



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Campus San Juan Del Rio

Evaluación del impacto térmico de los disturbios eléctricos en un motor de inducción usando termografía.

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el título de Ingeniero Electromecánico.

Línea terminal en
Diseño y Manufactura

Presenta

Daniel Cruz Ramírez

Asesor:

Dr. Roque Alfredo Osornio Ríos

Dr. Arturo Yosimar Jaen Cuellar

San Juan del Rio, Querétaro.

Septiembre, 2020.

RESUMEN

Existen varios trabajos enfocados a crear señales arbitrarias o en su caso disturbios eléctricos y diversos métodos para su identificación, así como trabajos relacionados a la detección y monitoreo de motores eléctricos mediante termografía. En este trabajo se busca unificar estos casos de estudio y para esto se presenta una metodología para el análisis de los disturbios eléctricos tales como: SAG, SWELL, armónicos y fluctuaciones sobre un motor de inducción a través de análisis termográfico. En este trabajo se presenta el desarrollo, diseño e implementación de un módulo de generación de señales y monitoreo a través de termografía infrarroja. En el primero módulo se generan las formas de onda y niveles de voltaje correspondientes a los disturbios eléctricos: SAG, SWELL, armónicos y fluctuaciones este módulo se basa en software-hardware, el primero se encarga de simular el disturbio en una señal sintética y generar las señales en una plataforma GUI (Graphical User Interface, Interfaz gráfica de usuario), las señales son enviadas a una tarjeta FPGA (Field-programmable gate array, matriz de puertas lógicas programable en campo) de diseño propio PLC-UAQ para ser almacenadas en una memoria de acceso aleatorio (RAM), el módulo hardware o etapa de inyección sintetiza las señales almacenadas en la tarjeta PLC-UAQ donde las señales de voltaje son amplificadas mediante un amplificador de audio y un transformador en serie, son acoplados al sistema trifásico de prueba donde se encuentra el motor de inducción, la inyección de la señal se realiza mediante un sistema de cruce por cero para sincronizar las señales de voltaje de la red y la generada por el módulo de generación. El módulo de monitoreo se encarga de realizar el análisis termográfico del objeto de estudio en este caso un motor eléctrico de inducción, al inducirle contaminación en la red eléctrica fundamental. La metodología está enfocada a realizar un análisis visual de las imágenes térmicas capturadas al inducir disturbios eléctricos al motor de inducción y comparar una cámara termográfica de alto costo contra una de bajo costo. Los disturbios son señales que se agregan a la señal fundamental, lo que agrega energía al sistema y parte de esta es convertida en calor. Es por ello que, por medio de la metodología desarrollada en este trabajo se valida que efectivamente parte de la energía que agregan los disturbios se convierte en calor y como visualmente se pueden detectar estos cambios comparando dos cámaras: una de alto costo y otra de bajo costo. Esto abre camino para próximos análisis de disturbios eléctricos empleando termografía.

Palabras clave: Calidad de la energía, disturbios eléctricos, termografía.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres María Guadalupe Ramírez Uribe y Daniel Cruz Hernández que me han apoyado en todo mi trayecto escolar y personal, me han brindado su amor y me han guiado con sus palabras y ejemplo. A quienes les brindo toda mi admiración.

A mis hermanos Fernando, Humberto, Luz del Carmen y Marisela con quienes he compartido y vivido valiosos momentos, a quienes estimo y quiero, me han apoyado en mis decisiones y han sido parte importante de mi vida.

A mis asesores Dr. Roque Alfredo Osornio y el Dr. Arturo Yosimar Jaen por la confianza que me brindaron para realizar este trabajo, sus conocimientos, tiempo y apoyo.

A mis compañeros y amigos que han sido parte de diferentes periodos de mi vida, han estado para apoyarme y darme consejo.

A mis familiares han estado ahí para apoyarme y han confiado en mí, y sobre todo han sido partícipes en mis proyectos.

ÍNDICE

RESUMEN	1
AGRADECIMIENTOS	2
ÍNDICE	3
ÍNDICE DE CUADROS	5
ÍNDICE DE FIGURAS	5
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 Antecedentes	8
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo general.....	12
1.2.2 Objetivos particulares	12
1.3 Descripción del problema	12
1.4 Justificación	13
1.5 Planteamiento general	13
CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	15
2.1 Sistemas trifásicos	15
2.1.1 Motores trifásicos.....	15
2.1.2 Motor de inducción.....	17
2.1.3 Transformador.	18
2.1.4 Transformador trifásico.....	19
2.2 Amplificadores	20
2.4 Disturbios	21
2.3.1 Clasificación de disturbios	23
2.3.2 Variaciones de corta duración	24
2.3.3 Distorsión de onda	24
2.4 FPGA	27
2.4.1 Programación de los FPGA	28
2.5 Termodinámica	30
2.5.1 Calor	31
2.5.2 Temperatura	32
2.5.3 Transferencia de calor	32
2.6 Ondas electromagnéticas	36
2.6.1 Onda.....	36

2.6.2 Espectro electromagnético.	37
2.9 Termografía infrarroja	39
2.8 Adquisición y filtrado de imágenes termográficas	40
2.9 Segmentación de imágenes termográficas	42
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.	43
3.1 Generador de disturbios	44
3.1.1 Módulo software.....	44
3.1.2 Módulo Hardware.....	49
3.1.3 Fuente de alimentación.....	53
3.1.4 Banco de pruebas.....	53
3.2 Análisis térmico	53
3.2.1 Cámara termográfica	53
3.2.2 Adquisición de imágenes	55
3.2.3 Inspección visual.....	55
CAPÍTULO 4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS	56
4.1 Implementación del sistema generador de disturbios	56
4.2 Implementación del sistema de análisis térmico	57
4.3 Casos de estudio	58
4.4 Resultados	59
4.4.1 SAG	59
4.4.2 SWELL.....	63
4.4.3 Tercer armónico.....	67
4.4.4 Quinto armónico.....	71
4.4.5 Cuarto, séptimo y onceavo armónico.....	75
4.4.6 Fluctuaciones.....	80
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	85
CAPÍTULO 6. REFERENCIAS	87

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Terminología IEEE, norma 1159-1995.	23
Cuadro 2. Modelos matemáticos de los disturbios. ...	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama general del sistema.....	14
Figura 2. Conexión estrella de un motor trifásico (Gutierrez, 2000).	16
Figura 3. Imán en movimiento que pasa sobre la escalera conductora (Wildi, 2007).	18
Figura 4. Voltaje inducido en el devanado secundario (Wildi, 2007).	19
Figura 5. Transformador trifásico: a) banco trifásico (tres transformadores monofásicos), b) de tres columnas, y c) de cinco columnas o acorazado (Córcoles et al., 1996).	19
Figura 6. Impulso transitorio en una señal de voltaje (IEEE, 1995).....	22
Figura 7. Disturbio oscilatorio (IEEE, 1995).	22
Figura 8. Estructura general de un FPGA (Gutiérrez et al., 2008).....	28
Figura 9. Flujo de diseño para lógica programable (Gutiérrez et al., 2008).....	29
Figura 10. Transferencia de calor por conducción (Delgadillo et al., 2013).....	33
Figura 11. En una habitación calentada por un radiador se establecen corrientes de convección (Serway et al., 2008).	34
Figura 12. Transmisión de calor por radiación (Delgadillo et al., 2013).....	35
Figura 13. El espectro electromagnético (Serway et al., 2008).	37
Figura 14. Sistema de adquisición de imágenes por Termografía Infrarroja (Ibarra et al., 2005).	41
Figura 15. Diagrama de la metodología del sistema.	43
Figura 16. Interfaz gráfica de usuario.	44
Figura 17. Ventana GUI y gráfica de la señal base.	45
Figura 18. Ventana de personalización y simulación, SAG.	46
Figura 19. Ventana de personalización y simulación, SWELL.	47
Figura 20. Ventana de personalización y simulación, armónicos.	48
Figura 21. Ventana de personalización y simulación, fluctuaciones.....	49
Figura 22. Tarjeta PLC-UAQ.	50
Figura 23. Acondicionamiento de señal.	51
Figura 24. Amplificador de audio KAM-3465.	52
Figura 25. Circuito detector de cruce por cero.	52
Figura 26. Cámara termográfica FLIR A320.....	54
Figura 27. Camara termografica PiNoIR.	54
Figura 28. RTD PT100.	55
Figura 29. Generador de disturbios eléctricos.....	56
Figura 30. Sistema termografico.	57
Figura 31. Imágenes térmicas FLIR, disturbio SAG.	60
Figura 32. Imágenes térmicas PiNoIR, disturbio SAG.....	60

Figura 33. Gráfica sensores RTDs, disturbio SAG.....	61
Figura 34. Gráfica slots imágenes térmicas FLIR, disturbio SAG.....	62
Figura 35. Segmentación imágenes térmicas PiNoIR, disturbio SAG.....	62
Figura 36. Gráfica temperatura promedio de imágenes térmicas PiNoIR, disturbio SAG.....	63
Figura 37. Imágenes térmicas FLIR, disturbio SWELL.....	64
Figura 38. Imágenes térmicas PiNoIR, disturbio SWELL.....	64
Figura 39. Gráfica sensores RTDs, disturbio SWELL.....	65
Figura 40. Gráfica slots imágenes térmicas FLIR, disturbio SWELL.....	66
Figura 41. Segmentación imágenes térmicas PiNoIR, disturbio SWELL.....	66
Figura 42. Gráfica temperatura promedio de imágenes térmicas PiNoIR, disturbio SWELL.....	67
Figura 43. Imágenes térmicas FLIR, 3° armónico.....	68
Figura 44. Imágenes térmicas PiNoIR, 3° armónico.....	68
Figura 45. Gráfica sensores RTDs, 3° armónico.....	69
Figura 46. Gráfica slots imágenes térmicas FLIR, 3° armónico.....	70
Figura 47. Segmentación imágenes térmicas PiNoIR, 3° armónico.....	70
Figura 48. Gráfica temperatura promedio de imágenes térmicas PiNoIR, 3° armónico.....	71
Figura 49. Imágenes térmicas FLIR, 5° armónico.....	72
Figura 50. Imágenes térmicas PiNoIR, 5° armónico.....	72
Figura 51. Gráfica sensores RTDs, 5° armónico.....	73
Figura 52. Gráfica slots imágenes térmicas FLIR, 5° armónico.....	74
Figura 53. Segmentación imágenes térmicas PiNoIR, 5° armónico.....	74
Figura 54. Gráfica temperatura promedio imágenes térmicas PiNoIR, 5° armónico.....	75
Figura 55. Imágenes térmicas FLIR, 4°, 7° y 11° armónicos.....	76
Figura 56. Imágenes térmicas PiNoIR, 4°, 7° y 11° armónicos.....	77
Figura 57. Gráfica sensores RTDs, 4°, 7° y 11° armónicos.....	78
Figura 58. Gráfica slots imágenes térmicas FLIR, 4°, 7° y 11° armónicos.....	78
Figura 59. Segmentación imágenes térmicas PiNoIR, 4°, 7° y 11° armónicos.....	79
Figura 60. Gráfica temperatura promedio imágenes térmicas PiNoIR, 4°, 7° y 11° armónicos.....	79
Figura 61. Imágenes térmicas FLIR, disturbio fluctuaciones.....	81
Figura 62. Imágenes térmicas PiNoIR, disturbio fluctuaciones.....	81
Figura 63. Gráfica sensores RTD's, disturbio fluctuaciones.....	82
Figura 64. Gráfica slots imágenes térmicas FLIR, disturbio fluctuaciones.....	83
Figura 65. Segmentación imágenes térmicas PiNoIR, disturbio fluctuaciones.....	83
Figura 66. Gráfica temperatura promedio imágenes térmicas PiNoIR, disturbio fluctuaciones.....	84

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Estudios realizados por IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers - Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) y EPRI (Electric Power Research Institute - Instituto de Investigación de Energía Eléctrica) muestran que entre 35% y 47% de las fallas en los motores son eléctricas aun cuando una falla mecánica sea la causa aparente (SKF Group, 2017). Por ello, es indispensable monitorear los parámetros eléctricos del motor, la fuente de alimentación, la carga y su interacción con la cadena cinemática, para de esta forma planear y realizar trabajos menores de reacondicionamiento. Por lo tanto, para hacer un análisis de las fallas en los motores eléctricos se establecen las siguientes zonas o áreas de fallas:

- Circuito de potencia
- Aislamiento
- Estator
- Rotor
- Excentricidad
- Calidad de la energía

El determinar problemas en los motores eléctricos debe ser confiable y seguro, por lo que las herramientas más comunes que permiten diagnosticar fallas en un motor eléctrico son, por ejemplo, el medidor de aislamiento (Megger), óhmetro, equipos de ultrasonido, análisis de vibraciones, etc. Sin embargo, estas herramientas no logran medir todas las zonas o áreas de falla en un motor eléctrico.

El tema de calidad de la energía ha sido ignorado como un caso de falla en los motores eléctricos, pero sin duda representa una gran influencia en la vida de un motor eléctrico y la calidad del proceso, debido a que la medición de armónicos, niveles bajos de voltaje, desbalance de tensión, entre otros. Pueden provocar sobrecalentamiento en los devanados del motor aun sin la presencia de sobrecarga. Este calentamiento se origina debido a la ley de conservación de la energía que establece que la potencia de entrada debe ser siempre igual a la potencia de salida más las pérdidas en la máquina. Las pérdidas en un motor son pérdidas mecánicas, pérdidas magnéticas que son resultado de la histéresis y por corrientes de Eddy y pérdidas eléctricas o por efecto Joule. La presencia de disturbios ocasiona que las pérdidas magnéticas y eléctricas aumenten y se liberen en forma de calor. Por esto, una herramienta muy útil de medición aparte de los ya mencionados es la cámara termográfica que es un instrumento muy confiable para monitorear la distribución de temperatura en una superficie, usualmente este monitoreo se enfoca a la detección de puntos calientes en equipos eléctricos, detección de puntos máximos de temperatura en motores específicamente en los rodamientos o elementos de la cadena cinemática, etc. Sin embargo, los diferentes equipos invasivos para el monitoreo de la calidad de la energía en motores eléctricos es reducido ya que son

equipos costosos, por ello, su uso se enfoca generalmente en los elementos de distribución o transformadores.

Por esto, en este trabajo se propone la creación de un sistema que permita evaluar el efecto térmico que producen los disturbios eléctricos SAG, SWELL, fluctuaciones y armónicos en un motor de inducción para el análisis de fallas por mala calidad de la energía. La idea principal se basa en el desarrollo de un software que permita generar señales sintéticas que contengan los datos ingresados de los disturbios, los datos obtenidos de cada disturbio serán enviados mediante un FPGA (Field Programmable Gate Array) al motor de inducción alimentado por la red eléctrica comercial, para realizar el análisis térmico que producen los disturbios mencionados anteriormente utilizando termografía.

La tesis se encuentra organizada en 5 capítulos, los cuales se resumen a continuación:

Capítulo 1. Se presenta la descripción del problema y los trabajos que se han desarrollado para resolverlo; se plantean los objetivos del trabajo y la forma en la que se enfrentará el problema.

Capítulo 2. Se presenta la revisión de la literatura donde se establecen las bases teóricas necesarias para dar solución al problema planteado.

Capítulo 3. Se plantea la metodología donde se describen a detalle los pasos para dar solución al problema planteado.

Capítulo 4. Se muestran los resultados obtenidos y la discusión del problema a resolver.

Capítulo 5. Se presentan las conclusiones del trabajo y se da una prospectiva del trabajo.

1.1 Antecedentes

Para el análisis de calidad de la energía y los efectos que producen en los equipos los disturbios eléctricos en condiciones parecidas a las reales, se han desarrollado diversos trabajos para la generación de disturbios eléctricos. Por otro lado, el uso de un software computacional como LabView, MatLab y sus múltiples aplicaciones, entre otros softwares han ayudado al desarrollo de señales sintéticas que contienen los datos de los disturbios generados. Los investigadores miembros del IEEE Terzija et al. (2008) evaluaron la calidad de la energía en media tensión, mediante la estimación del algoritmo numérico Newton no-lineal y no-recursivo; para ello utilizaron el ambiente de simulación de MatLab “simulink” donde generaron su sistema eléctrico de media tensión, a éste se le inducían fallas de corto circuito y la puesta en operación de motores eléctricos y por medio de su algoritmo evaluaron la

calidad de la energía en su sistema eléctrico. Posteriormente Penghui et al. (2010) analizaron y monitorearon la calidad de la energía en una subestación transformadora utilizando análisis del espectro en frecuencia, en este trabajo empleo el software LabView para simular la subestación e introducir mediante ecuaciones paramétricas armónicos en el lado de alta y baja tensión. Indu et al. (2012) presentaron una técnica PLL (Phase Locked Loop - Bucle de fase sincronizada) trifásico para generar las señales de referencia de los convertidores electrónicos de potencia en un sistema de conexión a la red, utilizaron filtrado de señales FIR (Finite Impulse Response – Respuesta al impulso finito) para eliminar el desfase de la señales y la presencia de armónicos, la técnica PLL mejorada se simuló en el ambiente de simulación Simulink de MatLab y se introdujeron los disturbios mediante sus ecuaciones paramétricas. Jashfar et al. (2013) presentaron un sistema para clasificar disturbios eléctricos utilizando S-Transform y TT-Transform basados en una red neuronal artificial, para comprobar su clasificador programaron y generaron los disturbios mediante sus ecuaciones paramétricas en el software MatLab, posteriormente tomaron cada disturbio y le aplicaron la S-Transform y la TT-Transform, encontraron la varianza entre ambas transformadas y con su red neuronal previamente entrenada realizaron la clasificación de los disturbios eléctricos SAG, SWELL, Flicker, armónicos, interrupciones y transitorios. Costa (2014) en su trabajo propuso una nueva forma de detectar los transitorios inducidos por fallas en tiempo real, se basó en la transformada de Coeficientes Wavelet Límite que no genera ningún retraso en el tiempo, para comprobar sus resultados simuló en el software ATP (Alternative Transients Program - Programa de Transitorios Alternativos) un sistema de potencia de transmisión y distribución con parámetros reales, al cual se le aplicaron fallas generadoras de transitorios. Los trabajos mencionados anteriormente para generar disturbios eléctricos presentan la desventaja, de que se utilizan softwares comerciales, el alto costo computacional que estos representan y solo se llevan a cabo en simulación.

Para solucionar la problemática de generar los disturbios en tiempo real y ser inyectados a la red eléctrica, se desarrollaron varios trabajos implementando un sistema software-hardware; Iñigo et al. (2007) presentaron un sistema basado en redes neuronales para la clasificación de los disturbios eléctricos en tiempo real, programaron una interfaz en Borland C++ que muestra la identificación de los disturbios, posteriormente entrenaron y programaron su red neuronal en MatLab apoyados en una tarjeta de adquisición de datos, los disturbios SAG, SWELL, interrupción, baja tensión, sobretensiones, armónicos y variaciones de frecuencia fueron generados mediante sus ecuaciones paramétricas en el entorno de LabView, los datos obtenidos de los disturbios se enviaron por medio de un DAC (Digital to Analog Converter – Convertidor Digital-Analógico) y un amplificador a la tarjeta de adquisición, con ello lograron entrenar su red neuronal y obtener sus resultados en la interfaz de Borland C++. Chen (2011) desarrolló un generador de señales arbitrarias mediante el uso de un microcontrolador AT89S52 encargado de controlar todo el circuito, un circuito DDS (Direct Digital Synthesis, Síntesis Digital Directa)

AT9850 encargado de generar la frecuencia de la señal y un convertidor digital-analógico AD7520 ajusta la amplitud de la señal bajo el control del microcontrolador, con este sistema se pueden generar distintos tipos de señales mediante la generación de los códigos de programación en "C". Granados et al. (2013) analizaron la calidad de la energía en una máquina CNC (Computer Numerical Control, Control Numérico por Computadora) mediante el monitoreo y procesamiento de las señales eléctricas, propusieron un arreglo de un transformador variable, uno de acoplamiento y un relé de estado sólido, debido a que el transformador variable permite la regulación del voltaje proporcionado por el transformador de acoplamiento, lograron variaciones en el voltaje de la entrada a una máquina CNC, mediante los contactos normalmente abierto y normalmente cerrado del relé, provocando disturbios SAG en la máquina. Jantee et al. (2014) desarrollaron un generador de disturbios SAG basado en la interfaz de usuario gráfica de MATLAB (GUI) y un microcontrolador, para crear los datos utilizaron el modelo matemático del disturbio SAG esto permitió simularlo para su comprobación y enseguida ser enviado a través de un microcontrolador encargado de generar el disturbio en tiempo real. Gutiérrez et al. (2014) desarrollaron e implementaron un sistema de generación y monitoreo de disturbios eléctricos en una plataforma software-hardware, la primer etapa consta de un sistema de generación en el cual se creó una interfaz de usuario gráfica de MATLAB (GUI) para generar los datos de los disturbios utilizando el modelo matemático, estas señales se almacenaron en una memoria RAM, para esto se utilizó la tarjeta PLC-UAQ, al contener la información de los disturbios, las señales de salida de la tarjeta son elevadas en magnitud por un amplificador de audio y la salida es enviada a un transformador en serie, lo cual inyecta las señales en las tres fases de la línea de alimentación, la segunda etapa presenta el sistema de monitoreo de las señal para ello se acondiciona la señal generada en la etapa anterior para que mediante un módulo de adquisición conformado por la tarjeta PLC-UAQ y el uso de la Transformada de Fourier de Tiempo Corto sea capaz de identificar los disturbios. Los trabajos citados anteriormente siguen teniendo la desventaja de hacer uso de software comercial y alto costo computacional, sin embargo, para la etapa de simulación ahora es posible reproducir esa señal en tiempo real y ser implementada en la red, por otra parte, la complejidad y costo es elevado, y no cuentan con la flexibilidad para generar otro tipo de disturbios.

El monitoreo y detección de fallas en motores de inducción se ha convertido en un área importante de investigación debido a su amplio uso en la industria. Olarte et al. (2011) presentaron un artículo que describe la importancia de la termografía como una herramienta clave para el mantenimiento predictivo en diferentes áreas de la ingeniería, ya que esto puede evitar grandes pérdidas económicas en las empresas, además explican el principio de funcionamiento de estos equipos para la obtención de la temperatura. Picazo et al. (2011) realizaron un estudio diseñando una metodología para establecer un balance de energía de un motor eléctrico de inducción de jaula de ardilla auto ventilado de 1.1 kW mediante termografía

infrarroja. Para ello, se puso en funcionamiento el motor y se adquirieron las imágenes térmicas desde su funcionamiento con la cámara FLIR S65, las imágenes son capturadas cada segundo y los datos son guardados en una computadora, estos datos se toman para realizar los cálculos de transferencia de calor y establecer el balance de energía del motor de inducción. Fandiño (2012) en su trabajo realizó la identificación y localización de fallas en máquinas rotativas utilizando procesamiento digital de imágenes termográficas, para ello se tomaron imágenes térmicas y se seleccionaron las regiones de interés mediante la transformada de Watershed, en estas zonas se inspeccionaron porque se presentan mayores aumentos de temperatura, y es donde se pueden presentar fallas mecánicas, los datos obtenidos permiten desarrollar esquemas de mantenimiento predictivo para darle seguimiento a la máquina en tiempo real. Royo et al. (2012) a diferencia de su trabajo anterior en este trabajo estudiaron de forma preliminar el uso de datos de la termografía infrarroja para diagnosticar fallas de barra rota en un motor de inducción de 1.1 kW, las imágenes de termografía de la temperatura se capturaron cada segundo desde el arranque hasta el estado estacionario del motor correspondiente a una máquina sana para ser comparados y analizados con los datos correspondientes a una máquina con barras rotas. Según sus análisis, el defecto por barras rotas, las pérdidas que se presenta son mayormente en un sobrecalentamiento en la máquina. Delgadillo et al. (2013) en su trabajo se realizó un estudio sobre la aplicación potencial de la termografía implementada al mantenimiento predictivo, para ello se identificaron y localizaron las fallas en las maquinas rotatorias utilizando procesamiento digital de imágenes termográficas, para ello se tomaron regiones de interés en las que se presentan mayores aumentos de temperatura, que ocurren por el efecto de las fallas mecánicas, el plan de mantenimiento se basó tomando las muestras continuas de la máquina y con base a las posibles fallas que se pueden evitar con este método se realizó un estudio de costos, para verificar la viabilidad de hacer uso de la termografía infrarroja. García et al. (2014) en su trabajo proponen una metodología basada en termografía utilizando segmentación de imágenes para la detección y el diagnóstico de motores de inducción, así como el impacto de las fallas en la cadena cinemática. Para validar los resultados la cámara de infrarrojos FLIR A310 se calibró con sensores RTD, la segmentación de las imágenes termográficas se realizó manualmente tomando las partes de interés del motor y la cadena cinemática, la segmentación permite hacer un diagnóstico de las posibles fallas en el motor ya sean de barra rota, defectos en chumaceras, desbalanceo, desalineamiento y desbalanceo de voltaje. Los trabajos mencionados tienen la desventaja que se enfocan principalmente en fallas mecánicas en los motores de inducción y en su cadena cinemática, sin tomar en cuenta las fallas eléctricas que pueden dar origen a las fallas mecánicas y que repercuten en la vida y eficiencia del motor.

Como se puede observar en los distintos artículos citados aún falta explorar en el campo de la calidad de la energía el efecto térmico que produce en las cargas, principalmente los motores de inducción debido a que son las máquinas eléctricas

más utilizadas en la industrial, por otro lado este trabajo tiene la ventaja de tener la capacidad de generar distintos tipos de disturbios, mediante la programación de sus respectivos modelos matemáticos que son indispensables para el análisis y diagnóstico térmico de las posibles fallas eléctricas que estos inducen y las pérdidas económicas por mala calidad de la energía.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar mediante termografía los cambios térmicos en un motor de inducción generados a partir de los disturbios eléctricos como: SAG, SWELL, fluctuaciones y armónicos.

1.2.2 Objetivos particulares

- Programar y simular para su validación las ecuaciones requeridas para la generación de los disturbios a aplicar mediante el software MatLab para su aplicación a un motor de inducción.
- Integrar los elementos físicos, eléctricos y electrónicos mediante sistemas comerciales para la puesta en operación de un generador de disturbios.
- Aplicar los disturbios eléctricos de estudio en un motor de inducción para la evaluación de cambios térmicos mediante termografía.
- Reportar las gráficas y resultados correspondientes a los disturbios aplicados mediante termografía.

1.3 Descripción del problema

Los motores de inducción son las máquinas eléctricas más utilizadas en la industria debido a su alta fiabilidad, eficiencia, bajo costo, entre otras razones. Por lo que cualquier falla en estas máquinas puede ocasionar pérdidas de producción e inseguridad para el personal. La mayor parte de las condiciones de falla eléctrica en un motor de inducción se deben al exceso de temperatura, que está ligado con el tema de calidad de la energía debido a que las distintas distorsiones inyectadas en la red eléctrica generan variaciones en amplitud, frecuencia, forma y simetría en la forma de onda y esto se ve reflejado en el incremento o decremento en la corriente eléctrica. Lo anterior, ocasiona calentamiento en los motores de inducción que está vinculado estrechamente a la vida y rendimiento de la máquina, ocasionando a su vez estados de falla y generando pérdidas económicas por mala calidad de la energía.

1.4 Justificación

Las instalaciones eléctricas están sometidas constantemente a una gran cantidad de disturbios eléctricos, los cuales dependiendo de su amplitud y tiempo de duración es la cantidad de daño que pueden ocasionar en nuestras cargas. Específicamente, en los motores de inducción, un disturbio puede ocasionar cambios en amplitud, frecuencia, forma y simetría en la forma de onda generando variaciones significativas en la corriente eléctrica. De este modo, se parte de la primera ley de la termodinámica que enuncia “la energía no se crea ni se destruye solo se transforma”, esto indica que la energía suministrada por los disturbios eléctricos no se convierte totalmente en energía mecánica para el motor de inducción debido a las pérdidas por efecto Joule y corrientes de Eddy. Esto ocasiona incrementos o decrementos de temperatura, por lo que es de suma importancia conocer los efectos térmicos que los disturbios producen en un motor de inducción. Estos cambios de temperatura identificados por la cámara termográfica, a través de sus sensores infrarrojos, entregan la medición superficial de gradientes de temperatura en el motor de inducción y una imagen clara de la distribución de calor en el motor de inducción; esto permite dar un diagnóstico de la vida útil y eficiencia del motor de inducción al ser sometido a los diferentes disturbios.

Por otro lado, la termografía infrarroja tiene la ventaja de que las mediciones se pueden realizar mientras el sistema está energizado, debido a la falta de contacto con el sistema y no interfiere en el proceso, por lo que es una metodología no invasiva, esto permite que el monitoreo se realice en tiempo real.

1.5 Planteamiento general

El planteamiento general del trabajo consta de tres módulos principales (Ver Figura 1):

1. Generación.
2. Inyección.
3. Análisis.

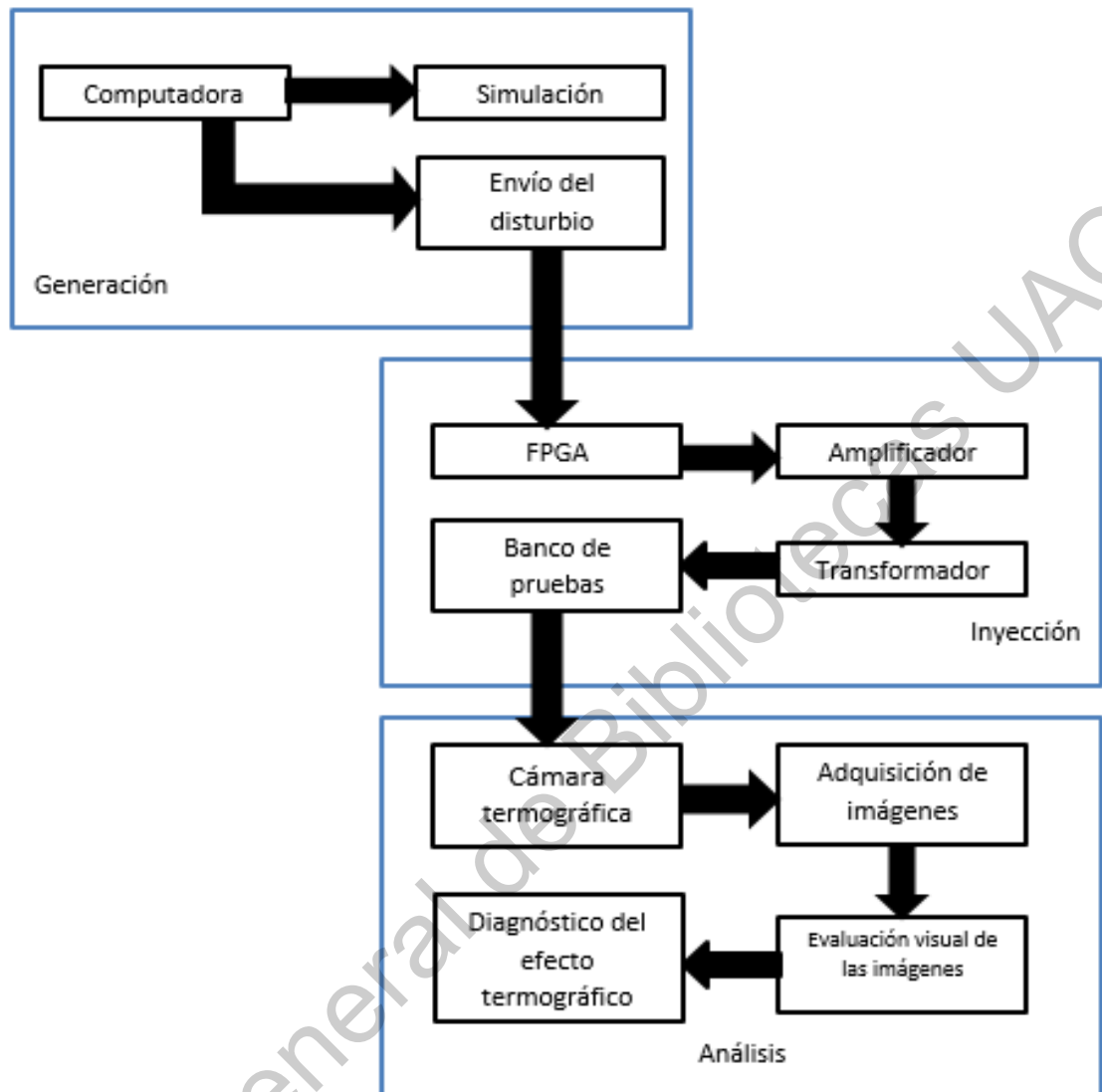


Figura 1. Diagrama general del sistema.

El módulo de generación se basa en un software que se encarga de simular el disturbio en una señal sintética y generar las señales que serán enviadas a un FPGA para ser almacenadas en una memoria de acceso aleatorio (RAM). Enseguida, los datos de estas señales van a ser enviados al módulo de inyección, donde, mediante un amplificador de audio y un transformador en serie, son acoplados al sistema trifásico de prueba donde se encuentra el motor de inducción el cual será analizado por la cámara termográfica. Para lo anterior, se toman puntos de interés de las imágenes obtenidas para hacer una evaluación del efecto térmico que producen los disturbios en el motor.

CAPÍTULO 2: REVISIÓN DE LA LITERATURA

En esta sección se presentan las bases teóricas requeridas para el planteamiento y desarrollo del trabajo para dar solución al problema abordado en este trabajo de tesis.

2.1 Sistemas trifásicos

La energía eléctrica es generada, transmitida y distribuida en forma de energía trifásica. Por lo general, los hogares y pequeños establecimientos tienen instalación eléctrica para energía monofásica, pero esto simplemente es una derivación del sistema trifásico básico. Se prefiere la energía trifásica a la monofásica por varias razones importantes:

1. Los motores, generadores y transformadores trifásicos son más simples, más baratos y más eficientes.
2. Las líneas de transmisión trifásicas pueden suministrar más potencia para un peso y costo dados.
3. La regulación del voltaje de líneas de transmisión trifásicas es inherentemente mejor.

Por lo tanto, el conocimiento de la energía trifásica y los circuitos trifásicos es esencial para entender la tecnología energética (Wildi, 2007).

2.1.1 Motores trifásicos

Son motores de corriente alterna que generalmente son conectados a redes de alimentación trifásica. Se compone de 2 partes, principalmente: estator y rotor.

- El estator consta de un armazón de acero que soporta un núcleo cilíndrico hueco compuesto de laminaciones apiladas. Varias ranuras equidistantes entre sí, hechas en la circunferencia interna de las laminaciones, proporcionan el espacio para el devanado del estator.
- El rotor también se compone de laminaciones ranuradas. Éstas están apiladas cuidadosamente para crear una serie de ranuras para el devanado del rotor. Se utilizan dos tipos de devanados de rotor. 1) devanados trifásicos convencionales hechos de alambre aislado y 2) devanados de jaula de ardilla. El tipo de devanado da lugar a dos clases principales de motores: motores de inducción de jaula de ardilla (también llamados motores de jaula) y motores de inducción de rotor devanado (Wildi, 2007).

Las bobinas alojadas en las ranuras estáticas están conectadas de modo que formen 3 arrollamientos independientes iguales, llamadas fases.

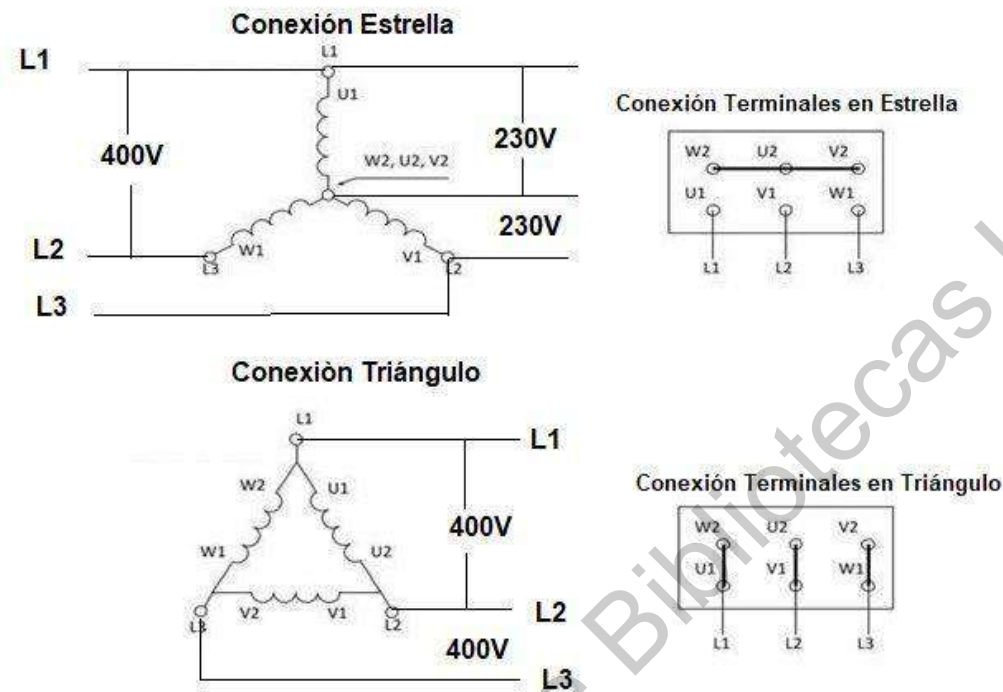


Figura 2. Conexión estrella de un motor trifásico (Gutierrez, 2000).

Normalmente se tiene que:

- El número de bobinas coincide con el número de ranuras (doble capa).
- Algunos motores tienen doble número de ranuras que de bobinas (arrollamiento de fondo de cesta). (Capa simple).
- Los motores 3 ϕ están normalmente previstos para trabajar a una o dos tensiones de servicio y para girar a dos, tres o cuatro velocidades de régimen, lo cual exige una gran variedad de conexiones (en Δ , en Y como se muestra en la Figura 2, en serie, en paralelo y todas las combinaciones posibles entre éstas).
- Los motores 3 ϕ de gran tamaño tienen las ranuras estáticas abiertas, en los motores pequeños y de mediano tamaño las ranuras estáticas son semicerradas.
- Las bobinas utilizadas en motores de cierto tamaño tienen forma hexagonal, es decir seis lados (Gutierrez, 2000).

2.1.2 Motor de inducción

Los motores de inducción (o motores asíncronos) trifásicos son los motores más utilizados en la industria. Son simples, resistentes, baratos y fáciles de mantener. Funcionan a velocidad esencialmente constante desde cero hasta plena carga. La velocidad depende de la frecuencia, por lo que estos motores no se adaptan con facilidad al control de velocidad. Sin embargo, cada vez se utilizan más los controladores electrónicos de frecuencia variable para controlar la velocidad de motores de inducción comerciales.

La operación de un motor de inducción trifásico está basada en la aplicación de la ley de Faraday y la fuerza de Lorentz en un conductor. El comportamiento es fácil de entender por medio del ejemplo siguiente.

Considere una serie de conductores de longitud L , cuyos extremos se ponen en cortocircuito mediante dos barras A y B (Figura 3). Un imán permanente colocado sobre esta escalera conductora se mueve con rapidez hacia la derecha a una velocidad v , para que su campo magnético B pase a través de los conductores. Entonces ocurre la siguiente secuencia de eventos:

1. Se induce un voltaje $E = Blv$ en cada uno de los conductores mientras el flujo pasa por ellos (ley de Faraday).
2. El voltaje inducido produce de inmediato una corriente I , la cual fluye por el conductor debajo de la cara del polo, a través de las barras extremas y regresa a través de los demás conductores.
3. Como el conductor que transporta corriente queda en el campo magnético del imán permanente, experimenta una fuerza mecánica (fuerza de Lorentz).
4. La fuerza siempre actúa en una dirección para arrastrar el conductor junto con el campo magnético.

Si la escalera conductora está libre para moverse, se acelerará hacia la derecha. Sin embargo, conforme ésta adquiera velocidad, el imán móvil pasará con menos rapidez por los conductores, por lo que el voltaje inducido E y la corriente I disminuirán. En consecuencia, la fuerza que actúa en los conductores también disminuirá. Si la escalera tuviera que moverse a la misma velocidad que el campo magnético, el voltaje inducido E , la corriente I y la fuerza que arrastra la escalera serían cero.

En un motor de inducción la escalera se cierra a sí misma para formar una jaula de ardilla y el imán móvil es reemplazado por un campo rotatorio. El campo es producido por las corrientes trifásicas que fluyen en los devanados del estator (Wildi, 2007).

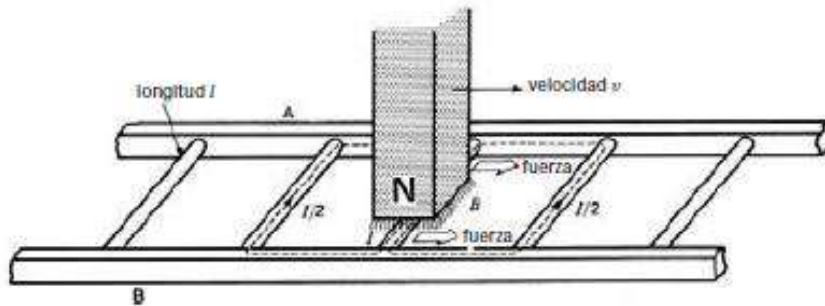


Figura 3. Imán en movimiento que pasa sobre la escalera conductora (Wildi, 2007).

2.1.3 Transformador.

El transformador es probablemente uno de los dispositivos eléctricos más útiles jamás inventados. Puede aumentar o disminuir el voltaje o corriente de un circuito de CA (Alternating Current, Corriente Alterna), puede aislar circuitos entre sí y puede incrementar o disminuir el valor aparente de un capacitor, un inductor o un resistor. Además, el transformador permite transmitir energía eléctrica a grandes distancias y distribuirla de manera segura en fábricas y hogares.

En la Figura 4, una bobina que tiene un núcleo de aire es excitada por una fuente de CA E_g . La corriente resultante I_m produce un flujo total ϕ , el cual se dispersa en el espacio alrededor de la bobina. Si acercamos una segunda bobina a la primera, rodeará una parte ϕ_{m1} del flujo total. Como resultado, un voltaje de CA E_2 es inducido en la segunda bobina y su valor se puede medir con un voltímetro. La combinación de dos bobinas se llama transformador. La bobina conectada a la fuente se llama devanado primario (o primario) y la otra se llama devanado secundario (o secundario).

Existe un voltaje sólo entre las terminales primarias 1-2 y las secundarias 3-4, respectivamente. No existe voltaje entre la terminal primaria 1 y la secundaria 3. Por lo tanto, la secundaria está aislada de la primaria. El flujo creado por el primario se puede descomponer en dos partes: un flujo mutuo F_{m1} , el cual enlaza las vueltas de ambas bobinas, y un flujo de dispersión F_{r1} , el cual enlaza sólo las vueltas del primario. Si las bobinas están demasiado separadas, el flujo mutuo es muy pequeño comparado con el flujo total; en ese caso se dice que el acoplamiento entre las dos bobinas es débil. Se puede obtener un mejor acoplamiento (y un voltaje secundario E_2 más alto) acercando ambas bobinas. Sin embargo, aunque acerquemos el secundario al primario para que las dos bobinas se toquen, el flujo mutuo seguirá siendo reducido comparado con el flujo total. Cuando el acoplamiento es débil, el voltaje E_2 es relativamente bajo y, peor aún, se colapsa casi por completo cuando se conecta una carga a través de las terminales secundarias. En la mayoría de los transformadores industriales, los devanados primario y secundario están enrollados uno encima del otro para mejorar el acoplamiento entre ellos (Wildi, 2007).

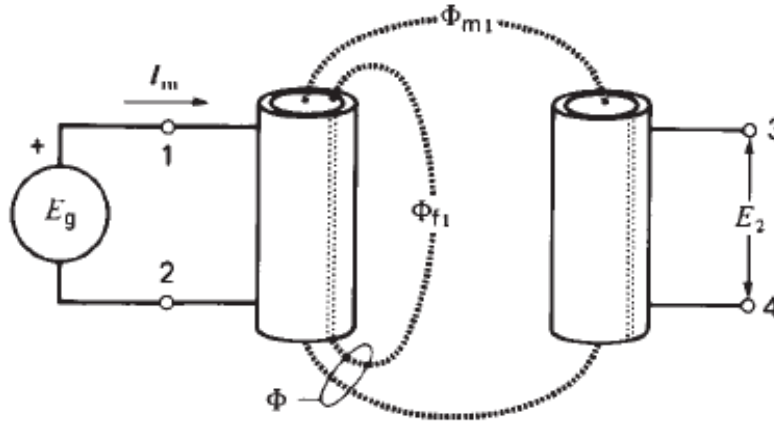


Figura 4. Voltaje inducido en el devanado secundario (Wildi, 2007).

2.1.4 Transformador trifásico

Conectando tres transformadores monofásicos se puede obtener un trifásico (que en este caso se llama banco trifásico). El transformador trifásico puede tener otras formas constructivas derivadas del banco trifásico: con núcleo de tres o cinco columnas (ver Figura 5). El más utilizado es el de tres columnas.

Un transformador trifásico en régimen equilibrado tiene su primario conectado a un sistema simétrico de tensiones y su secundario en vacío o alimentando una carga simétrica (las tres impedancias son iguales). Tanto el primario como el secundario pueden estar conectados en triángulo o en estrella, con o sin neutro. Si el neutro del primario está conectado, el sistema de tensiones ha de ser también equilibrado (Córcoles et al., 1996).

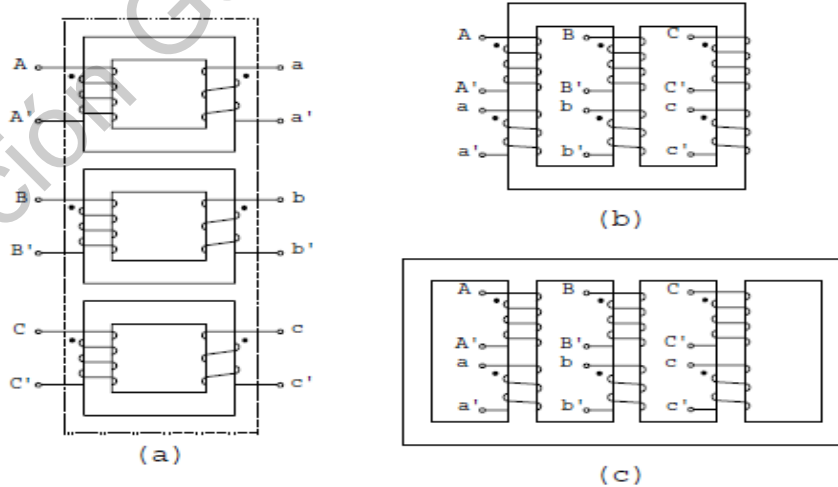


Figura 5. Transformador trifásico: a) banco trifásico (tres transformadores monofásicos), b) de tres columnas, y c) de cinco columnas o acorazado (Córcoles et al., 1996).

Conexiones de transformadores trifásicos.

- a) Conexión Estrella: Esta forma de conexión, se prefiere para operaciones con tensiones elevadas (o muy altas) por resultar más económico.
- b) Conexión Triángulo: Empleada para transformadores de potencia elevada y tensiones moderadas o corrientes elevadas.
- c) Conexión Estrella-Estrella: Empleado cuando se desee disponer de neutro en baja y cuando no se prevean grandes corrientes de desequilibrio (fase-neutro). Útil para transformadores con potencias pequeñas o moderadas a tensiones elevadas.
- d) Conexión Estrella-Triángulo: Adecuado como transformador reductor (cuando no se requiere puesta a tierra en el secundario). No genera armónicas de tensión. Se recomienda mayormente para tensiones secundarias relativamente bajas que motiva corrientes elevadas.
- e) Conexión Triángulo- Estrella: Empleado como transformador elevador. No es generador de terceras armónicas de tensión. No motiva flujos por el aire en caso de cargas desequilibradas ni traslados de neutros (sobretensiones). Admite cargas desequilibradas y posibilidad de sacar neutro en baja tensión.
- f) Conexión Estrella-Zeta: Solo se emplea en transformadores de distribución de reducida potencia. Puede operar con neutro secundario, admitiendo toda clase de desequilibrios y las tensiones secundarias no presenta terceras armónicas. Es más caro que el Estrella – Estrella, por el mayor empleo de material en su construcción (Gutierrez, 2000).

2.2 Amplificadores

Un amplificador recibe una señal de algún lugar transductor de captación o de cualquier otra fuente de entrada, y proporciona una versión más grande de la señal o cierto dispositivo de salida a otra etapa de amplificación. La señal del transductor de entrada es, por lo general, pequeña (unos cuantos milivolts para una entrada de casete o de disco compacto, o de algunos microvolts para una antena) y requiere amplificarse lo suficiente para poder operar un dispositivo de salida (una bocina o cualquier otro dispositivo de manejo de potencia). Para los amplificadores de pequeña señal, los principales factores son, por lo general, la linealidad de la amplificación y la magnitud de la ganancia. Dado que el voltaje y la corriente de la señal son pequeños en un amplificador de pequeña señal, la magnitud de la capacidad de manejo de potencia y la eficiencia de potencia no son cuestiones de consideración. Un amplificador de voltaje ofrece amplificación de voltaje principalmente para incrementar el voltaje de la señal de entrada.

Por otro lado, los amplificadores de gran señal o de potencia, proporcionan principalmente potencia, con frecuencia, en magnitudes de algunos watts o de decenas de estos. Las principales características de un amplificador de gran señal son la eficiencia de potencia del circuito, la máxima cantidad de potencia que es capaz de manejar el circuito y el acoplamiento de impedancia con el dispositivo de salida (Boylestad, 2003).

2.4 Disturbios

Un disturbio es un transitorio de corta duración en la forma de onda de voltaje de CA el cual se caracteriza por una breve discontinuidad repentina en la forma de onda. Puede ser de cualquier polaridad y puede ser aditivo o sustractivo de la forma nominal de onda nominal, estas perturbaciones se pueden presentar en cualquier sistema eléctrico tanto en magnitud y frecuencias distintas a los valores fundamentales (50 o 60 Hz). Estas perturbaciones se manifiestan como sobre voltajes, caída de voltajes, impulsos transitorios, distorsión, ruido, etc. Los disturbios tienen dos tipos de orígenes, los externos y los internos al Sistema Eléctrico. Los disturbios de origen externos son los producidos por las descargas atmosféricas (rayos) en las líneas eléctricas, contactos incidentales entre dos líneas eléctricas principalmente los de orígenes internos son producidos por la operación de dispositivos de desconexión, conmutación electrónica (drive's, PLC's, computadoras, etc.), arranque de motores entre otros.

Un disturbio puede tener una duración extremadamente corta y alta magnitud. Las instalaciones están sometidas a una gran cantidad de disturbios (fluctuaciones de tensión y corriente con bases de tiempo muy pequeñas con valores de 6000 V / 3000 A según IEEE 587 cat B). Estos disturbios pueden ser de origen atmosférico o eléctrico. Un disturbio se observa como un impulso de corta duración de gran amplitud que aparece súper impuesto en la forma de onda del voltaje o corriente. Los transitorios se clasifican en dos categorías:

Disturbio en forma de impulso. También conocido como Pico Transitorio de voltaje, es un cambio repentino de la condición de estado estable del voltaje, corriente o ambos, el cual es unidireccional en polaridad (principalmente positivo o negativo). El transitorio impulsivo es caracterizado normalmente por su elevación y tiempo de decaimiento, el cual puede ser obtenido de su contenido espectral (ver Figura 6).

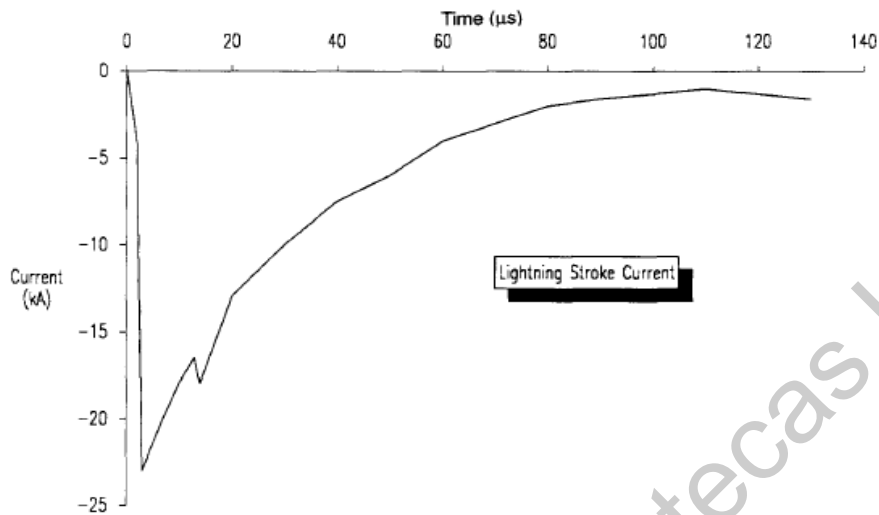


Figura 6. Impulso transitorio en una señal de voltaje (IEEE, 1995).

Los eventos transitorios involucran altas frecuencias. Ellos pueden excitar la frecuencia natural de circuitos del sistema eléctrico y producir Transitorios Oscilatorios.

Disturbio oscilatorio. Es un cambio repentino de la condición de estado estable del voltaje, corriente o ambos, el cual incluye valores de ambas polaridades, positivos y negativos. Un transitorio oscilatorio consiste en un voltaje o corriente cuyos valores instantáneos cambian rápidamente de polaridad. Esto es descrito por su contenido espectral (frecuencia predominante) así como su duración y magnitud. Uno de los impulsos oscilatorios más comunes ocurre cuando capacitores para corrección de factor de potencia son switcheados en el sistema de potencia. Figura 7 (Saucedo et al., 2008)

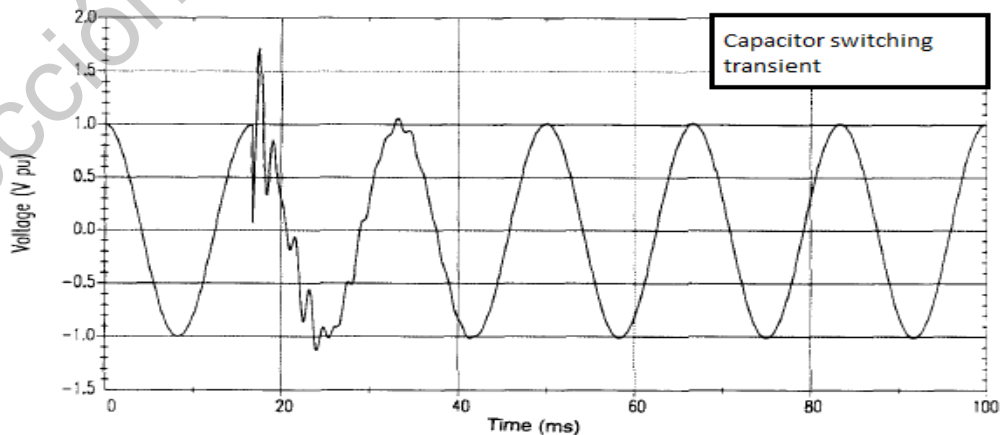


Figura 7. Disturbio oscilatorio (IEEE, 1995).

2.3.1 Clasificación de disturbios

Los disturbios eléctricos se encuentran clasificados de acuerdo con su magnitud y duración; el IEEE tiene como estándar, en lo referido a recomendaciones prácticas para el monitoreo de la Calidad de la Energía, la norma 1159-1995. El comité de la IEEE recomienda la terminología que se resume en el Tabla 1 (Gutiérrez et al., 2014).

Tabla 1. Terminología IEEE, norma 1159-1995.

Categoría	Tipos	Duración típica
Transitorios	Oscilaciones, impulsos	Menos de 1 ciclo
Variaciones de corta duración	Sags, swells, interrupciones	Menos de 1 ciclo
Variaciones de larga duración	Subtensiones, sobretensiones, interrupciones sostenidas	0.5 – 30 ciclos
Desequilibrio de tensión	----	Más de 1 minuto
Distorsión de forma de onda	Armónicas, ruido notching	Estado estacionario
Fluctuaciones de tensión	----	Intermitentes
Variación de frecuencia	----	Menos de 10 segundos

2.3.2 Variaciones de corta duración

Las variaciones de corta duración abarcan la categoría de la IEC (International Electrotechnical Commission, Comisión Electrotécnica Internacional) de depresiones de voltaje (DIP) e interrupciones cortas, así como su antítesis o sobrevoltajes (SWELL).

Los cambios en la corriente que caen dentro de los rangos de duración y magnitud están también incluidos en las variaciones de corta duración.

2.3.2.1 Interrupción

Una interrupción ocurre cuando la fuente de voltaje o corriente de la carga se reduce a menos de 0.1 pu por un período de tiempo que no excede un minuto; son medidas por su duración dado que la magnitud de voltaje es siempre menor al 10% de la nominal.

2.3.2.2 SAG

El termino SAG ha sido usado en la comunidad eléctrica por muchos años para describir un tipo específico de disturbio: un decremento de voltaje de corta duración (IEEE, 1995).

Son decrementos en el voltaje o corriente que ocurren a la frecuencia fundamental con magnitudes entre el 10% y el 90% del valor nominal que dura de 0.5 ciclos a 1 minuto. Estos son normalmente causados cuando cargas pesadas tales como motores son puestos en operación. Estas cargas tienen corrientes de arranque de seis a diez veces su corriente nominal por lo que llegan a afectar la señal de voltaje (Saucedo, 2008).

2.3.2.3 SWELL

Un SWELL está definido como un incremento en el voltaje o corriente rms (root mean square, valor cuadrático medio) en la frecuencia de la red para duraciones de 0.5 ciclos a 1 minuto. Las magnitudes se describen por su voltaje restante y típicamente están entre 1.1 y 1.4 pu. Los SWELLS están caracterizados por su magnitud (valor rms) y duración.

2.3.3 Distorsión de onda

La distorsión de onda es un estado estable de desviación de una onda de señal ideal de frecuencia principalmente caracterizada por el contenido espectral de la desviación. Hay 5 tipos principales de distorsión de onda que son los siguientes:

- a) DC offset
- b) Armónicos
- c) Interarmónicos
- d) Notching
- e) Ruido

2.3.3.1 Offset DC

La presencia de un voltaje de corriente directa en un sistema de potencia de corriente alterna es llamada offset de DC. La corriente directa en redes de corriente alterna puede ser perjudicial debido a un incremento en la saturación del transformador, atenuación adicional del aislamiento y otros efectos adversos.

2.3.3.2 Armónicos

Los armónicos son usualmente voltajes o corrientes senoidales que tienen altas frecuencias y que son múltiplos enteros de la frecuencia a la cual el sistema de alimentación está diseñado para operar. Los armónicos se combinan con el voltaje o corriente fundamentales y producen distorsión de la forma de onda.

Los niveles de la distorsión armónica pueden ser caracterizados por el espectro armónico con magnitudes y ángulo de fase de cada componente armónica individual. Es también común usar una sola cantidad, la distorsión armónica total, como una medida de la magnitud de la distorsión armónica (IEEE, 1995).

Cuando la forma de onda no es sinusoidal, pero periódica con un periodo de un ciclo (de la frecuencia del sistema, 50 o 60 Hz), las formas de onda del voltaje y la corriente pueden ser descompuestas en una suma de componentes armónicos. Para el voltaje se tiene la representación de la ecuación 1.

$$v(t) = V_o + \sum_{h=1}^H V_h \sqrt{2} \cos(h\omega t - \alpha_h) \quad (1)$$

Con $\omega=2\pi f_o$ y f_o la frecuencia fundamental o frecuencia del sistema.

2.3.3.3 Interarmónicos

Las formas de onda de voltaje y corriente usualmente contienen componentes que no son un múltiplo entero de la frecuencia del sistema. Para medir esos llamados interarmónicos es necesario medir sobre un periodo más largo que un ciclo. Para un voltaje con solo una componente interarmónica presente a una frecuencia f_o .

La presencia de interarmónicos puede ser interpretada en el dominio del tiempo como una señal siendo periódica, pero con un periodo de más de un ciclo (Bollen et al., 2006).

2.3.3.4 Notching

Es un disturbio de voltaje periódico causado por la operación normal de los dispositivos electrónicos de potencia cuando la corriente es conmutada de una fase a otra.

El notching de voltaje representa un caso especial que cae entre los transitorios y la distorsión armónica. Dado que ocurre continuamente (estado estable), puede ser caracterizado a través del espectro armónico del voltaje afectado. Sin embargo, los componentes de frecuencia asociados con el notching pueden ser bastante altos y pueden no ser caracterizados con el equipo normalmente usado para el análisis de armónicos.

2.3.3.5 Ruido

Son señales eléctricas no deseadas con contenido espectral de ancho de banda menor de 200 kHz superpuestas sobre el voltaje o corriente del sistema en conductores de fase, o encontrado en conductores neutrales o líneas de señal.

El rango de frecuencia y nivel de magnitud del ruido dependen de la fuente que produce el ruido y las características del sistema. La magnitud típica del ruido es menor del 1% de la magnitud del voltaje.

2.3.4 Fluctuaciones de voltaje

Las fluctuaciones de tensión son variaciones sistemáticas de la envolvente de voltaje o una serie de cambios de voltaje al azar, la magnitud de lo que normalmente no supera los rangos de tensión especificado de 0.9-1.05 pu.

Las fluctuaciones de tensión generalmente aparecen como una modulación de la frecuencia fundamental (similar a la modulación de amplitud de una señal de radio de la mañana). Por lo tanto, es más fácil de definir una magnitud para la tensión como fluctuación el rms magnitud de la señal de modulación. Esto se puede obtener por la demodulación de la forma de onda para eliminar la frecuencia fundamental y después medir la magnitud de las componentes de modulación. Típicamente, magnitudes tan bajas como 0.5% pueden resultar en flicker de luz perceptible si las frecuencias están en el rango de 6-8 Hz (IEEE, 1995).

2.3.5 Efectos de los disturbios en el sistema de energía

Los disturbios en el sistema, que se han considerado normales durante muchos años, ahora pueden causar desorden en el sistema eléctrico industrial, con la consecuente pérdida de producción. Adicionalmente, deben tomarse en cuenta nuevas medidas para desarrollar un sistema eléctrico confiable, mismas que anteriormente no se consideraban significativas. Dependiendo del tipo de disturbio, de su magnitud y su duración, es como se pueden manifestar en menos o mayor grado sobre los equipos eléctricos. A continuación, se mencionan algunos de los efectos producidos por los disturbios:

1. Ruido o impulsos eléctricos. Estos pueden ocasionar un funcionamiento errático en cualquier tipo de computadora, se pueden inhibir o desprogramar, errores de paridad, teclados bloqueados o información perdida. Si la magnitud del disturbio es muy elevada, el daño puede ser físico e irreversible.
2. Los sobre voltajes y caídas de voltaje. Los bajos voltajes del orden del 90% del nominal y por un tiempo de 3 ciclos aproximadamente, los drives los detectarían como una condición de falla. Los bajos voltajes al momento del arranque de grandes motores, pudiera ocasionar que los contactores de los motores se abran. Por otra parte, el sobre voltaje con duración muy larga, pueden dañar el aislamiento de la electrónica de los equipos.
3. Distorsión armónica. Este tipo de disturbio puede ocasionar funcionamiento errático de algunos variadores, calentamiento de cables y transformadores, y falsos disparos de interruptores (Saucedo et al., 2008).

2.4 FPGA

Estos constituyen la última generación de lógica programable, están constituidos por matrices de puertas eléctricamente programadas que contienen múltiples niveles de lógica, se basan en una cantidad muy grande de celdas lógicas, muy elementales. Mientras más pequeñas resulten las celdas, mayor aprovechamiento se puede tener de las mismas, aunque los retardos en la conducción pueden aumentar.

Los FPGA se caracterizan por altas densidades de puerta, alto rendimiento, un número grande de entradas y salidas definibles por el usuario, un esquema de interconexión flexible, y un entorno de diseño similar al de matriz de puertas. No están limitadas a la típica matriz AND-OR. Las celdas básicas de un FPGA son mucho más simples que las macro-celdas de un PLD, y dependiendo del proveedor de circuitos, ésta será su constitución. Cada proveedor y cada familia de FPGA ofrecen una versión diferente de la celda básica y en el texto solo se presenta un ejemplo típico de las mismas.

Todo FPGA tiene tres grupos de celdas básicas que son:

- Celda lógica
- Celda de entrada/salida
- Celda de distribución

La celda lógica es la que existe en mayor cantidad y son pequeños bloques lógicos de compuertas programables. Las celdas de entrada/salida están dedicadas a proporcionar la interconectividad entre el FPGA y el exterior. Finalmente, las celdas de distribución se encargan de manejar las señales de reloj hacia dentro del circuito.

Al contrario de lo que ocurre con los PLDs, la interconectividad en un FPGA está restringida a celdas adyacentes exclusivamente. Con esto se permite un mucho menor consumo de potencia y por consiguiente, un mayor nivel de integración. (Gutiérrez et al., 2008). El diagrama a bloques de la interconectividad típica en un FPGA se muestra en la Figura 8.

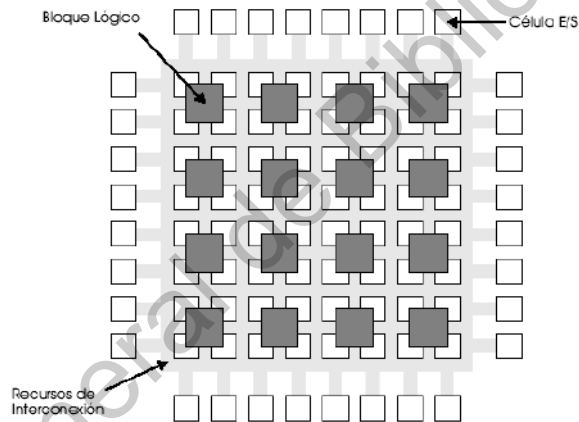


Figura 8. Estructura general de un FPGA (Gutiérrez et al., 2008).

2.4.1 Programación de los FPGA

Los FPGAS son dispositivos semiconductores programables que se basan alrededor de una matriz de bloques lógicos configurables (CLBs) conectados a través de las interconexiones programables a diferencia de la aplicación Circuitos Integrados Específicos (ASIC), en el que el dispositivo está hecho a la medida para el diseño particular, los FPGAs se pueden programar para los requisitos de las aplicaciones o funcionalidades deseadas (XILINX, 2015).

La Figura 9 muestra el flujo de diseño que se tiene que seguir cuando se trabaja con dispositivos lógicos programables, de acuerdo con la figura anterior partiendo del problema inicial, el primer paso consiste en realizar un planteamiento estructural del circuito que proporciona la solución. En este punto se determinan los elementos que han de ser utilizados para la solución del problema. El segundo paso

consiste en realizar la descripción VHDL (Hardware Description Language, Lenguaje de Descripción de Hardware) de la estructura propuesta para la solución del problema y se procede a la simulación lógica. Esta simulación lógica no contempla los retardos en las compuertas y solamente sirve para verificar la funcionalidad en comportamiento de la solución propuesta. Si la simulación es correcta se procede a la síntesis, si la simulación no es correcta hay que realizar las correcciones necesarias hasta obtener un circuito funcional.

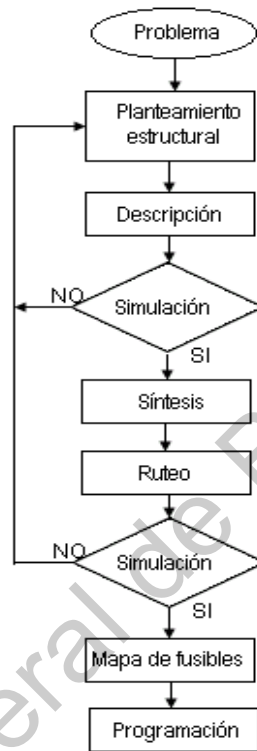


Figura 9. Flujo de diseño para lógica programable (Gutiérrez et al., 2008).

Para obtener un circuito que realice las operaciones descritas en el planteamiento se procede al paso cinco que consiste en realizar la síntesis del proyecto. Esta síntesis consiste en convertir el código VHDL en ecuaciones lógicas equivalentes a la tecnología donde se pretende llevar a cabo la realización final. Este paso y los siguientes, son sensitivos a la tecnología, es decir en este momento se tiene que utilizar y especificar el fabricante del dispositivo y la familia de circuitos a utilizar. Existen diversos fabricantes de dispositivos lógicos programables.

El sexto paso consiste en ruteo que se encarga de ajustar las ecuaciones obtenidas por la síntesis en los bloques constructores del dispositivo lógico programable, especificado de manera particular. Este proceso se encarga de convertir las ecuaciones lógicas en bloques constructores como son las macroceldas o las celdas lógicas, según se haya utilizado un FPGA, y la interconectividad

en las mismas. Este proceso predice los retardos que han de tener todas y cada una de las etapas sintetizadas en el circuito.

El siguiente paso incorpora los retardos predichos por el ruteo y el listado VHDL original y se procede a realizar la simulación funcional donde además de la lógica, también se verifican los tiempos de retardo en que actúan las diferentes señales. Si la simulación es correcta se procede al siguiente paso, si la simulación no entrega los resultados deseados debido a los retardos, se deben realizar modificaciones pertinentes, ya sea en la estructura del circuito o en el tipo de dispositivo seleccionado y proceder a realizar la síntesis y simulación funcional hasta que cumpla con lo deseado.

Una vez que la simulación funcional entrega los resultados correctos se procede a generar el mapa de fusibles del dispositivo, el cual define la interconectividad final del circuito que desea programar. Finalmente, con el mapa de fusibles y un programador lógico se procede a programar el circuito integrado y proceder a su aplicación.

Se debe tener en cuenta que cada fabricante de circuitos lógicos programables tiene sus propias herramientas para llevar a cabo a síntesis, ruteo y generación de mapa de fusibles, por lo que es importante conocer las herramientas para la correcta aplicación de los diseños de circuitos lógicos realizados. Así mismo cada familia de dispositivos tiene sus variantes en cuanto a recursos, es decir: cantidad de compuertas disponibles, velocidad de operación, número de terminales de entrada y/o salida. La selección del dispositivo específico donde se lleva a cabo la síntesis es muy importante para lograr una realización óptima en costo/desempeño. También se debe considerar que cada dispositivo requiere de un sistema que permita su programación que generalmente lo constituye un equipo especializado para programar circuitos. También se debe contar con este equipo y se debe asegurar que se programen los dispositivos que son mayormente utilizados en los diseños propios (Gutiérrez et al., 2008).

2.5 Termodinámica

La termodinámica es la rama de la física que estudia la relación entre la energía térmica y otras formas de energía. La ciencia de la transferencia de calor se ha desarrollado a partir de tres conceptos fundamentales o “leyes” de la termodinámica.

Ley cero de la termodinámica: si los objetos A y B están separados y en equilibrio térmico con un tercer objeto C, entonces A y B están en equilibrio térmico entre sí.

Como consecuencia de esta ley se puede afirmar que dos objetos en equilibrio térmico entre sí están a la misma temperatura y que si tienen temperaturas diferentes, no se encuentran en equilibrio térmico entre sí.

La primera ley de la termodinámica: (Principio de la conservación de la energía). Se sabe que la energía debe ser “conservada” o, exactamente “contabilizada”, el calor que fluye desde o hacia un objeto debe ir a alguna parte, no puede crearse o destruirse; la energía puede cambiar de una forma a otra. Por lo tanto, la suma de la energía total encontrada en un sistema cerrado es constante de acuerdo a la ecuación 2.

$$\text{Energía entrante} = \text{Energía saliente} + \text{Energía almacenada} \quad (2)$$

La segunda ley de la termodinámica: El flujo de calor siempre es unidireccional, más concretamente, el calor siempre fluye desde las áreas de mayor temperatura (mayor actividad molecular) a las áreas de menor temperatura (menor actividad molecular).

2.5.1 Calor

Cuando la energía térmica es transferida entre dos objetos como resultado de la estricta diferencia en temperaturas, el proceso es llamado calor. Calor no es la energía térmica total que cada cuerpo contiene, si no, la cantidad de energía que se transfiere de un cuerpo a un cierto nivel de energía a otro cuerpo con un nivel menor de energía o temperatura, este proceso de traslado de energía térmica entre dos objetos se llama calor.

El calor se puede describir como la energía vibracional cinética en tránsito. Es la cantidad de energía que fluye de un objeto o un área con alta temperatura a un objeto o área de menor temperatura. Un objeto no contiene calor, contiene energía térmica interna. Cuando un objeto se enfría, su energía interna térmica disminuye; cuando se calienta, (significa el proceso de agregar energía térmica a un objeto) su energía térmica interna está aumentando.

Cuando dos objetos a diferentes temperaturas están en contacto, el calor fluye del objeto más caliente al objeto más frío. Si los dos están en contacto por un período de tiempo, ellos eventualmente en algún lugar llegarán a un equilibrio común de temperaturas, entre las dos temperaturas iniciales. En este punto no puede fluir más calor. Cuando esto ocurre se dice que los dos objetos están en equilibrio térmico.

2.5.2 Temperatura

La temperatura se define como la medida del promedio de la energía cinética de las moléculas, es por lo que los dispositivos de medición de temperatura son relativos. La temperatura y la energía térmica interna están muy relacionadas, pero hay una importante distinción. La temperatura depende del promedio de la energía cinética por molécula o átomo mientras que el total de la energía térmica interna es la energía cinética total aleatoria de todos los átomos o moléculas (Delgadillo et al., 2013).

La temperatura es una magnitud a un sistema termodinámico y referido a la energía interna asociada a las partículas del sistema y su movimiento. Se mide en Kelvin (K) o en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (FENERCOM, 2011).

2.5.3 Transferencia de calor

El calor se define como energía térmica transfiriéndose o en tránsito de un lugar a otro debido a una diferencia de temperaturas. Las dinámicas de este proceso de transferencia componen el cuerpo del conocimiento llamado transferencia de calor. El fenómeno de transferencia de calor es tan simple como el movimiento de la energía calorífica de un objeto a otro. La energía térmica puede ser transferida de un cuerpo a otro por uno o todos los siguientes mecanismos:

1. Conducción.
2. Convección.
3. Radiación.

Aunque existen tres formas de transferencia de energía térmica, en la gran mayoría de los casos el calor será transferido como una combinación de dos o tres formas distintas, y rara vez este será transferido por una sola forma.

2.5.3.1 Conducción

La transferencia se representa a escala atómica como un intercambio de energía cinética entre partículas microscópicas (moléculas, átomos y electrones libres) en el que las partículas menos energéticas ganan energía en colisiones con partículas más energéticas (Figura 10) (Serway et al., 2008).

La transferencia de calor por conducción se asocia con el movimiento interno al azar de las moléculas dentro de un objeto, o dentro de dos objetos que se encuentran en contacto íntimo. Cuando se le transfiere calor a la superficie de un sólido, la energía térmica añadida causa que las moléculas internas del sólido vibren alrededor de su posición de equilibrio. Cuando una de estas moléculas vibra, esta interacción con la molécula vecina más cercana y hace que este vibre también, la

cual a su vez interactúa con su molécula vecina más cercana y la hace vibrar y así sucesivamente.

Las moléculas reciben energía térmica por este movimiento al azar a través de un choque molecular y transfieren esta energía a otras moléculas que estén en contacto con ellas. La conducción es la transferencia de calor a través de un material, o entre dos materiales que se encuentren en contacto íntimo siempre que exista una diferencia de temperaturas (Ver Figura 10).



Figura 10. Transferencia de calor por conducción (Delgadillo et al., 2013).

2.5.3.2 Convección

La convección es la transferencia de calor dentro de un fluido (líquido o gas), o entre un fluido y un sólido, siempre y cuando exista un gradiente de temperatura. Ya que la masa del fluido debe moverse, debe existir un mecanismo que cause este movimiento. Cuando un fluido o gas recibe energía térmica las moléculas de este gas o fluido se vuelven más calientes y se expanden. Sin embargo, cuando un sólido recibe energía térmica, sus moléculas permanecen en su misma posición. A diferencia de un sólido, las moléculas de un líquido o gas se mueven al recibir energía térmica ya que esta ocasiona que parte de la sustancia se vuelva menos densa que su ambiente. Cuando parte de un líquido o gas, se vuelve menos densa que los fluidos que la rodean, esta parte se esparce y sube; al mismo tiempo es reemplazada por una parte más densa y fría. La fuerza de gravedad producirá el movimiento necesario. Por lo tanto, la convección requiere la presencia de un fluido o un gas, una diferencia de densidades y una diferencia de temperaturas (Delgadillo et al., 2013).

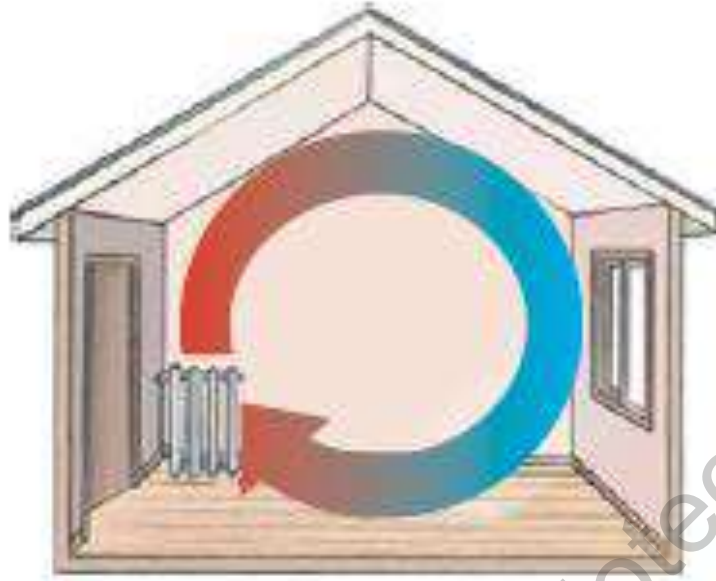


Figura 11. En una habitación calentada por un radiador se establecen corrientes de convección (Serway et al., 2008).

El mismo proceso se presenta cuando una habitación se calienta mediante un radiador. El radiador calienta el aire en las regiones más bajas de la habitación. El aire caliente se expande y eleva hasta el techo debido a su densidad más baja. El aire más frío y denso de arriba se hunde, y se establece el patrón continuo de corriente de aire que se muestra en la Figura 11 (Serway et al., 2008).

2.5.3.3 Radiación

La radiación es la transferencia de energía, a través de un gas o el vacío, de los objetos (sólidos o líquidos) que están a temperaturas superiores, hacia los objetos (sólidos o líquidos) a una temperatura inferior, esto a través de ondas electromagnéticas alternantes (Figura 12).

Hay muchas formas diferentes de radiación electromagnética. La transferencia de calor por radiación toma lugar primeramente en el área del espectro electromagnético conocido como la banda infrarroja. Al calentamiento de las moléculas en la superficie de un objeto, el movimiento vibracional cinético incrementa y estas dan más radiación infrarroja electromagnética. Cuando esta radiación choca contra otro objeto, esta energía es absorbida por este objeto. Si el segundo objeto está a una menor temperatura que el primer objeto, esta energía agregada causa que las moléculas del objeto más frío vibren más rápido, lo que hace que aumente la temperatura del objeto más frío (Delgadillo et al., 2013).



Figura 12. Transmisión de calor por radiación (Delgadillo et al., 2013).

Ley de Stefan Boltzmann: La rapidez a la que un objeto radia energía es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta como se representa en la ecuación 3.

$$P = \sigma A e T^4 \quad (3)$$

Donde P es la potencia en watts de las ondas electromagnéticas radiadas de la superficie del objeto, σ es una constante igual a $5.6696 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$, A es el área superficial del objeto en metros cuadrados, e es la **emisividad** y T es la temperatura superficial en kelvin. El valor de e puede variar entre cero y la unidad, depende de las propiedades de la superficie del objeto. La emisividad es igual a la **absortividad**, que es la fracción de la radiación entrante que absorbe la superficie. Un espejo tiene muy baja absortividad porque refleja casi toda la luz incidente. Por lo tanto, la superficie de un espejo también tiene una emisividad muy baja. En el otro extremo, una superficie negra tiene alta absortividad y alta emisividad. Un absorbedor ideal se define como un objeto que absorbe toda la energía incidente sobre él y, para tal objeto, $e = 1$. Un objeto para el que $e = 1$ con frecuencia se conoce como cuerpo negro (Serway et al., 2008).

2.6 Ondas electromagnéticas

Son ondas que tienen componentes eléctricos y magnéticos los cuales son generados por la oscilación de una carga eléctrica. Este tipo de ondas no requiere de medio material de propagación porque tienen la propiedad de viajar en el vacío a la velocidad de la luz (300000 km/s).

Las cargas eléctricas oscilantes generan ondas electromagnéticas. Las ondas radiadas por cargas oscilantes pueden detectarse a grandes distancias. Además, porque las ondas electromagnéticas transportan energía y cantidad de movimiento, pueden ejercer presión sobre una superficie (Serway et al., 2009).

2.6.1 Onda

Una onda es la propagación de una perturbación que transfiere energía progresivamente de un punto a otro a través de un medio y que puede tener la forma de deformación elástica, una variación de presión, intensidad magnética o eléctrica o de temperatura.

Los elementos que describen una onda son:

- a) Cresta: es el punto más alto de dicha amplitud o punto máximo de saturación de onda.
- b) Período: es el tiempo que tarda la onda en ir de un punto de máxima amplitud al siguiente.
- c) Amplitud: es la distancia vertical entre una cresta y el punto medio de la onda. Nótese que pueden existir ondas cuya amplitud sea variable, es decir, crezca o decrezca con el paso del tiempo.
- d) Frecuencia: número de veces que es repetida dicha vibración. En otras palabras, es una simple repetición de valores por un período determinado de tiempo.
- e) Valle: es el punto más bajo de una onda.
- f) Longitud de onda: distancia que hay entre dos crestas consecutivas de dicho tamaño (FENERCOM, 2011).

2.6.2 Espectro electromagnético.

Es un conjunto de ondas electromagnéticas clasificadas según su longitud y frecuencia (Olarte et al., 2011), recordando que todas las formas de los diversos tipos de radiación son producidas por el mismo fenómeno: cargas en aceleración (Ver Figura 13).

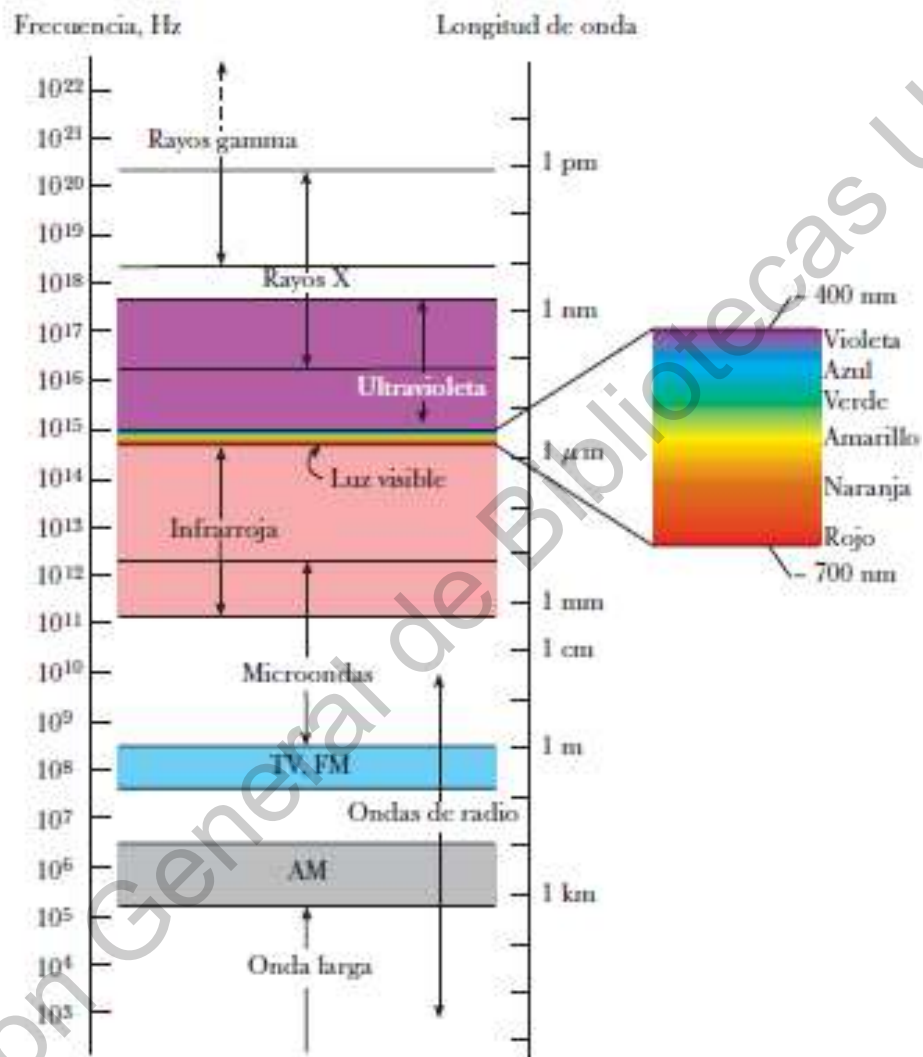


Figura 13. El espectro electromagnético (Serway et al., 2008).

2.6.2.1 Ondas de radio

Los intervalos de longitud de onda llegan más allá de 10^4 m a casi 0.1 m, son el resultado de cargas que se aceleran en alambres conductores. Estas ondas son generadas por dispositivos electrónicos, como osciladores LC , y se utilizan en los sistemas de radio y televisión.

2.6.2.2 Microondas

Tienen longitudes de onda clasificadas desde 0.3 m hasta 10^{-4} m y también son generadas por dispositivos electrónicos. Debido a sus longitudes de onda cortas, son muy adecuadas para sistemas de radar y para el estudio de las propiedades atómicas y moleculares de la materia. Los hornos de microondas son una aplicación doméstica interesante de estas ondas. Se ha sugerido que la energía solar podría aprovecharse enviando microondas a la Tierra desde un colector solar en el espacio.

2.6.2.3 Ondas infrarrojas

Tienen longitudes de onda clasificadas desde 10^{-3} hasta 7×10^{-7} m, longitud de onda más larga de la luz visible. Estas ondas, producidas por moléculas y objeto a la temperatura ambiente, son fácilmente absorbidas por la mayor parte de los materiales. La energía infrarroja (IR, *infrared*), absorbida por una sustancia, aparece como energía interna, ya que la energía agita los átomos del objeto, lo que incrementa su movimiento vibratorio o de traslación, y da como resultado un incremento en la temperatura. La radiación infrarroja tiene aplicaciones prácticas y científicas en muchas áreas, incluyendo la fisioterapia, la fotografía infrarroja y la espectroscopia vibratoria.

2.6.2.4 Luz visible

Es la forma más familiar de las ondas electromagnéticas, es aquella parte del espectro electromagnético que el ojo humano puede detectar. Se produce mediante la reorganización de los electrones en los átomos y moléculas. Sus diversas longitudes de onda, que corresponden a los diferentes colores, van desde el rojo ($\lambda = 4 \times 10^{-7}$ m) hasta el violeta ($\lambda = 7 \times 10^{-7}$ m). La sensibilidad del ojo humano es una función de la longitud de onda, siendo máxima a una longitud de onda de alrededor de 5.5×10^{-7} m.

2.6.2.5 Ondas ultravioleta

Las ondas ultravioleta cubren longitudes de onda que van desde aproximadamente 4×10^{-7} m hasta 6×10^{-10} m. El Sol es una fuente importante de luz ultravioleta (UV), la cual es la causa principal de las quemaduras de sol o eritema solar. Las lociones bloqueadoras son transparentes a la luz visible, pero absorben la mayor parte de la luz UV. Cuanto mayor sea el factor de protección solar del bloqueador, mayor será el porcentaje de luz UV absorbida. A los rayos ultravioleta se les atribuye en parte la formación de cataratas y nubosidad en el lente interno del ojo.

2.6.2.6 Rayos X

Tienen longitudes de onda que van de aproximadamente 10^{-8} m a 10^{-12} m. La fuente más común de rayos X es el frenado de electrones de alta energía que impactan un objetivo metálico. Los rayos X se utilizan como una herramienta de diagnóstico en la medicina y como tratamiento para ciertos tipos de cáncer. Porque los rayos X dañan o destruyen los tejidos y los organismos vivos, se debe tener cuidado para evitar una exposición o sobreexposición innecesaria. Los rayos X también se utilizan en el estudio de la estructura de los cristales ya que las longitudes de onda de los rayos X son comparables con las distancias de separación de los átomos en los sólidos (alrededor de 0.1 nm).

2.6.2.7 Rayos gamma

Son ondas electromagnéticas emitidas por núcleos radioactivos (como ^{60}Co y ^{137}Cs) y durante ciertas reacciones nucleares. Los rayos gamma de alta energía son un componente de los rayos cósmicos que entran en la atmósfera de la Tierra desde el espacio. Tienen longitudes de onda que van desde aproximadamente 10^{-10} m hasta menos de 10^{-14} m. Son rayos muy penetrantes y producen daños serios si son absorbidos por tejidos vivos. En consecuencia, quienes trabajan cerca de este tipo de radiación peligrosa, deben estar protegidos con materiales de gran absorción, como gruesas capas de plomo (Serway et al., 2009).

2.9 Termografía infrarroja

Las cámaras termográficas infrarrojas son ampliamente utilizadas en las plantas para encontrar articulaciones eléctricas y cables sobrecalentados, puntos calientes en calderas y tuberías de fluidos de proceso, y cientos de otras aplicaciones. Tales cámaras son sensibles a la porción infrarroja del espectro electromagnético. Como objetos calientes que emiten energía infrarroja en proporción a su temperatura, la temperatura normal de la superficie del aparato puede ser fácilmente evaluada, y se determina la ubicación de las áreas anormalmente calientes. Las cámaras de imagen térmica modernas contienen ordenadores para indicar directamente la temperatura de las superficies, así como para proporcionar la capacidad de comparar imágenes pasado con el presente de la imagen, lo que permite cambios en la imagen térmica para ser detectado fácilmente (Stone et al., 2014).

El sensor de la cámara termográfica es un detector de infrarrojos cuyos objetivos son para absorber la energía emitida por el objeto y la temperatura de la superficie a medir, y convertirlo en una señal. Basándose en la ley de Stefan-Boltzmann, se dice que cualquier objeto emite energía proporcional a la temperatura

de la superficie (Picazo, 2013), en realidad la energía detectada por el sensor de infrarrojos depende del coeficiente de emisividad de la superficie a medir, utilizando el concepto de ley de Planck (Holst, 2000).

La cámara termográfica infrarroja puede capturar una imagen del patrón térmico y puede ser utilizado en varios rangos de temperatura en función de la emisividad de la superficie. La imagen digital termográfica capturada por la cámara se llama un termograma. Cada píxel de un termograma tiene un valor específico de la temperatura, y el contraste de la imagen se deriva de las diferencias de temperatura de la superficie del objeto. Puede ocurrir en niveles de gris. La asignación de colores para cada grado de temperatura se basa en una paleta de colores con la que se pueden ver la temperatura del objeto. El análisis termográfico infrarrojo tiene la ventaja de ofrecer una señal bidimensional, a través del cual la segmentación es capaz de analizar un punto caliente específico o pequeñas zonas (Taib et al., 2012).

2.8 Adquisición y filtrado de imágenes termográficas

Las imágenes se obtienen de una cámara que detecta la radiación emitida por la máquina en el rango infrarrojo del espectro electromagnético, y la convierte en un mapa térmico que puede utilizarse para detectar modos de degradación de la máquina manifestados como aumentos de temperatura, por ejemplo los rodamientos, que por efecto de los desbalances inducidos para simular fallos, empiezan a deformarse y a presentar irregularidades en su superficie, produciendo incrementos en la fricción con las piezas en contacto con estos durante su operación y consecuentemente provocan aumentos de temperatura en partes de la máquina (Hashemian, 2011).

La Figura 14 se ilustra el proceso de adquisición de imágenes por TI y puede resumirse de la siguiente manera, primeramente, un contraste térmico es producido en la superficie de la muestra bajo inspección. En general, este contraste se produce tras el envío de un frente de calor, que es el enfoque comúnmente adoptado, señalando que la utilización de un frente frío es igualmente válida. Esto puede lograrse ya sea en régimen transitorio, con un impulso de energía o en régimen permanente, con el envío de ondas periódicas, dependiendo de la aplicación.

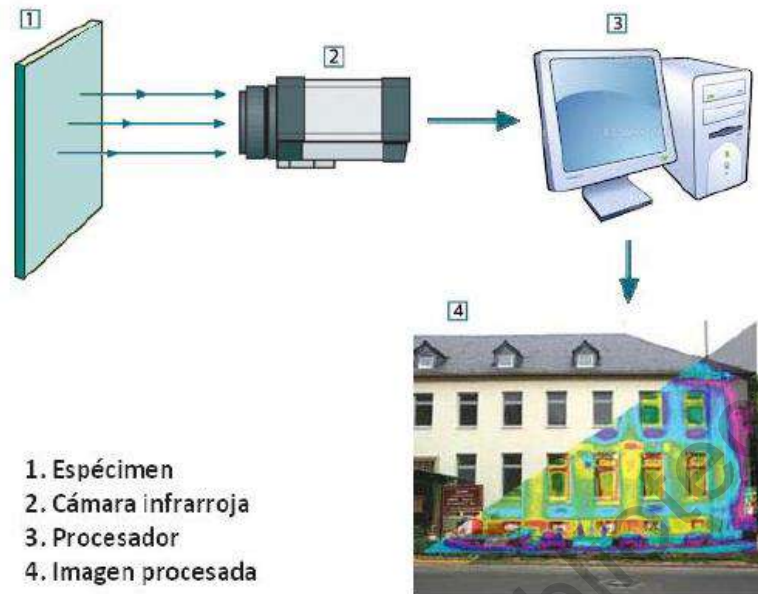


Figura 14. Sistema de adquisición de imágenes por Termografía Infrarroja (Ibarra et al., 2005).

De igual manera, la adquisición de imágenes puede realizarse en modo reflexión, mediante el reflejo ocasionado por el espécimen o en modo transmisión, atravesando el mismo. En general, el modo reflexión es utilizado para defectos internos relativamente cercanos a la superficie, mientras que el modo transmisión lo es para defectos profundos, siempre y cuando se tenga acceso a los dos lados del objeto. Una vez que el calor entra en contacto con la superficie del espécimen, la energía es transmitida por conducción a su interior.

El principio de detección de defectos se basa en el hecho de que el frente caliente se propaga homogéneamente a través del material, salvo en presencia de un cuerpo con propiedades térmicas diferentes lo que determina un defecto. Cuando el frente hace contacto con este cuerpo, se produce una atenuación o un incremento, dependiendo de las propiedades térmicas del material y del defecto en la conducción de calor, que tiene una relación directa con el tiempo de propagación del frente. Esto se refleja en la superficie de la muestra por un aumento o disminución de temperatura, que indica la presencia de un defecto y que puede ser detectado con la ayuda de una cámara infrarroja.

Existe un gran número de fuentes de degradación de la señal infrarroja, tales como ruido ligado al equipo de adquisición, ruido eléctrico, calentamiento no uniforme debido a imperfecciones de la fuente de energía, ruido térmico, diferencias de emisividad e irregularidades en la superficie de la pieza inspeccionada, deficiencia estructural, reflexiones provenientes de otros objetos y atenuación

atmosférica. De este modo, una vez que las imágenes han sido adquiridas diferentes técnicas de tratamiento pueden ser utilizadas para realzar el contraste, detectar la presencia de defectos y caracterizados (Ibarra et al., 2005).

2.9 Segmentación de imágenes termográficas

Al segmentar una imagen se separan regiones o contornos, denominados objetos, mediante la identificación de características comunes. Dado que la propiedad más simple que pueden compartir los píxeles en la región de una imagen es la intensidad, una forma natural de separar las regiones es a través de una umbralización o separación de regiones claras y oscuras (Morse, 2000).

De acuerdo con la ecuación 4, una umbralización constituye una versión simple de segmentación en la que obtiene una versión umbralizada $g(x, y)$ de una imagen $I(x, y)$ a partir de un umbral T dado por:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } I(x, y) \geq T \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (4)$$

Esta forma de umbralización se denomina *global*, y tiene como limitación que solo puede aplicarse a algunas imágenes, en las cuales la relación objeto-fondo de la imagen, es clara. En la mayoría de los casos, se implementan técnicas de umbralización multinivel, en las que problema de la selección de los umbrales para cuantificar una imagen se puede interpretar como el de encontrar un conjunto $T(l)$, ($l = 1, 2, \dots, L$) de valores de umbral, de modo que la imagen original $I(x, y)$ se transforme en una nueva con sólo J valores, es decir, si $T(l)$ son los valores de umbral para $T(1) \leq T(2) < \dots < T(L)$, entonces, la imagen de salida está dada por la ecuación 5:

$$g(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{si } I(x, y) \leq T(1) \\ 1, & \text{si } T(1) \leq I(x, y) \leq T(2) \\ \vdots & \\ \vdots & \\ L, & \text{si } I(x, y) \geq T(L) \end{cases} \quad (5)$$

Donde 0 y L representan los valores mínimo y máximo de la imagen, respectivamente (Papamarkos et al., 1994).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.

En este capítulo se describen los procedimientos que se llevaron a cabo para el desarrollo de este trabajo, aquí se incluyen el material y equipo utilizados, el principio de funcionamiento del equipo y algunas otras justificaciones teóricas necesarias.

La estructura general del trabajo se muestra en la Figura 15, esta consta de los módulos: generador de disturbios y análisis térmico.

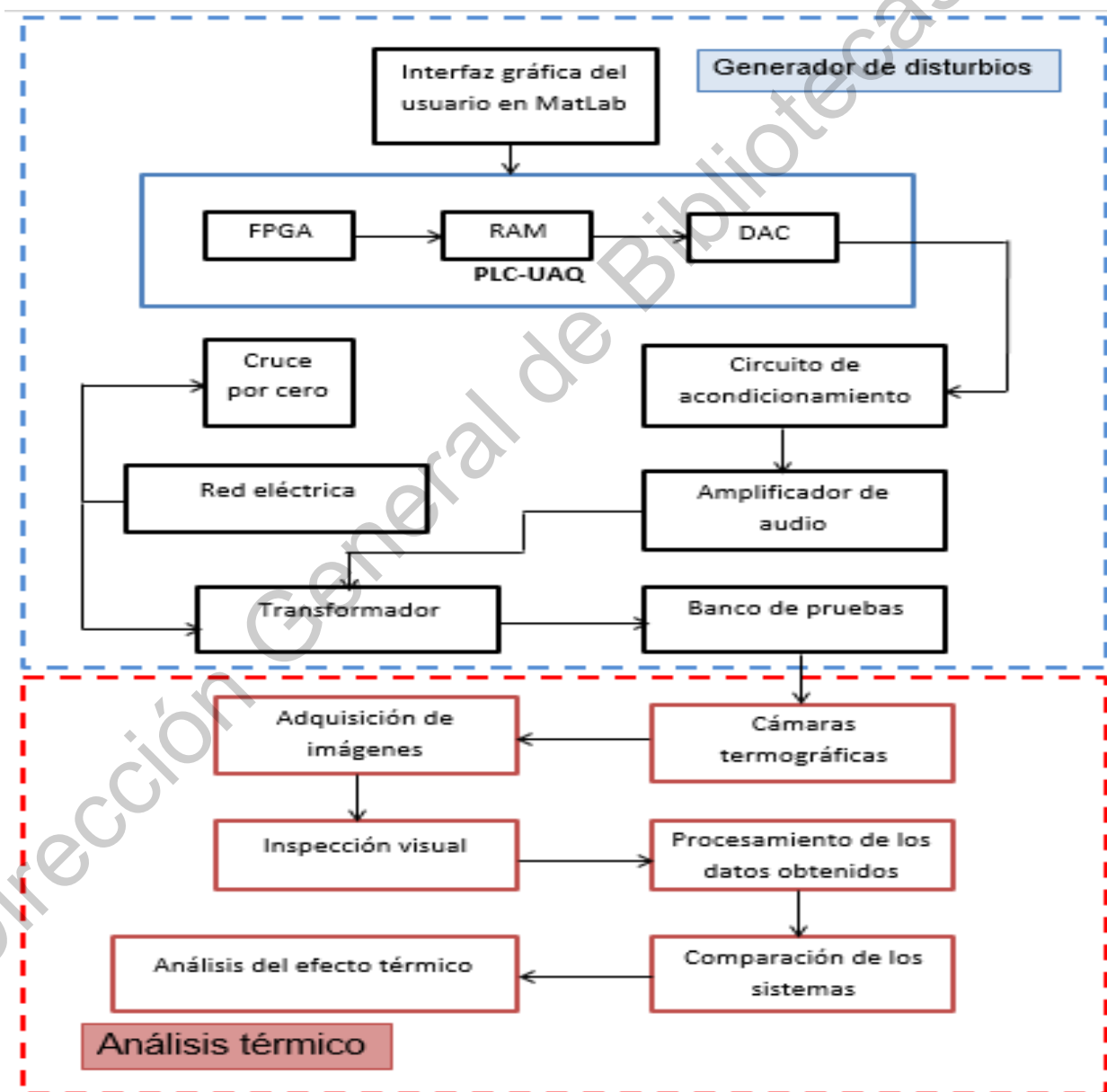


Figura 15. Diagrama de la metodología del sistema.

3.1 Generador de disturbios

En este módulo se generan las formas de onda y niveles de voltaje correspondientes a los disturbios eléctricos: SAG, SWELL, armónicos y fluctuaciones; dentro de este módulo se cuenta con una parte desarrollada en software y hardware.

3.1.1 Módulo software

La Figura 16 muestra la interfaz gráfica de usuario realizada en Matlab en el ambiente de simulación GUI, esta ventana se encarga de validar los parámetros de cada disturbio, generación y simulación de las formas de onda.

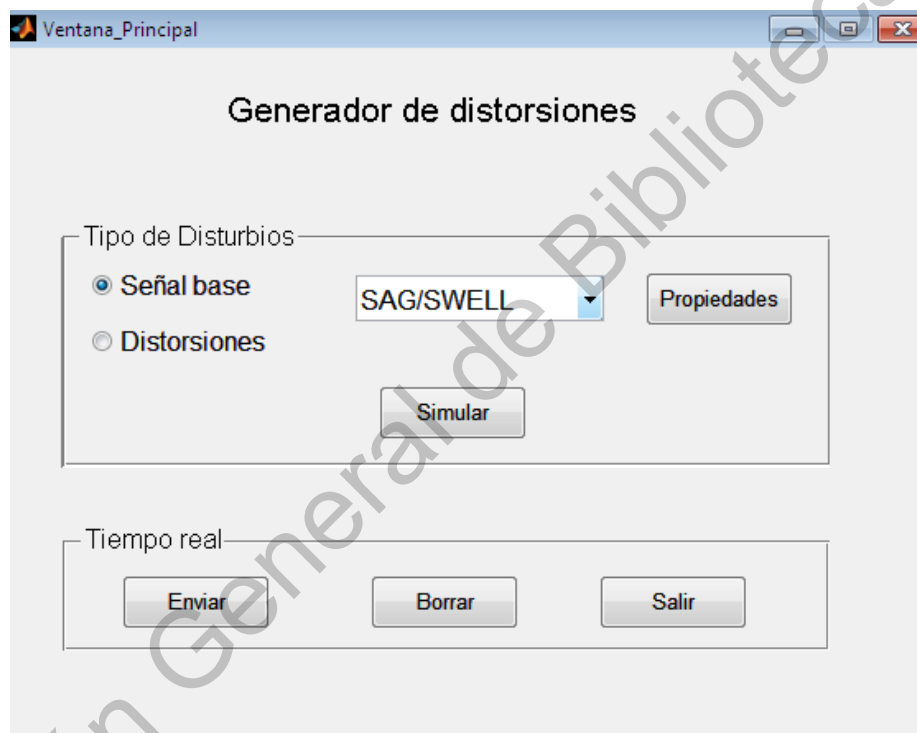


Figura 16. Interfaz gráfica de usuario.

Es importante validar que los valores de entrada no sobrepasen las capacidades del sistema y equipos, para ello las magnitudes de los parámetros de los disturbios deben ser cuidadosamente seleccionadas.

La generación de las formas de onda de los disturbios eléctricos bajo prueba se muestra en la ecuación 6, donde la frecuencia fundamental f_0 está dada y el término $F(t)$ es la forma de onda del disturbio que se muestra en la Tabla 2 donde:

$$v(t) = A_n \sin(2\pi f_0 t) + F(t) \quad (6)$$

A_n = Amplitud nominal

A_i = Amplitud del disturbio

f_0 = Frecuencia fundamental

f_i = Frecuencia del disturbio

t_1 = Tiempo de inicio

t_2 = Tiempo de fin

h = Número de armónico

ϕ_i = Fase del disturbio

ϕ_h = Fase del armónico

Tabla 2. Modelos matemáticos de los disturbios.

Disturbio	Modelo matemático
SAG	$v(t) = A_n \sin(2\pi f_0 t) - A_i [u(t - t_1) - u(t - t_2)] \cos(2\pi f_0 t)$
SWELL	$v(t) = A_n \sin(2\pi f_0 t) + A_i [u(t - t_1) - u(t - t_2)] \cos(2\pi f_0 t)$
Armónicos	$v(t) = A_n \sin(2\pi f_0 t) + \sum_{h=2}^H A_h \cos(2\pi h f_0 t - \phi_h)$
Fluctuaciones	$v(t) = A_n \sin(2\pi f_0 t) + 0.5 A_i \cos[2\pi(f_0 + f_i)t + \phi_i] + 0.5 A_i \cos[2\pi(f_0 - f_i)t + \phi_i]$

3.1.1.1 Señal base

La Figura 17 muestra la ventana de personalización de la forma de onda de una señal sintética base y su simulación, esta señal será sometida a los disturbios de estudio en este trabajo para validar cada uno de ellos.

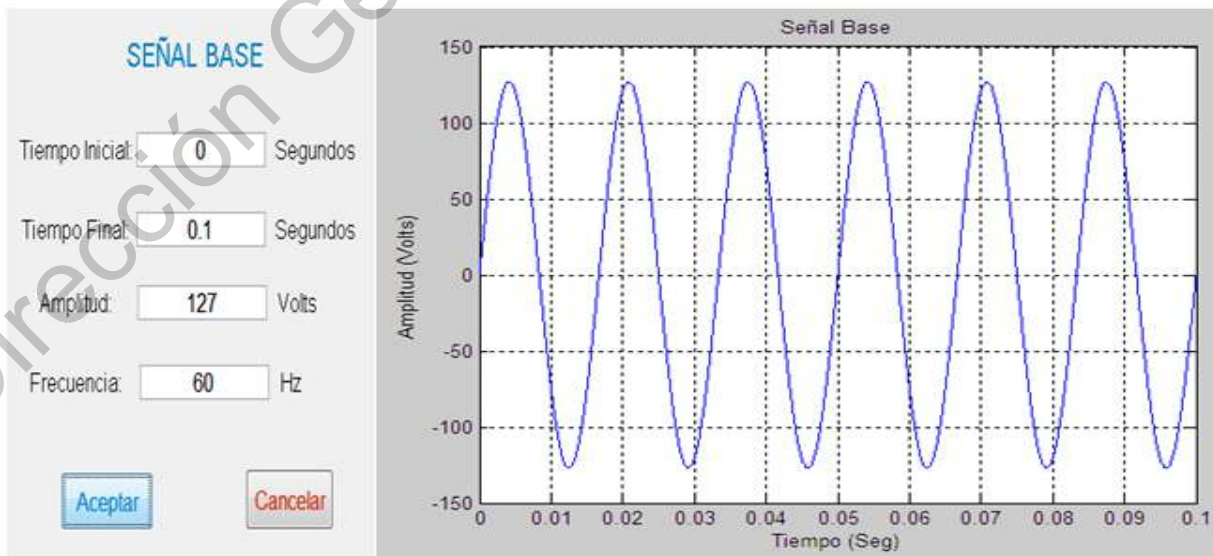


Figura 17. Ventana GUI y gráfica de la señal base.

3.1.1.2 SAG/SWELL

En las Figuras 18 y 19 se observa la ventana de configuración de los parámetros de los disturbios SAG/SWELL, y sus respectivas simulaciones. Los parámetros solicitados por la GUI corresponden a las variables representadas en el modelo matemático de los disturbios SAG y SWELL mostrados en la Tabla 2. Los parámetros solicitados son tiempo de inicio y final en segundos para fines de simulación, lo que entrega a su vez la duración del disturbio, amplitud en volts del disturbio y frecuencia que debe corresponder a la frecuencia fundamental del sistema con el que se trabaje a 50 o 60 Hz, para este caso de estudio corresponde a 60 Hz.

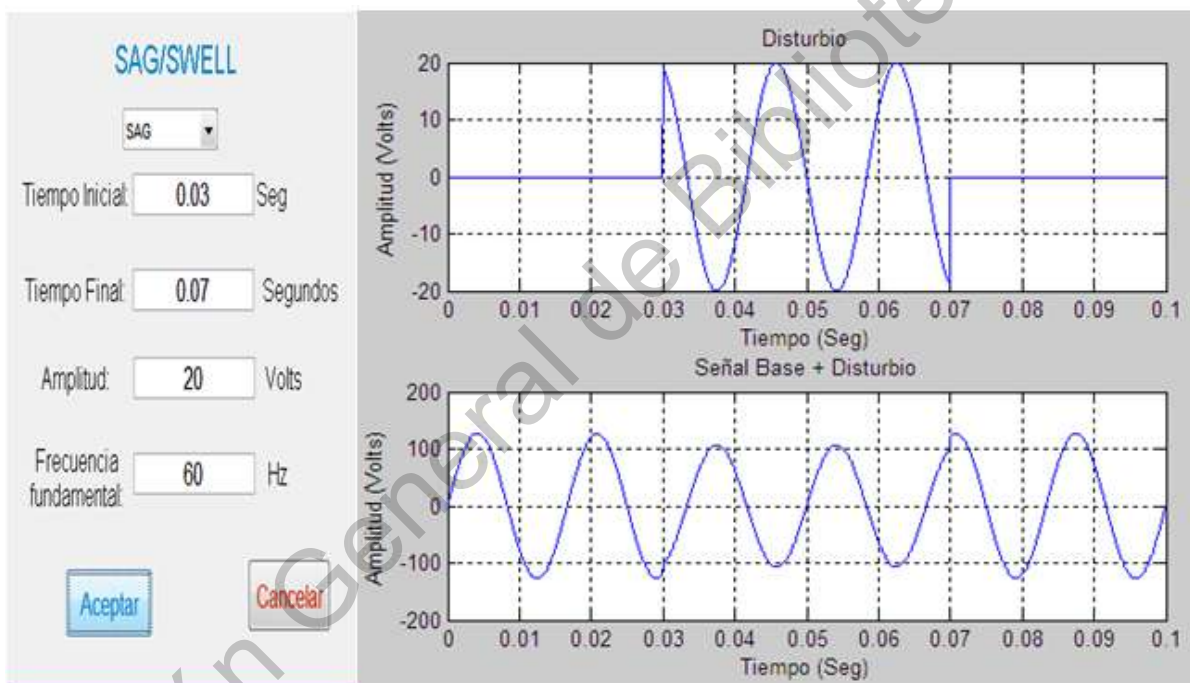


Figura 18. Ventana de personalización y simulación, SAG.

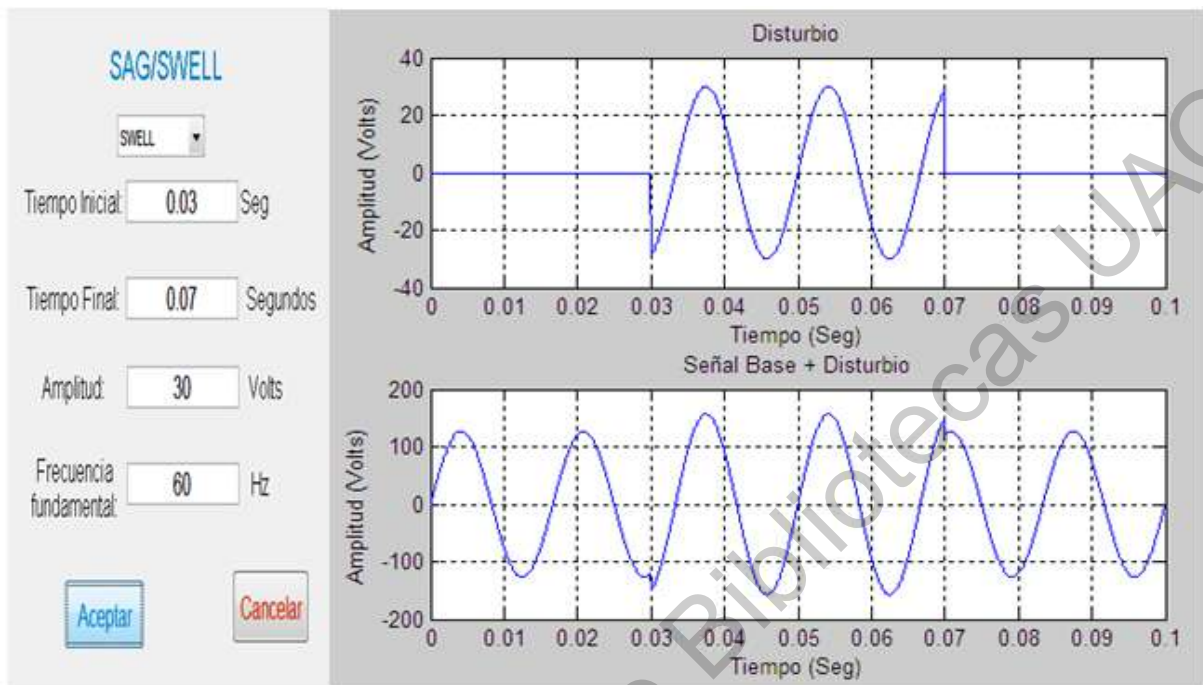


Figura 19. Ventana de personalización y simulación, SWELL.

3.1.1.3 Armónicos

En la Figura 20 se muestra la ventana para personalizar los parámetros de los armónicos y su simulación. Los parámetros solicitados por la GUI corresponden a las variables del modelo matemático de los armónicos mostrado en la Tabla 2. Entre los parámetros solicitados tenemos el tiempo de inicio y final en segundos para fines de simulación, de donde obtenemos la duración del disturbio, la amplitud del disturbio en volts, la frecuencia base de la señal en Hertz, el ángulo de fase en rad si la señal se va encontrar desfasada respecto a la señal base, y finalmente el tipo de armónico que deseamos generar.

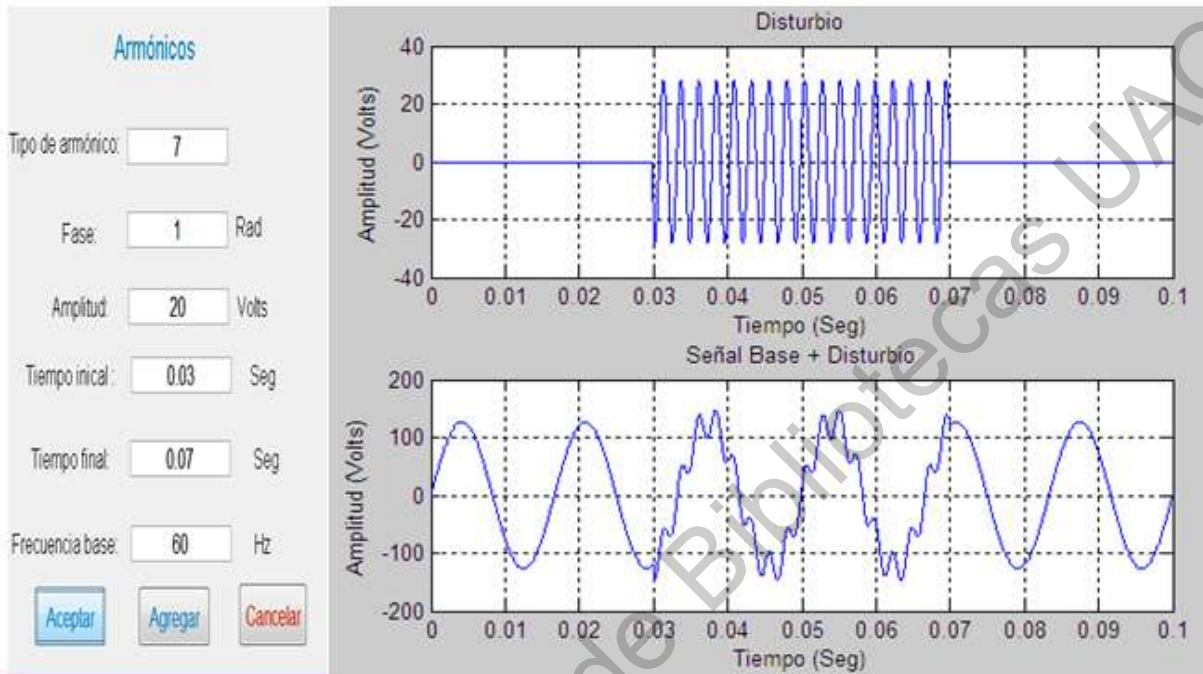


Figura 20. Ventana de personalización y simulación, armónicos.

3.1.1.4 Fluctuaciones

En la Figura 21 se observa la ventana para personalizar los parámetros de los armónicos y su simulación. Los parámetros solicitados por la GUI corresponden a las variables del modelo matemático correspondiente a las fluctuaciones de tensión mostradas en la Tabla 2. Dentro de los parámetros solicitados por la GUI tenemos la frecuencia fundamental del sistema en Hertz, la amplitud del disturbio en volts, la frecuencia de la señal correspondiente a las fluctuaciones en Hertz y el ángulo de fase en caso de que el disturbio se encuentre desfasado respecto a la señal fundamental.

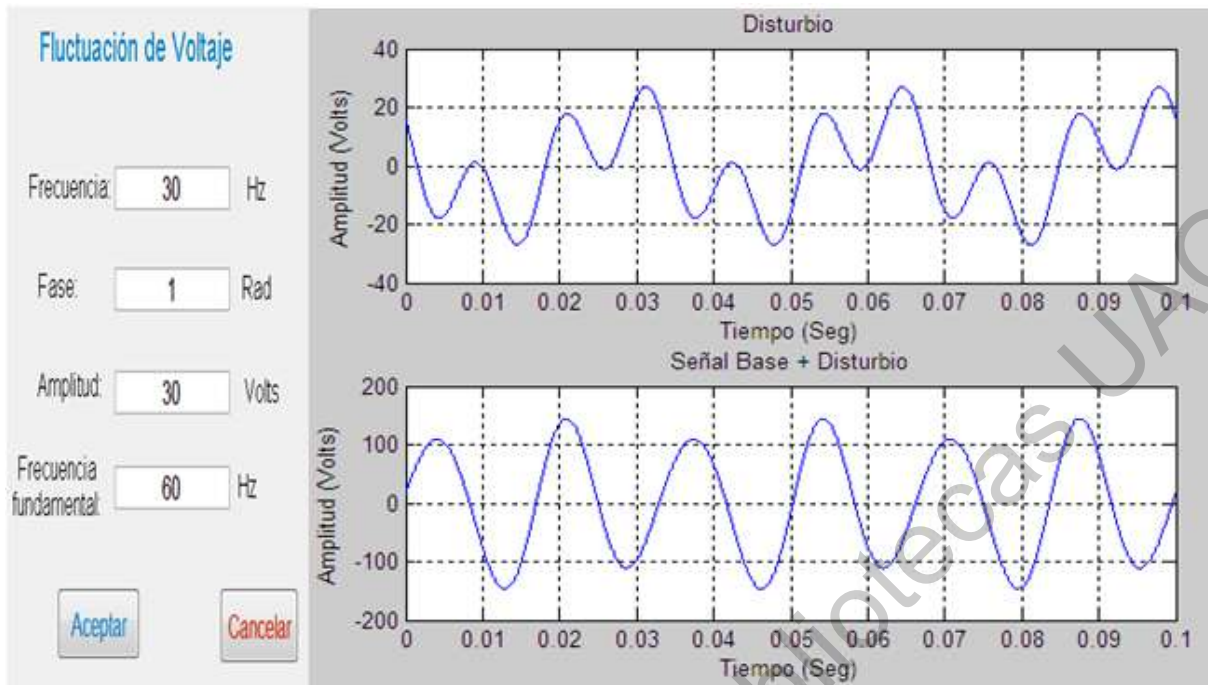


Figura 21. Ventana de personalización y simulación, fluctuaciones.

3.1.2 Módulo Hardware

Este módulo es el encargado de generar las señales analógicas de voltaje de los disturbios generados en el módulo software, se amplifican para tomar valores significativos en relación con la línea de alimentación y ser inyectados.

3.1.2.1 PLC-UAQ

Es un controlador PLC para maquinaria CNC o robots, el controlador está basado en un FPGA de bajo costo y alta capacidad, es propiedad intelectual del grupo de investigación HSP Digital de la Universidad Autónoma de Querétaro; el sistema se compone de dos parte: el módulo de procesamiento (MPU) y el módulo de aplicación (SIM); el sistema está diseñado para albergar múltiples periféricos digitales y también análogos de entradas y salidas, agregado a esto soporta comunicaciones adicionales mediante puerto serial RS232 o USB (Ver Figura 22). Dentro de sus especificaciones técnicas se encuentran:

- a) FPGA Spartan 3E de hasta 500,000 compuertas.
- b) Oscilador de 48 MHz.
- c) Memoria dinámica de 4 Mbyte.
- d) Memoria estática de 512 Kbyte.
- e) 8 entradas analógicas de ± 10 VDC.
- f) 8 salidas analógicas de ± 10 VDC.

- g) 16 salidas digitales TTL.
- h) 16 entradas digitales TTL.
- i) 1 puerto USB.

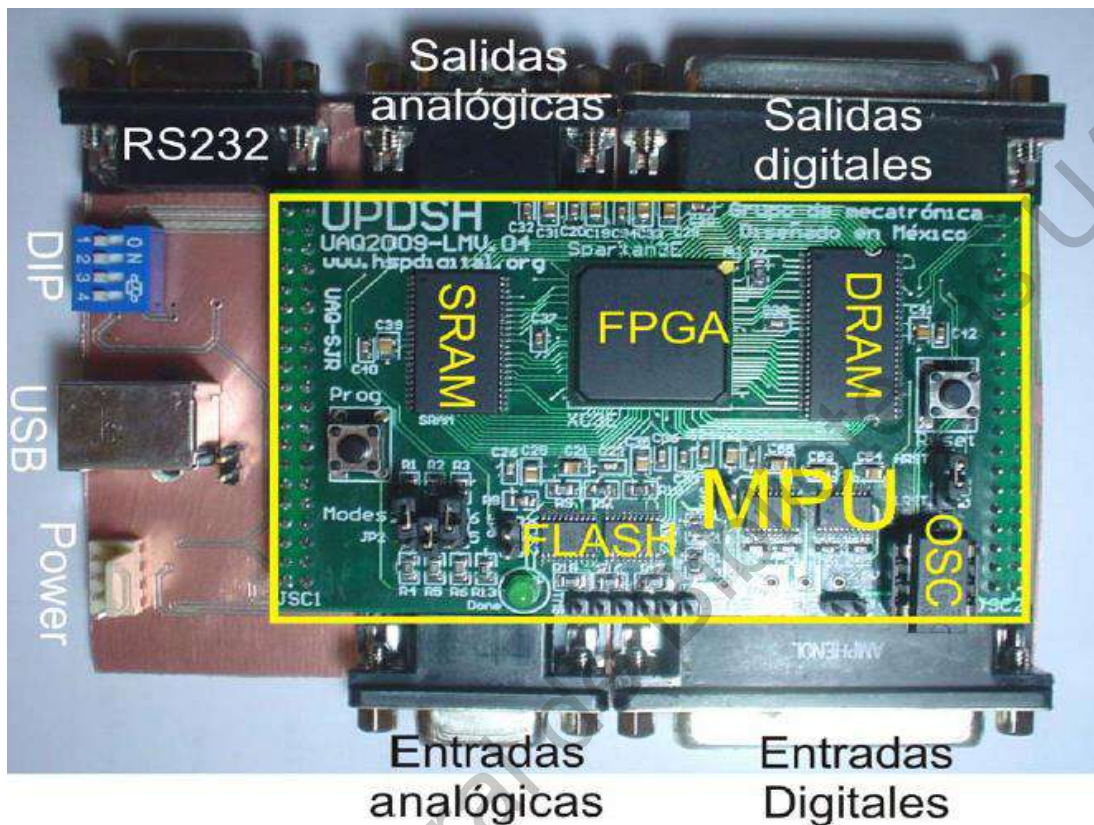


Figura 22. Tarjeta PLC-UAQ.

3.1.2.1.1 FPGA

El FPGA es un Spartan-3E de Xilinx de 1,600,000 compuertas; en éste se encuentran contenidas las descripciones en lenguaje HDL (Hardware Description Language, Lenguaje de Descripción de Hardware) necesarias para la comunicación USB, el sintetizador de señales, controlador DAC, sincronización, etc.

3.1.2.1.2 RAM

Es una memoria RAM estática ISSI 1S61LV55128AL, controlada por un módulo digital, permite almacenar los datos correspondientes a las formas de onda de los disturbios eléctricos generados por el software.

3.1.2.1.3 DAC

Es el chip DAC7565 de Texas Instruments, el cual tiene la función de convertir los datos digitales de 16 bits en señales analógicas de voltaje en rangos de amplitud ± 10 V.

3.1.2.2 Circuito de acondicionamiento

El circuito consta de un amplificador operacional TL084CN cuenta con cuatro amplificadores internos, el circuito mostrado en la Figura 23 permite acondicionar la señal analógica de salida de la tarjeta PLC-UAQ de ± 10 Vp a la entrada del amplificador de audio de ± 1.7 Vp, el circuito está conformado por dos amplificadores operacionales inversores y un amplificador operacional seguidor para el acoplamiento a tierra.

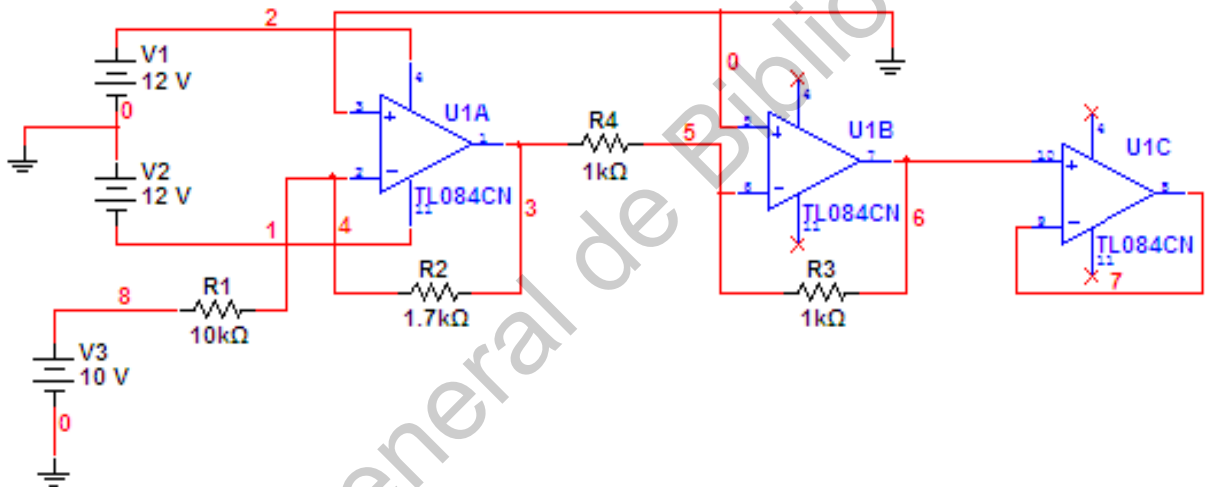


Figura 23. Acondicionamiento de señal.

3.1.2.3 Amplificador

Para lograr la etapa de inyección, las señales de salida generadas por la tarjeta se deben llevar a niveles significativos en relación con el valor de voltaje presente en la línea de alimentación. Esto se lleva a cabo mediante el amplificador de audio KAM-3465 (Ver Figura 24), cuenta con dos canales de la marca comercial MITZU® las especificaciones técnicas son:

- Alimentación: 100 – 120 Vca 60 Hz
- Frecuencia: 20Hz – 20kHz +0/-1 dB
- Potencia de salida: 650W RMS por canal



Figura 24. Amplificador de audio KAM-3465.

3.1.2.4 Transformador trifásico

Se trata de un transformador trifásico modelo SQ15T125H marca Square D, este transformador es en encargado del acoplamiento e inyección de las señales con el banco de pruebas trifásico, sus especificaciones técnicas son:

- Capacidad 15 kVA.
- Relaciones de transformación 440V/220-127V.
- Conexión delta en el primario y estrella en el secundario.

3.1.2.5 Detector cruce por cero

En la Figura 25 se muestra el circuito que se encarga de detectar el cruce por cero de la señal fundamental de la línea de alimentación a una fase, este circuito proporciona a la salida una forma de onda cuadrada donde sus niveles bajo y alto corresponden a los semiciclos negativo y positivo de la forma de onda fundamental, esta onda cuadrada nos permite acoplar la salida del DAC con la señal de fundamental de alimentación.

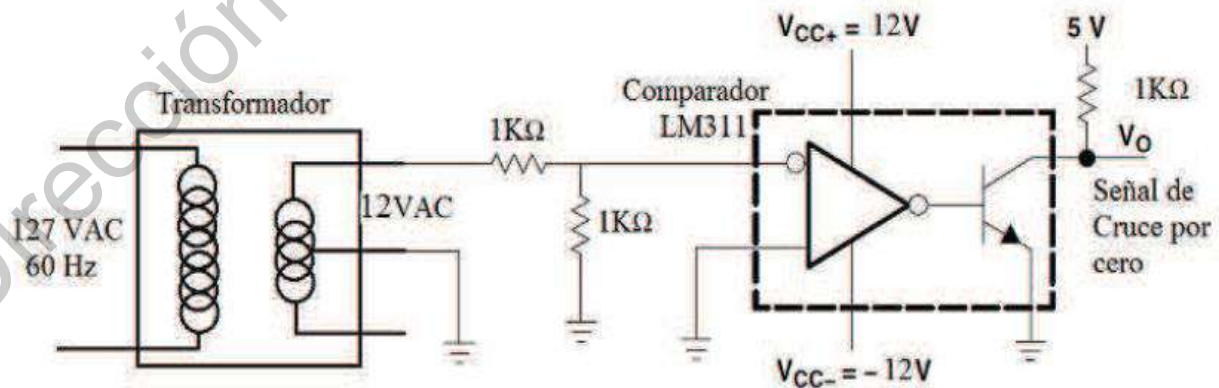


Figura 25. Circuito detector de cruce por cero.

3.1.3 Fuente de alimentación

Es la conexión de red del Laboratorio de Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro Campus San Juan del Río, esta red proporciona la señal de la frecuencia fundamental de 60 Hz en 3 fases, estos valores son los requeridos para alimentar el motor de inducción conectado al banco de pruebas, cabe mencionar que en la línea puede haber presencia de distorsiones.

3.1.4 Banco de pruebas

Es el motor de inducción trifásico que actúa como la carga para la experimentación, el cual recibe las señales de la línea de alimentación contaminada con los disturbios generados por el sistema.

3.2 Análisis térmico

Este módulo se encarga de realizar el análisis termográfico del objeto de estudio en este caso un motor eléctrico de inducción, al inducirle contaminación en la red eléctrica fundamental.

3.2.1 Cámara termográfica

En la parte de medición de temperatura se utilizará la cámara de visión termográfica FLIR A320 por sus prestaciones de alta precisión en la toma de lecturas, amplio rango de trabajo, fácil instalación y uso. Entre sus características principales podemos mencionar:

- a) Intervalo de temperatura de trabajo de $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- b) Campo visual / distancia focal mínima de $25'' \times 18.8'' / 0.4\text{ m}$.
- c) Sensibilidad térmica de $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+30\text{ }^{\circ}\text{C} / 50\text{ mK}$.
- d) Resolución IR de 320×240 pixeles.
- e) Precisión de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ o $\pm 2\%$ por lectura.
- f) Transmisión de video vía Ethernet MPEG-4 o M-JPEG.



Figura 26. Cámara termográfica FLIR A320.

También se utilizará una cámara termográfica de bajo costo PiNoIR que se conecta con la tarjeta Raspberry, entre sus características principales tiene las siguientes:

- Resolución 80x60 pixeles.
- Temperatura de operación $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $70\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Imagen estable $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Rangos de detección de temperatura $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $350\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 27. Camara termografica PiNoIR.

Por último, para validar los resultados obtenidos por ambas cámaras termográficas se cuenta con RTD's PT100. Que consiste en un alambre de platino que a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ tiene 100 ohms y que al aumentar la temperatura aumenta la resistencia eléctrica, los RTD's tienen la ventaja que son sensores lineales y miden rangos de temperatura de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figura 28. RTD PT100.

3.2.2 Adquisición de imágenes

Esta etapa consta en configurar las cámaras termográficas para que sean capaces de capturar de forma automática las imágenes termográficas, los parámetros de importancia y que se tiene que actualizar en la cámara FLIR A310 son:

- Temperatura ambiente
- Porcentaje de humedad relativa
- Emisividad
- Distancia al objeto no menor a 1 m

3.2.3 Inspección visual

Esta etapa es para validar que la captura de imágenes se realizó correctamente y detectar los cambios de temperatura en la carga al ser sometida a disturbios eléctricos.

CAPÍTULO 4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En esta sección se presentan los diferentes casos de estudio mostrados en la Tabla 2 que se consideraron para el análisis térmico de un motor eléctrico de inducción al ser sometido a los disturbios eléctricos correspondientes al análisis, así como los resultados obtenidos al implementar el sistema.

4.1 Implementación del sistema generador de disturbios

Para realizar la experimentación se realizó la configuración mostrada en la Figura 29, tomando como carga de prueba un motor trifásico marca Weg modelo 00136APE48T de 1 hp de potencia, el disturbio será inyectado en una de las tres fases de la alimentación del motor. La etapa de generación de disturbios se validó monitoreando las tres fases del sistema trifásico con un analizador de calidad de la energía marca FLUKE.

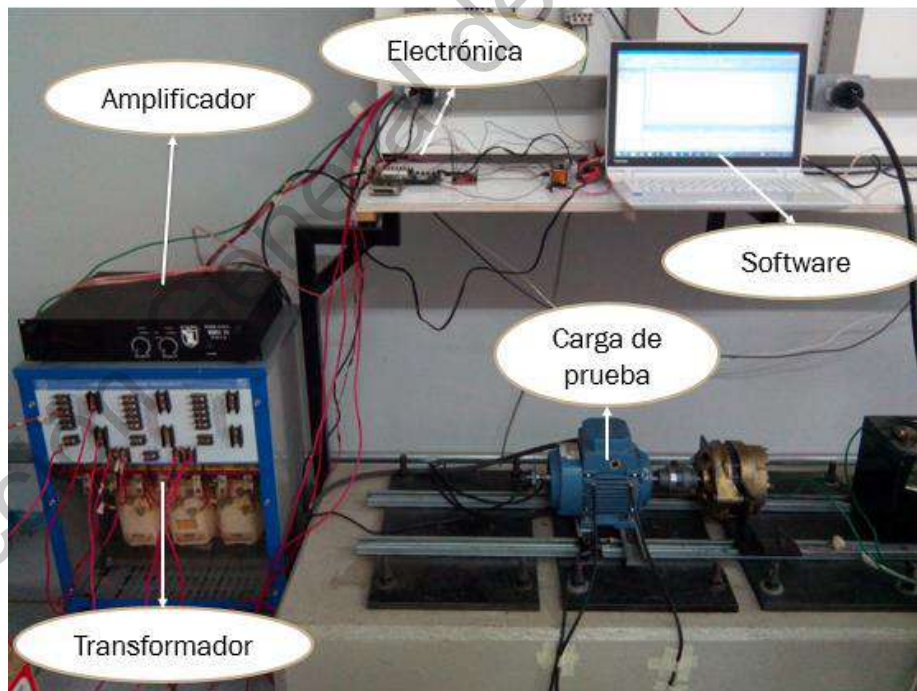


Figura 29. Generador de disturbios eléctricos.

4.2 Implementación del sistema de análisis térmico

Para realizar el análisis térmico se colocaron las cámaras termográficas a la distancia correspondiente, se colocaron marcas a la distancia pertinente para evitar errores de medición. En la Figura 30 se muestra la implementación del sistema termográfico que consta de los sensores RTDs montados en el armazón del motor, la cámara PiNoIR y FLIR A310.



Figura 30. Sistema termográfico.

4.3 Casos de estudio

A continuación, se presentan en la Tabla 3 los diferentes casos de estudio propuestos, que se tomaron para realizar el análisis térmico del motor de inducción; el sistema es capaz de generar una señal con una amplitud máxima de 5.7 Vp, por lo que se toma como valor de análisis en la mayor parte de los casos de estudio.

Tabla 3. Matriz de pruebas de disturbios SAG, SWELL, armónicos y fluctuaciones.

SAG		
Caso	Tiempo (minutos)	Amplitud (Vp)
1	60	5.7

SWELL		
Caso	Tiempo (minutos)	Amplitud (Vp)
1	60	5.7

Armónicos			
Caso	Tipo de Armónico	Tiempo (minutos)	Amplitud (Vp)
1	3	15	4.5
2	5	30	5
3	4, 7, 11	60	5.7

Fluctuaciones			
Caso	Tiempo (minutos)	Amplitud (Vp)	Frecuencia (Hz)
1	60	5.7	15

Los resultados obtenidos en los diferentes casos de estudio se muestran a continuación en la diferentes Figuras y Gráficas. Cada imagen muestra cuatro cuadros con progreso del incremento de temperatura hasta llegar a los 90 minutos, tiempo en el cual se alcanza la estabilidad térmica del motor al ser operado desde una temperatura. En ese instante se induce el disturbio, al finalizar el tiempo de inyección se enfría el motor y para cada caso de estudio se realizaron tres mediciones para validar los resultados y repetividad.

Dentro de los casos de estudio correspondiente a los armónicos se selecciona y se inducen 3rd y 5th armónico individual debido a que son los que generan una mayor distorsión armónica en la forma de onda, y un combinado de 4th, 7th y 11th armónicos de secuencia positiva y negativa para completar nuestro estudio. Los armónicos seleccionados son los más comunes generados por las cargas no lineales tales como variadores de frecuencia, iluminación electrónica, impresoras láser, hornos de microondas, etc.

4.4 Resultados

En esta sección se reportan los resultados obtenidos de la implementación del sistema y los diferentes casos de estudio presentados, en algunos casos se varía la paleta de colores de la imagen térmica para fines de apreciación. Para obtener los gráficos de temperatura de las imágenes obtenidas con la cámara termográfica de bajo costo PiNoIR, se aplicó segmentación manual para separar el área de interés correspondiente únicamente al motor de inducción.

4.4.1 SAG

En las Figuras 31 y 32 se observa el proceso térmico de un motor de inducción desde un tiempo cero en el cual es puesto en marcha, en el minuto 90, tiempo en el cual llega a su estabilidad térmica, y comienza a inducirse el disturbio SAG de acuerdo con los parámetros de la Tabla 3, y el minuto 150, tiempo correspondiente al término de la inyección del disturbio. Al comparar las Figuras 31 y 32, se puede determinar que visualmente la cámara FLIR entrega una mejor resolución de imagen y ayuda visual en el caso de estudio correspondiente al disturbio SAG. La Figura 31 muestra un incremento de temperatura exponencial en el motor de inducción, observando la ayuda visual de los spots obtenemos que en el spot 1 correspondiente al lado libre del motor tiene un incremento de temperatura de 0.5 °C, spot 2 correspondiente al lado carga del motor presenta un incremento de temperatura 0.6 °C y el spot 3 correspondiente al rodamiento del motor muestra un incremento de temperatura de 0.5 °C.

Los decrementos de tensión incrementan el deslizamiento y por ende disminuye la velocidad, estos decrementos de tensión ocasionan que la corriente total sea mayor estos efectos se ven reflejados en incrementos de perdidas principalmente por efecto Joule en el estator como se observa en los resultados obtenidos con la cámara termográfica. Los cuales deben tomarse a consideración ya que un decremento de mayor amplitud puede ocasionar fallas por el deterioro del aislamiento o paros inesperados de equipos.

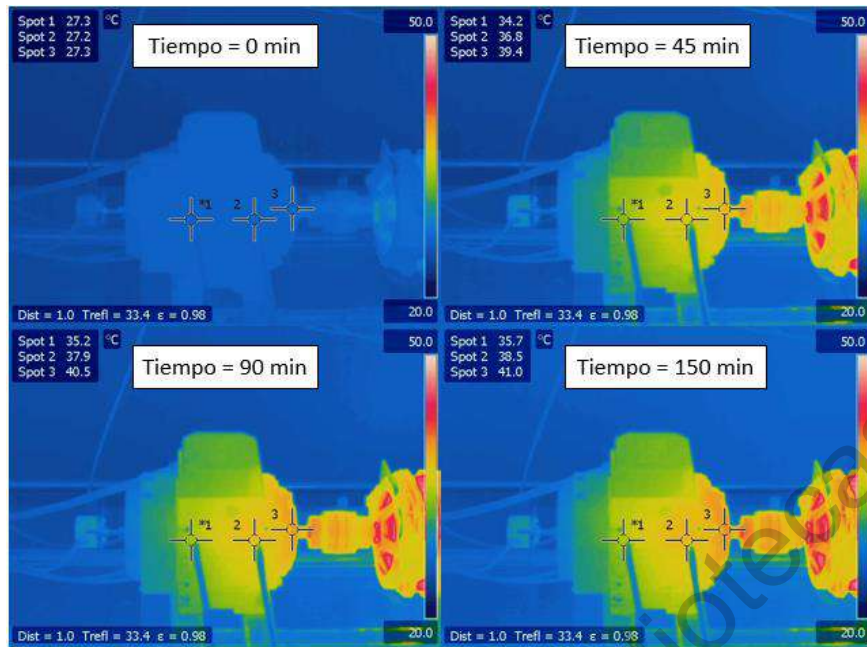


Figura 31. Imágenes térmicas FLIR, disturbio SAG.

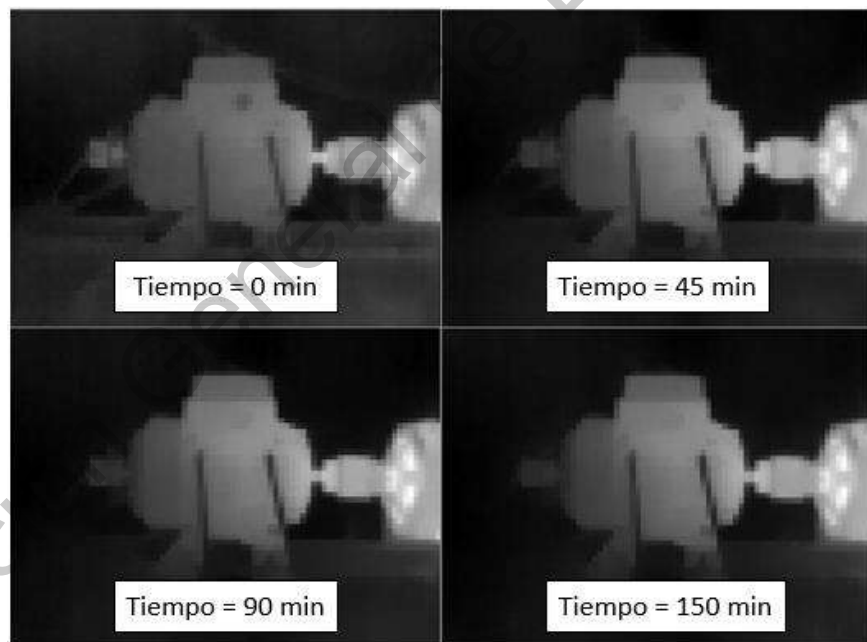


Figura 32. Imágenes térmicas PiNoIR, disturbio SAG.

Los gráficos mostrados en las Figuras 33 y 34, muestran los datos obtenidos por la cámara FLIR y los RTD's quienes muestran el incremento de temperatura al inducir el disturbio SAG, después de transcurrir los 90 minutos se observa que el motor alcanza su estabilidad térmica e inducimos el disturbio eléctrico, al presentarse el disturbio la temperatura del motor crece gradualmente hasta finalizar la inyección. El gráfico de la Figura 36 se obtiene al aplicar segmentación manual en las imágenes termográficas obtenidas por la cámara PiNoIR, el cual muestra la temperatura promedio del área seleccionada correspondiente al motor de inducción como se muestra en la Figura 35.

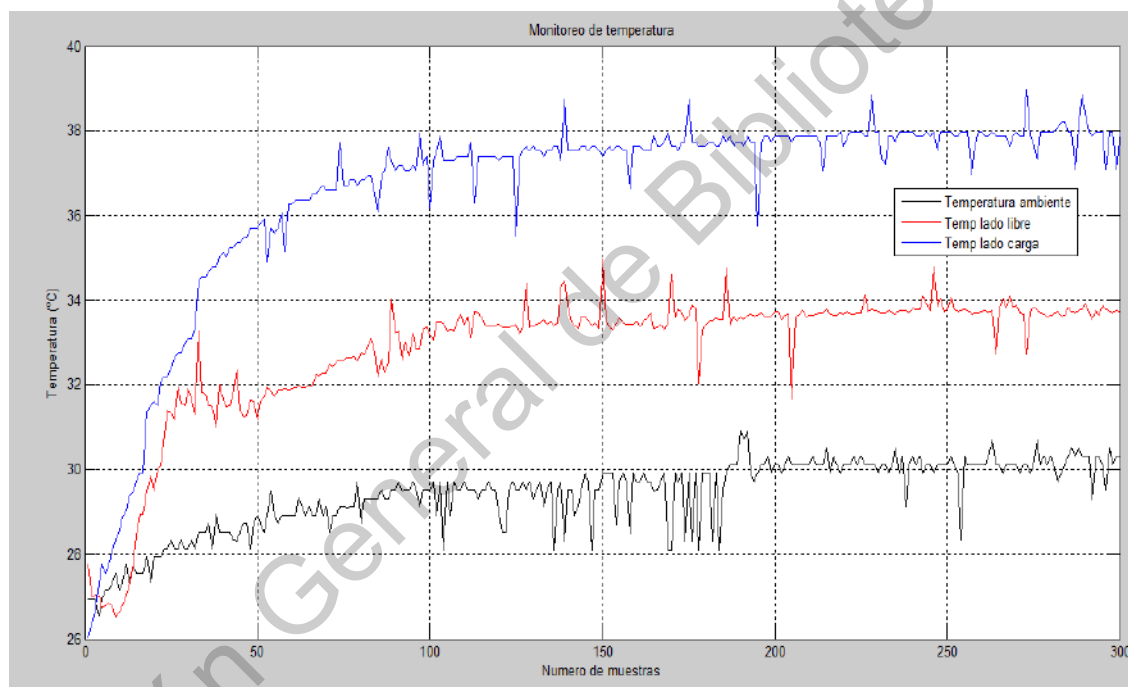


Figura 33. Gráfica sensores RTDs, disturbio SAG.

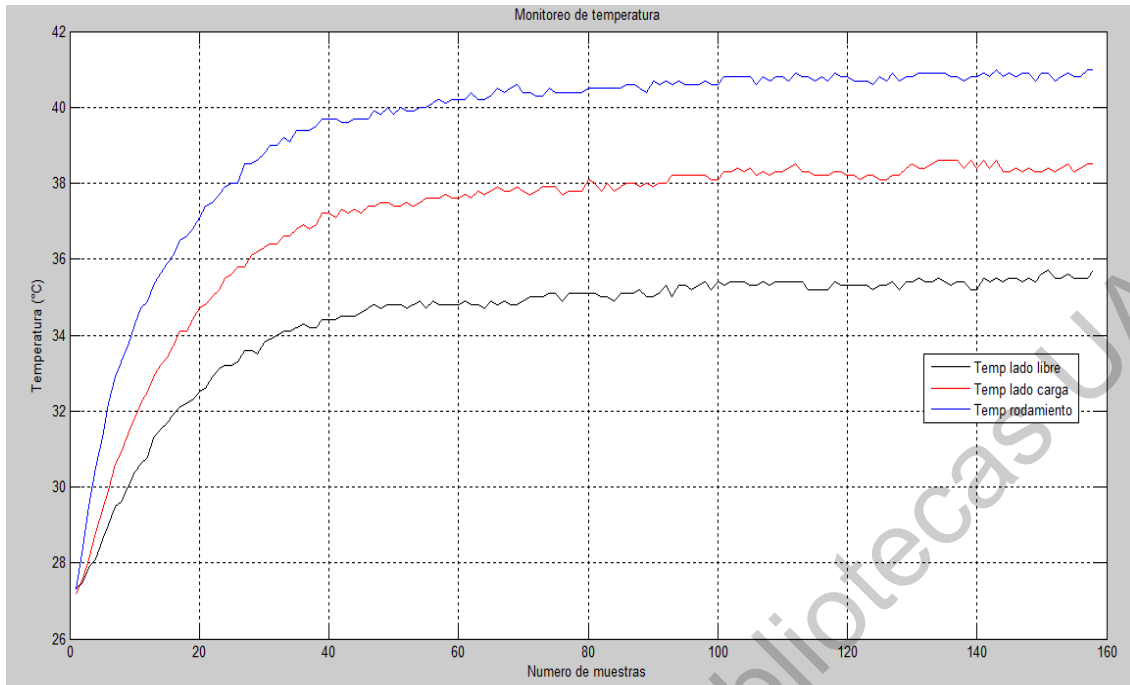


Figura 34. Gráfica slots imágenes térmicas FLIR, disturbio SAG.

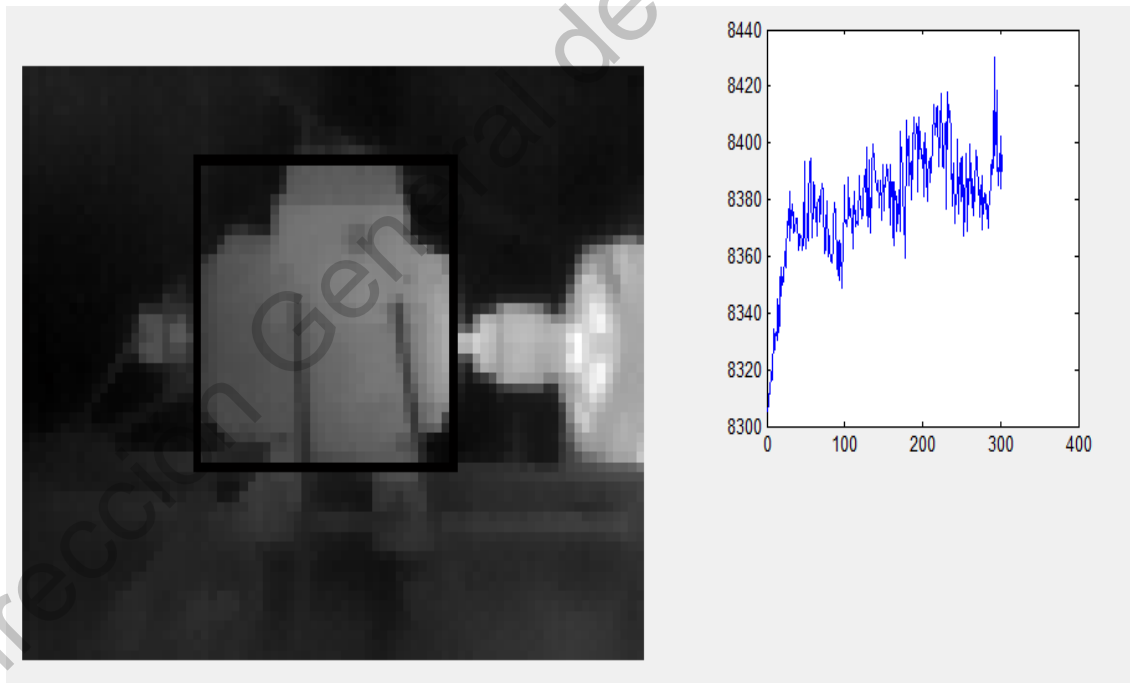


Figura 35. Segmentación imágenes térmicas PiNoIR, disturbio SAG.

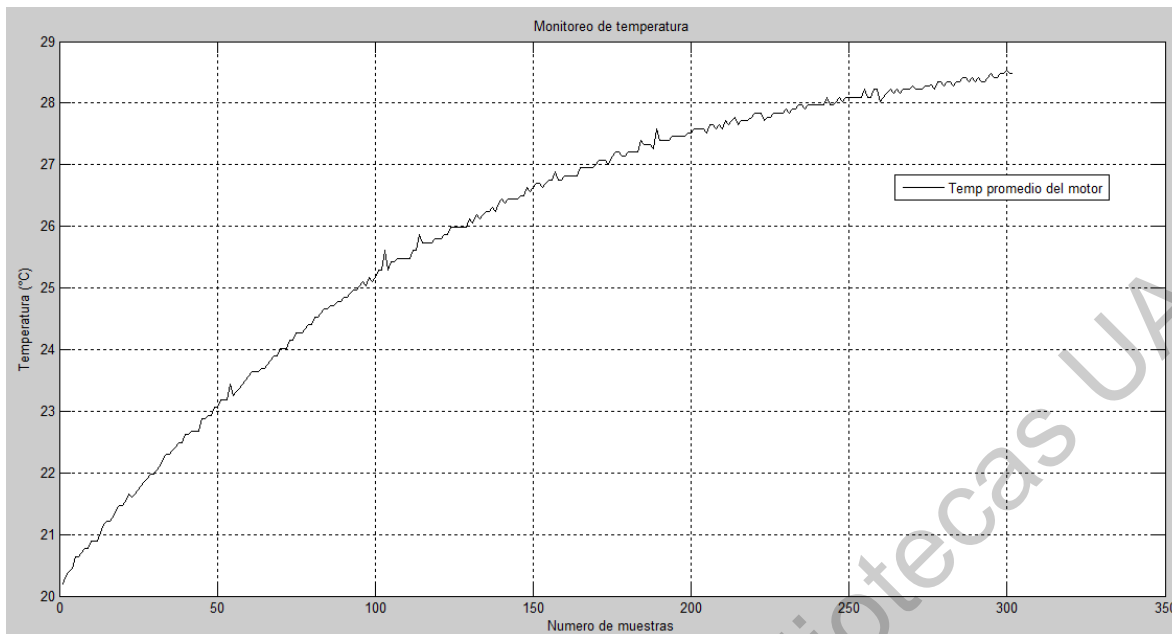


Figura 36. Gráfica temperatura promedio de imágenes térmicas PINoIR, disturbio SAG.

4.4.2 SWELL

En las Figuras 37 y 38 se observa el proceso térmico de un motor de inducción desde un tiempo cero en el cual es puesto en marcha, para este caso en específico el motor se puso en marcha después de haber sido operado e inducido el caso correspondiente al disturbio SAG, minuto 30 tiempo en el cual llega a su estabilidad térmica y comienza a inducirse el disturbio SWELL de acuerdo a los parámetros de la Tabla 3, y el minuto 90 tiempo correspondiente al término de la inyección del disturbio. Al comparar las Figuras 37 y 38, se puede determinar que visualmente la cámara FLIR entrega una mejor resolución de imagen y ayuda visual en el caso de estudio correspondiente al disturbio SWELL. La Figura 37 muestra un incremento de temperatura exponencial en el motor de inducción, observando la ayuda visual de los spots se obtiene que en el spot 1 correspondiente al lado libre del motor tiene un incremento de temperatura de 1°C, spot 2 correspondiente al lado carga del motor presenta un incremento de temperatura 0.8 °C y el spot 3 correspondiente al rodamiento del motor muestra un incremento de temperatura de 2.2 °C.

Los incrementos de tensión por lo contrario disminuyen el deslizamiento por ende incrementa la velocidad, el aumento de tensión origina que la corriente sea más baja. Al observar los resultados obtenidos por la cámara termográfica el incremento de velocidad da origen a un incremento de temperatura considerable en rodamientos y las pérdidas eléctricas por consumo de potencia reactiva incrementan la temperatura del devanado. Estos efectos pueden ocasionar fallas en los motores

eléctricos como daños en rodamientos e incluso fallas eléctricas por daño en el aislamiento.

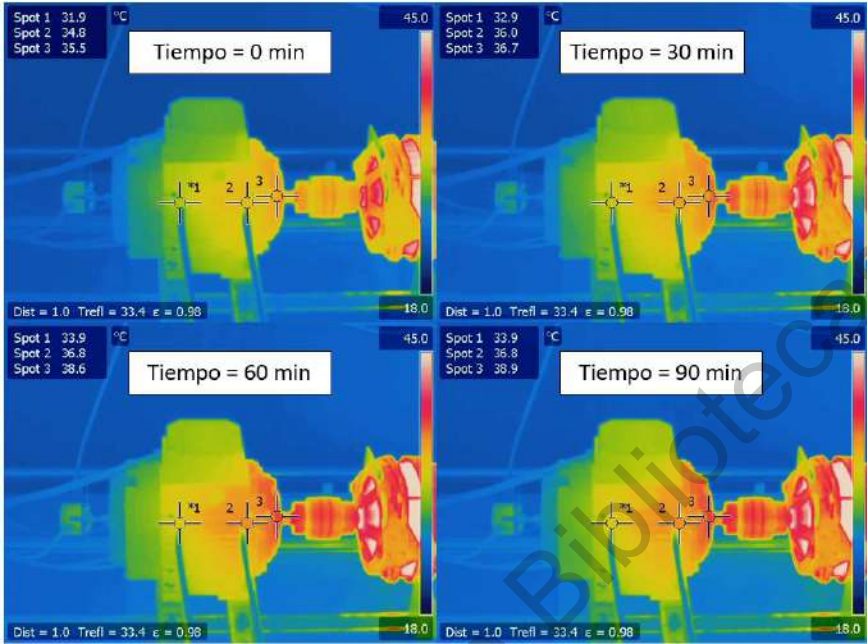


Figura 37. Imágenes térmicas FLIR, disturbio SWELL.

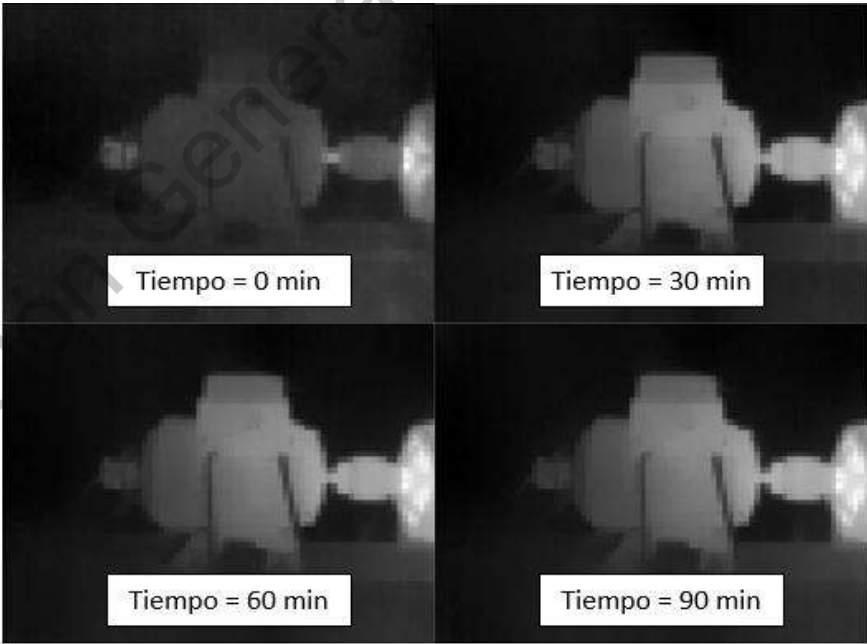


Figura 38. Imágenes térmicas PiNoIR, disturbio SWELL.

Los gráficos mostrados en las Figuras 39 y 40, muestran los datos obtenidos por la cámara FLIR y los RTD's quienes muestran el incremento de temperatura al inducir el disturbio SWELL, después de transcurrir 30 minutos se observa que el motor alcanza su estabilidad térmica e inducimos el disturbio eléctrico, al presentarse el disturbio la temperatura del motor crece gradualmente hasta finalizar la inyección. El gráfico de la Figura 42 se obtiene al aplicar segmentación manual en las imágenes termográficas obtenidas por la cámara PiNoIR, el cual muestra la temperatura promedio del área seleccionada correspondiente al motor de inducción como se muestra en la Figura 41.

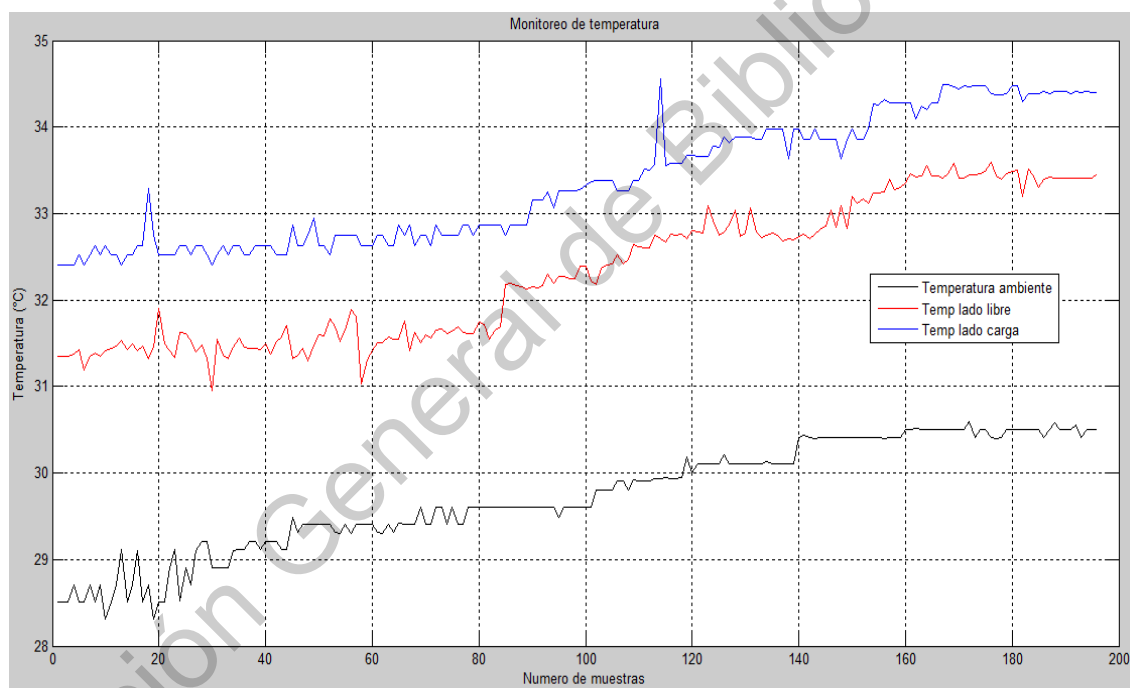


Figura 39. Gráfica sensores RTDs, disturbio SWELL.

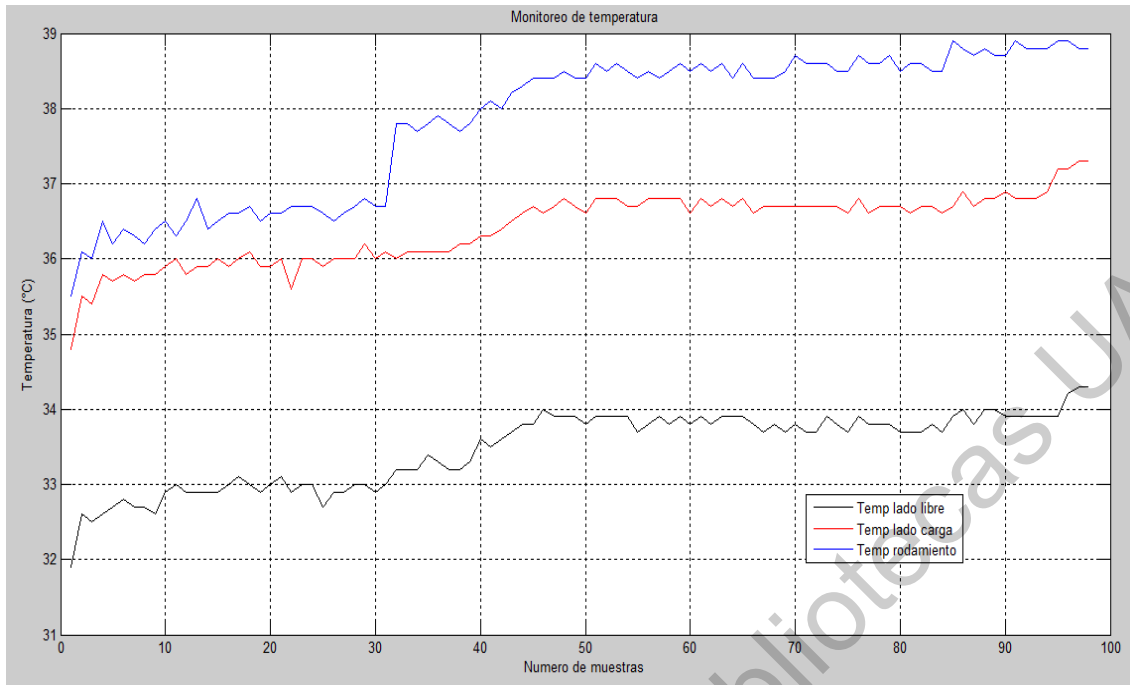


Figura 40. Gráfica slots imágenes térmicas FLIR, disturbio SWELL.

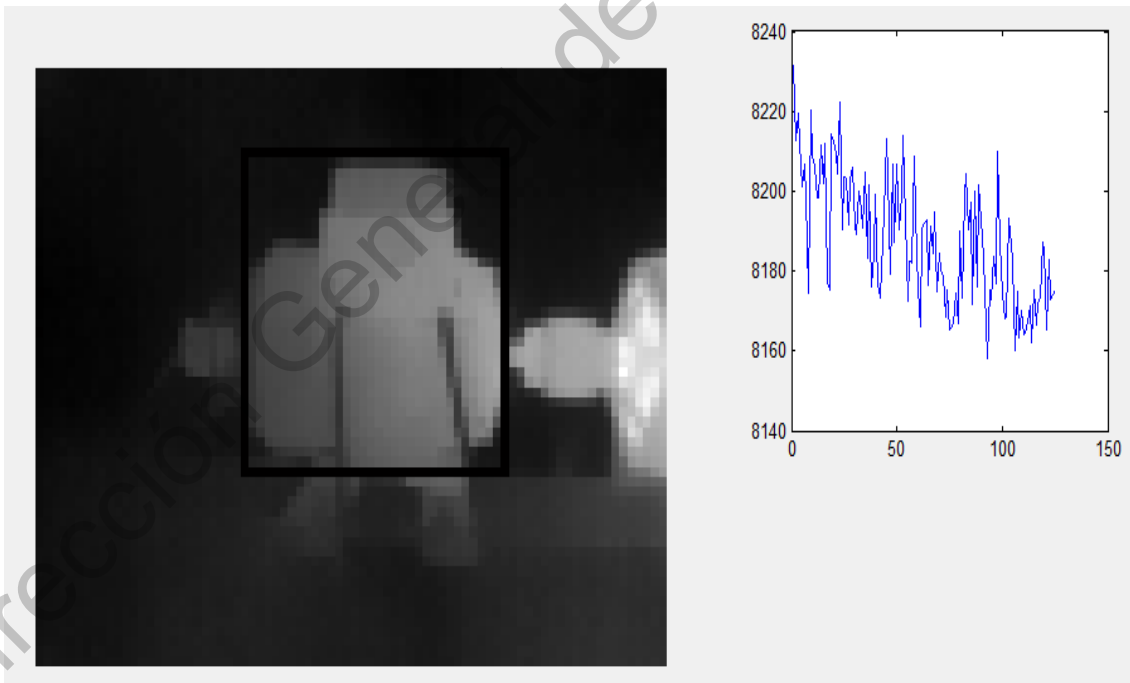


Figura 41. Segmentación imágenes térmicas PiNoIR, disturbio SWELL.

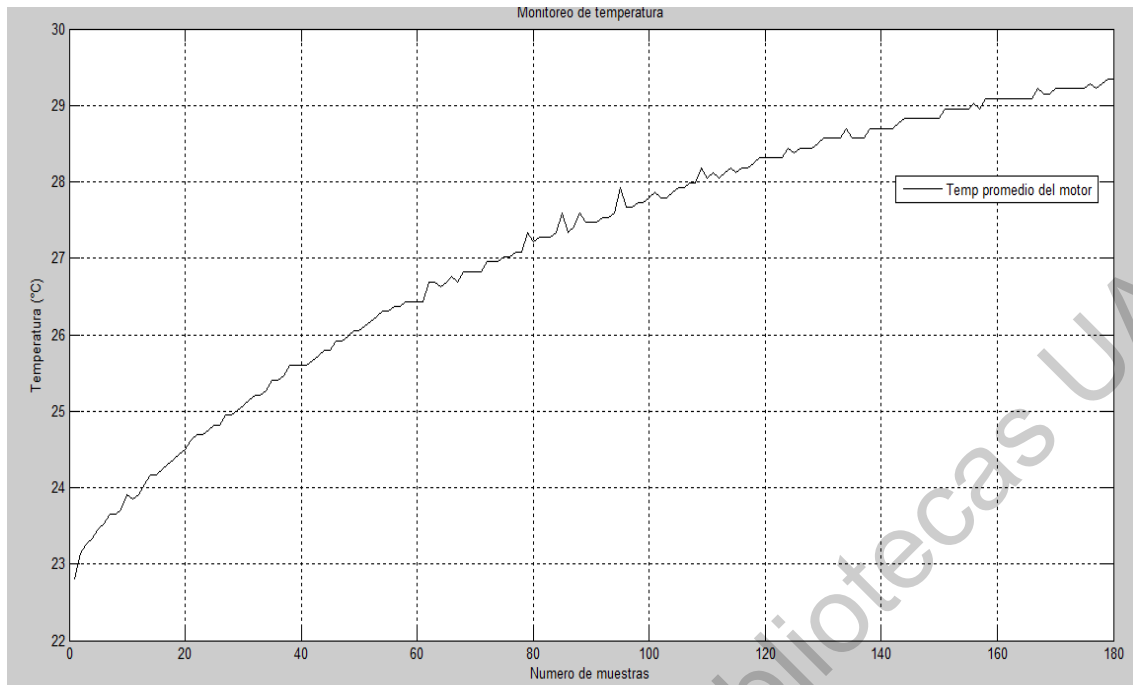


Figura 42. Gráfica temperatura promedio de imágenes térmicas PiNoIR, disturbio SWELL.

4.4.3 Tercer armónico

Las Figuras 43 y 44 muestran el proceso térmico del motor de inducción, el primer recuadro muestra el tiempo inicial cuando el motor fue puesto en marcha hasta llegar al tercer recuadro con un tiempo de 90 minutos, tiempo en el cual el motor llega a su estabilidad térmica y se induce el disturbio de 3° armónico, de acuerdo con los parámetros de la Tabla 3. Al observar la Figura 43 se puede ver una imagen más clara de la distribución de la temperatura en el motor de inducción que la Figura 44 donde no se posible distinguir alguna diferencia de temperatura. Sin embargo, visualmente no se pueden detectar cambios significativos al aplicar un tercer armónico debido a su baja amplitud y tiempo de inyección.

Por otra parte, la tercer armónica al ser parte de los llamados “triplens” son de secuencia homopolar no tiene sentido de giro pero puede causar calentamiento en motores pero principalmente se suman al hilo de neutro y puede circular más corriente eléctrica que en cada fase del sistema trifásico, calentando y desgastando el cableado si el dimensionamiento no es el correcto, ya que normalmente el cable de neutro de un sistema trifásico es de menor calibre que el de los hilos de fase.

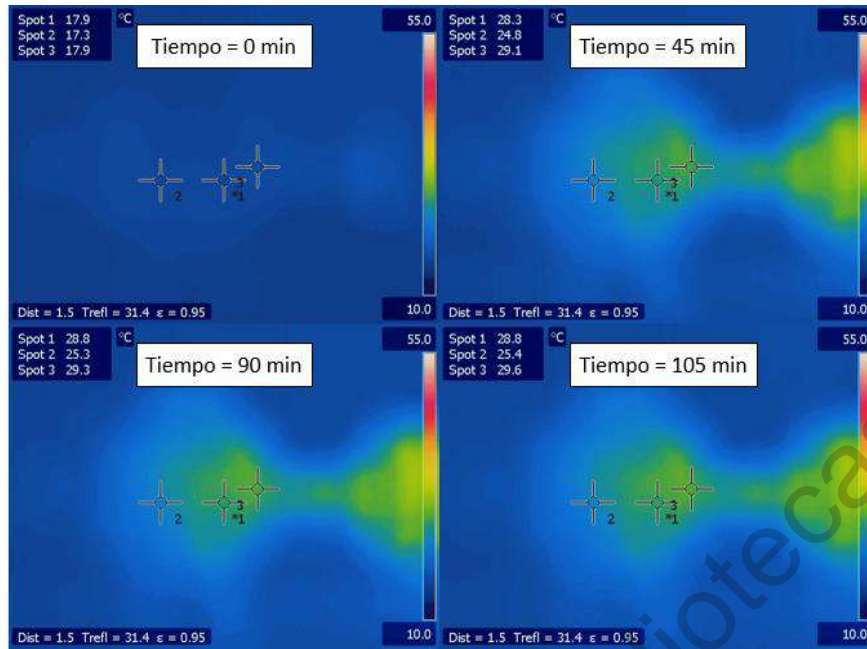


Figura 43. Imágenes térmicas FLIR, 3° armónico.

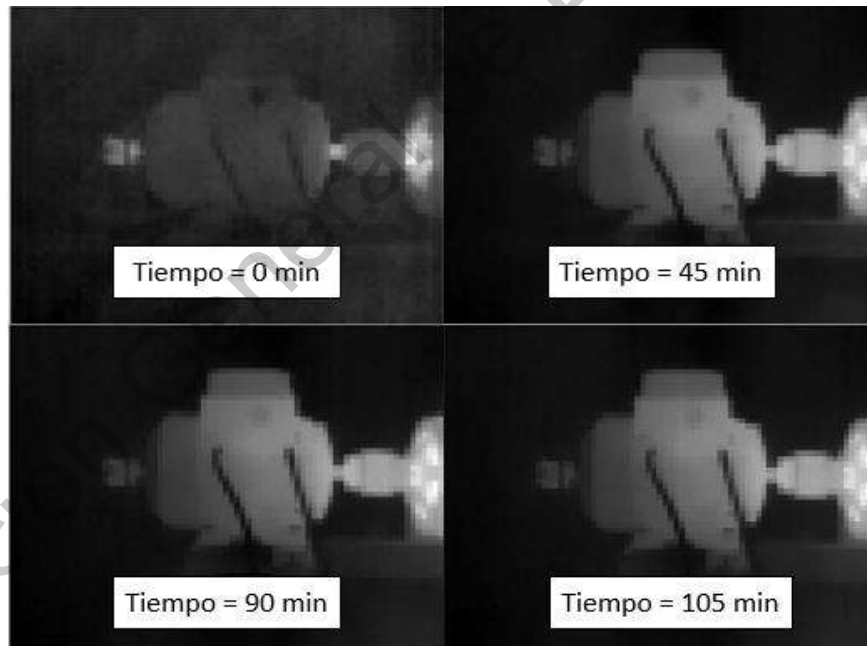


Figura 44. Imágenes térmicas PiNoIR, 3° armónico.

Los gráficos mostrados en las Figuras 45 y 46, muestran los datos obtenidos por la cámara FLIR y los RTD's quienes muestran el incremento de temperatura al inducir el disturbio de 3° armónico, después de transcurrir los 90 minutos se observa que el motor alcanza su estabilidad térmica e inducimos el disturbio eléctrico, al presentarse el disturbio la temperatura del motor se mantiene sin variaciones. El gráfico de la Figura 48 se obtiene al aplicar segmentación manual en las imágenes termográficas obtenidas por la cámara PiNoIR, el cual muestra la temperatura promedio del área seleccionada correspondiente al motor de inducción como se muestra en la Figura 47.

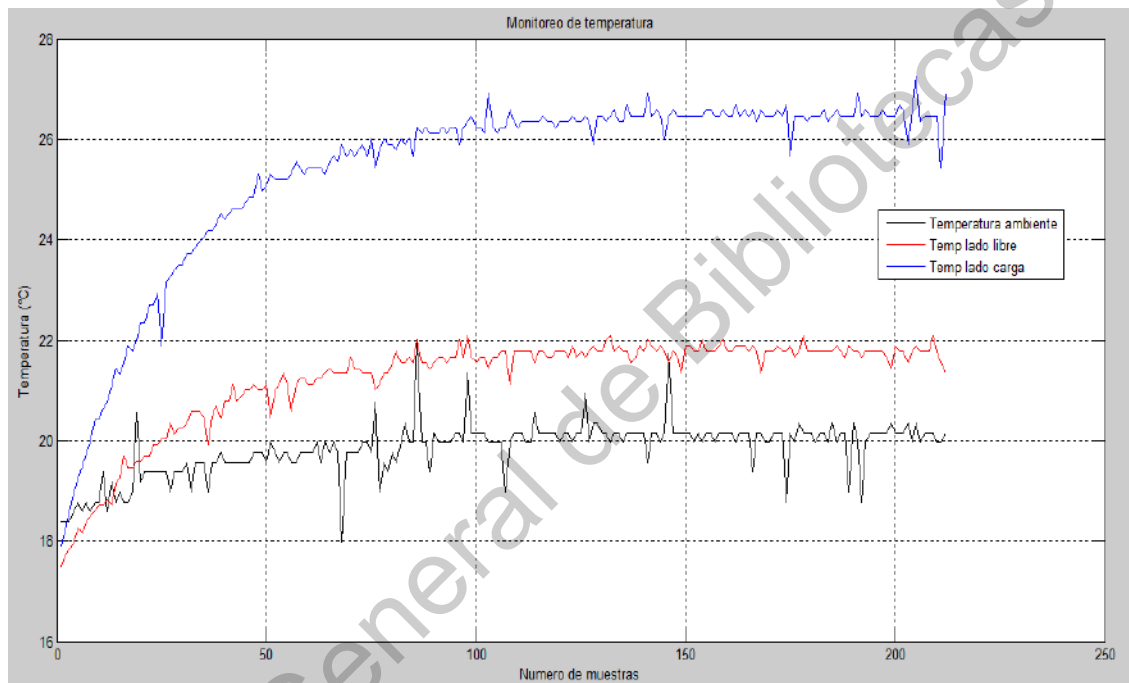


Figura 45. Gráfica sensores RTDs, 3° armónico.

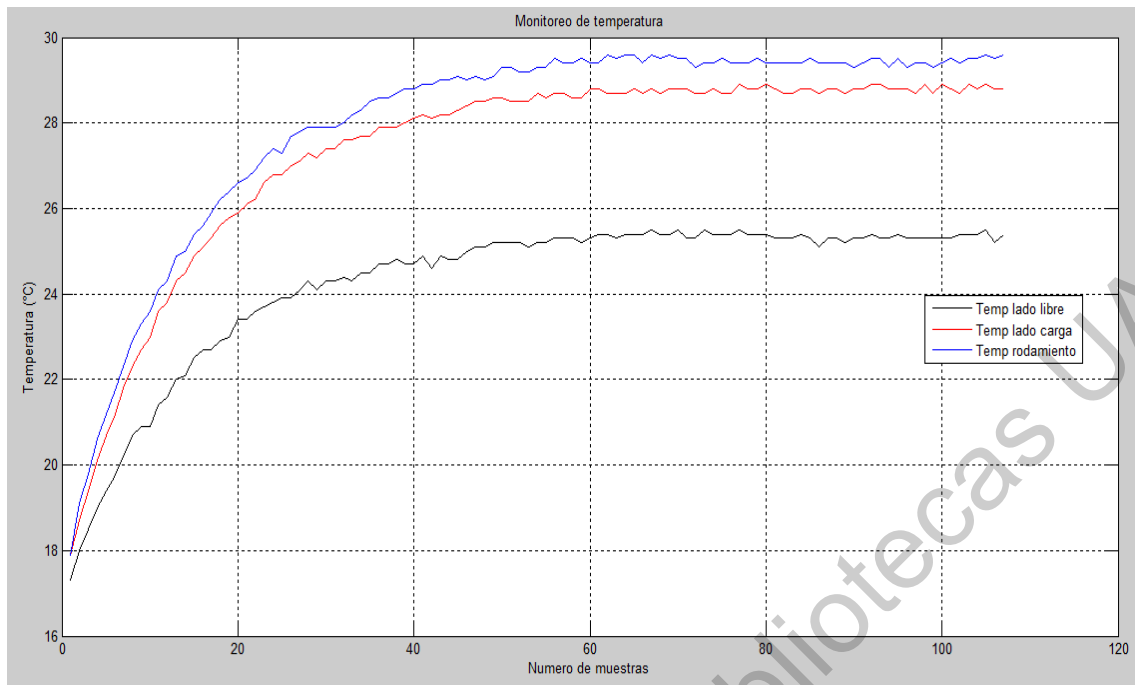


Figura 46. Gráfica slots imágenes térmicas FLIR, 3° armónico.

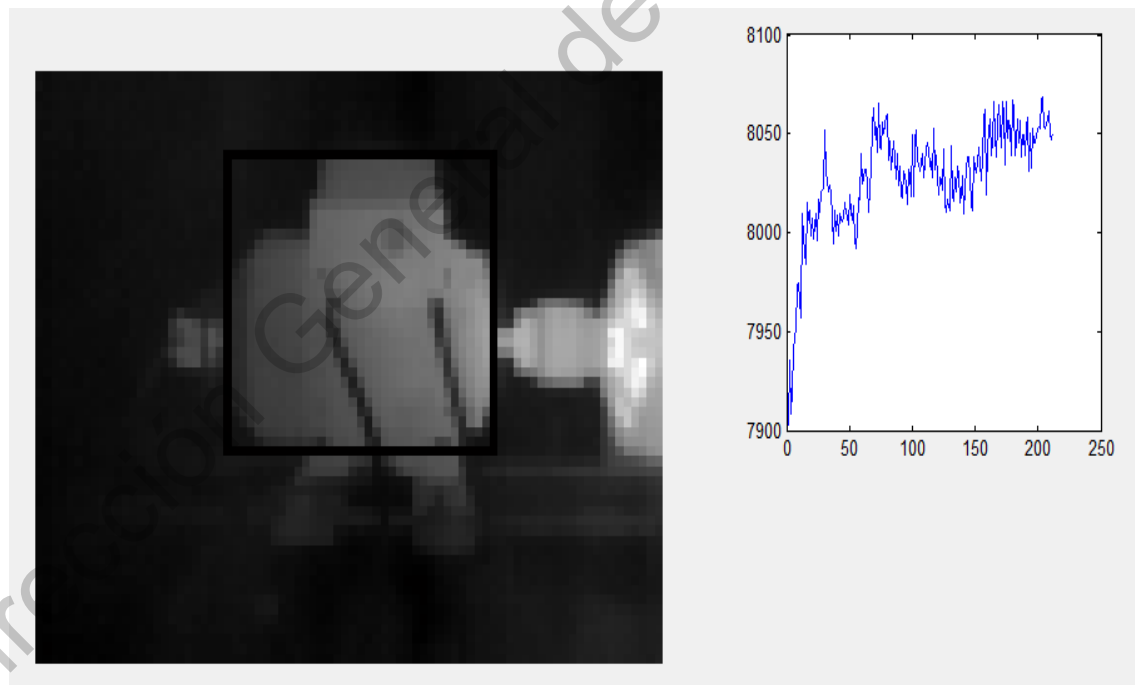


Figura 47. Segmentación imágenes térmicas PiNoIR, 3° armónico.

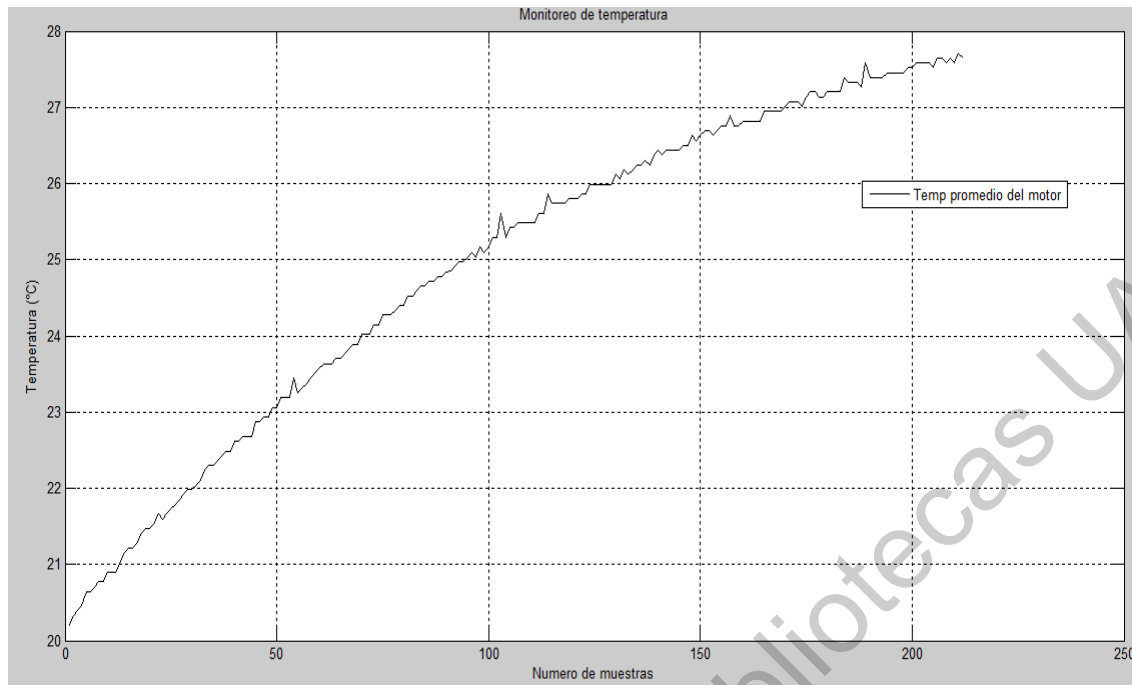


Figura 48. Gráfica temperatura promedio de imágenes térmicas PiNoIR, 3° armónico.

4.4.4 Quinto armónico

En las Figuras 49 y 50 se puede observar el proceso térmico de un motor de inducción desde un tiempo cero en el cual es puesto en marcha, minuto 90 tiempo en el cual llega a su estabilidad térmica y comienza a inducirse el disturbio de 5° armónica de acuerdo con los parámetros de la Tabla 3, y el minuto 120 tiempo correspondiente al término de la inyección del disturbio. Al comparar las Figuras 49 y 50, se puede determinar que visualmente la cámara FLIR entrega una mejor resolución de imagen y ayuda visual en el caso de estudio correspondiente a la quinta armónica. La Figura 49 muestra un incremento de temperatura en lado libre del motor de inducción, tornándose de un color amarillo que de acuerdo a la paleta de colores este color representa mayor temperatura, observando la ayuda visual de los spots se obtiene que en el spot 1 correspondiente al lado carga del motor tiene un incremento de temperatura de 0.8 °C, spot 2 correspondiente al lado libre del motor presenta un incremento de temperatura 1.1 °C y el spot 3 correspondiente al rodamiento del motor muestra un incremento de temperatura de 0.5 °C.

En el caso del quinto armónico al ser de secuencia negativa producen una rotación inversa que ocasiona el frenado del motor generando calentamiento en los rodamientos del motor, por otro lado el contenido armónico genera calentamiento en el devanado debido al incremento de perdidas por efecto joule en el cobre y perdidas magnéticas en el rotor, este incremento de temperatura como se observa en los resultados obtenidos por la cámara termográfica pueden ocasionar daños en el aislamiento y calentamiento en el rotor o rodamientos, que pueden dar lugar a

fallas futuras. Considerando que el disturbio inyectado es de baja amplitud, en condiciones reales estos disturbios se presentan en amplitud mayor a la propuesta.

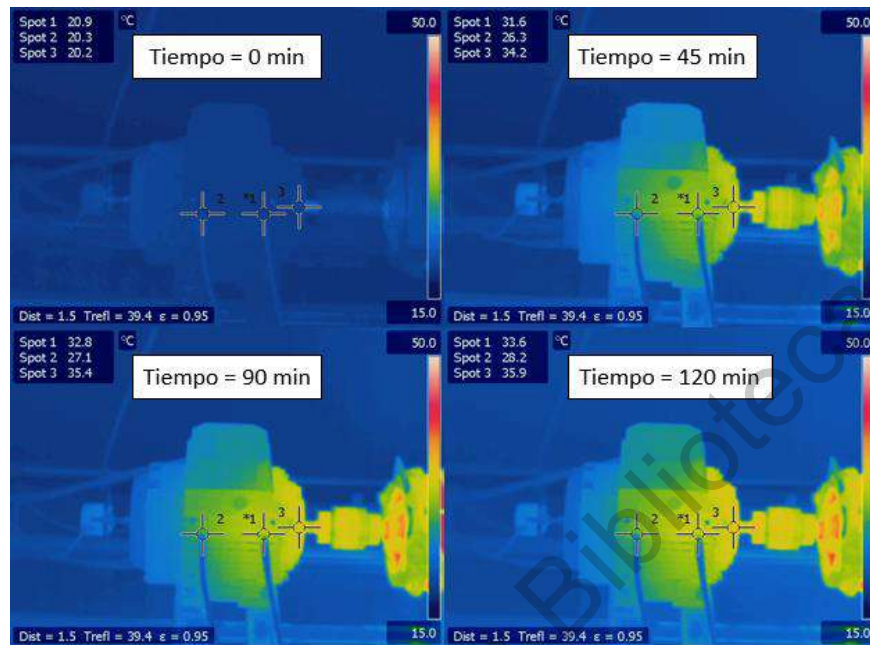


Figura 49. Imágenes térmicas FLIR, 5° armónico.

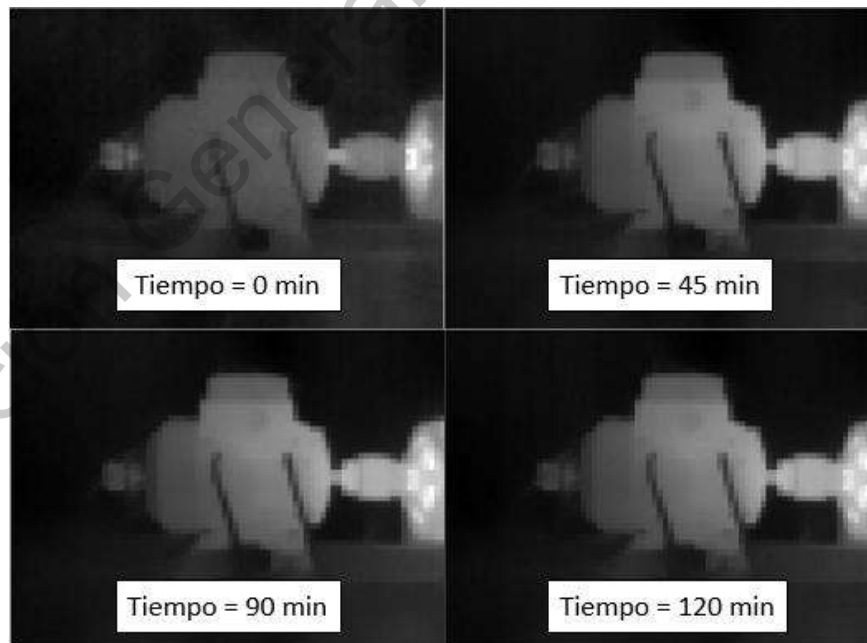


Figura 50. Imágenes térmicas PiNoIR, 5° armónico.

Los gráficos mostrados en las Figuras 51 y 52 presentan los datos obtenidos por la cámara FLIR y los RTD's quienes muestran el incremento de temperatura al inducir el disturbio de 5° armónica, después de transcurrir los 90 minutos observamos que el motor alcanza su estabilidad térmica y se induce el disturbio eléctrico, al presentarse el disturbio la temperatura del motor crece gradualmente hasta finalizar la inyección. El gráfico de la Figura 54 se obtiene a partir al aplicar segmentación manual en las imágenes termográficas obtenidas por la cámara PiNoIR, el cual muestra la temperatura promedio del área seleccionada correspondiente al motor de inducción como se muestra en la Figura 53.

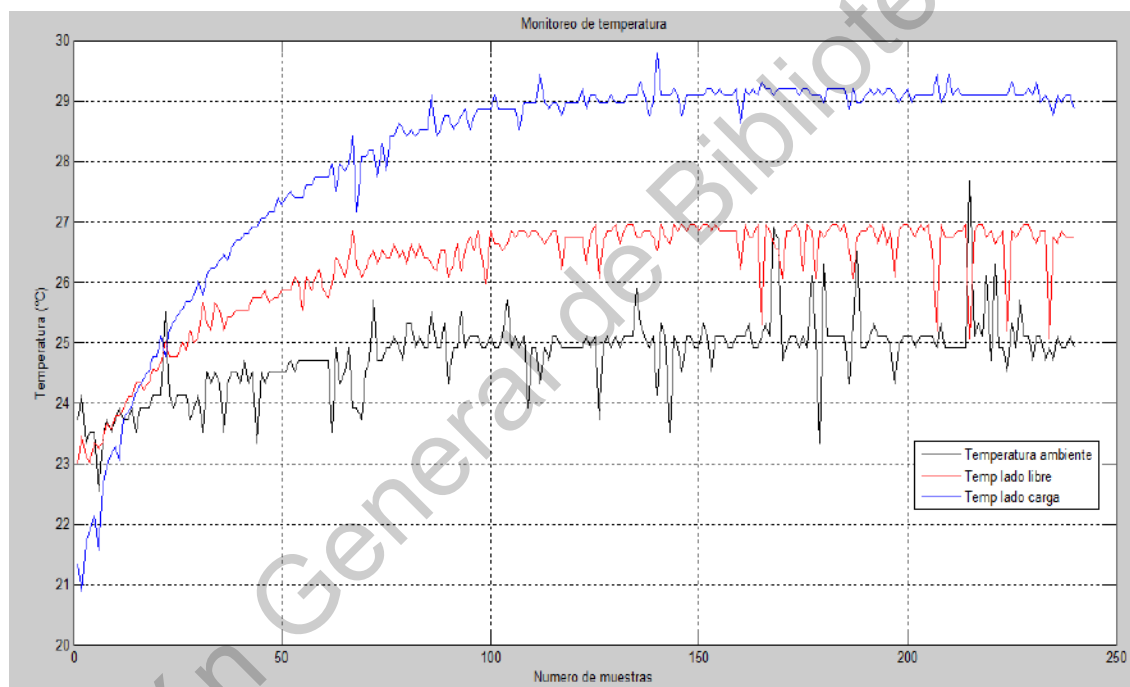


Figura 51. Gráfica sensores RTDs, 5° armónico.

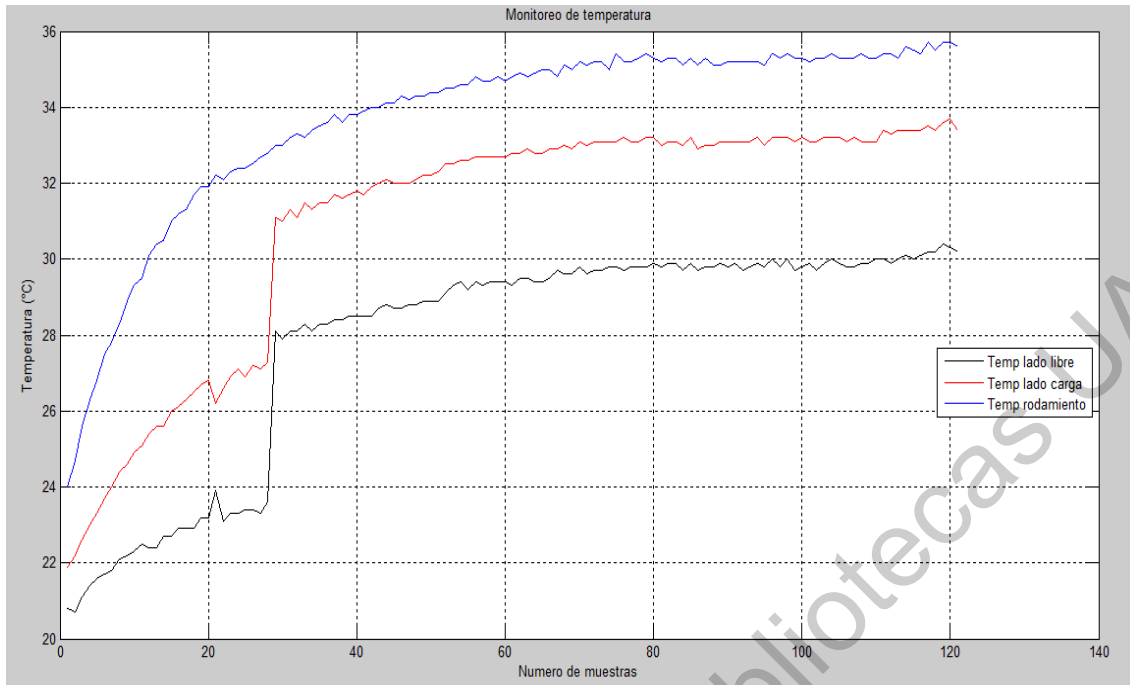


Figura 52. Gráfica slots imágenes térmicas FLIR, 5° armónico.

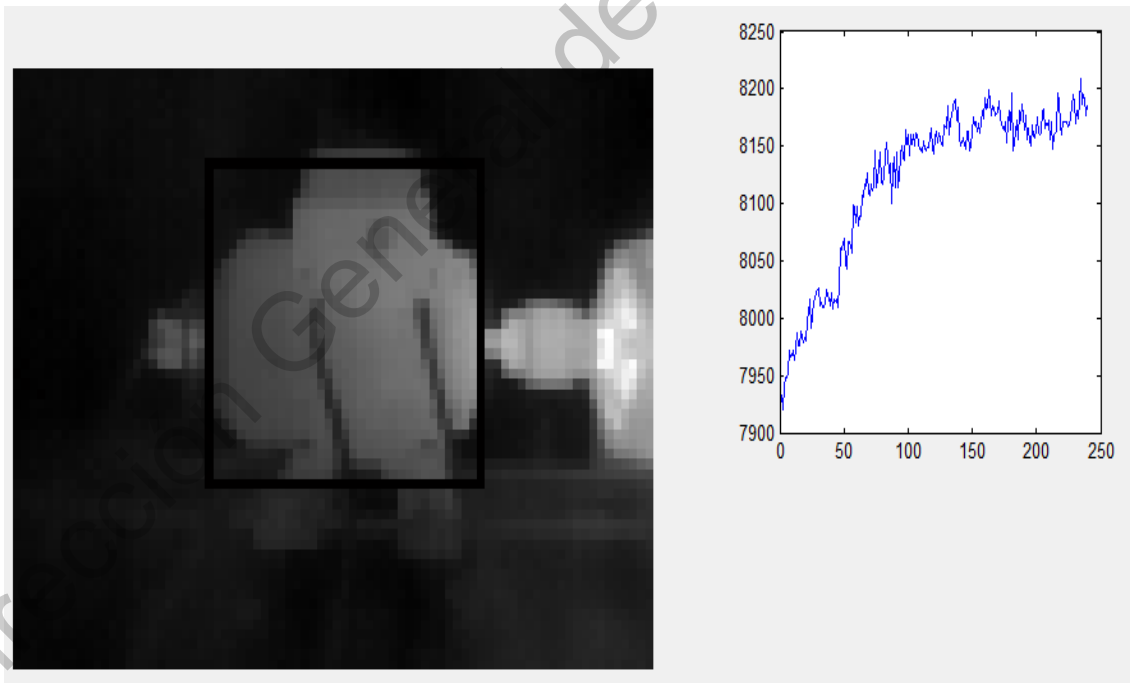


Figura 53. Segmentación imágenes térmicas PiNoIR, 5° armónico.

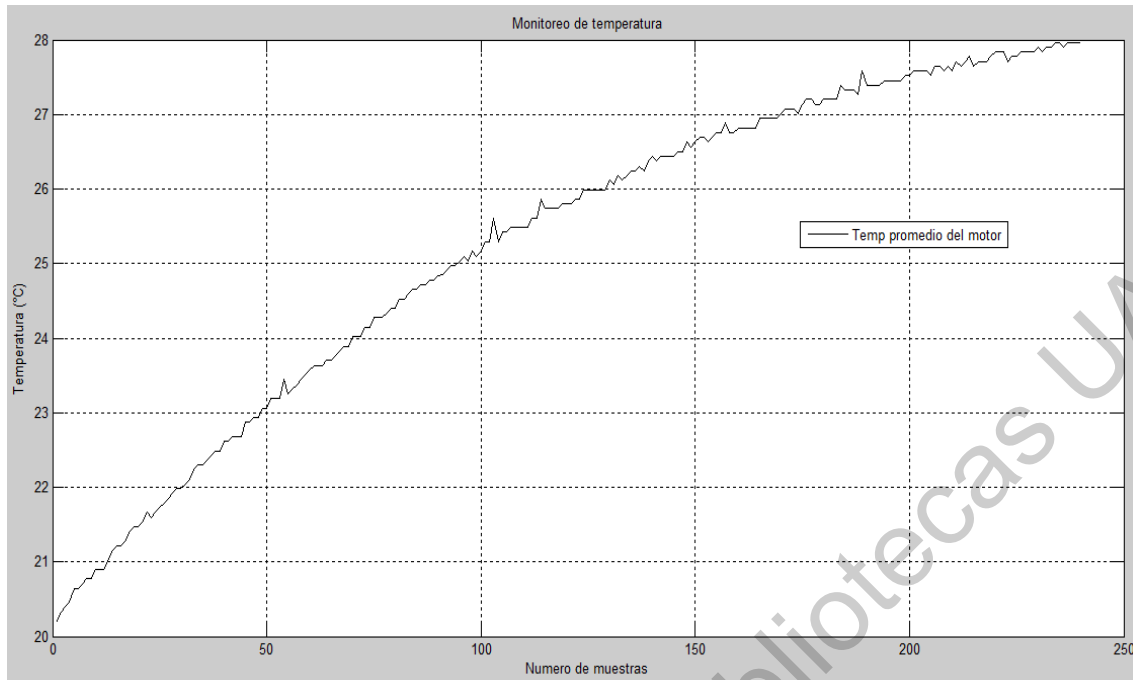


Figura 54. Gráfica temperatura promedio imágenes térmicas PiNoIR, 5° armónico.

4.4.5 Cuarto, séptimo y onceavo armónico

En las Figuras 55 y 56 se muestra el proceso térmico del motor eléctrico de inducción a analizar, iniciando en cero tiempo en el que se pone en marcha el motor, minuto 90 tiempo en el que el motor llega a su estabilidad térmica y se comienza la inyección de los disturbios de 4°, 7° y 11° armónicos de acuerdo a los parámetros especificados en la Tabla 3 para este caso de estudio, finalmente a los 150 minutos tiempo en el cual finaliza la inyección de los disturbios y se detiene el motor. Podemos observar en la Figura 55 que visualmente se puede distinguir la diferencia de temperaturas en las imágenes con la ayuda de la paleta de colores que nos proporciona la cámara FLIR, en cambio en la Figura 56 es complicado determinar visualmente la diferencia de temperaturas al inducir el disturbio. Como podemos observar en la Figura 55 la zona correspondiente al lado carga del motor muestra un mayor incremento de temperatura tornándose esta área de un color amarillento, la zona de lado libre también muestra un incremento cambiando la coloración verde a amarillo en algunas zonas, observando la ayuda visual de los spots, tenemos que el spot 1 correspondiente al lado carga del motor incrementa la temperatura en 1.5 °C, spot 2 correspondiente al lado libre del motor eléctrico incremento de temperatura de 1 °C y el spot 3 correspondiente al rodamiento de motor eléctrico tiene un incremento de temperatura de 1.3 °C.

Las cargas no lineales y equipos generadores de armónicos normalmente aportan combinaciones de armónicos a la red como se presenta en este caso de estudio, esta combinación de armónicos de secuencia negativa y positiva elevan la

temperatura, generan vibraciones y desgaste en los motores, como se observa en los resultados obtenidos por la cámara termográfica incrementan las pérdidas magnéticas por la presencia de armónicos en el rotor, eléctricas por efecto joule por las corrientes que circulan en el cableado y mecánicas al generar vibración en rodamientos. Bajo condiciones normales de operación estos armónicos se presentan en amplitudes mayores a la propuesta llegando a ocasionar estados de falla por daño en el aislamiento del estator, daños en rodamientos, etc.

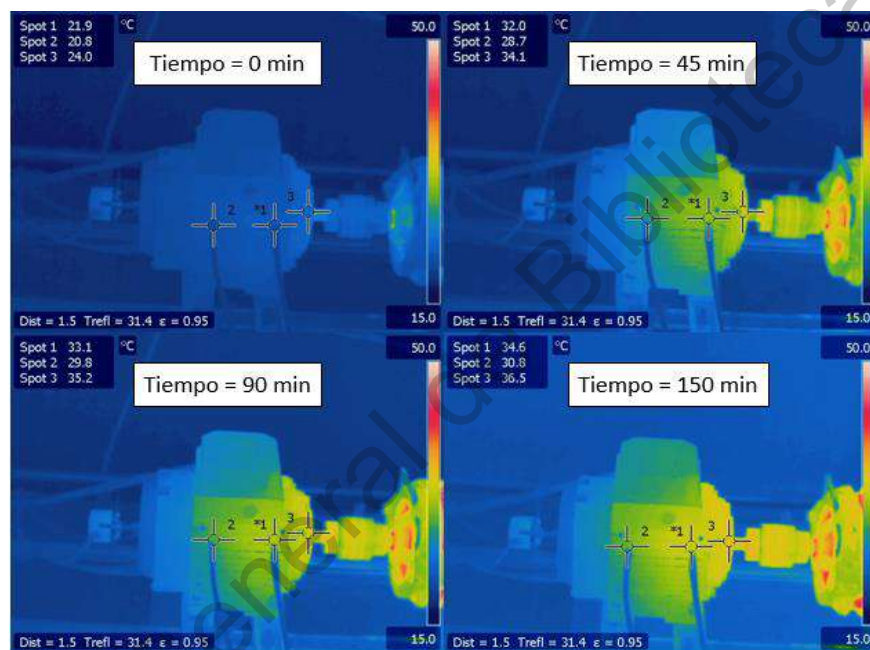


Figura 55. Imágenes térmicas FLIR, 4°, 7° y 11° armónicos.

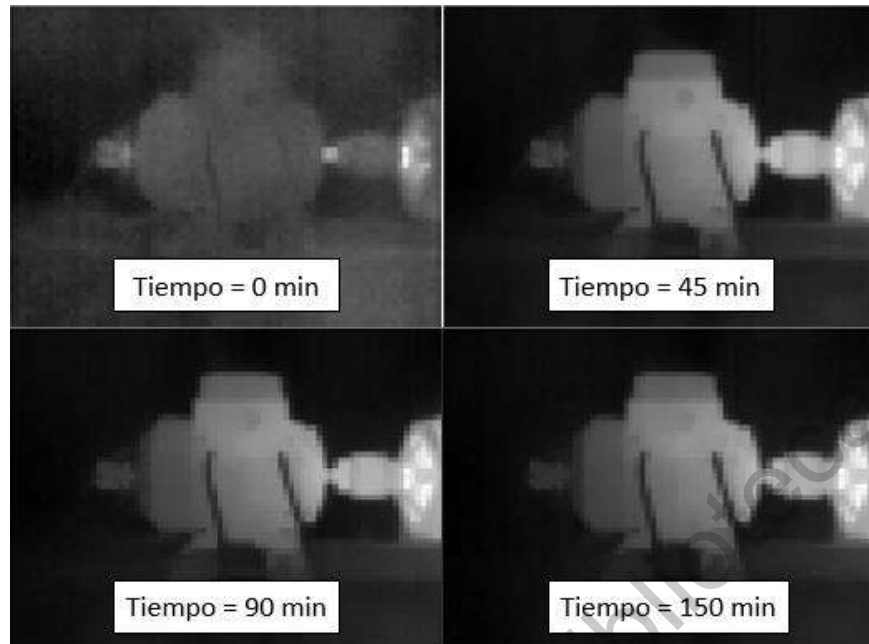


Figura 56. Imágenes térmicas PiNoIR, 4°, 7° y 11° armónicos.

Los gráficos en las Figuras 57 y 58 muestran los datos obtenidos por la cámara FLIR y los RTD's quienes muestran el incremento de temperatura al inducir la combinación de disturbios de 4°, 7° y 11° armónico, después de transcurrir los 90 minutos observamos que el motor alcanza su estabilidad térmica e inducimos los disturbios eléctricos, al presentarse el disturbio la temperatura del motor crece gradualmente hasta finalizar la inyección. El gráfico de la Figura 60 se obtiene a partir al aplicar segmentación manual en las imágenes termográficas obtenidas por la cámara PiNoIR, el cual muestra la temperatura promedio del área seleccionada correspondiente al motor de inducción como se muestra en la Figura 59.

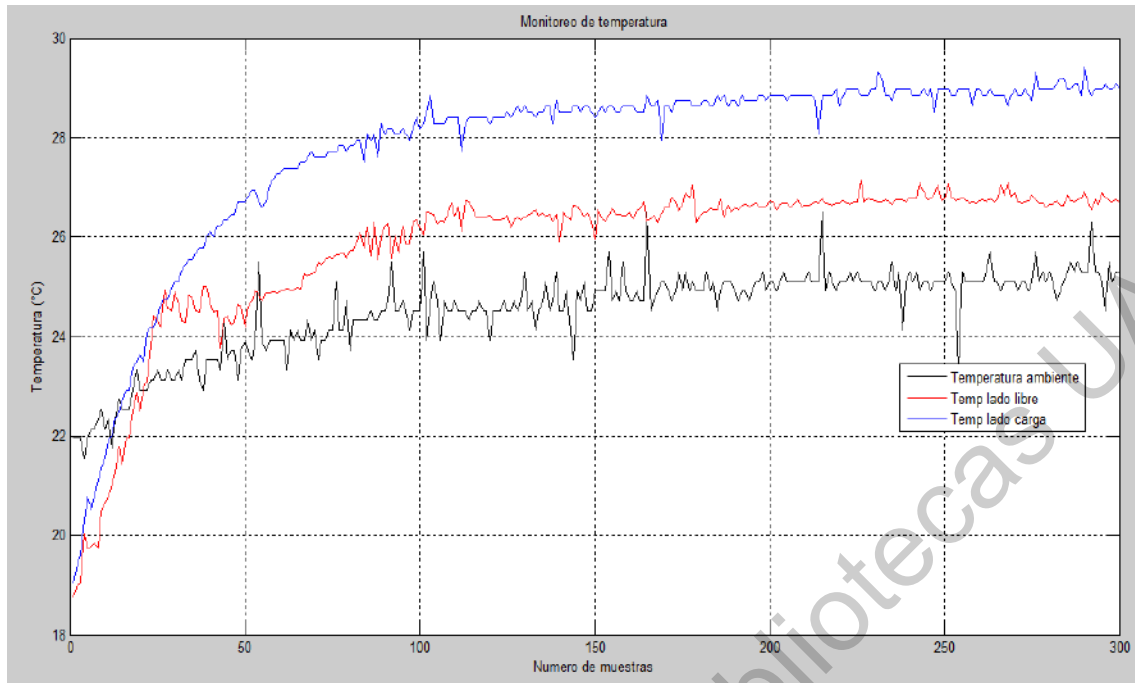


Figura 57. Gráfica sensores RTDs, 4°, 7° y 11° armónicos.

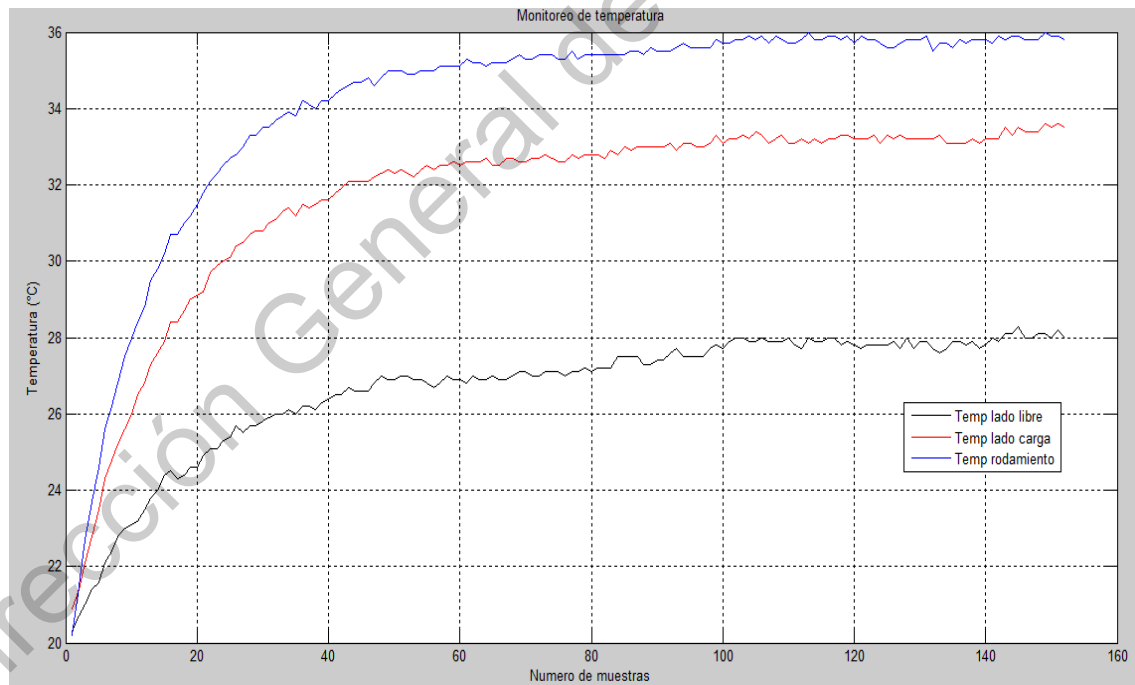


Figura 58. Gráfica slots imágenes térmicas FLIR, 4°, 7° y 11° armónicos.

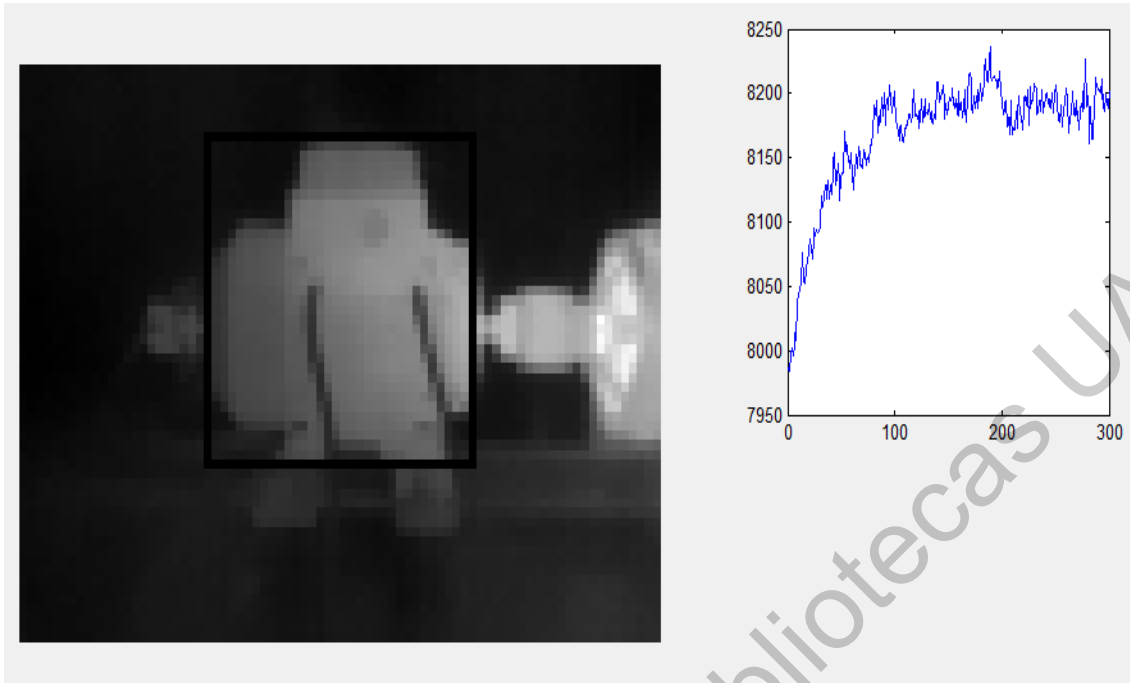


Figura 59. Segmentación imágenes térmicas PiNoIR, 4°, 7° y 11° armónicos.

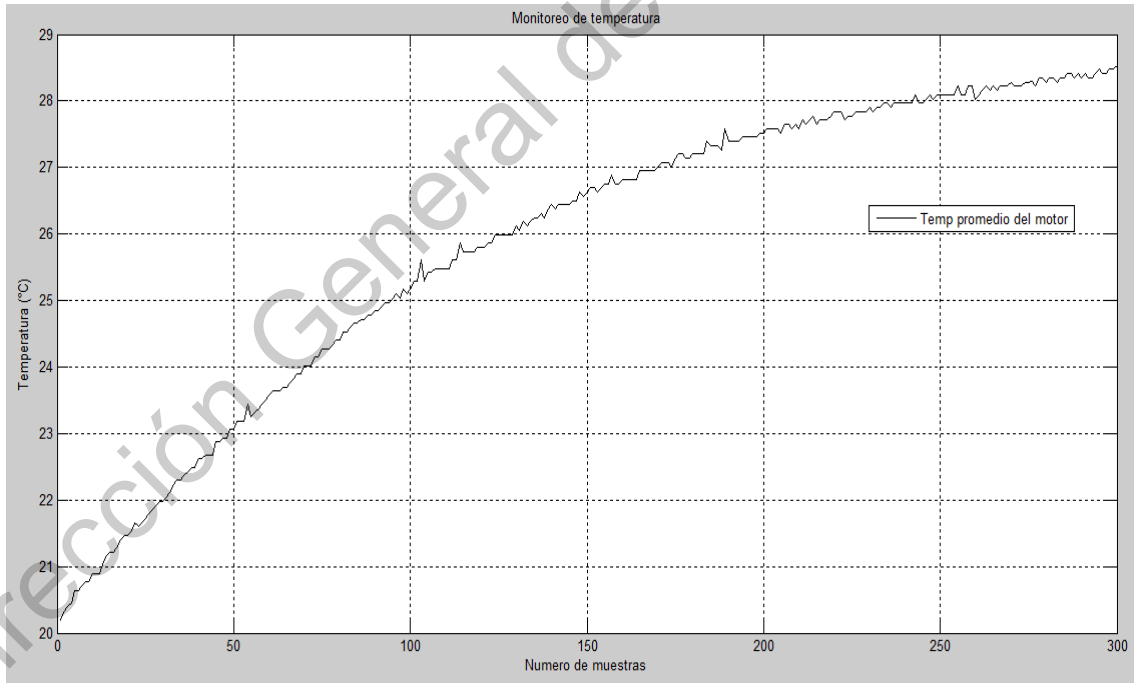


Figura 60. Gráfica temperatura promedio imágenes térmicas PiNoIR, 4°, 7° y 11° armónicos.

4.4.6 Fluctuaciones

En las Figuras 61 y 62 se muestra el proceso térmico del motor eléctrico de inducción, iniciando en cero; tiempo en el que se pone en marcha el motor, minuto 90 tiempo en el que el motor llega a su estabilidad térmica y se comienza la inyección de las fluctuaciones de tensión de acuerdo con los parámetros especificados en la Tabla 3 para este caso de estudio, finalmente a los 150 minutos tiempo en el cual finaliza la inyección de los disturbios y se detiene el motor. Se puede observar en la Figura 61 es más fácil distinguir visualmente la diferencia de temperaturas en las imágenes con la ayuda de la paleta de colores que proporciona la cámara FLIR, en cambio en la Figura 62 es complicado determinar visualmente la diferencia de temperaturas al inducir el disturbio. Como se puede observar en la Figura 61 la zona correspondiente al lado carga del motor muestra un mayor incremento de temperatura tornándose esta área de un color más rojo, la zona de lado libre también muestra un incremento cambiando la coloración verde a amarillo en algunas zonas, observando la ayuda visual de los spots, tenemos que el spot 1 correspondiente al lado libre del motor incrementa la temperatura en 0.8 °C, spot 2 correspondiente al lado carga del motor eléctrico incremento de temperatura de 1.2 °C y el spot 3 correspondiente al rodamiento de motor eléctrico tiene un incremento de temperatura de 1 °C.

Las fluctuaciones de tensión afectan a los motores eléctricos principalmente en cambios de toque y velocidad, en algunos casos pueden incrementar las vibraciones e incrementan las pérdidas eléctricas por efecto Joule. Como se puede observar en los resultados obtenidos por la cámara termográfica los rodamientos y el área correspondiente al devanado se ven afectados. Estas pérdidas reflejadas en calentamiento pueden ocasionar daños en el aislamiento que da origen a fallas eléctricas y daños en rodamientos por los cambios de velocidad y vibraciones.

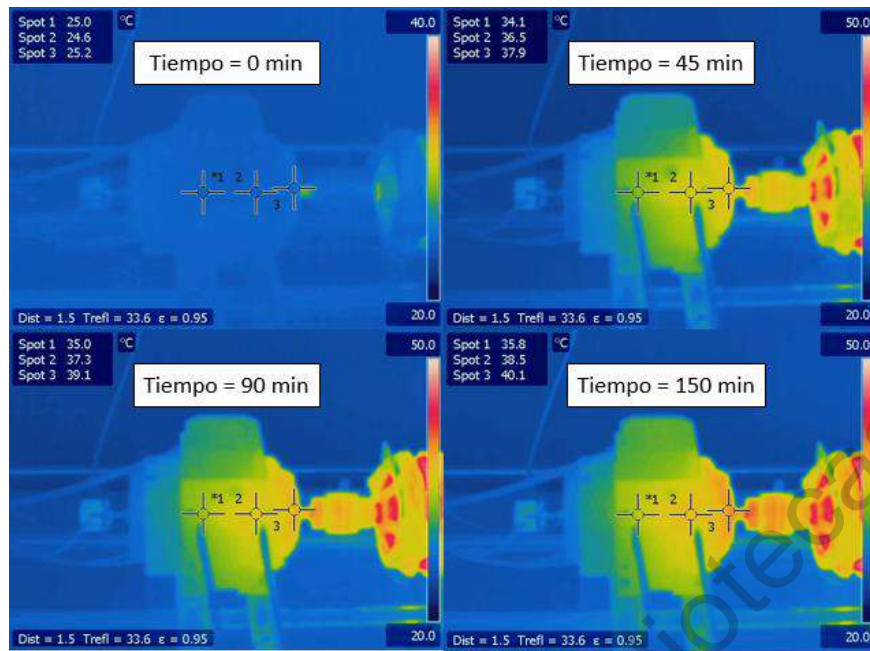


Figura 61. Imágenes térmicas FLIR, disturbio fluctuaciones.

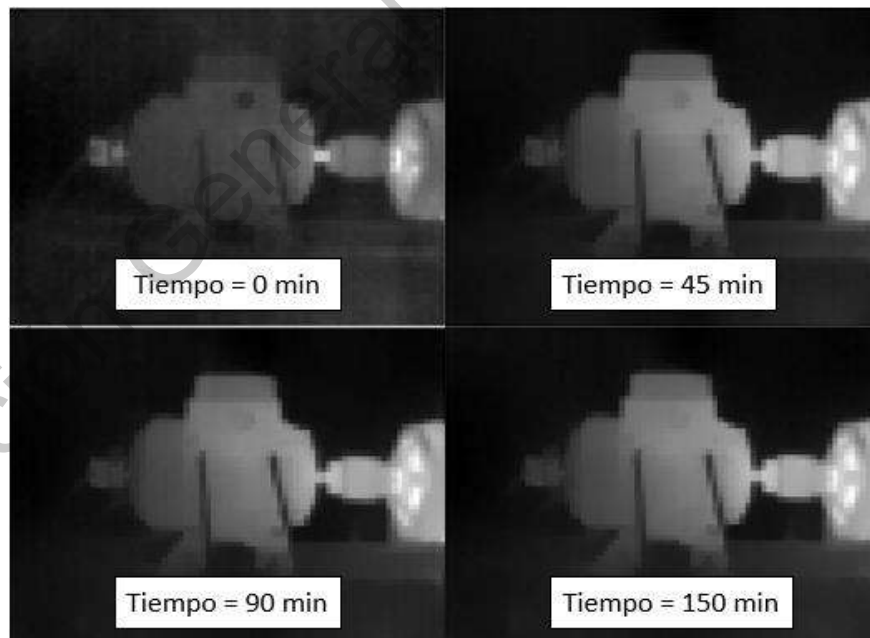


Figura 62. Imágenes térmicas PiNoIR, disturbio fluctuaciones.

Los gráficos mostrados en las Figuras 63 y 64 muestran el proceso térmico del motor eléctrico de inducción desde su puesta en marcha, a 90 minutos tiempo en el que como se aprecia en los gráficos de las Figuras 63 y 64 llega a su estabilidad térmica y se inducen las fluctuaciones de tensión, se puede observar que al inducir los disturbios la temperatura comienza a incrementar hasta estabilizarse nuevamente. El gráfico de la Figura 66 se obtiene a partir al aplicar segmentación manual en las imágenes termográficas obtenidas por la cámara PiNoIR, el cual muestra la temperatura promedio del área seleccionada correspondiente al motor de inducción como se muestra en la Figura 65.

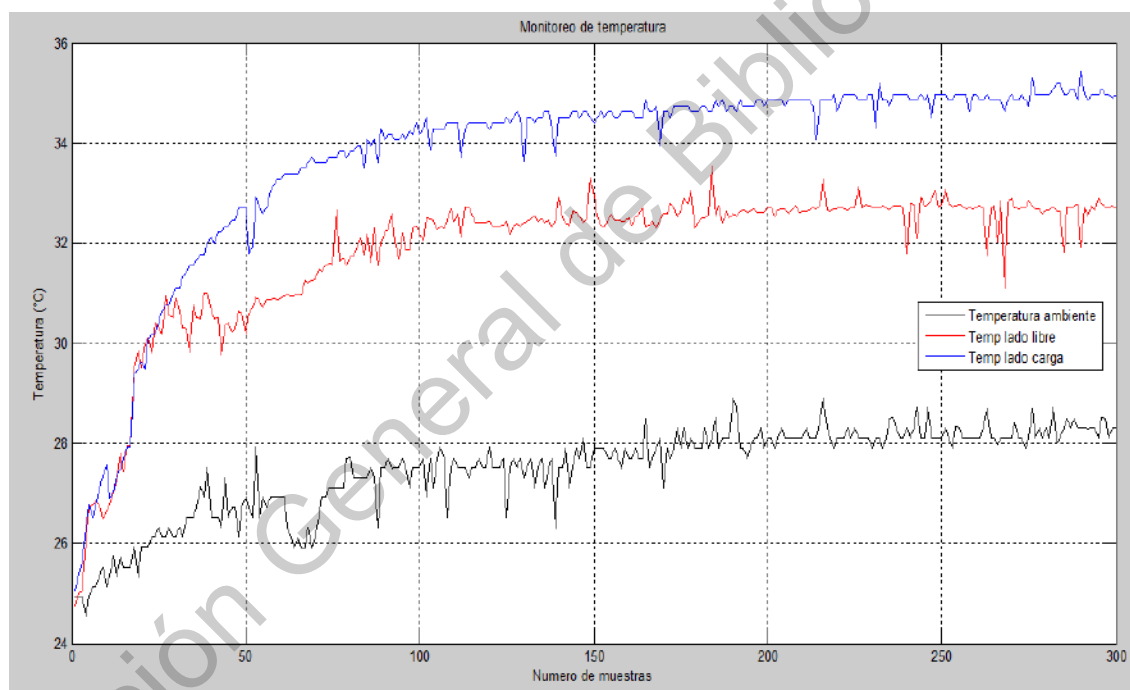


Figura 63. Gráfica sensores RTD's, disturbio fluctuaciones.

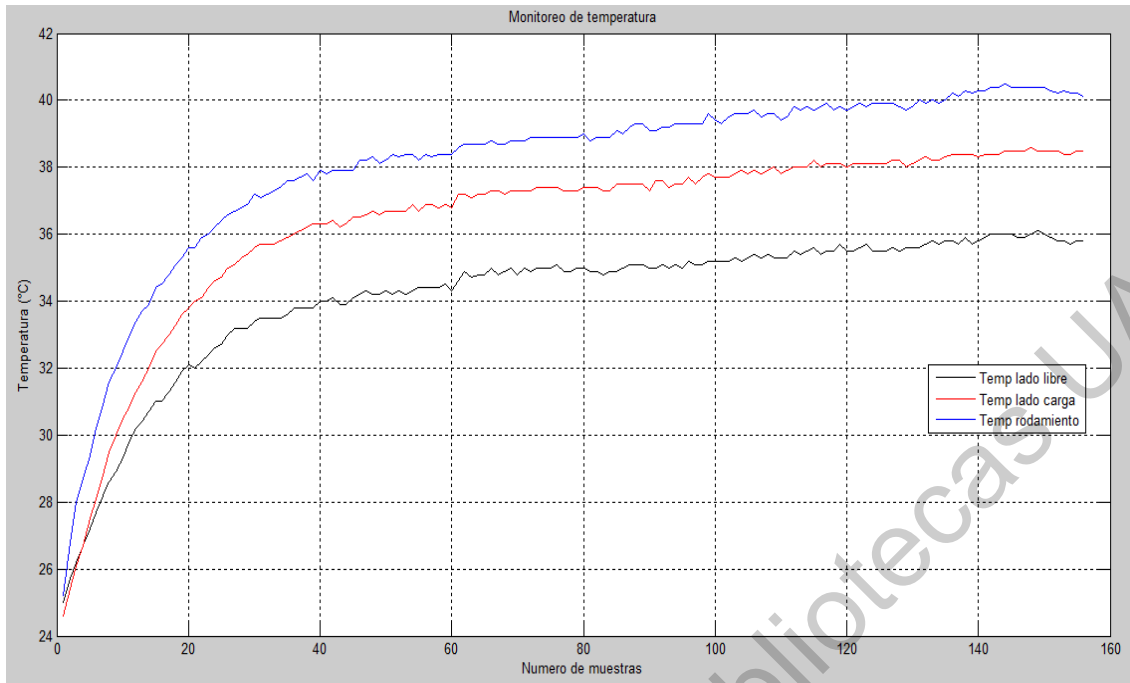


Figura 64. Gráfica slots imágenes térmicas FLIR, disturbio fluctuaciones.

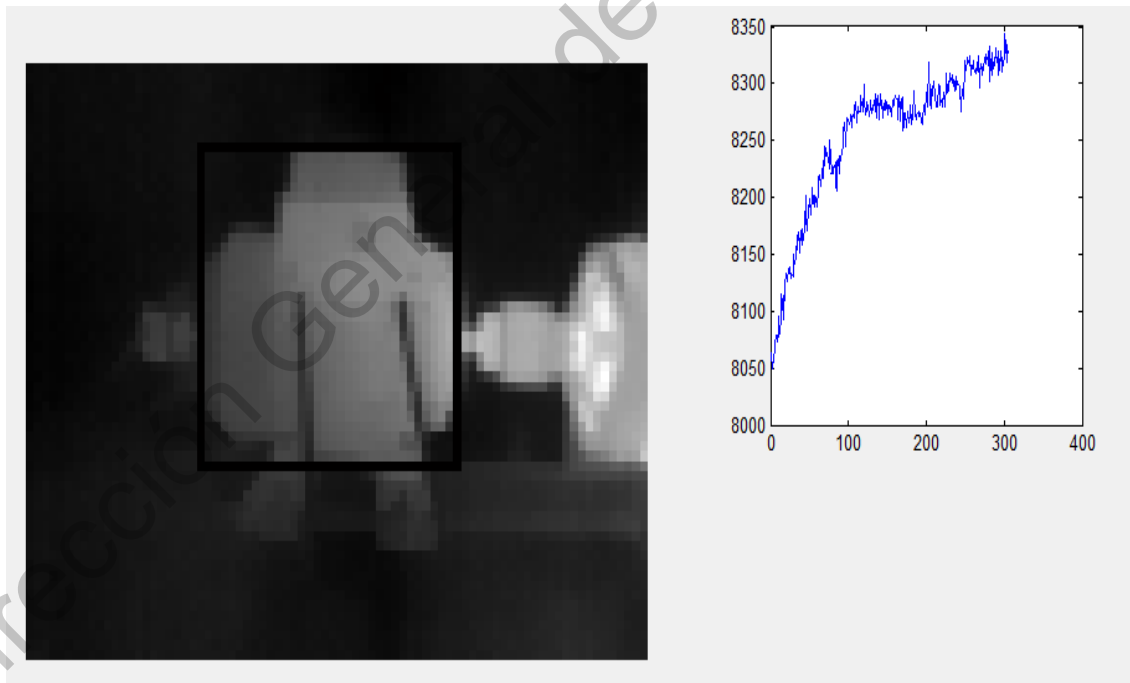


Figura 65. Segmentación imágenes térmicas PiNoIR, disturbio fluctuaciones.

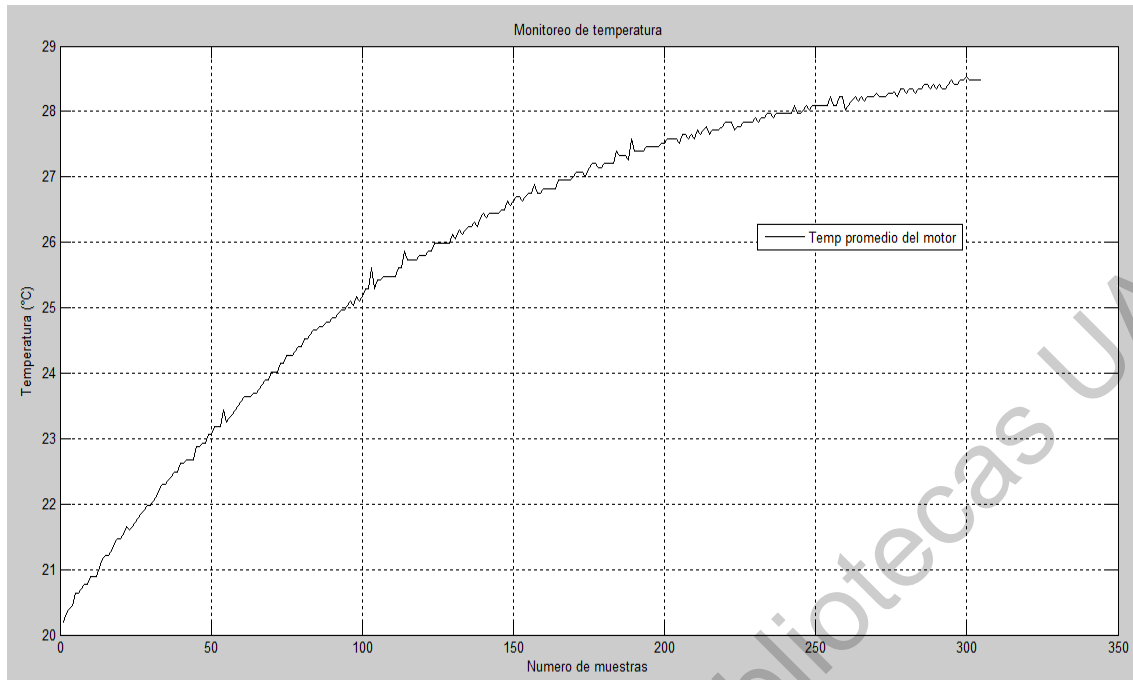


Figura 66. Gráfica temperatura promedio imágenes térmicas PiNoIR, disturbio fluctuaciones.

Los resultados obtenidos al someter un motor eléctrico de inducción a diferentes disturbios eléctricos demuestran que esta energía agregada a la señal fundamental genera pérdidas por efecto Joule, corrientes de Eddy, perdidas mecánicas, etc. Estas pérdidas se ven reflejadas en un incremento de temperatura en diferentes zonas del motor, el incremento de temperatura como resultado de inducir diferentes disturbios no es considerable para degradar el aislamiento o la grasa del motor eléctrico debido a la amplitud de los disturbios inducidos. Siendo el más representativo el correspondiente al disturbio SWELL que alcanzo un incremento de temperatura de 2.2 °C en el rodamiento del motor, la combinación de 4°, 7° y 11° armónicos que representaron un incremento de 1.5 °C lado carga, 1 °C lado libre y 1.3 °C rodamientos del motor.

Sin embargo, en la industria los motores eléctricos algunas veces operan en ambientes y condiciones adversas o en procesos donde se requiere que estos operen a su máxima capacidad y donde nuestros equipos son los principales generadores de disturbios eléctricos, la suma de estas condiciones de operación pueden ser fatales para nuestro motor eléctrico tomando un papel muy relevante el eliminar los disturbios en nuestro sistema eléctrico ahorrándonos daños en nuestro motor eléctrico, mala operación del motor como incrementos o decrementos de velocidad o torque, paros inesperados al activarse las protecciones eléctricas y ahorro de energía.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se desarrolló e implementó un sistema para el análisis de los disturbios eléctricos SAG, SWELL, armónicos y fluctuaciones utilizando termografía. Para determinar sus efectos en un motor eléctrico de inducción mediante el análisis de las imágenes termográficas.

Hoy en día existen diferentes métodos y sistemas que permiten monitorear la calidad de energía en nuestro sistema eléctrico, y obtener información del estado del sistema para tomar decisiones y corregir los problemas de calidad de la energía, ya que esto afecta nuestros equipos y representa una pérdida económica para el usuario. Para ello se desarrolló e implementó un sistema que permita generar disturbios eléctricos o cualquier señal arbitraria, los disturbios generados e inducidos en la red son de baja amplitud, debido a que nuestro sistema es capaz de generar una señal con una amplitud máxima de 5.7 Vp. Sin embargo, tiene la versatilidad de poder generar cualquier señal aplicando su modelo matemático y puede inyectarse por periodos largos de tiempo.

Este trabajo aborda el tema de calidad de la energía y los efectos que causa en un motor eléctrico de inducción al ser analizado por termografía infrarroja, partiendo del uso de cámaras de bajo costo las cuales son funcionales y permiten obtener el termograma de las imágenes capturadas y así realizar procesamiento de datos de forma rápida. Sin embargo, su resolución para identificar cambios de forma visual es compleja y esto no permite hacer un diagnóstico rápido del efecto producido en el equipo. Su funcionalidad se limita en ciertas aplicaciones. Por otro lado, las cámaras termográficas de alto costo tienen la ventaja de contar con alta resolución de imagen, cuentan con ayudas visuales que permiten conocer la temperatura en un punto en específico, se muestran diferentes paletas de colores para visualizar mejor la distribución de calor, etc. Pero requieren un alto procesamiento para realizar un análisis más complejo. Para analizar los efectos producidos por los disturbios SAG, SWELL, armónicos y fluctuaciones nos basamos en la información e imágenes obtenidas por medio de la cámara FLIR A320.

Los resultados del trabajo realizado muestran que los casos de estudio correspondientes a los disturbios SAG, SWELL, armónicos y fluctuaciones afectan la operación de los motores de inducción reduciendo o incrementando su velocidad e incluso el torque de la máquina, incrementa las pérdidas del motor eléctrico tales como:

- Pérdidas mecánicas: se observó incremento de temperatura en la zona referente al rodamiento del lado carga del motor, este efecto causado por el incremento de velocidad que como consecuencia se obtiene mayor fricción de los rodamientos y la pista.
- Pérdidas magnéticas: al incrementar el voltaje por el efecto de los disturbios, el campo magnético del estator incrementa causando corrientes circundantes de Foucault creando campos magnéticos que se oponen al campo magnético del estator. Estas corrientes parásitas generan incrementos de temperatura.
- Pérdidas eléctricas: el incremento de corriente eléctrica como consecuencia de la presencia de los disturbios eléctricos maximiza las pérdidas por efecto Joule por el paso de un mayor flujo de corriente eléctrica a través del alambre de cobre de las bobinas del estator. Este efecto incrementa la temperatura en el motor eléctrico.

Es importante conocer los datos de placa de los motores eléctricos, las condiciones ambientales y condiciones de operación. Debido a que estos aspectos y una mala calidad de la energía pueden ser fatales para su funcionamiento.

Actualmente se cuenta con diferentes dispositivos que ayudan a los motores a trabajar de forma óptima ante la presencia de disturbios eléctricos, así como su monitoreo, por ejemplo: filtros de armónicos, UPS, DVR, terminadores, PQM, etc. Estos dispositivos permiten filtrar armónicos, eliminar el efecto de onda reflejada, mejorar el factor de potencia, monitorear disturbios eléctricos, etc. El uso de estos dispositivos se vuelve más esencial para proteger las máquinas y reducir costos por mala calidad de la energía, ya que ahora los sistemas de distribución de energía eléctrica exigen mantener una buena calidad de la energía y contar con sistemas de monitoreo. Por otra parte, el mercado cuenta con motores eléctricos que han mejorado el aislamiento para usarse en variadores de velocidad y arrancadores inteligentes que soportan el incremento de temperatura ocasionado por la presencia de armónicos, reduciendo el problema en nuestro motor eléctrico, sin embargo, la pérdida de energía sigue presente. Por ello la importancia del monitoreo de la calidad de la energía y el estado de nuestras máquinas. El uso de la termografía infrarroja como se presenta en este trabajo permite monitorear motores eléctricos y observar los efectos ocasionados por una mala calidad de la energía, esto permitirá detectar la presencia de disturbios eléctricos, diagnosticar fallas y prevenir daños en el motor eléctrico.

Como futuros trabajos, la detección e identificación de disturbios eléctricos en motores eléctricos aplicando termografía mediante la huella digital generada por los diferentes disturbios eléctricos, así como realizar estadísticas que permitan

hacer una valoración de las posibles soluciones a estos efectos. Por otra parte, el desarrollo de un sistema de generación de disturbios eléctricos que entregue mayor amplitud y pueda ser inyectado en las tres fases de un sistema trifásico como parte esencial de futuros trabajos.

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

Arizpe Islas, J. L., Neira Rosales, S., & López Escamilla, A. (Octubre 2012 - Octubre 2013). Calidad de energía y sistemas eléctricos de potencia. *MULTIDISCIPLINAS DE LA INGENIERÍA*, 29-54.

Bollen, M., & Gu, I. (2006). Signal Processing of power quality disturbances. John Wiley & Sons, Inc.

Boylestad, N. (2003). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. PEARSON Prentice Hall.

C. Stone, G., Bouler, E., & Dhirani, H. (2014). Electrical insulation for rotating machines: desing, evaluation, aging, testing, and repair. John Wiley & Sons Inc.

Chen, X., & Chen, J. (2011). Design of an arbitrary waveform signal generator. China: Procedia Engineering ELSEVIER.

Córcoles López, F., Pedra Dúran, J., & Salichs Vivancos, M. (1996). *Transformadores*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.

Costa, F. (Diciembre de 2014). Boundary Wavelet Coefficients for Real-Time Detection of Transients Induced by Faults and Power-Quality Disturbances. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL.29, No. 6.

Delgadillo Olvera, L. A., & Joaquín Chino, V. (22 de Mayo de 2013). DIAGNÓSTICO DEL MANTENIMIENTO A MOTORES JAULA DE ARDILLA APLICANDO TECNOLOGÍA TERMOGRAFÍA INFRARROJA. D.F., MÉXICO: IPN.

Delgadillo Olvera, L. A., Chino Vicente, J., Escutia Gómez, J., & Muñoz Lozano, L. (Mayo de 2013). Diagnóstico del mantenimiento a motores jaula de ardilla aplicando tecnología de termografía infrarroja. D.F., México: Instituto Politécnico Nacional.

Fandiño Toro, H. A. (2012). Diagnóstico e identificación de fallas en motores industriales a través del análisis de imágenes termográficas. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Departamento de ingeniería Eléctrica.

FENERCOM. (2011). 5. Aspectos sobre el calor y la temperatura. *Guía de la termografía infrarroja Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética*. Madrid, España: Gráficas Arias Montano, S.A.

FLIR. (2009). FLIR A320 Series Infrared Camera System. Hong Kong, China: FLIR Datasheet.

García Ramírez, A. G., Morales Hernandez, L. A., Osornio Rios, R. A., Benitez Rangel, J. P., García Perez, A., & Romero Troncoso, R. (2014). Fault detection in induction motors and the impact on the kinematic chain through thermographic analysis. San Juan del Rio, Querétaro, México: ELSEVIER Electric Power Systems Research.

Granados Lieberman, D., Romero Troncoso, R. d., & Osornio Ríos, R. A. (Julio de 2013). Análisis en maquinaria CNC ante variaciones de bajo voltaje y sus efectos en la calidad de la energía. San Juan del Río, Querétaro, México: Tesis Doctorado en Ingeniería en la Universidad Autónoma de Querétaro.

Gutierrez Páucar, A. (2000). *Teoría de Análisis de Máquinas Eléctricas*. Lima - Perú: UNI - FIEE.

Gutiérrez Quintanilla, E., Pérez Bernabe, H., & Rodríguez Doñante, R. (2008). Estructura general de un FPGA. *Aplicación y soluciones para lógica programable (FPGA)*.

Gutiérrez Torres, C., & Romero Troncoso, R. d. (2014). Sistema de generación y monitoreo de disturbios eléctricos. Santiago de Querétaro, Querétaro, México: Tesis de maestría en la Universidad Autónoma de Querétaro.

Hashemian, H. (2011). Wireless sensors for predictive maintenance of rotating equipment in research reactors. *Annals of Nuclear Energy*.

Holst, G. (2000). Common Sense Approach to Thermal Imaging PM86, SPIE press monograph. Winter Park.

Ibarra Castañedo, C., A. González, D., Bendada, H., & Maldague, X. (2005). Análisis de imágenes en Termografía Infrarroja.

IEEE. (1995). IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. IEEE Standards Board.

Indu Rani, B., Saravana Llango, G., & Nagamani, C. (2012). A three phase reference current generator for power electronic converters under distorted utility conditions. National Institute of Technology, India: International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies.

Iñigo Monedero, C. L., Roperro, J., García, A., Elena, J. M., & Montañó, J. C. (Julio de 2007). Classification of Electrical Disturbances in Real Time Using Neural Networks. España: IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 22, NO.3.

- Jantee, W., Oranpiroj, K., & Muangjai, W. (2014). Voltaje Sag Signal Generator Program for Testing Electrical Equipment. Tailandia: International Electrical Engineering Congress.
- Jashfar, S., Esmaili, S., Zareian-Jahromi, M., & Rahmanian, M. (02 de 10 de 2013). Classification of power quality disturbances using S-transform and TT-transform based on the artificial neural network. Iran: Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences.
- Morse, B. (2000). Lecture 4: Thresholding. Utah: Brigham Young University.
- Olarte C., W., Botero A., M., & Cñon Zabaleta, B. (2011). Aplicación de la termografía en el mantenimiento predictivo. Universidad Tecnológica de Pereira: Scientia et Technica Año VII, No. 48.
- Papamarkos, N., & Gatos, B. (1994). A new approach for multilevel threshold selection. CVGIP: Graphical Model and Image Processing.
- Penghui, L., Lijie, Z., Haijun, B., & Yanhua, Z. (2010). Power Quality Monitoring of Power System Based on Spectrum Analysis. School of information Technology Shenyang , University of Chemical Technology Shen Yang, China: IEEE.
- Picazo Ródenas, M., Royo, R., Antonino-Dviu, J., & Roger-Folch, J. (2011). Energy balance and Heatin Curves of electric motors based on Infrared Thermography. Universidad Politécnica de Valencia, España: IEEE.
- Royo, R., Antonino-Daviu, J., Roger-Folch, J., & Picazo Ródenas, M. (2013). Use of the infrared data for heating curve computation in induction motors: aplication to fault diagnosis. España: IEEE Universidad Politécnica de Valencia.
- Saucedo Martinez, D., & Taxis Villagran, J. (2008). Factores que afectan la calidad de la energía y su solución. Distrito Federal, México: IPN.
- Serway, R., & Jewett, J. (2008). 20.7 Mecanismos de transferencia de energía. *Física para ciencias e ingeniería Volumen 1*. CENGAGE Learning.
- Serway, R., & Jewett, J. (2009). 34. Ondas electromagnéticas. *Física para ciencias e ingeniería con Física Moderna volumen 2*. CENGAGE Learning.
- SKF Group. (2017). Pruebas y diagnóstico de motores eléctricos en servicio. *Electro Industria*, 58-65.
- Taib, S., Jadin, M., & Kabir, S. (2012). Thermal Imaging for Enhancing Inspection Reliability. InTech.
- Terzija, V., Stanojevic, V., & Rebizant, W. (2008). Electrical Power Quality Indices Estimation during Severe Signal Distortions in Medium Voltaje Networks. IEEE.

Wildi, T. (2007). *Máquinas Eléctricas y Sistemas De Potencia*. PEARSON.

XILINX. (2015). *What is a FPGA?* Obtenido de <http://www.xilinx.com/fpga/>

Dirección General de Bibliotecas UAQ