechanical failures are mechanical vibration oscillations in motor torque, and the temperature increase in some parts of same equipment (Aging) [2.3].

In the area of industrial maintenance, there are several techniques for diagnose faults in induction motors through a predictive maintenance plan, which allows reduced costs and avoid unplanned down time [4].

Have been demonstrated the applications of new the application of new techniques for the signal acquisition, to detect failures in induction motors, such as equipment power quality analyzer thermal variables or thermography and applying analyzers variable frequency.

A thermal analyzer allows measurement and Visualization the surface with high precision from an object.

A thermal imaging camera has an infrared sensor in which its main function is to measure the temperature by infrared electromagnetic spectrum in an object.

A frequency analyzer allows an analysis of mechanical vibrations that are the most used in the industry where failures are detected by increased frequency, mechanical failures, and electrical noise.

Some applications for detection of failures in electric motors, allows us to study the shaft misalignment abrasion of bearings among others more [7].

One technique for the acquisition of frequency signals, is by means of the use of an accelerometer that measures the noise waves to convert to frequency spectra, by signal processing, using the same specialized software [8].

In signal processing, are recognized Fourier series, especially the fast Fourier transform "FTF" for analysis of discrete signals that are evaluated with the spectra in relation to the frequency [9]. In this research variables in voltage, current, frequency and temperature for their respective series for mathematical modeling by means of the following equations 1,2, 3,4 [10,11] were used.

$$V_t = V_o + \sum_{h=1}^N V_h \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (1)$$

$$I_t = I_o + \sum_{h=1}^N I_h \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (2)$$

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t \dots \quad (3)$$

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t$$

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi n/N} \quad (4)$$

Donde:

$(I_h)$  = es el valor de la corriente armónico conocido

$(V_h)$  = es el valor del voltaje armónico conocido

$V_o, I_o$  = corriente y voltaje (iniciales)

$a_0, a_1, a_n, b_0, b_1, b_n$ , coeficientes constantes

$\omega = \frac{2\pi}{T}$  la frecuencia fundamental

T=periodo de una oscilación

$X(0), \dots, X(N-1)$ , son números complejos.

Donde:

$(I_h)$  = is the value of the harmonic current known..

$(V_h)$  = is the value of the harmonic voltage known.

$V_o, I_o$  = concurrent and voltage (initials).

$a_0, a_1, a_n, b_0, b_1, b_n$ , Constant coefficients.

$\omega = \frac{2\pi}{T}$  the fundamental frequency.

T= an oscillation period

$X(0), \dots, X(N-1)$ , = are complex numbers

Una de las delimitantes en la adquisición de señales es llevarlo a cabo por medio de un monitoreo, constante en su interpretación manual, pero gracias a los avances de la tecnología se puede implementar un monitoreo automatizado mediante la computación inteligente como son la inteligencia artificial, lógica difusas, y los sistemas de control difuso [12]. El surgimiento de la lógica difusa fue hasta 1965, cuando el Dr. Zadeh se enfocó en la teoría de los conjuntos difusos, en la actualidad su investigación se centra en la computo con palabras y las teorías computacionales [13].

La teoría clásica de conjuntos en cada elemento del universo de discurso o bien pertenece al conjunto o no pertenece a este. Por lo que el grado de elemento asociado es nítida, el conjunto difuso es un mapeo del universo de discurso en un intervalo cerrado (0, 1) [14].

Las aplicaciones de lógica difusa están relacionadas con productos al consumidor, control de procesos industriales, sistemas de visión por computadora, procesamiento de señales entre otras más [15].

Los sistemas difusos se construyen a partir de las teorías de conjuntos y las reglas de inferencia difusa con relación en el dominio de un estudio a realizar [16].

Un conjunto difuso en el universo X es caracterizado por una función de pertenencia,  $\mu_A(x)$ , toman los valores en el intervalo [0,1], y puede ser representado como un conjunto de pares ordenados de un elemento. Un grado de pertenencia de un elemento para el conjunto y se define por la siguiente ecuación (5) [17].

One of the restrictions in acquiring signals, is to take place through a constant monitoring in manual interpretation, but thanks to advances in technology, can be implemented an automated monitoring through intelligent computing as are artificial intelligence, fuzzy logic and fuzzy control systems [12].

The emergence of fuzzy logic was not until 1965, when Dr. Zadeh focused on the theory of fuzzy sets, currently his research focuses on computing with words and computational theories [13].

The classical theory of sets in each element of the universe of discourse or belongs to the set or does not belong to this. So the degree of associated element is sharp, the fuzzy set is a mapping the universe of discourse in a closed interval (0, 1) [14].

Fuzzy logic applications are related to consumer products, industrial process control, computer vision systems, and signal processing among others [15].

Fuzzy systems are built from set theories and fuzzy inference rules regarding the domain of a study to be performed [16].

A fuzzy set in the X universe is characterized by a membership function,  $\mu_A(x)$ , taking values in the range [0,1], and can be represented as a set of ordered pairs of an element. A degree of membership of an element to the set 'y' is defined by the following equation (5) [17].

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (5)$$

Donde

$\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ , esta definición  $\mu_A(x)$  representan los grados de membresía del elemento  $x \in X$  para el conjunto A.

Una norma triangular es una operación  $T: [0,1]^2$ , con lo que se pueden emplear las siguientes ecuaciones (6), (7) para la  $T_m$ -norm y la  $T_s$ -conorm [18].

$$T_M(x, y) = \min(x, y) \tag{6}$$

$$S_M(x, y) = \max(x, y) \tag{7}$$

Donde:

$T_M$  = T-norm mínima.  
 $S_M$  = T-conorm máximo

Una regla difusa de tipo Si-Entonces se muestra en la ecuación 8 como sigue [19].

$$\text{Si } x \text{ es } A \text{ entonces } y \text{ es } B \tag{8}$$

Donde:

A y B son conjuntos difusos en el universo 'x' y 'y' respectivamente. El término "x es A" se llama el antecedente, mientras el término "y es B" se llama el consecuente.

Un sistema de inferencia difusa fue propuesto para el control de un motor de vapor en combinación de una caldera, por medio de variables lingüísticas, y reglas obtenidas por un experto [20].

En la Fig. 1, se muestra la evaluación de dos entradas (x, y) mediante dos reglas de inferencia, las salidas de cada regla son unidas mediante el centroide del área en la ecuación (9).

Where

$\mu_A: X \rightarrow [0,1]$ , this definition  $\mu_A(x)$  they represent the gradrees of membership of the element  $x \in X$  to set A.

A triangular rule, is a T operation  $T: [0,1]^2$ , which can be used the following equations (6), (7) for  $T_m$ -norm and:  $T_s$ -conorm [18].

Where:

$T_M$  = T-norm minimum  
 $S_M$  = T-conorm maximum

A fuzzy rule if-then shown in Equation (8) as follows [19].

Where:

A and B are fuzzy sets in the universe of discourse 'x' and 'y' respectively. The term "x is A" is called the antecedent, while the term "y is B" is called the consequent.

A fuzzy inference system was proposed for controlling a steam engine in combination of a boiler, by means of linguistic variables and rules obtained by an expert [20].

In Fig. 1, the evaluation of two inputs (x, y) shown by two inference rules, each rule outputs are joined by the centroid of the area in the equation (9).

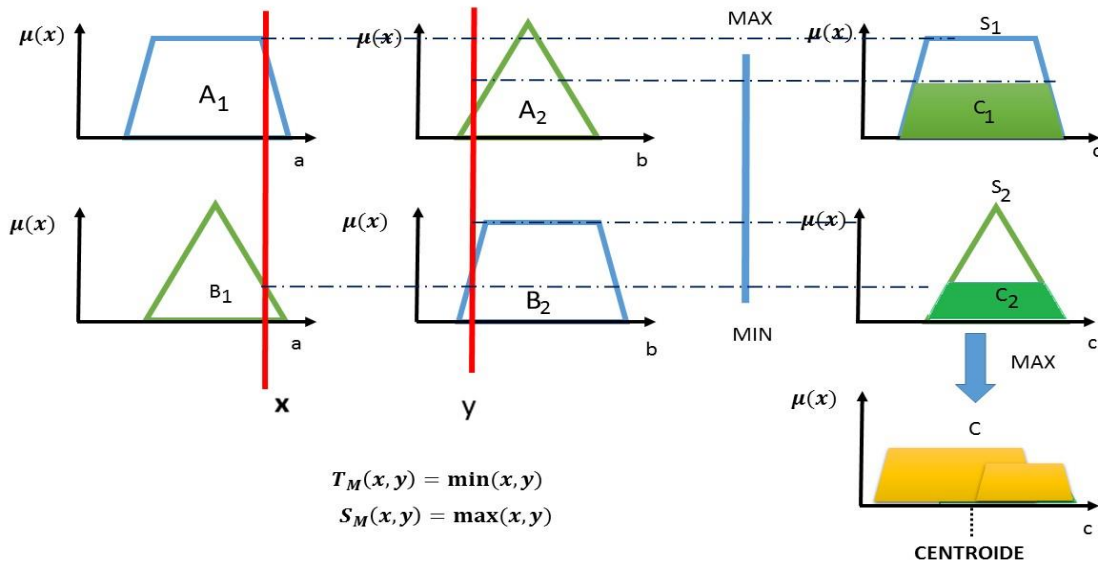


Fig. 2 Mandani Inference System



$$C = \frac{\int \mu_A(s) s dz}{\int \mu_A(s) dz} \quad (9)$$

Donde

$\mu_A(s)$  = es la salida del agregada MF.

C = es el centroide del área.

Where :

$\mu_A(s)$  = is the output add MF.

.C = is the centroid of the area

Nuestra propuesta es un sistema experto difuso Mandani, para la determinación del porcentaje de envejecimiento ocurrido en motores, una vez obtenidas las variables de entrada para diagnosticar el grado de envejecimiento, se realizó un análisis comparativo con el Toolbox Matlab y el Shell FuzzyApp, para comparar el porcentaje de error en los resultados obtenidos en la aplicación de estas dos herramientas.

Our proposal is a Mamdani fuzzy expert system, for determining the percentage of aging occurred in motors, after obtaining the input variables to diagnose the degree of aging, an analysis with the Toolbox Matlab and the Shell FuzzyApp was performed to compare the percentage error in the results obtained in the application of these two tools.

## 2 Metodología propuesta y desarrollo

En esta sección, se determinaron y adquirieron las variables de estudio, como se muestra en la Fig.2, las cuales se describen a continuación.

Adquisición de señales de temperatura, variables armónicas y ruido.

Procesamiento de las señales.

Aplicación de Lógica difusa.

Obtención del porcentaje de envejecimiento.

## 2.- Methodology and developed proposed

In this section, they were determined and acquired study variables, as shown in Fig.2, which are described below.

Signal acquisition of temperature signals, harmonic and noises variables.

Signal processing.

Application of fuzzy logic.

Acquisition of the percentage of aging.

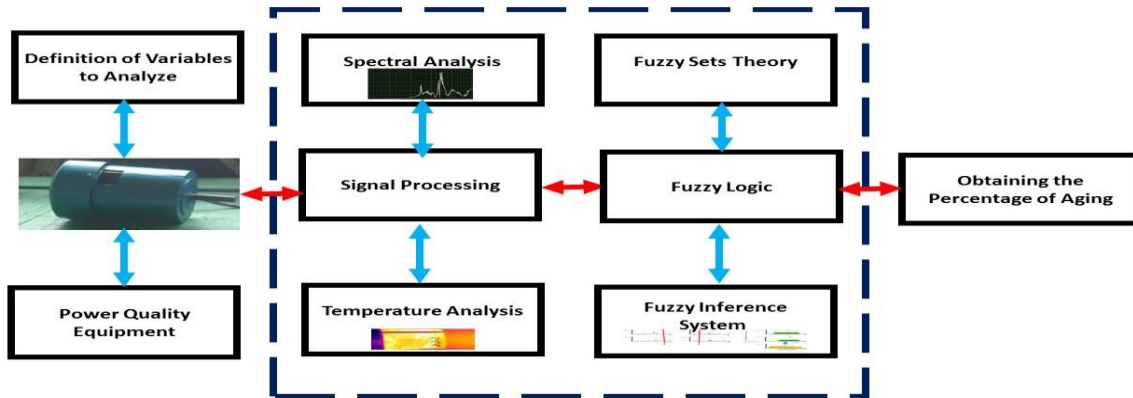


Fig. 2. Proposed Methodology

### Adquisición de señales.

En la adquisición de señales se aplicó la termografía para realizar estudios de temperatura por zonas observándose en la (Fig. 3). Así como la frecuencia, de operación del equipo, como frecuencia natural de vibración, algún fallo presente que intervenga y afecte a nuestro sistema en estudio. Su adquisición es a partir de la aplicación de un acelerómetro lineal, este convierte una señal mecánica en digital, mostrándola en forma de espectro.

### Signals acquisition.

In the signal acquisition thermography was applied to realize studies of temperature zones observed in Fig 3. For frequency, operating equipment, such as natural frequency of vibration, some present failure to intervene and affect our system under study. Its Acquisition is from the application of a linear accelerometer, this converts a mechanical signal into digital, showing shaped spectrum.

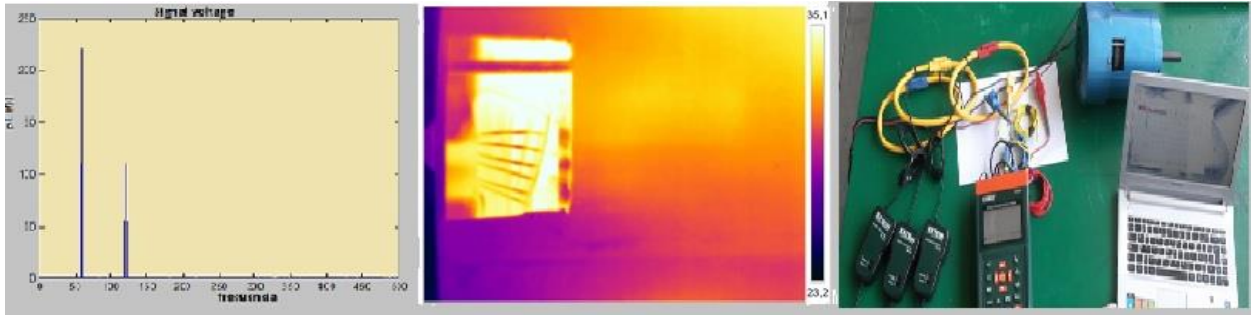


Fig. 3. Analysis of the frequency with power quality equipment to measure different variables

### Procesamiento de señales

El procesamiento de señales tiene dos etapas, la primera es la adquisición de señales, y la segunda es el procesamiento de las señales.

Las series de Fourier las utilizamos en distintas áreas de la ingeniería, como son la termografía, vibraciones mecánicas, acústica, procesamiento de imágenes entre otra más.

En esta sección se describen las variables para el desarrollo de la metodología como sigue:

La aplicación de Equipo de calidad de energía nos muestra la adquisición de señales por medio de la frecuencia para su posterior aplicación en el sistema experto difuso. La obtención de la tensión armónica nos permite determinar un orden de armónicos con respecto a la frecuencia, siendo de nuestro interés el tercer quinto y séptimo armónicos, como se observa en la (Fig. 4), se hace un muestreo con el equipo en calidad de energía en una carga no lineal.

### Signal Processing

Signal processing has two stages, the first is the acquisition of signals, and the second is the processing of the signals. Fourier series used them in different areas of engineering, such as thermography, mechanical vibrations, acoustics, image processing between another.

This section describes the variables for the development of methodology are described as follows:

The application of power quality equipment shows us the signal acquisition by means of frequency for subsequent application in the fuzzy expert system. Obtaining the harmonic voltage allows us to determine an order of harmonics with respect to frequency, being in our interest to third, fifth and seventh harmonics, as shown in Figure 4, a sampling equipment as energy is made in a nonlinear load

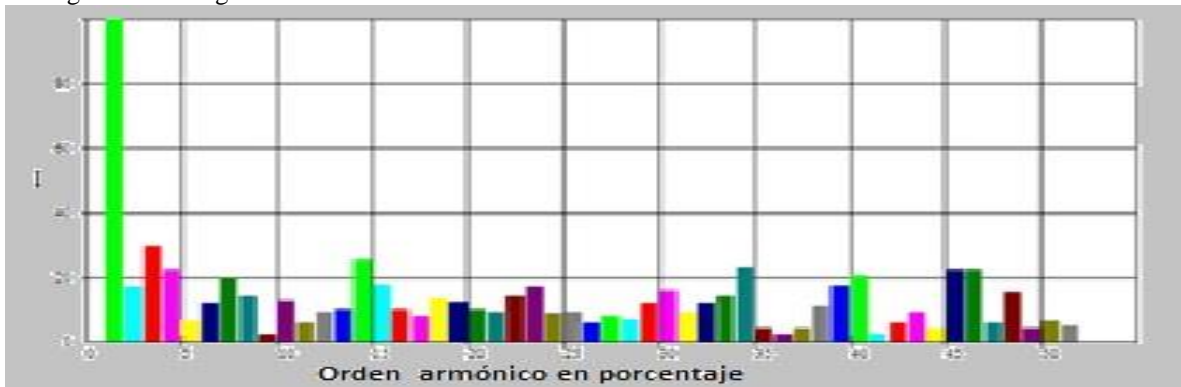


Fig. 4. Harmonic measurement

La obtención de la temperatura se observa en la (Fig. 5), siendo la cantidad de calor del estator la que nos interesa medir para observar el comportamiento en operación.

Obtaining temperature observed in Figure 4, the amount of heat of the stator measure interests us to observe the behavior in operation.

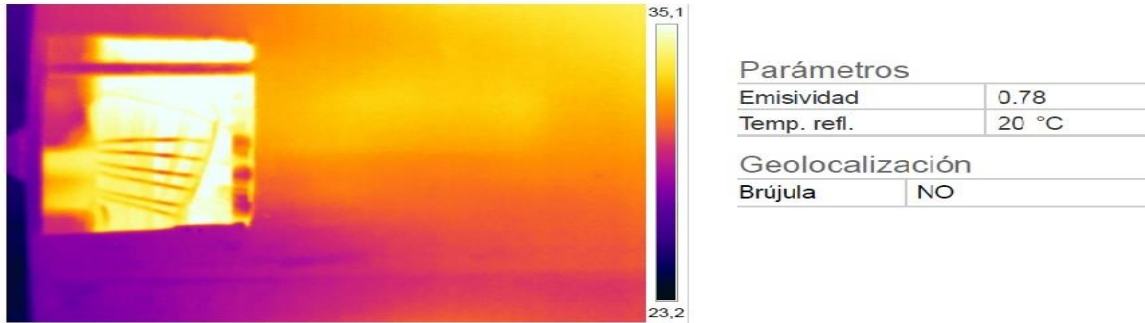


Fig. 5. Measurement of temperatures in windings

Para nuestro sistema de inferencia difusa, se emplean tres entradas y una salida, las dos primeras, fueron por medio de un equipo de calidad de energía en análisis de armónicos. También se emplea una cámara termografía para para el análisis de los espectros electromagnéticos, con una emisividad de cobre oxidado  $\epsilon = 0.75$  ajustado este valor a la cámara termográfica

#### Aplicación de lógica difusa

##### Descripción de las entradas y salidas

La primera entrada es la tensión armónica que se divide en subconjuntos lingüísticos, como son las tensión armónica baja (VAB). La tensión armónica media (VAM), tensión armónica alta (VAA).

La segunda entrada se llama corriente armónica que se divide en subconjuntos lingüísticos como son las corriente armónica baja (IAB), la corriente armónica media (IAM), corriente armónica alta (IAA). Tomando en cuenta el límite armónico de 5% como lo consideran las normas internacionales sobre armónicos.

La tercera entrada se llama temperatura en el devanado, que se divide en subconjuntos lingüísticos como la temperatura del devanado bajo (TDB), temperatura del devanado medio (TDM), temperatura del devanado alto (TDA), considerando la NORMA NEMA clase B como temperatura nominal de 130 °C en motores de inducción.

La salida se llama envejecimiento que se divide en subconjuntos como envejecimiento nominal bajo (ENB), envejecimiento nominal medio (ENM), envejecimiento nominal alto (ENA).

En la (Fig. 6) se identifica las entradas y salidas para la implementación de un sistema de inferencia Mandani y la evaluación de estos en el proceso de desfuzificación se observa en la (Fig. 7).

For our fuzzy inference system, three inputs and one output are used the first two were by an equipment of power quality harmonics analysis. Thermography camera also used for the analysis of the electromagnetic spectra with an emissivity of  $\epsilon = 0.95$  oxidized copper adjusted this value to the thermal imaging camera.

#### Applying fuzzy logic

##### Description output and input

The first input is the harmonic voltage that is divided in linguistic subsets, how is low harmonic voltage (VAB). The average harmonic voltage (VAM), high harmonic voltage (VAA).

The second input is called harmonic current that is divided in linguistic subsets how is low harmonic current (IAB), the average harmonic current (IAM), high harmonic current (IAA). Taking into account the harmonic limit of 5% consider international standards on harmonics.

The third input is called winding temperature, that is divided in linguistic subsets as the temperature of low winding (TDB), temperature of the winding (TDM), temperature high winding (TDA), considering NEMA class B as temperature 130 °C in rated induction motors.

The output is called aging that is divided in subsets as aging under rated (ENB), rated aging medium (MND), rated aging high (ENA).

In (Fig. 6) inputs and outputs to implement a Fuzzy inference system Mandani and evaluation of these in the process desfuzification is identified shown in (Fig. 7).

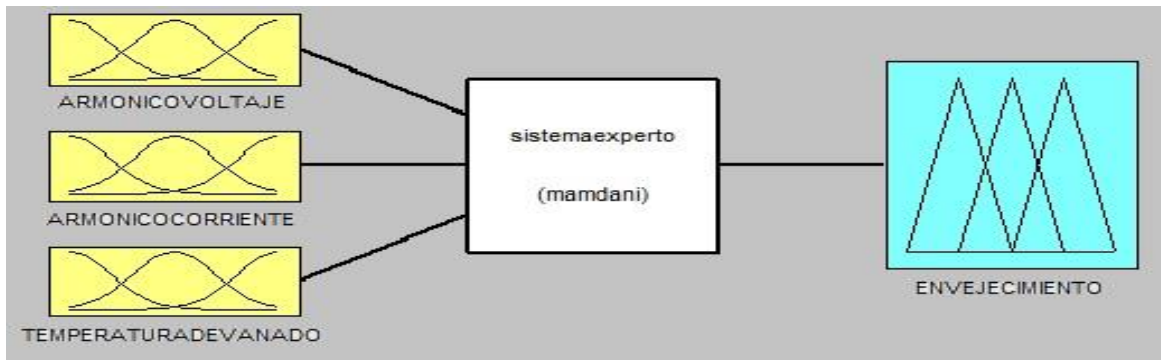


Fig. 6. Implementation of the Mamdani fuzzy inference system with three inputs and one output

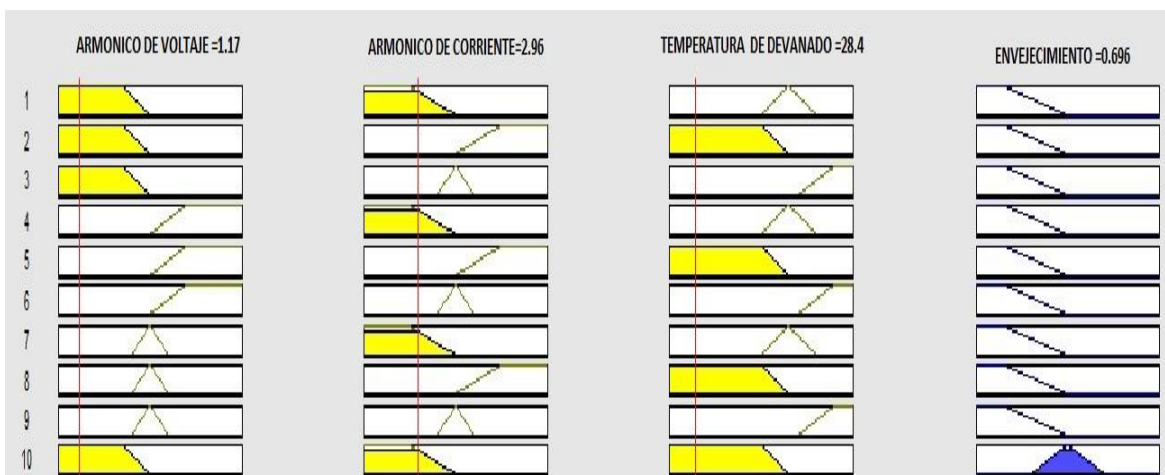


Fig. 7. Implementation of the defuzzification

## Resultados

Obtención del porcentaje de envejecimiento .- Para nuestro sistema experto se emplearon dos herramientas de modelado de lógica difusa, una es el Toolbox Matlab [21] y la segunda es el shell FuzzyApp [22], donde son evaluadas tres entradas y una salida, obteniendo una similitud en el grado de envejecimiento en comparación a un diagnóstico tradicional, dichas evaluaciones se muestran en la Tabla 1.

Las variables de entrada son el voltaje armónico y la corriente armónica que son representados en porcentajes, la temperatura del devanado y la salida de envejecimiento mediante la evaluación de 0,1 tomando el punto .5 como el punto medio en el diagnóstico del grado de envejecimiento.

El procesamiento de señales aplica las series de Fourier, donde, se demostró que están relacionados con la frecuencia respecto al tiempo, los sistemas expertos difusos nos permiten reducir un margen de error y al mismo tiempo, hacer una automatización con los datos obtenidos.

## Results

Obtaining the percentage of aging .- For our expert system, two fuzzy logic modeling tools were used, one is the Matlab Fuzzy logic Toolbox [21] and the second is the shell FuzzyApp [22], where they were evaluated three inputs and one output , obtaining a similar aging diagnosis in comparison with a traditional diagnosis, such evaluations are shown in Table 1.

The input variables are the harmonic voltage and harmonic current that are represented in percentages, the winding temperature and aging output trough the evaluation by 0.1 taking .5 point as the midpoint in diagnosing the degree of aging.

Signal processing applies Fourier series, where it was shown that are related to the frequency versus time, fuzzy expert systems allow us to reduce a margin of error and at the same time make an automation with the data obtained.

Table 1. Comparison of the degree of aging of an induction motor obtained in the 2 tools used and by an expert

Variables de entrada			MATLAB	FUZZYAPP	EXPERTO	
	AV %	AI %	TD °C	Envejecimiento		
1	1	2.3	28.5	0.676	0.67	0.68
2	0.9	2.1	28.4	0.678	0.672	0.68
3	0.8	2.7	31.7	0.679	0.672	0.68
4	1.1	2.3	28.3	0.675	0.669	0.7
5	1.1	3.7	29.3	0.658	0.652	0.6
6	1.1	2.8	30.2	0.675	0.699	0.67
7	1.2	2.5	31.2	0.674	0.67	0.67
8	1	2.4	30.9	0.676	0.67	0.68
9	0.8	6.1	28.5	0.201	0.201	0.2
10	0.8	3.6	28.4	0.66	0.654	0.67

### Conclusiones

Con esto se ha demostrado un diagnóstico más eficiente y una mejor optimización en el mantenimiento en los motores de inducción, estos alargan su vida de operación en las líneas de producción, ya que por lo general si se tiene una buena calidad de energía, esta trae beneficios a la compañía algunos ejemplos son: se reducen fallas en la red eléctrica, reducción de fallas mecánicas-eléctricas y por último el más importante, el incremento en el factor de potencia (FP).

El F.P es proporcionado en nuestro país por comisión federal de electricidad que tiene la facultad de multarnos si el F.P es menor de 0.90.

### Agradecimientos

El presente artículo fue posible gracias al apoyo de CONACYT, igualmente agradezco a las universidades que participaron en este proyecto que fue el Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Apizaco y la Universidad Tecnológica de Tlaxcala por haberme brindando las facilidades para desarrollar las pruebas en su laboratorio de mantenimiento predictivo.

### Conclusions

With this has been demonstrated a more efficient diagnosis and a better optimization of the maintenance in induction motors, these extend their operating life in production lines because usually if you have a good quality of energy, this brings benefits to the company, some examples are: reduction of failures in the power grid, reduction of the mechanical-electrical failures and finally the most important, the increase in the power factor (PF).

The F.P is provided in our country by federal electricity commission has the power to fine us if the F.P is less than 0.90.

### Acknowledgements

This article was made possible by the support of CONACYT, I also thank the universities that participated in this project which was the National Technological of Mexico, Technological Institute of Apizaco and the Technological University of Tlaxcala for providing the facilities to develop the evidence in its predictive maintenance laboratory.

## References

- [1].- D. Barman, S. Sarkar, G.Das, S Das, P.Purkait . DFA and DWT Based Severity Detection and Discrimination of Induction Motor Stator Winding Short Circuit Fault From Incipient Insulation Failure, IEEE, Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO), 2015 International Conference on, pp 1-6, 2015.
- [2].-X.Wang, F. Fung, Bearing Failure Diagnosis in three-phase Induction Motor by Chirp-Z Transform and Zoom-MUSIC, IEEE, Electrical and Control Engineering(ICECE), 2011 International Conference on, pp.1016-1019, 2011.
- [3].-S. Ossama Ibrahim, K.Nagdy, E. Abo Elzahab Implementation of fuzzy modeling system for faults detection and diagnosis in three phase induction motor drive system, ScienceDirect, Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2, 1, pp 27-46, 2015.
- [4].-S.Sarkar, S. Das, P. Purkait, Wavelet and SFAM Based Classification of Induction Motor Stator Winding Short Circuit Faults and Incipient Insulation Failures, IEEE, Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), 2013 IEEE 1st International Conference on, pp 237-242, 2013.
- [5].- M. J. Picazo, Ródenas; R. Rojo; J. Antonino-Daviu; J. Roger-Folch, Use of infrared thermography for computation of heating curves and preliminary failure detection in induction motors. IEEE, Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on, pp 525-531, 2012.
- [6].- Jan Vaculik, Zdenek, Hradilek, P. Moldrik, Daniel Minarik, Utilisation of thermography in the field of PEM fuel cells, IEEE, Electric Power Engineering (EPE), 2015 16th International Scientific Conference on, pp 488-492, 2015.
- [7].-Khaled Feytan, Dalia Garza, Effect of motor vibration problem on the power quality of water pumping stations, ScienceDirect, Water Science, 28, 1, pp 31-41, 2014.
- [8].- Heta S. Shah, Pujaben N. Patel, Shashank P. Shah, and Manish T. Thakk, 8 Channel Vibration Monitoring and Analyzing System Using LabVIEW, IEEE, 2013 Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE), pp 1-4, 2013.
- [9].-E. Cabal-Yopez, M. Valtierra Rodriguez, R:J. Romero-Troncoso, A. Garcia Perez, R.A Osornio-Rios, H. Miranda-Vidales, R.Alvarez-Salas, FPGA-based entropy neural processor for online detection of multiple combined faults on induction motors, ScienceDirect, Mechanical Systems and Signal Processing, 30, pp 123-130, 2012.
- [10].- L. M Tolbert, H.D Hollis, P:S Hale: Survey of harmonics measurements in electrical distribution systems, Industry Applications Conference, 1996. Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96., Conference Record of the 1996 IEEE (Volume:4), pp 2333 – 2339, 1996.
- [11].-K. Vanmathi, K. Sekar, Reyma Ramachandran, FPGA implementation of Fast Fourier Transform, IEEE, Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE), 2014 International Conference on, pp 1-5, 2014.
- [12].-Greety Jose; Victor Jose., Fault diagnosis in induction motor using soft computing techniques IEEE, Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), 2013 International Conference on, pp 1-8, (2013),
- [13].-Zadeh Lofti, Is there a need for fuzzy logic, IEEE, Fuzzy Information Processing Society, pp 1-3, 2008
- [14].- K. Ramesh, M.Sushama, Inter-Turn Fault Detection in Power Transformer Using Fuzzy Logic, Science Engineering and Management Research (ICSEMR), 2014 International Conference on, pp 1-5, 2014.
- [15].-L. A. Zadeh, Fuzzy logic: issues, contentions and perspectives, IEEE, Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1994. ICASSP-94., 1994 IEEE International Conference on, VI, pp 1520-6149, 2014.
- [16].-Moslem Dehghani, Mohammad Hassan Khoobn, Taher Nikman, Fast Fault detection and classification based on a combination of wavelet singular entropy theory and fuzzy logic in distribution lines in the presence of distributed generations, ScienceDirect, Electrical Power and Energy System, 76, pp 455-462, 2016.
- [17].- Oscar Catillo, Leticia Amador-Angulo, Juan R, Castro, Mario Garcia-valdez, A comparative study of type-1 fuzzy logic systems, interval type-2 fuzzy logic systems and generalized type-2 fuzzy logic systems in control problems, ELSEVIER, Information Sciences, 354, pp 257-274, 2016.
- [18].- Yao Ouyan, Jinxuan Fang, Zhejiang Zhao, A generalization of additive generator of triangular norms, ELSEVIER, International Journal of Approximate Reasoning, 49, pp 417-421, 2008.
- [19].-K.V Zuñiga, I. Castilla, R.M Aguilar, Using fuzzy logic to model the behavior of residential electrical utility customers, ELSEVIER, Apply Energy, 115, pp 384-393, 2014.
- [20].-E. H: MANDANI AND S, ASSILIAN, An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic controller, Int. J. Human Computer Studies, 51, pp-135-147, 1973.
- [21].-Matlab, Fuzzy Logic Toolbox, junio 9-2016, <http://www.mathworks.com/products/fuzzy-logic/features.html>.
- [22].-S.C. Ponce Flores, P. M. Quintero Flores, J. L. Hernández Corona, Modelling of a fuzzy inference system for the diagnosis of electric motors aging, Internatinal Journal of investigation and Science Research, 21, 1, pp-34-42, 2016.