



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERÍAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:

“PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO DE MONITOREO Y CONTROL DE TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LABVIEW, UTILIZANDO LA TARJETA DE INTERFAZ NI SB-RIO”

AUTORES:

JORGE LUIS MEJÍA SOTAMBA

MOISÉS EDUARDO MONTESDEOCA PALADINES

DIRECTOR:

ING. ORLY GUZMÁN KURE

GUAYAQUIL, JULIO DEL 2012

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

“La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestas en esta tesis, nos corresponden exclusivamente, y, el patrimonio intelectual de la misma a la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR”

Guayaquil, Julio del 2012.

JORGE LUIS MEJÍA SOTAMBA.

MOISÉS MONTESDEOCA PALADINES.

Ing. Orly Guzmán Kure.

CERTIFICA:

Que la tesis ha sido desarrollada en su totalidad por los señores Jorge Luis Mejía Sotamba y Moisés Eduardo Montesdeoca Paladines bajo mi dirección, por lo que autorizo su presentación.

Guayaquil, Julio del 2012.

Ing. Orly Guzmán Kure

Director

AGRADECIMIENTO

A la “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR SEDE GUAYAQUIL” sumados a su excelentísimo cuerpo de docentes que hicieron de nosotros personas de buen proceder, con capacidad y criterio para comprometernos con cada una de nuestras acciones y actuar de manera ética, al Ing. José Luis Pesantes Corral ingeniero de aplicación de la National Instrument, a la Eléctrica de Guayaquil, al Ing. Orly Guzmán, Ing. Luis Serrano de la CNEL por sus buenas ideas y criterios en beneficio de esta tesis.

Los Autores

DEDICATORIA

A DIOS

A mi papá Luis Mejía, mi abuelita María, quienes siempre serán para mí un motivo de inspiración y una razón de mi vida.

A toda mi familia en especial a Lourdes, Anita, Cecilia, Roberto, Carlos, Rosa, mi abuelo Manuel Mejía para quienes siempre soy motivo de orgullo.

A las autoridades de la Universidad Politécnica Salesiana, Ing. Pablo Parra, Ing. Cesar Cáceres, a mis amigos con los cuales pasamos buenos momentos en nuestros años de formación.

A todos quienes consideran que la sencillez, perseverancia, y el estudio es la mejor alternativa para el desarrollo humano y profesional.

JORGE LUIS MEJÍA S.

DEDICATORIA

A DIOS

A mi madre Sicilia Paladines y a mi padre Efraín Montesdeoca quienes me brindaron todo su apoyo y comprensión durante mi periodo como estudiante universitario, a mis hermanos Israel y Paul quienes estuvieron hay para darme consejos, a toda mi familia en general los cuales fueron pilar importante para cumplir este objetivo.

A mi novia Yokastha Zapata por su comprensión y apoyo durante mi periodo como estudiante.

A mis compañeros de aula con los cuales siempre nos apoyamos incondicional para cumplir el objetivos de terminar la carrera a los mismos que deseo éxito en su vida profesional

A los docentes y autoridades universitarias los mismos que con sus conocimientos me permitieron fórmame tanto intelectualmente como éticamente para mi carrera como profesional.

MOISES MONTESDEOCA P.

RESUMEN

Hoy en día es muy importante para las grandes y medianas industrias alargar la vida útil de sus equipos y máquinas, para garantizar su disponibilidad y productividad en planta. Subsiguiente a esto la realización del presente proyecto presenta el desarrollo de la electrónica con aplicación a la adecuación de señales eléctricas y programación con la aplicación, para la adquisición de datos que hace posible la elaboración de una herramienta que constituya parte fundamental para control y monitoreo de transformadores de distribución.

Este proyecto propone una alternativa para obtener la eficiencia, modelo equivalente, corrientes de falla, predecir y detectar el sobre calentamiento del transformador de manera temprana tanto en transformadores nuevos, usados o en periodos de mantenimiento, monitoreando señales de tensión, corriente y temperatura en un transformador, antes de ser insertado o reinsertado a las redes de distribución , de acuerdo a las tendencias obtenidas en las pruebas básicas de rutina considerando que cualquier irregularidad en uno de estos parámetros pueda ser adquirido y presentado en el monitor de un computador por medio del programa Labview.

La implementación del software Labview, presenta las señales adquiridas en tiempo real, además estos datos son adquiridos y almacenados en una base de datos para tener un historial del funcionamiento del equipo, el objetivo de monitorear estas variables nos permite determinar si el equipo cumple las normas como INEN, IEEE, IEC y ANSI para transformadores de distribución.

El manejo de la ventana programada en Labview en nuestro modulo por parte del usuario es didáctica ya que maneja un lenguaje amigable y comprensible para el mismo, permitiendo comprender cada uno de los datos presentados y los rangos permitidos de las variables para un transformador de distribución en pleno funcionamiento.

INDICE GENERAL

| | |
|---------------------------------------|-------|
| PORTADA..... | i |
| DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD | ii |
| CERTIFICACIÓN | iii |
| AGRADECIMIENTO | iv |
| DEDICATORIA | v |
| RESUMEN..... | vii |
| INDICE GENERAL | viii |
| INDICE | ix |
| INDICE DE GRÁFICOS | xv |
| INDICE DE TABLAS..... | xxi |
| INDICE DE FIGURAS..... | xxiii |

INDICE

CAPÍTULO I

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

| | | |
|--------|--|----|
| 1.1 | Importancia de los transformadores en la vida moderna..... | 1 |
| 1.2 | Principio de Funcionamiento..... | 2 |
| 1.3 | El transformador Ideal..... | 2 |
| 1.4 | El circuito equivalente de un transformador..... | 4 |
| 1.5 | Clasificación y utilización de los transformadores..... | 5 |
| 1.5.1 | Por la operación..... | 5 |
| 1.5.2 | Transformadores de distribución..... | 5 |
| 1.6 | Por el número de fases..... | 7 |
| 1.6.1 | Transformador monofásico..... | 7 |
| 1.6.2 | Banco Trifásico con transformadores monofásicos..... | 7 |
| 1.7 | Transformador convencional vs autoprotegido | 8 |
| 1.8 | Por la forma del núcleo..... | 9 |
| 1.8.1 | Núcleo acorazado..... | 9 |
| 1.8.2 | Núcleo tipo columnas..... | 10 |
| 1.9 | Por las condiciones de servicio..... | 10 |
| 1.9.1 | Para uso interior..... | 10 |
| 1.9.2 | Para uso a la interperie..... | 11 |
| 1.10 | En función en los lugares de instalación..... | 11 |
| 1.10.1 | Tipo poste..... | 11 |
| 1.10.2 | Tipo subestación..... | 11 |
| 1.10.3 | Tipo pedestal..... | 11 |
| 1.10.4 | Tipo sumergible..... | 12 |
| 1.10.5 | Límites de calentamiento para transformadores sumergidos en aceite..... | 12 |
| 1.11 | De acuerdo al tipo de aislamiento..... | 12 |
| 1.11.1 | Tipo OA..... | 13 |
| 1.11.2 | Tipo OA/FA/FOA..... | 13 |
| 1.11.3 | Tipo FOA..... | 13 |

| | | |
|----------|--|----|
| 1.11.4 | Tipo FOW..... | 13 |
| 1.12 | Partes de un transformador..... | 13 |
| 1.12.1 | Circuito magnético..... | 14 |
| 1.12.2 | Circuito eléctrico..... | 14 |
| 1.12.3 | Sistema de aislamiento..... | 15 |
| 1.12.4 | Requisitos de funcionamiento en condiciones de altitud y temperaturas diferentes de las normalizada..... | 17 |
| 1.12.4.1 | Aislamiento norma INEN 2128..... | 17 |
| 1.13 | Tanque, partes y accesorios..... | 18 |

CAPÍTULO II

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO TENSIÓN EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1. | Tensión..... | 20 |
| 2.1.1 | Potencial eléctrico..... | 20 |
| 2.1.2 | Campo electrostático..... | 20 |
| 2.2 | Tensión continua..... | 20 |
| 2.3 | Fuente simétrica..... | 21 |
| 2.4 | Tensión alterna..... | 22 |
| 2.4.1 | Valor promedio..... | 23 |
| 2.4.2 | Valor R.M.S..... | 24 |
| 2.5. | Tensión nominal de los devanados..... | 24 |
| 2.5.1 | Devanado Primario..... | 24 |
| 2.5.2 | Devanado Secundario..... | 24 |
| 2.5.3 | Alimentación de un transformador..... | 25 |
| 2.6. | Adecuación de la tensión | 25 |
| 2.7. | Divisor de tensión..... | 26 |
| 2.8. | Amplificador Operacional..... | 27 |
| 2.8.1 | Configuración no inversor..... | 27 |
| 2.9 | Amplificador operacional tipo UA741..... | 28 |
| 2.9.1 | Características..... | 29 |

| | | |
|--------|--|----|
| 2.9.2 | Aplicaciones..... | 29 |
| 2.10 | Relación lineal del circuito que adecua la señal de tensión por canal..... | 29 |
| 2.10.1 | Canal 1..... | 30 |
| 2.10.2 | Canal 2..... | 31 |
| 2.10.3 | Canal 3..... | 32 |

CAPÍTULO III

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO DE CORRIENTE EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

| | | |
|---------|--|----|
| 3.1 | Introducción | 33 |
| 3.2 | Tipos de sensores de corriente..... | 33 |
| 3.2.1 | Inductivos..... | 33 |
| 3.2.2 | Resistivos <i>Shunt</i> | 34 |
| 3.2.3 | Magnéticos (Efecto Hall)..... | 34 |
| 3.2.4 | Bobina <i>Rogowsky</i> | 34 |
| 3.3 | Requerimientos..... | 34 |
| 3.4 | Parámetros de selección..... | 34 |
| 3.4.1 | Sensor de corriente de efecto hall..... | 35 |
| 3.4.1.1 | Definición..... | 35 |
| 3.4.1.2 | Utilización..... | 37 |
| 3.5 | Adquisidor de la señal de corriente | 37 |
| 3.5.1 | Circuito para alimentación de sensores de corriente..... | 37 |
| 3.5.2 | Cálculo de la salida del sensor de corriente..... | 39 |
| 3.5.3 | Programa en Labview FPGA..... | 42 |

CAPÍTULO IV

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO DE TEMPERATURA EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | La temperatura..... | 45 |
| 4.2 | Medios de enfriamiento del transformador | 46 |

| | | |
|----------|---|----|
| 4.2.1 | Primera letra..... | 46 |
| 4.2.2 | Segunda letra..... | 46 |
| 4.2.3 | Tercera letra..... | 46 |
| 4.2.4 | Cuarta letra..... | 47 |
| 4.3 | Límite de calentamiento del transformador | 47 |
| 4.3.1 | Altitud..... | 48 |
| 4.3.2 | Temperatura del agente refrigerante..... | 48 |
| 4.3.3 | Clase de materiales..... | 49 |
| 4.4 | Factores que afectan la vida útil del transformador..... | 50 |
| 4.5 | Modelo térmico del transformador | 52 |
| 4.6 | Elevación de la temperatura del aceite | 54 |
| 4.7 | Elevación de la temperatura promedio de los devanados | 55 |
| 4.8 | Consideraciones de la temperatura en el punto más caliente..... | 56 |
| 4.9 | Ecuaciones de envejecimiento..... | 56 |
| 4.10 | Sensor de temperatura tipo LM35..... | 60 |
| 4.10.1 | Características..... | 61 |
| 4.10.2 | Aplicación..... | 61 |
| 4.10.3 | Linealización..... | 63 |
| 4.11 | La termocupla..... | 64 |
| 4.11.1 | Tipos de termocupla..... | 65 |
| 4.11.2 | Linealización..... | 66 |
| 4.11.2.1 | Ecuación de la recta de la salida de la termocupla..... | 67 |
| 4.12 | Adquisición y presentación de datos mediante el software Labview..... | 69 |
| 4.12.1 | Programación variable de temperatura..... | 70 |

CAPÍTULO V

ENTORNO LABVIEW FPGA Y ADQUISICIÓN DE DATOS

| | | |
|-------|--|----|
| 5.1 | Descripción del FPGA..... | 77 |
| 5.2 | Evolución de los dispositivos programables..... | 78 |
| 5.3 | Arquitectura de la FPGA <i>SPARTAN</i> | 78 |
| 5.3.1 | Bloques de entrada/salida (<i>Input/Output Blocks – IOBs</i>)..... | 79 |

| | | |
|-------|--|----|
| 5.3.2 | Bloques lógicos configurables (<i>Configurable Logic Blocks – CLBs</i>)..... | 79 |
| 5.3.3 | Bloques de memoria RAM (<i>Block RAM</i>)..... | 79 |
| 5.3.4 | Administradores digitales de reloj (<i>Digital Clock Managers – DCMs</i>)..... | 79 |
| 5.4 | Programación de una FPGA..... | 80 |
| 5.5 | Programación gráfica de alto nivel..... | 81 |
| 5.6 | Módulo Labview FPGA..... | 81 |
| 5.7 | Entorno Labview FPGA..... | 84 |
| 5.7.1 | Programación básica Labview FPGA..... | 84 |
| 5.7.2 | Funciones de la paleta FPGA..... | 87 |
| 5.7.3 | Paleta de funciones Labview FPGA..... | 87 |
| 5.8 | Compilación FPGA VI..... | 89 |
| 5.9 | Creación de un VI en <i>real time</i> | 91 |

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE LAS SEÑALES

| | | |
|---------|--|-----|
| 6.1 | Introducción..... | 95 |
| 6.2 | Diagrama de flujo de adquisición de señales..... | 95 |
| 6.3 | Descripción de la tarjeta NI-Sbrío 9631..... | 96 |
| 6.3.1 | Sistema <i>EMBEBIDO NI SINGLE BOARD RIO</i> | 96 |
| 6.3.2 | Características..... | 97 |
| 6.3.3 | Software necesario para el proyecto..... | 100 |
| 6.4 | Transductores..... | 100 |
| 6.4.1 | Procesamiento..... | 102 |
| 6.4.1.1 | Almacenamiento de datos usando FPGA FIFOs..... | 102 |
| 6.4.2 | Creación de un FPGA FIFO..... | 103 |
| 6.4.3 | Ventajas y desventajas de programar FPGA en forma gráfica con Labview..... | 105 |
| 6.5 | Análisis del transformador..... | 105 |
| 6.5.1 | Almacenamientos de datos en Word..... | 107 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 6.5.2 | Pruebas..... | 108 |
| 6.5.3 | Banco de pruebas..... | 109 |
| 6.6 | Circuito equivalente exacto de un transformador real..... | 109 |
| 6.6.1 | Pérdidas en el hierro..... | 110 |
| 6.6.1.1 | Perdidas por histéresis magnéticas..... | 110 |
| 6.6.1.2 | Perdida por corrientes parasitas..... | 111 |
| 6.6.2 | Circuitos equivalentes aproximados de un transformador..... | 115 |
| 6.6.3 | Determinación de los valores de los componentes en el modelo del transformador..... | 117 |
| 6.6.4 | Prueba en vacío..... | 117 |
| 6.6.5 | Prueba de cortocircuito..... | 121 |
| 6.6.6 | Corrientes de magnetización..... | 126 |
| 6.6.7 | Rendimiento..... | 128 |
| 6.6.8 | Análisis con carga..... | 130 |
| 6.7 | Análisis de temperatura..... | 136 |
| 6.7.1 | Inicio de la prueba de calentamiento..... | 137 |
| 6.7.2 | Elevación de la temperatura en el aceite..... | 139 |
| 6.7.3 | Elevación de temperatura de los devanados..... | 140 |
| 6.7.3.1 | Procedimiento simplificado para obtención de datos..... | 141 |
| 6.8 | Análisis de resultados..... | 146 |

CAPÍTULO VII

MANUAL DE USUARIO

| | | |
|-----|--|-----|
| 7.1 | Introducción..... | 149 |
| 7.2 | Objetivos de este manual..... | 149 |
| 7.3 | Que se necesita para empezar..... | 150 |
| 7.4 | Iniciación del programa..... | 151 |
| 7.5 | Uso del teclado..... | 154 |
| 7.6 | Tips para trabajar con LabVIEW..... | 155 |
| 7.7 | Circuitos y alimentación del módulo..... | 155 |
| 7.8 | Transformador de distribución..... | 157 |

| | |
|---|-----|
| 7.9 Adquisición de señales de tensión-corriente y análisis del transformador... | 157 |
| 7.10 Prueba # 1..... | 159 |
| 7.11 Prueba # 2..... | 160 |
| 7.11.1 Análisis con carga..... | 162 |
| 7.12 Prueba # 3..... | 162 |
| 7.13 Simulación de carga..... | 164 |
| 7.14 Potencia de entrada vs potencia de salida (PIN-POUT)..... | 165 |
| 7.15 Análisis de temperatura..... | 167 |

INDICE DE GRÁFICOS

CAPÍTULO I

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

| | |
|---|----|
| Gráfico 1.1 Diagrama General de un Sistema Eléctrico de Potencia..... | 2 |
| Gráfico 1.2 Transformador Ideal..... | 3 |
| Gráfico 1.3 Modelo Equivalente de un Transformador Real..... | 5 |
| Gráfico 1.4 Transformador de distribución con secundario de 120V/240V, con conductor central..... | 6 |
| Gráfico 1.5 Esquema Eléctrico de un transformador monofásico..... | 7 |
| Gráfico 1.6 Esquema Eléctrico de un banco monofásico..... | 8 |
| Gráfico 1.7 Diagrama unifilar de transformador autoprotegido y convencional..... | 9 |
| Gráfico 1.8 Forma constructiva de un núcleo tipo columna..... | 10 |
| Gráfico 1.9 Partes de un transformador de distribución tipo tanque..... | 18 |

CAPÍTULO II

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO TENSIÓN EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

| | |
|---|----|
| Gráfico 2.1 Gráfica que representa a la tensión continua..... | 21 |
| Gráfico 2.2 Diagrama de la fuente simétrica..... | 21 |

| | |
|--|----|
| Gráfico 2.3 Forma de onda tensión alterna..... | 22 |
| Gráfico 2.4 Ciclo para una onda sinusoidal..... | 23 |
| Gráfico 2.5. Circuito acondicionador de tensión..... | 25 |
| Gráfico 2.6 Divisor de tensión..... | 26 |
| Gráfico 2.7 Símbolo para un amplificador operacional..... | 27 |
| Gráfico 2.8 Amplificador operacional configuración no inversor..... | 28 |
| Gráfico 2.9 Distribución de pines en un circuito integrado UA741..... | 28 |
| Gráfico 2.10 Muestra una gráfica para los valores de la tabla 2.1..... | 30 |
| Gráfico 2.11 Muestra una gráfica para los valores de la tabla 2.2..... | 31 |
| Gráfico 2.12 Muestra una gráfica para los valores de la tabla 2.3..... | 32 |

CAPÍTULO III

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO DE CORRIENTE EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

| | |
|--|----|
| Gráfico 3.1 Detalle del Sensor de efecto hall..... | 36 |
| Gráfico 3.2 Medidas y detalle de alimentación el sensor de corriente de efecto hall utilizado..... | 36 |
| Gráfico 3.3 Simulación del Circuito utilizado para el sensor de corriente..... | 37 |
| Gráfico 3.4 Diseño de la placa electrónica para medición de corriente..... | 38 |
| Gráfico 3.5. Relación de salida del sensor de corriente HASS 50-S, offset 2.5V..... | 40 |
| Gráfico 3.6. Relación de salida del sensor de corriente HASS 100-S, offset 2.5V... | 42 |
| Gráfico 3.7 Programación en FPGA de la adquisición de la señal de corriente..... | 43 |
| Gráfico 3.8 Pantalla principal del control y adquisición de la señal de corriente..... | 44 |

CAPÍTULO IV

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO DE TEMPERATURA EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

| | |
|---|----|
| Gráfico 4.1. Diagrama simplificado de la distribución de temperaturas en el transformador..... | 53 |
| Gráfico 4.2. La curva de vida por unidad relaciona, vida del aislamiento P.U, con la temperatura más caliente del bobinado..... | 57 |
| Gráfico 4.3. Se muestra los valores de FAA vs temperatura del punto más caliente..... | 58 |
| Gráfico 4.4. Gráfica de resultados de la vida útil y factor de envejecimiento vs el punto más caliente del transformador..... | 59 |
| Gráfico 4.5 Circuito que adecua la señal entregada por el LM35..... | 62 |
| Gráfico 4.6 La misma muestra la temperatura (Tin) Vs tensión (Vout) de salida del circuito que adecua la señal del LM35..... | 64 |
| Gráfico 4.7. Diagrama de una termocupla tipo J..... | 65 |
| Gráfico 4.8 Gráfica de rango de temperaturas (°C) y tensiones máximas (mV) de diferentes tipos de termocupla..... | 66 |
| Gráfico 4.9 Circuito que realiza la linealización y adecua la señal entregada por la termocupla tipo J..... | 67 |
| Gráfico 4.10 Relación, tensión de la termocupla vs temperatura..... | 68 |
| Gráfico 4.11 Gráfica del circuito que adecua la señal de tensión emitida por la termocupla..... | 69 |
| Gráfico 4.12 Programación en FPGA de la adquisición de la señal de temperatura.. | 71 |
| Gráfico 4.13 Ventana de control para el parámetro de temperatura, muestran los datos adquiridos durante las pruebas realizadas..... | 72 |
| Gráfico 4.14 En esta ventana se muestra la programación para los datos adquiridos por la termocupla y LM35..... | 73 |
| Gráfico 4.15 Muestra el ingreso de la ecuación para determinar la temperatura del punto más caliente de un transformador | 74 |
| Gráfico 4.16. Muestra el ingreso y cálculo de vida absoluta, factor de aceleración, y la tasa de envejecimiento relativo del transformador..... | 74 |
| Gráfico 4.17. Panel de control de análisis de temperatura..... | 75 |

| | |
|--|----|
| Gráfico 4.18. Ventana de ayuda en la realización de la medida de resistencia en los devanados..... | 76 |
|--|----|

CAPÍTULO V

ENTORNO LABVIEW FPGA Y ADQUISICIÓN DE DATOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 5.1 Arquitectura de la <i>Spartan 3</i> | 80 |
| Gráfico 5.2 Plataforma de Labview Embebida..... | 82 |
| Gráfico 5.3 Flujo de compilación de Labview FPGA..... | 83 |
| Gráfico 5.4 Lógica del FPGA y Labview..... | 83 |
| Gráfico 5.5 Creación de un nuevo proyecto..... | 84 |
| Gráfico 5.6 Agregando dispositivo nuevo..... | 85 |
| Gráfico 5.7 Add NI-Sbrio9631..... | 85 |
| Gráfico 5.8 Dispositivo agregado al proyecto..... | 86 |
| Gráfico 5.9 Nuevo proyecto creado..... | 86 |
| Gráfico 5.10 E/S agregadas al diagrama de bloques..... | 87 |
| Gráfico 5.11 Paleta de Funciones..... | 89 |
| Gráfico 5.12 Compilación del FPGA VI..... | 90 |
| Gráfico 5.13 Compilación terminada..... | 91 |
| Gráfico 5.14 Creación de un VI en Real Time..... | 91 |
| Gráfico 5.15 Open FPGA VI Reference..... | 92 |
| Gráfico 5.16 <i>Read/Write Control</i> | 93 |
| Gráfico 5.17 <i>Close FPGA VI Reference</i> | 93 |
| Gráfico 5.18 Ubicación del programa FPGA en real time..... | 94 |
| Gráfico 5.19 <i>Real Time VI</i> | 94 |

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE LAS SEÑALES

| | |
|--|----|
| Gráfico 6.1 Esquema de un DAQ en diagrama de flujo..... | 96 |
| Gráfico 6.2 Gráfica CB-50LP, conector de 50 pines para conexión directa..... | 98 |

| | |
|--|-----|
| Gráfico 6.3 NB1, cable de listón 50 pines..... | 98 |
| Gráfico 6.4 NI Sbrío Pinout de I/O Conector J7, Análogas I/O..... | 99 |
| Gráfico 6.5 Ubicación de los transductores..... | 101 |
| Gráfico 6.6 Esquema del proyecto..... | 101 |
| Gráfico 6.7 Proceso de almacenamiento y transferencia de datos en un buffer FIFO..... | 102 |
| Gráfico 6.8 Creación de una nueva memoria FIFO..... | 103 |
| Gráfico 6.9 Tipo de memoria FIFO..... | 104 |
| Gráfico 6.10 Memoria FIFO, adquiriendo datos de sensores..... | 104 |
| Gráfico 6.11 Análisis del transformador prueba de corto circuito..... | 106 |
| Gráfico 6.12 Análisis del transformador análisis bajo carga y rendimiento..... | 106 |
| Gráfico 6.13 Diagrama de bloques del almacenamiento de datos análisis del transformador y temperatura..... | 107 |
| Gráfico 6.14 Ciclo de Histéresis de un transformador..... | 110 |
| Gráfico 6.15 Chapas del núcleo..... | 112 |
| Gráfico 6.16 El modelo de un transformador real..... | 113 |
| Gráfico 6.17(a) El modelo referido a su nivel de tensión primario..... | 114 |
| Gráfico 6.17 (b) El modelo referido a su nivel de tensión secundario..... | 114 |
| Gráfico 6.18 (a) El modelo aproximado, referido al lado primario..... | 115 |
| Gráfico 6.18 (b) El modelo aproximado, referido al lado secundario..... | 116 |
| Gráfico 6.19 (a) El modelo aproximado sin rama de excitación, referido al lado primario..... | 116 |
| Gráfico 6.19 (b) El modelo aproximado sin rama de excitación, referido al lado secundario..... | 117 |
| Gráfico 6.20 Conexión para la prueba en vacío..... | 118 |
| Gráfico 6.21 Panel de control de prueba en vacío..... | 120 |
| Gráfico 6.22 Conexión para la prueba de corto circuito..... | 121 |
| Gráfico 6.23 Panel de control de prueba de corto circuito..... | 124 |
| Gráfico 6.24 Panel de resultados del circuito equivalente, referido lado de baja tensión | 125 |
| Gráfico 6.25 Corrientes dentro del circuito equivalente..... | 128 |
| Gráfico 6.26 Análisis con carga en el transformador | 131 |
| Gráfico 6.27 Esquema de medición de parámetros y canales analógicos..... | 135 |

| | | |
|--------------|--|-----|
| Gráfico 6.28 | Análisis de potencia de entrada vs potencia de salida en Labview... | 135 |
| Gráfico 6.29 | Análisis de temperaturas, (a) resultados, (b) indicadores temperaturas internas..... | 145 |

CAPÍTULO VII

MANUAL DE USUARIO

| | | |
|--------------|---|-----|
| Gráfico 7.1 | Pantalla inicial..... | 151 |
| Gráfico 7.2 | Pantalla de opciones..... | 151 |
| Gráfico 7.3 | Apertura del archivo..... | 152 |
| Gráfico 7.4 | Apertura del programa principal..... | 152 |
| Gráfico 7.5 | Programa principal, sub VI's, programa en FPGA..... | 153 |
| Gráfico 7.6 | Pestañas de navegación..... | 154 |
| Gráfico 7.7 | Sistema de control y monitoreo..... | 158 |
| Gráfico 7.8 | Prueba en vacío..... | 159 |
| Gráfico 7.9 | Ingreso de resultados obtenidos de la prueba en vacío..... | 160 |
| Gráfico 7.10 | Prueba de cortocircuito..... | 161 |
| Gráfico 7.11 | Ingreso de resultados obtenidos de la prueba de cortocircuito..... | 161 |
| Gráfico 7.12 | Presentación de datos medidos..... | 164 |
| Gráfico 7.13 | Simulación de carga y presentación de resultados..... | 165 |
| Gráfico 7.14 | Presentación de resultados de potencia, eficiencia, índice de carga...166 | |
| Gráfico 7.15 | Presentación de resultados en tablas de registro..... | 166 |
| Gráfico 7.16 | Presentación de ayuda..... | 167 |
| Gráfico 7.17 | Presentación de la medición obtenida por los sensores de temperatura..... | 169 |
| Gráfico 7.18 | Presentación de los resultados obtenidos por los sensores de temperatura..... | 170 |
| Gráfico 7.19 | Presentación de ayuda para análisis de parámetros de normativas.... | 171 |
| Gráfico 7.20 | Finalización de la adquisición de datos y análisis de resultados..... | 171 |

INDICE DE TABLAS

CAPÍTULO I

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Tabla 1.1 La altura y su factor de corrección para rigidez dieléctrica.....17

Tabla 1.2 Partes de un transformador de distribución.....19

CAPÍTULO II

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO TENSIÓN EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Tabla 2.1. Tabla de valores para canal 1 de tensión30

Tabla 2.2. Tabla de valores para canal 2 de tensión31

Tabla 2.3. Tabla de valores para canal 3 de tensión.....32

CAPÍTULO III

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO DE CORRIENTE EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Tabla 3.1. Tabla especificaciones, sensor de corriente HASS 50-S.....39

Tabla 3.2. Salida del sensor de corriente HASS 50-S.....40

Tabla 3.3 Tabla especificaciones, sensor de corriente HASS 100-S.....41

Tabla 3.4 Salida del sensor de corriente HASS 100-S.....42

CAPÍTULO IV

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO DE TEMPERATURA EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

| | |
|--|----|
| Tabla 4.1. Orden de los símbolos para la designación del método de refrigeración según norma NTC 800..... | 47 |
| Tabla 4.2. Temperatura promedio máxima permisible del aire refrigerante a la potencia nominal del transformador..... | 48 |
| Tabla 4.3. Límites de calentamiento de los aislamientos de acuerdo a su clase..... | 49 |
| Tabla 4.4. Tasa de envejecimiento relativo por temperatura del punto más caliente..... | 60 |
| Tabla 4.5. Pruebas de temperatura Vs tensión de salida del LM35..... | 62 |
| Tabla 4.6. Pruebas de temperatura Vs tensión de salida del circuito que adecua la señal de temperatura..... | 63 |
| Tabla 4.7 Tipos de termocupla..... | 65 |
| Tabla 4.8 Valores de salida de tensión Vs temperatura de la termocupla..... | 68 |

CAPÍTULO V

ENTORNO LABVIEW FPGA Y ADQUISICIÓN DE DATOS

| | |
|---|----|
| Tabla. 5.1 Características de FPGA <i>Spartan</i> | 80 |
|---|----|

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE LAS SEÑALES

| | |
|---|-----|
| Tabla. 6.1 Características de la tarjeta Sbrío utilizada..... | 97 |
| Tabla 6.2 Configuración de entradas diferenciales..... | 99 |
| Tabla. 6.3 Características del módulo didáctico..... | 108 |
| Tabla. 6.4 Características del transformador..... | 108 |
| Tabla 6.5 Resultados de pruebas en vacío..... | 120 |
| Tabla 6.6 Resultados de pruebas de corto circuito..... | 125 |
| Tabla 6.7 Datos para cálculo teórico..... | 132 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 6.8 Resultados de análisis teórico | 133 |
| Tabla 6.9 Resultados prácticos con carga en el transformador..... | 134 |
| Tabla 6.10 Resultados de prueba con carga en el transformador..... | 136 |
| Tabla 6.11 Resultados prueba de calentamiento..... | 144 |
| Tabla 6.12 Rangos de temperatura según normas INEN..... | 146 |
| Tabla 6.13 Tasa de envejecimiento relativo por temperatura del punto más caliente..... | 147 |
| Tabla 6.14 Tabla de pérdidas en los ensayos de vacío y corto circuito según norma INEN 2114..... | 148 |

CAPÍTULO VII

MANUAL DE USUARIO

| | |
|---|-----|
| Tabla 1.1 Detalle de contenido de pestañas de navegación..... | 153 |
| Tabla 1.2 Detalle de teclas de navegación..... | 154 |
| Tabla 1.3 Detalle de atajos desde el teclado..... | 155 |
| Tabla 1.4 Detalle de canal 1 de tensión y canal 3 y 4 de corriente..... | 163 |
| Tabla 1.5 Detalle de canal 2 de tensión y canal 5 de corriente..... | 165 |
| Tabla 1.6 Detalle de canal 6 de la termocupla y canal 7 del lm35..... | 167 |

INDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

| | |
|---|----|
| Figura 1.1 Transformador de distribución..... | 6 |
| Figura 1.2 Forma constructiva de un núcleo acorazado..... | 10 |
| Figura 1.3 Circuito Magnético de un transformador de distribución..... | 14 |
| Figura 1.4 Circuito Eléctrico de un transformador de distribución..... | 15 |
| Figura 1.5 Sistemas de aislamiento de un transformador de distribución..... | 16 |

CAPÍTULO II

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO TENSIÓN EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Figura 2.1 Acople de fuente simétrica al módulo.....22

Figura 2.2 (a) Acople al módulo del circuito con tres canales que adecua la señal de tensión.(b) Pistas impresas de circuito que adecua la señal de tensión.....26

CAPÍTULO III

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO DE CORRIENTE EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Figura 3.1 Montaje de elementos para alimentar al sensor de corriente.....38

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE LAS SEÑALES

Figura 6.1 Tarjeta de adquisición de datos Sbrío-9631.....98

Figura 6.2 (a) Módulo didáctico de adquisición de señales.....109

Figura 6.2 (b) Transformador de distribución.....109

Figura 6.3 Resultados prueba de circuito abierto.....121

Figura 6.4 Prueba de corto circuito.....122

Figura 6.5 Resultado prueba de corto circuito.....122

Figura 6.6 (a, b) Entrada de canales de tensión y corriente, (a) Entrada de tensión, (b) entradas y salidas del transformador.....131

Figura 6.7 Análisis de temperatura.....137

Figura 6.8 Toma de medida de resistencia en los devanados en frio, (a) resistencia en alta tensión, (b) resistencia en baja tensión.....138

Figura 6.9 Toma de medida de resistencia en los devanados después de la prueba, (a) resistencia en alta tensión, (b) resistencia en baja tensión.....138

| | |
|--|-----|
| Figura 6.10 Toma de temperatura, (a) parte inferior del tanque, (b) parte superior del tanque..... | 140 |
| Figura 6.11 Toma de temperatura (a) ambiente, (b) aceite por medio de termocupla..... | 142 |
| Figura 6.12 Transformador conectado a corriente nominal 100%..... | 142 |

CAPÍTULO VII

MANUAL DE USUARIO

| | |
|---|-----|
| Figura 7.1 Alimentación del módulo..... | 156 |
| Figura 7.2 Regleta de alimentación, breaker de protección, fuente de alimentación de circuitos..... | 156 |
| Figura 7.3 Alimentación del transformador y conexión de la carga..... | 162 |
| Figura 7.4 Entradas del sensor de temperatura del aceite y del sensor de temperatura ambiente..... | 168 |

| | |
|-------------------|-----|
| CONCLUSIONES..... | 172 |
|-------------------|-----|

| | |
|----------------------|-----|
| RECOMENDACIONES..... | 175 |
|----------------------|-----|

| | |
|-------------|-----|
| ANEXOS..... | 177 |
|-------------|-----|

| | |
|---------------------------|-----|
| GLOSARIO DE TÉRMINOS..... | 192 |
|---------------------------|-----|

| | |
|-------------------|-----|
| BIBLIOGRAFÍA..... | 197 |
|-------------------|-----|

CAPÍTULO I

TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

1.1 IMPORTANCIA DE LOS TRANSFORMADORES EN LA VIDA MODERNA.

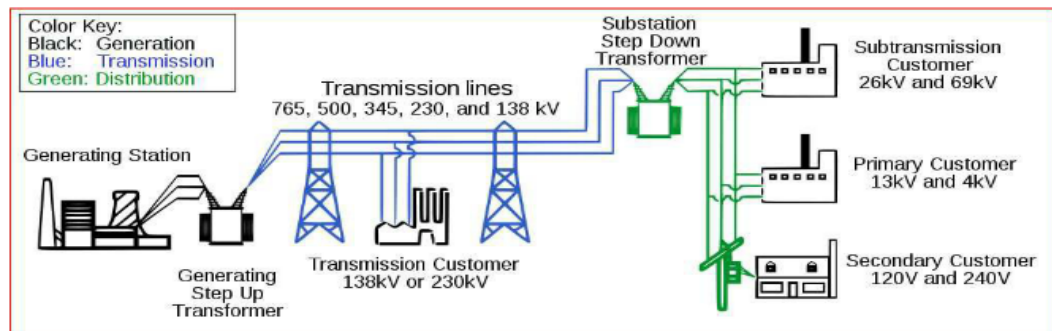
El primer sistema de distribución de potencia que se uso en Estados Unidos fue uno de corriente directa de 120V inventado por Thomas Alva Edison para suministrar potencia a las bombillas incandescentes. La primera central de Edison entró en operación en la ciudad de Nueva York en septiembre de 1882. Lamentablemente, este sistema de potencia generaba y transmitía potencia a tan bajos niveles de tensión que se requerían corrientes muy altas para suministrar cantidades significativas de potencia. Estas altas corrientes ocasionaban enormes caídas de tensión y pérdidas de potencia en las líneas de transmisión.¹

En los sistemas de distribución de energía eléctrica actuales, para poder llegar con la energía producida, hasta los consumidores finales, se necesita de un dispositivo llamado transformador. La energía producida en forma masiva, es transmitida desde, la central de generación, hasta una subestación. De éstas, salen los alimentadores primarios hacia las áreas de consumo, en donde se alimentan a los transformadores de distribución, que son los encargados de transmitir la energía hasta los consumidores finales a niveles de tensión convenientes.

El gráfico 1.1 Muestra un diagrama unifilar, que describe la distribución de la energía desde los centros de generación hasta el consumidor final.

¹ CHAPMAN Stephen J., *Máquinas Eléctricas*, 4ta Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 2005.

GRÁFICO 1.1 DIAGRAMA GENERAL DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA



Fuente: www.wikipedia.com, 2009

1.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

Es una máquina eléctrica estacionaria que transforma que transforma niveles de tensión manteniendo la misma naturaleza (frecuencia, definición matemática, representación senoidal, etc.)

Consta de dos o más bobinas de alambre conductor enrollada alrededor de un núcleo ferromagnético común. Estas bobinas normalmente no están conectadas en forma directa. La única conexión entre bobinas es el flujo magnético común que se encuentra dentro del núcleo.

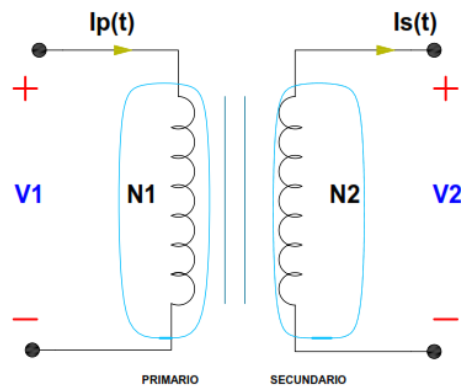
1.3 EL TRANSFORMADOR IDEAL.

Un transformador Ideal es un dispositivo sin pérdidas y su núcleo es infinitamente permeable, Además, cualquier flujo producido por el primario esta completamente enlazado por el secundario y viceversa, por consiguiente un transformador ideal no tiene flujo de dispersión.

Los transformadores prácticos tienen propiedades que se aproximan a las de un transformador ideal. Por consiguiente, el estudio del transformador ideal nos ayudara a entender las propiedades de los transformadores en general.

El gráfico 1.2 Muestra un transformador ideal en el que el primario y secundario poseen N_1 y N_2 vueltas respectivamente.

GRÁFICO 1.2 TRANSFORMADOR IDEAL



Fuente: Los Autores

$$V_p(t)/V_s(t) = N_p/N_s = a$$

Donde a se define como la relación de vueltas del transformador

$$N_p/N_s = a$$

La relación entre la corriente $I_p(t)$ que fluye en el lado primario del transformador y la corriente $I_s(t)$ que sale del lado secundario del transformador es:

$$N_p * I_p(t) = N_s * I_s(t)$$

O,

$$I_p(t) / I_s(t) = 1/a$$

1.4 EL CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR.²

Las pérdidas que ocurren en los transformadores reales deben tenerse en cuenta para obtener un modelo exacto del comportamiento de un transformador. Los principales aspectos que se deben considerar en la construcción de un prototipo son:

- **Pérdidas en el cobre (I^2R).**

Las pérdidas en el cobre son causadas por el calentamiento resistivo de los devanados primario y secundario del transformador. Son proporcionales al cuadrado de la corriente en los devanados.

- **Pérdidas por corrientes parasitas.**

Las pérdidas por corrientes parasitas son provocadas por el calentamiento resistivo en el núcleo del transformador. Son proporcionales al cuadrado de la tensión aplicada al transformador.

- **Pérdidas por Histéresis.**

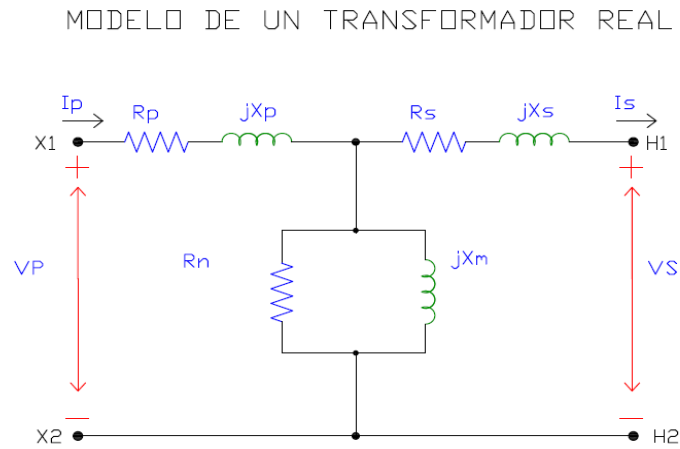
Las pérdidas por histéresis están asociadas con la reubicación de los dominios magnéticos en el núcleo durante cada semiciclo, son una función compleja y no lineal de tensión aplicada al transformador.

- **Flujo disperso.**

Los flujos dispersos que escapan del núcleo y pasan a través de solo uno de los devanados del transformador son flujos dispersos. Estos flujos que escapan producen un auto inductancia en las bobinas primarias y secundarias.

² CHAPMAN Stephen J., *Máquinas Eléctricas*, 4ta Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 2005.

GRÁFICO 1.3 MODELO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR REAL



Fuente: Los Autores

1.5 CLASIFICACIÓN Y UTILIZACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES.

Los transformadores se clasifican según; la operación, la construcción y la utilización.

1.5.1 POR SU OPERACIÓN.³

Se refiere a la energía o potencia que manejan dentro del sistema eléctrico de potencia.

1.5.2 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.

Son aquellos transformadores, monofásicos o trifásicos, que tienen capacidades nominales entre 3 a 500 KVA.

³ PEREZ P. Avelino, *Transformadores de distribución*, 2da Edición, Editorial Reverté, S.A, México 2001.

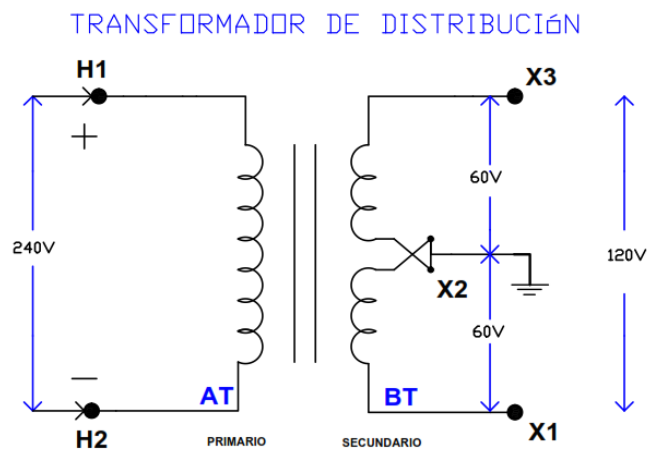
FIGURA 1.1 TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN



Fuente: Los Autores

Por lo general, los transformadores que suministran energía eléctrica en áreas residenciales, industriales y comerciales son transformadores de distribución que disponen de dos devanados secundarios, cada uno con capacidad de 120V. Los devanados están conectados en serie, por lo que la tensión entre líneas es de 240V, mientras que entre líneas y la toma central es de 120V, la toma central, llamado neutro siempre está conectado a tierra.

GRÁFICO 1.4 TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN CON SECUNDARIO DE 120V/240V, CON CONDUCTOR CENTRAL



Fuente: Los Autores

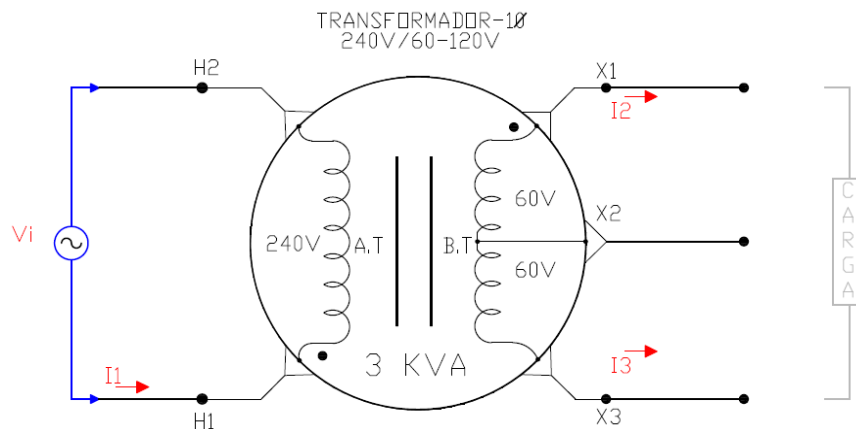
1.6 POR EL NÚMERO DE FASES.

De acuerdo a las características del sistema al cual se conectará, tenemos:

1.6.1 TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.

Son transformadores de potencia o distribución, que son conectados a una línea o fase y un neutro o tierra. Estos transformadores tienen un solo devanado de alta tensión y uno de baja tensión.

GRÁFICO 1.5 ESQUEMA ELÉCTRICO DE UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO

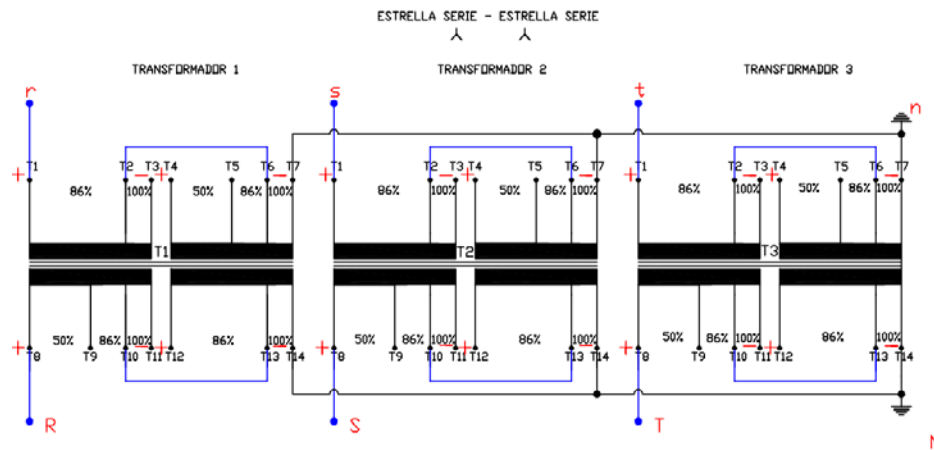


Fuente: Los Autores

1.6.2 BANCO TRIFÁSICO CON TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS.

Los bancos de transformadores monofásicos son utilizados en sistemas eléctricos trifásicos como sustitución de un transformador trifásico. Por ejemplo, en el transporte a largas distancias de la energía eléctrica. Asimismo, el banco de transformadores monofásicos también sirve para poder cambiar el número de fases del sistema, es decir, un sistema trifásico lo podemos convertir en un sistema bifásico, de 6 fases, de doce fases, etc.

GRÁFICO 1.6 ESQUEMA ELÉCTRICO DE UN BANCO MONOFÁSICO



Fuente: Los Autores

1.7 TRANSFORMADOR CONVENCIONAL VS AUTOPROTEGIDO.

Los transformadores de distribución por el tipo de protección se clasifican en convencionales y autoprotegidos.

Los transformadores de distribución autoprotegidos, cuentan con las siguientes características:

- 1 Bushing en media tensión
- Lámpara de señal luminosa
- Protección interna en baja tensión

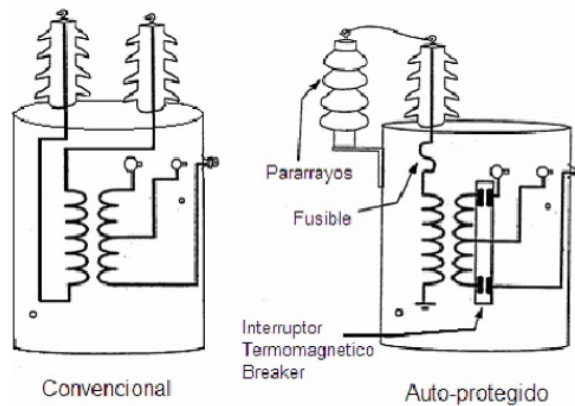
Los transformadores de distribución convencionales, cuentan con las siguientes características:

- 2 Bushing en media tensión
- Protección adicional, caja porta fusible
- Maniobras más seguras

La característica principal de los transformadores convencionales es la facilidad y confiabilidad al realizar conexiones de bancos trifásicos.

Los transformadores de distribución convencionales tipo poste a diferencia de los autoprotegidos no cuentan con interruptor termo magnético interno ni con pararrayos instalado en la cuba teniendo desventajas para su instalación al adquirir componentes de protección por separado tal es el caso del pararrayos y fusibles.

GRÁFICO 1.7 DIAGRAMA UNIFILAR DE TRANSFORMADOR AUTOPROTEGIDO Y CONVENCIONAL



Fuente: ABB Distribution Transformer Guide Pág.: 21

1.8 FORMA DEL NÚCLEO.

Generalmente se conocen los siguientes tipos, por la posición que existe entre la colocación de las bobinas y el núcleo.

1.8.1 NÚCLEO ACORAZADO.

Es aquel en el cual el núcleo se encuentra cubriendo los devanados de baja y alta tensión.

FIGURA 1.2 FORMA CONSTRUCTIVA DE UN NÚCLEO ACORAZADO

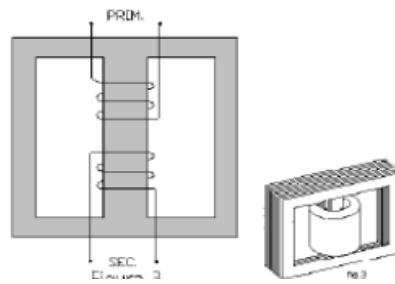


Fuente: Transformadores, www.alamtec.com.ar, 2006

1.8.2 NÚCLEO TIPO COLUMNAS.

Llamado también núcleo no acorazado, es aquel en el cual las bobinas abarcan una parte considerable del circuito magnético.

GRÁFICO 1.8 FORMA CONSTRUCTIVA DE UN NÚCLEO TIPO COLUMNA



Fuente: Transformador tipo columna, www.transformadoresiec.com, 2002

1.9 CONDICIONES DE SERVICIO.

1.9.1 PARA USO INTERIOR.

Un transformador para uso interior tiene como características una tensión bifásica y los terminales aislados de tierra a su plena tensión de aislamiento. Es de tipo seco aislado en bloque de resina. Se los utiliza para medida y protección hasta con dos devanados secundarios.

1.9.2 PARA USO A LA INTEMPERIE.

Un transformador para uso a la intemperie es de tipo seco, aislado en bloque de resina con Tensión para medida y protección hasta con 3 devanados secundarios, Diseñado para soportar condiciones como por ejemplo: temperatura ambiente del aire, humedad, polución, etc.

1.10 LUGARES DE INSTALACIÓN.

1.10.1 TIPO POSTE.

La aplicación principal de los transformadores tipo poste es la distribución de energía eléctrica, reduciendo la tensión de las líneas de transmisión de media tensión a los niveles de baja tensión residencial o industrial. Normalmente se utiliza aceite mineral como aislante.

1.10.2 TIPO SUBESTACIÓN.

Este tipo de transformador está diseñado para trabajar bajo techo o a la intemperie. Es adecuado para suministrar energía eléctrica en edificios, e instalaciones en general que requieren un alto grado de seguridad. Permiten ser instalados cerca de los centros de consumo, reduciendo al mínimo la pérdida de potencia y los costos de instalación. Pueden ser sumergidos en aceite aislante o en fluido incombustible de silicona cuando por razones de seguridad así requiera.

1.10.3 TIPO PEDESTAL.

El transformador de distribución para montaje sobre pedestal PAD MOUNTED está diseñado para proveer servicio eléctrico en sistemas de distribución subterráneos. Este tipo transformador está diseñado para instalarse en el interior o exterior de zonas residenciales o en terrazas de edificios.

1.10.4 TIPO SUMERGIBLE.

Los transformadores tipo sumergible, están destinados a ser instalados en cámara o bóveda bajo el nivel del suelo, donde existe la posibilidad de inmersión ocasional con agua. Podrán permanecer sumergidos durante 12 horas en un volumen de agua de 3 metros sobre el transformador sin que ocurran filtraciones.

1.10.5 LIMITES DE CALENTAMIENTO PARA TRANSFORMADORES SUMERGIDOS EN ACEITE.⁴

Los límites de calentamiento para transformadores de distribución sumergidos en aceite se basan en las normas INEN 2 126:98:

- El límite de calentamiento para los devanados con clase de aislamiento AO y cualquier método de refrigeración será de 65°C medidos por el método de variación de la resistencia.
- El límite de calentamiento del aceite, con cualquier método de refrigeración (medido por termómetro) será de 60°C cuando el transformador esté sellado o equipado con un conservador (tanque de expansión) y 55°C cuando el transformador no esté sellado o así equipado.
- La temperatura de los circuitos magnéticos y de otras partes no deben alcanzar en ningún caso un valor susceptible de dañar el circuito magnético mismo o las partes adyacentes.

1.11 DE ACUERDO AL TIPO DE AISLAMIENTO.

Existen transformadores sumergidos en aceite y de tipo seco. Entre los sumergidos en aceite tenemos: Tipo OA, Tipo OA/FA/FOA, Tipo FOA, Tipo FOW.

⁴ NORMA NTE INEN 2 126:98, *Transformadores. Límites de calentamiento*

1.11.1 TIPO OA.

Transformador sumergido en aceite y con enfriamiento natural. Es el enfriamiento más común y con resultados más económicos. En este tipo de unidades el aceite aislante circula por convección natural dentro de un tanque con paredes llanas o corrugadas, o bien provistos de enfriadores tubulares.

1.11.2 TIPO OA/FA/FOA.

Transformador sumergido en aceite con enfriamiento propio, con enfriamiento a base de aire forzado.

1.11.3 TIPO FOA.

Transformador sumergido en aceite con enfriamiento con aceite forzado con enfriadores de aire forzado. El aceite de estas unidades es enfriado cuando éste pasa por los cambiadores de calor de aire y aceite, ubicados afuera del tanque.

1.11.4 TIPO FOW.

Transformador sumergido en aceite, con enfriamiento de aire forzado con enfriadores de agua forzada. El enfriamiento del aceite se hace por medio de agua sin tener ventiladores.

1.12 PARTES DE UN TRANSFORMADOR.

Las partes que componen un transformador se dividen en tres grandes grupos, los cuales: son circuito magnético, circuito eléctrico y sistemas de aislamiento

1.12.1 CIRCUITO MAGNÉTICO.⁵

Al circuito magnético se lo conoce también como el núcleo. En esta parte el transformador es, en donde se conduce el flujo magnético generado en las bobinas, el cual conectara magnéticamente los circuitos eléctricos del transformador. El núcleo está formado por láminas de acero al silicio de grano orientado, de bajas pérdidas y de alta permeabilidad magnética. Las láminas que forman el núcleo están recubiertas y por ende aisladas por un componente inorgánico llamado “*carlite*”. Esta capa es aplicada a las láminas al final del proceso de planchado y recocido.

FIGURA 1.3 CIRCUITO MAGNÉTICO DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN



Fuente: Transformador Eléctrico, dsc.discovery.com/videos/

1.12.2 CIRCUITO ELÉCTRICO⁶.

El circuito eléctrico está compuesto por los devanados primario y secundario. Dichos devanados se fabrican en diferentes tipos, dependiendo de las necesidades del diseño. Los materiales más utilizados son el cobre y el aluminio.

Los devanados primarios, crean un flujo magnético, para inducir al devanado secundario, una fuerza electromotriz, y transferir una potencia del primario al

⁵ *Transformadores de Distribución, Capítulo 1*, dspace.ups.edu.ec, Pag:10

⁶ *Transformadores de Distribución, Capítulo 1*, dspace.ups.edu.ec, Pag:11

secundario, todo esto mediante el principio de inducción electromagnética. En este proceso se pierde una pequeña cantidad de energía.

Las ventajas de devanados de cobre para devanados son las siguientes:

- Resistencia mecánica.
- Tiene una buena conductividad eléctrica.

Las ventajas del devanado de aluminio son:

- Mayor eficiencia para disipar el calor.
- Considerable reducción del peso.
- Estabilidad del costo por suministro.

FIGURA 1.4 CIRCUITO ELÉCTRICO DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN



Fuente: Transformador Eléctrico, dsc.discovery.com/videos/

1.12.3 SISTEMA DE AISLAMIENTO.

El sistema de aislamiento está compuesto de algunos materiales aislantes, entre los cuales tenemos:

- Cartón prensado.
- Papel kraft.
- Papel manila o corrugado.
- Cartón prensado de alta densidad.

- Collares de cartón prensado y aislamientos finales.
- Partes de cartón prensado laminados.
- Esmaltes y barnices.
- Recubrimientos orgánicos e inorgánicos para la laminación del núcleo.
- Porcelanas (boquillas).
- Recubrimientos de polvo epóxico.
- Madera de maple, fibra vulcanizada
- Algodón, hilos, cintas.
- Plásticos y cementos, telas y cintas adhesivas, cintas de fibra de vidrio.
- Fluido líquido dieléctrico, que puede ser aceite mineral, aceite de siliconas.

FIGURA 1.5 SISTEMAS DE AISLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN



Fuente: Transformador Eléctrico, dsc.discovery.com/videos/

Este sistema aísla los devanados del transformador entre sí y de tierra, la figura 1.5 muestra el sistema de aislamiento de papel impregnado de cola epóxica, así como de las partes cercanas del núcleo y de las partes de acero que forma la estructura. El sistema de aislamiento sólido, deben cumplir con las cuatro funciones siguientes:

- Calidad para soportar las tensiones relativamente altas, sucedidas en servicio normal (esfuerzos dieléctricos). Esto incluye ondas de impulso y transitorios.

- Calidad para soportar esfuerzos mecánicos y térmicos (calor) los cuales, generalmente acompañan a un circuito.
- Calidad para prevenir excesivas acumulaciones de calor (transmisión de calor).

1.12.4 REQUISITOS DE FUNCIONAMIENTO EN CONDICIONES DE ALTITUD Y TEMPERATURA DIFERENTES DE LAS NORMALIZADAS.

1.12.4.1 AISLAMIENTO NORMA INEN 2128.

La rigidez dieléctrica para altitudes mayores a 1 000 m.s.n.m. para una determinada clase de aislamiento, deberá multiplicarse por un factor de corrección apropiado para obtener la rigidez dieléctrica a la altitud requerida (ver tabla 1.1).

TABLA 1.1 LA ALTURA Y SU FACTOR DE CORRECCIÓN PARA RIGIDEZ DIELECTRICA

| Altura (m.n.s.m.) | Factor de corrección para rigidez dieléctrica |
|--------------------------|--|
| 1000 | 1.00 |
| 1200 | 0.98 |
| 1500 | 0.95 |
| 1800 | 0.92 |
| 2100 | 0.89 |
| 2400 | 0.85 |
| 2700 | 0.83 |
| 3000 | 0.80 |
| 3600 | 0.75 |
| 4200 | 0.70 |
| 4500 | 0.67 |

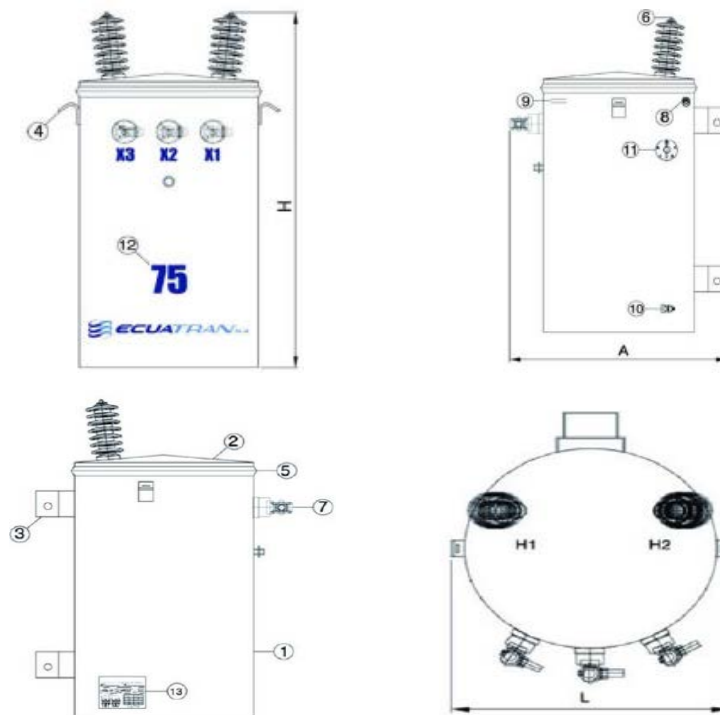
Fuente: Instituto Ecuatoriano de Normalización, www.inen.gob.ec

Para los transformadores sumergidos en aceite que trabajan a altitudes superiores a 1000 m.s.n.m., es necesario seleccionar los bujes para un aislamiento superior al correspondiente de los devanados.

1.13 TANQUE, PARTES Y ACCESORIOS.⁷

Los transformadores deben ser construidos con un tanque hermético, con objeto de preservar el aceite, ya que este tiene la función de dieléctrico y también de refrigerante del conjunto núcleo-bobinas. El transformador debe permanecer perfectamente sellado desde una temperatura de -5°C a un máximo de 105°C en la parte superior del líquido aislante, El Gráfico 1.9 muestra en conjunto un tanque de transformador.

GRÁFICO 1.9 PARTES DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN TIPO TANQUE



Fuente: ECUATRAN, partes de un transformador, 2000.

⁷ PEREZ P. Avelino, *Transformadores de distribución*, 2da Edición, Editorial Reverté, S.A, México 2001.

TABLA 1.2 PARTES DE UN TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN

| Ítem | Cantidad | Descripción |
|-------------|-----------------|----------------------------------|
| 1 | 1 | Cuba del transformador |
| 2 | 1 | Tapa |
| 3 | 2 | Soportes de montaje |
| 4 | 2 | Soportes de izado |
| 5 | 1 | Banda de cierre |
| 6 | 2 | Pasa tapas de media tensión |
| 7 | 3 | Pasa tapas de baja tensión |
| 8 | 1 | Válvula de sobrepresión |
| 9 | 1 | Nivel de Aceite |
| 10 | 1 | Conectores a tierra |
| 11 | 1 | Cambiador de derivaciones 5 pos. |
| 12 | 1 | Potencia |
| 13 | 1 | Placa de características |

Fuente: ECUATRAN, Transformador monofásico de 75KVA

CAPÍTULO II

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO TENSIÓN EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

2.1 TENSIÓN.

La tensión es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, cuya unidad de medida es el voltio.

2.1.1 POTENCIAL ELÉCTRICO.

El potencial eléctrico en un punto, es el trabajo que debe realizar un campo electrostático para mover una carga positiva desde el punto de referencia, dividido por unidad de carga de prueba.

2.1.2 CAMPO ELECTROSTÁTICO.

Las cargas eléctricas no precisan de ningún medio material para influir entre ellas y por ello las fuerzas eléctricas son consideradas fuerzas de acción a distancia. En virtud de ello se recurre al concepto de campo electrostático para facilitar la descripción, en términos físicos de la influencia que una o más cargas ejercen sobre el espacio que las rodea.

2,2 TENSIÓN CONTÍNUA.

La tensión continua se representa con una línea recta que se mantiene continua en el tiempo tal como lo muestra el gráfico 2.1 Este tipo de tensiones por lo general se utiliza para alimentar circuitos electrónicos o para el diseño de fuentes simétricas.

GRÁFICO 2.1 GRÁFICA QUE REPRESENTA A LA TENSION CONTINUA

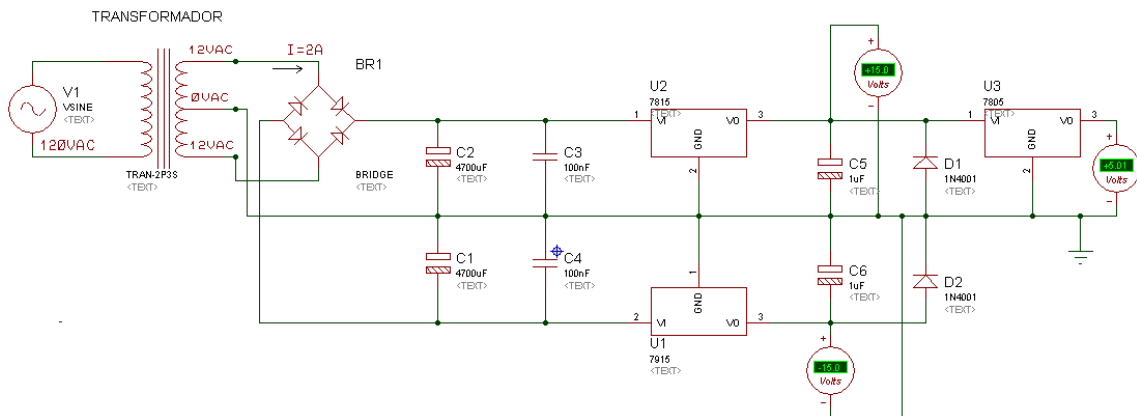


Fuente: Los Autores

2,3 FUENTE SIMÉTRICA.

La fuente simétrica es esencial en el diseño de circuitos de adquisición de datos en los que se usan amplificadores operacionales para el acondicionamiento de señales, en el gráfico 2.2 se muestra el diagrama de la fuente simétrica la cual entrega valores de +15VDC, -15VDC y 5VDC.

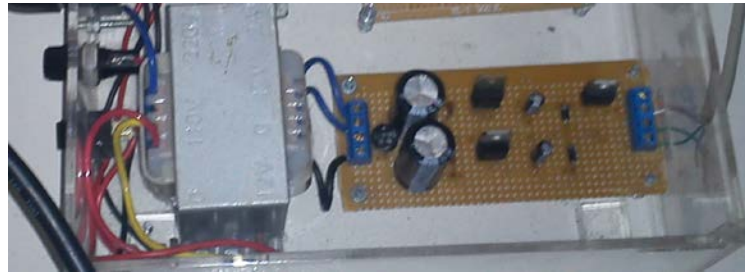
GRÁFICO 2.2 DIAGRAMA DE LA FUENTE SIMÉTRICA



Fuente: Los Autores

Para nuestra fuente utilizamos un transformador reductor de 120VAC/24VAC con toma intermedia a 12v y una corriente nominal 2A, se utilizan capacitores para que la tensión luego del rectificador llegue ligeramente alta al regulador. La figura 2.1 muestra la fuente elaborada en una baquelita recubierta con acrílico y su acoplamiento al módulo.

FIGURA 2.1 ACOPLA DE FUENTE SIMÉTRICA AL MÓDULO

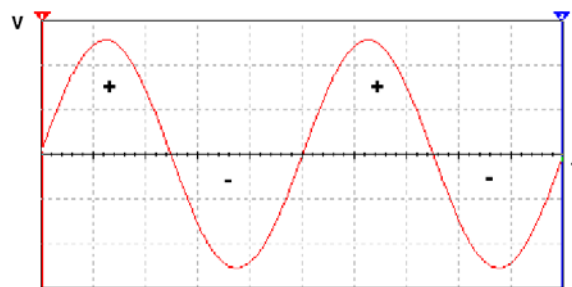


Fuentes: Los Autores

2.4 TENSIÓN ALTERNA.

Mediante el gráfico 2.3 Se puede definir la tensión alterna el cual tiene una forma sinusoidal que varía de manera continúa en amplitud y cambia de polaridad periódicamente, las variaciones hacia arriba y hacia debajo de la forma de onda corresponden a cambios de magnitud. El eje cero es una línea horizontal ubicada en el centro del trazo. De esta manera, las tensiones que pasan encima de esta línea tienen una polaridad positiva mientras que las tensiones que se encuentran por debajo tienen polaridad negativa

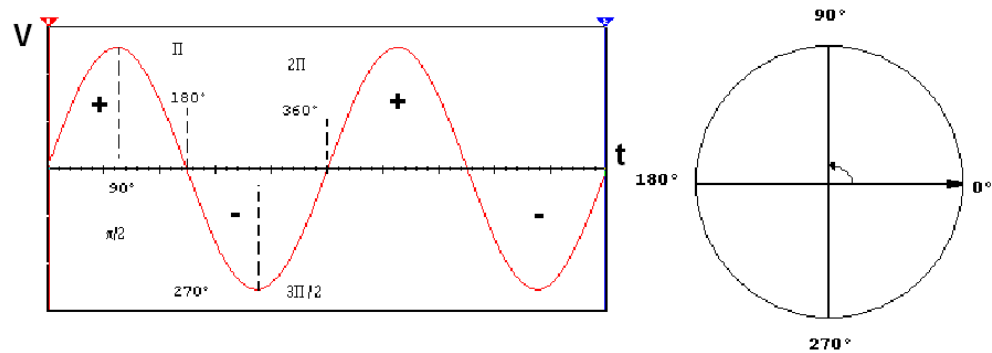
GRÁFICO 2.3 FORMA DE ONDA TENSIÓN ALTERNA



Fuente: Tensión Alterna, www.solecmexico.com, 2012

En el gráfico 2.4 Se muestra que un ciclo para una onda sinusoidal corresponde a una vuelta completa a una espira que equivale a 360° y un semiciclo está comprendido por la mitad de un ciclo que equivale a 180° .

GRÁFICO 2.4 CICLO PARA UNA ONDA SINUSOIDAL



Fuente: Onda Sinusoidal, www.solecmexico.com, 2012

La magnitud de la tensión inducido es proporcional al seno del ángulo de rotación del movimiento que produce la tensión, la forma de onda de tensión producida por el movimiento circular de la espira aumenta hasta alcanzar un valor máximo en el que el ángulo de rotación es 90° .

El valor inducido y el seno del ángulo guardan relación entre si durante todo el ciclo de 360° , el valor instantáneo de cualquier tensión sinusoidal en función del ángulo de rotación esta expresada de acuerdo a:

$$V = V_m * \text{Sen } \theta$$

Donde θ es el ángulo, V_m es el máximo valor de tensión y V es el valor instantáneo de tensión para cualquier ángulo.

2.4.1 VALOR PROMEDIO.⁸

La tensión o valor promedio es igual al promedio aritmético de todas las tensiones de una onda sinusoidal durante un semiciclo para obtener el promedio, al sumar los valores de la función seno hasta 180° lo cual es un semiciclo y el resultado es dividido por el número de valores el promedio es igual a 0.637.

⁸ Tensión Alterna, www.solecmexico.com, Pág. 3.

Dado que el valor pico de una onda seno es uno y su promedio es igual a 0.637 se tiene entonces:

$$\text{Valor promedio} = 0.637 * \text{Valor pico}$$

2.4.2 VALOR R.M.S.⁹

Tensión o valor efectivo (raíz cuadrática media) una de las manera mas comunes de especificar una magnitud de una forma de onda sinusoidal consiste en proporcionar su valor para un ángulo 45° el cual es igual a 70.7% del valor pico este valor toma el nombre de raíz cuadrática media (r.m.s.).

$$V_{\text{rms}} = 0.707 * V_{\text{pico}}$$

El factor 0.707 del valor R.M.S. se obtiene al tomar la raíz del promedio (media) del cuadrado de todos los valores de la onda seno.

2.5 TENSIÓN NOMINAL DE LOS DEVANADOS.

2.5.1 DEVANADO PRIMARIO.

La tensión del devanado primario estará determinada por la tensión nominal del sistema en el que operará el transformador

2.5.2 DEVANADO SECUNDARIO.

La tensión secundaria está determinada por la relación de transformación del transformador.

⁹ EDMINISTER Joseph A. *Circuitos Eléctricos*. 2da Edición, McGraw-Hill, México 1994.

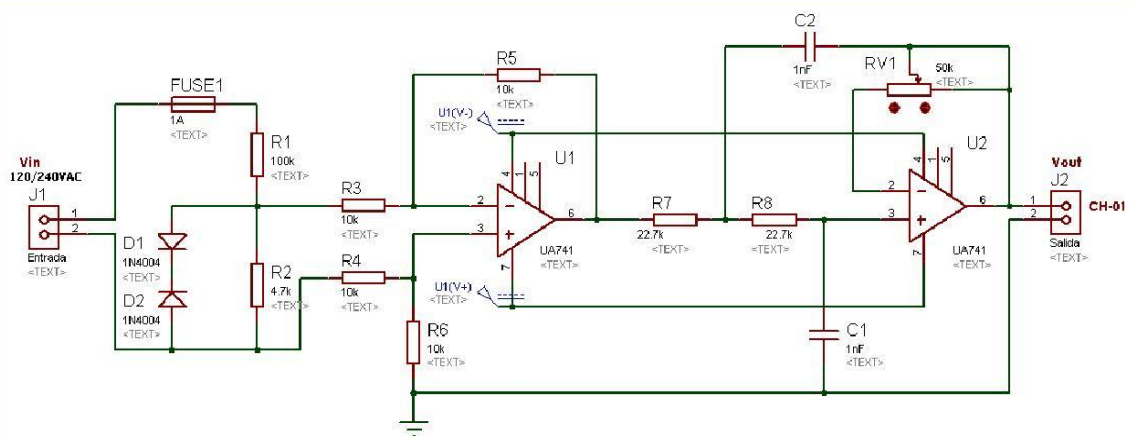
2.5.3 ALIMENTACIÓN DE UN TRANSFORMADOR.

Se conecta una fuente alterna en el lado del primario y esta hará circular una corriente por la bobina primaria que genera un campo magnético que crea en el secundario una tensión en caso de tener conectada una carga aparece una corriente

2.6 ADECUACIÓN DE LA TENSIÓN.

El objetivo del circuito que muestra el gráfico 2.5 y que se detalla a continuación es reducir la tensión tomada en el lado del secundario del transformador a tensiones manejables de 0 a 10VAC, los capacitores se usan como filtros para las señales.

GRÁFICO 2.5 CIRCUITO ACONDICIONADOR DE TENSIÓN



Fuente: Los Autores

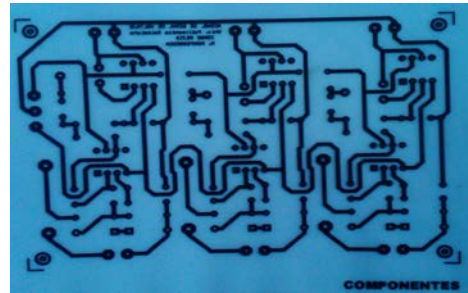
El circuito que adecua la señal de tensión fue diseñado para reducir las señales de tensiones de 120VAC/240VAC a tensiones admisibles para la tarjeta SB-RIO lo cual se detalla en los siguientes capítulos, estos valores son adquiridos y visualizados en la pantalla del programa labview pero antes de ser mostrada debe pasar por una programación para devolverla a sus valores reales.

El circuito que adecua la señal de tensión fue colocado en tarjeta mediante circuito impreso y acoplada en el modulo con tres canales tal como lo muestra en la figura 2.2

FIGURA 2.2 (A) ACOUPLE AL MÓDULO DEL CIRCUITO CON TRES CANALES QUE ADECUA LA SEÑAL DE TENSIÓN. (B) PISTAS IMPRESAS DE CIRCUITO QUE ADECUA LA SEÑAL DE TENSIÓN



(a)



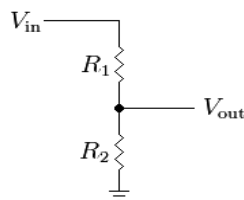
(b)

Fuente: Los Autores

2.7 DIVISOR DE TENSIÓN.

El divisor de tensión es una configuración que me permite dividir la tensión de una fuente en una o más resistencias

GRÁFICO 2.6 DIVISOR DE TENSIÓN



Fuente: Circuitos Eléctrico, www.wikipedia.com,2000

Observando el gráfico 2.6 Obtenemos la siguiente formula para un divisor de tensión

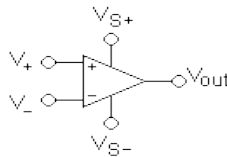
$$V_{out} = (R2 / (R1+R2)) * V_{in}$$

2.8 AMPLIFICADOR OPERACIONAL.¹⁰

El termino de amplificador operacional fue asignado alrededor de 1940 para asignar una clase de amplificadores que permiten realizar una serie de operaciones tales como suma, resta, multiplicación, integración, diferenciación, los cuales actualmente se los encuentra en circuitos integrados.

En el gráfico 2.7 Se muestra el símbolo para un amplificador operacional

GRÁFICO 2.7 SÍMBOLO PARA UN AMPLIFICADOR OPERACIONAL



Fuente: Amplificadores, www.wikipedia.com

V_+ = Entrada no inversor

V_- = Entrada inversor

V_{out} = Tensión de salida

V_{s+} = Alimentación positiva

V_{s-} = Alimentación negativa

2.8.1 CONFIGURACIÓN NO INVERSOR.¹¹

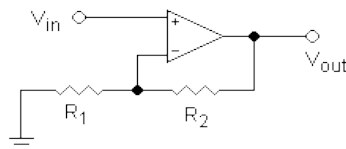
Como observamos en el gráfico 2.8 el voltaje de entrada, ingresa por el pin positivo, pero como conocemos que la ganancia del amplificador operacional es muy grande, el

¹⁰ ORTEGA Rogelio B. *Circuitos Electrónicos, Guía 7, Pág. 1*

¹¹ *Tecnología en Electrónica, ZIPAQUIRÁ 2011, Pág., 5*

voltaje en el pin positivo es igual al voltaje en el pin negativo, conociendo el voltaje en el pin negativo podemos calcular la relación que existe entre el voltaje de salida con el voltaje de entrada haciendo uso de un pequeño divisor de tensión.

GRÁFICO 2.8 AMPLIFICADOR OPERACIONAL CONFIGURACIÓN NO INVERSOR



Fuente: Amplificadores, www.wikipedia.com

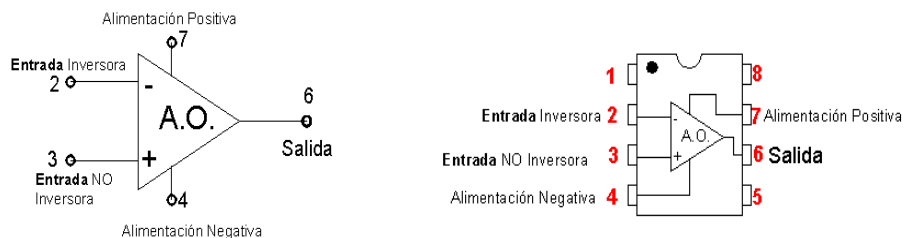
El Vout en un amplificador operacional en configuración no inversor esta dado por la siguiente formula

$$V_{out} = V_{in} (1 + (R_2/R_1))$$

2.9 AMPLIFICADOR OPERACIONAL TIPO UA741.

Es un amplificador operacional de altas características. Se ha diseñado para una amplia gama de aplicaciones analógicas su alta ganancia y el amplio rango de voltaje de operación proporcionan unas excelentes características. En el gráfico 2.9 se muestra la distribución de pines de un UA741.

GRÁFICO 2.9 DISTRIBUCIÓN DE PINES EN UN CIRCUITO INTEGRADO UA741



Fuente: Amplificadores, www.wikipedia.com,2002

2.9.1 CARACTERISTICAS.

- No requiere compensación en frecuencia.
- Alta impedancia (resistencia) de entrada la cual esta en el orden de $1\text{ M}\Omega$, lo cual implica que la intensidad de corriente por los terminales de entrada será despreciable.
- Baja impedancia de salida la cual esta en el orden de $150\ \Omega$, pudiendo atacar cualquier carga (circuito) sin que su funcionamiento se modifique dependiendo del valor de ésta.
- Tensión máxima de alimentación o $\pm V_{cc} = \pm 18\text{ V}$. Implica que la tensión de salida nunca podrá superar a la de alimentación.
- Alta ganancia de tensión en lazo abierto la cual significa que sin conectar ningún componente entre la salida y cualquiera de las entradas con pequeños valores de tensión en los terminales de entrada se consiguen grandes tensiones de salida

2.9.2 APLICACIONES.

Este circuito integrado tiene muy diversas aplicaciones, utilizándose más usualmente en: seguidores de tensión de ganancia unidad, amplificadores no inversores, amplificadores inversores integradores, diferenciadores.

2.10 RELACIÓN LINEAL DEL CIRCUITO QUE ADECUA LA SEÑAL DE TENSIÓN POR CANAL.

En el circuito que adecua la señal de tensión se realizaron pruebas para determinar la linealidad del circuito y determinar la ecuación que gobierna al circuito la señal de entrada V_{in} versus la señal de salida V_{out} estas pruebas se realizaron para cada uno de los canales

2.10.1 CANAL 1.

Para el canal 1 se realizo la medición de tensiones de entrada Vs tensiones de salida obteniendo los valores de la tabla 2.1.

TABLA 2.1. TABLA DE VALORES PARA CANAL 1 DE TENSION

| Puntos | Canal 1 [V] |
|-------------------|-------------|
| V _{OUT1} | 1.17 |
| V _{IN1} | 32.08 |
| V _{OUT2} | 4.60 |
| V _{IN2} | 124.10 |

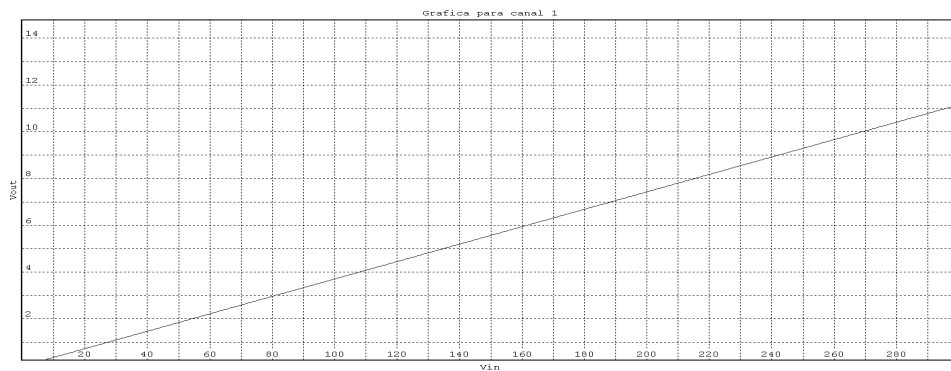
Fuente: Los Autores

La ecuacion de la recta para canal 1 de tensión esta definida por:

$$V_{out} = 0.03724 * V_{in} - 0.0216$$

Los valores que se obtienen en VOUT son los que ingresan a la tarjeta SB-RIO y los VIN son los medidos del secundario del transformador, en el gráfico 2.10 Se muestra la gráfica para los valores de la tabla 2.1.

GRÁFICO 2.10 MUESTRA UNA GRÁFICA PARA LOS VALORES DE LA TABLA 2.1



Fuentes: Los Autores

2.10.2 CANAL 2.

Para el canal 2 se realizo la medición de tensiones de entrada Vs tensiones de salida obteniendo los valores de la tabla 2.2.

TABLA 2.2. TABLA DE VALORES PARA CANAL 2 DE TENSION

| Puntos | Canal 2 [V] |
|-------------------|-------------|
| V _{OUT1} | 1.16 |
| V _{IN1} | 32.08 |
| V _{OUT2} | 4.53 |
| V _{IN2} | 124.10 |

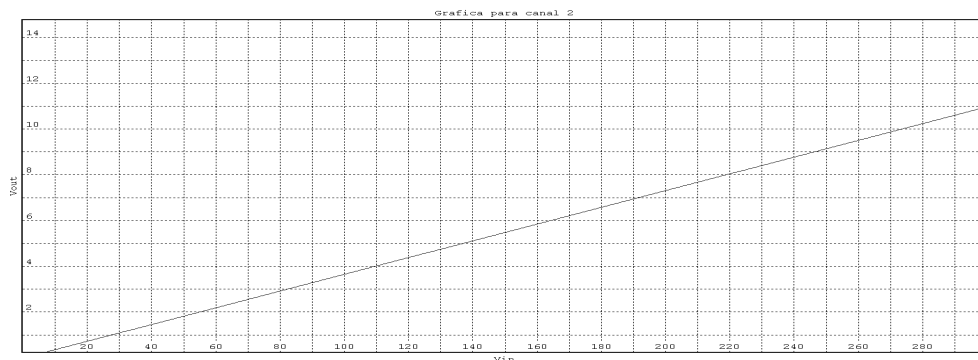
Fuente: Los Autores

La ecuacion de la recta para canal 2 de tensión esta definida por:

$$V_{out} = 0.0366 * V_{in} - 0.0148$$

Los valores que se obtienen en VOUT son los que ingresan a la tarjeta SB-RIO y los VIN son los medidos del secundario del transformador, en el gráfico 2.11 Se muestra la gráfica para los valores de la tabla 2.2.

GRÁFICO 2.11 MUESTRA UNA GRÁFICA PARA LOS VALORES DE LA TABLA 2.2.



Fuente: Los Autores

2.10.3 CANAL 3.

Para el canal 3 se realizo la medición de tensiones de entrada Vs tensiones de salida obteniendo los valores de la tabla 2.3.

TABLA 2.3. TABLA DE VALORES PARA CANAL 3 DE TENSION

| Puntos | Canal 2 [V] |
|-------------------|-------------|
| V _{OUT1} | 1.221 |
| V _{IN1} | 32.08 |
| V _{OUT2} | 4.63 |
| V _{IN2} | 124.1 |

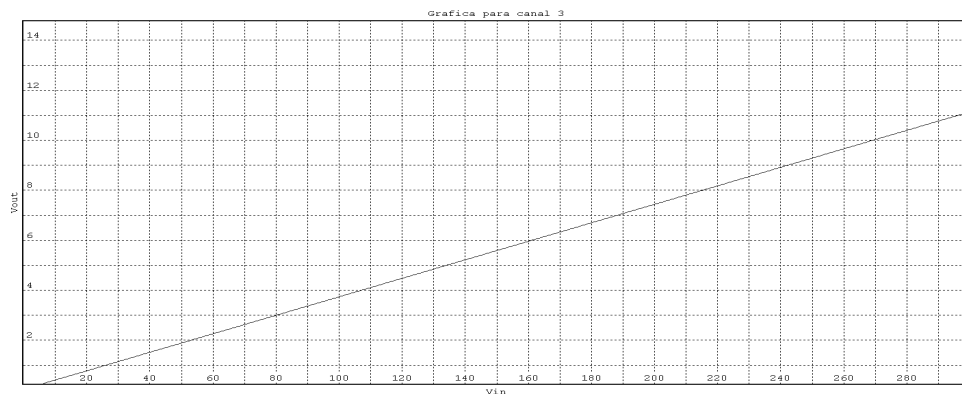
Fuente: Los Autores

La ecuacion de la recta para canal 3 de tensión esta definida por

$$V_{out} = 0.037 * V_{in} + 0.03404$$

Los valores que se obtienen en VOUT son los que ingresan a la tarjeta SB-RIO y los VIN son los medidos del secundario del transformador, en el gráfico 2.12 Se muestra la gráfica para los valores de la tabla 2.3.

GRÁFICO 2.12 MUESTRA UNA GRÁFICA PARA LOS VALORES DE LA TABLA 2.3.



Fuente: Los Autores

CAPÍTULO III

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO DE CORRIENTE EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN.

Los valores de corriente a medir con el prototipo a diseñar en el presente proyecto, están en el rango de 0A a 50A, por lo tanto, las características y funcionamiento del sensor de efecto hall modelo HASS 50S y HASS 100S de LEM, se ajustan a los requerimientos del diseño a implementar.

Al estar los valores de corriente a un rango de 0A a 50A, se hace necesario utilizar un sensor basado en efecto Hall, ya que la corriente a medir no debe afectar al resto de circuitería interna del proyecto. El sensor tiene separado la parte de potencia de la circuitería que mide el campo magnético, para después transformarlo en una tensión lineal, proporcional a la corriente aplicada.

3.2 TIPOS DE SENSORES DE CORRIENTE.¹²

3.2.1 INDUCTIVOS.

Transformadores de Corriente es un artefacto electromagnético. El cable a medir pasa por medio de un núcleo magnético que tiene bobinado un secundario que proporciona una tensión proporcional a la corriente que circula por el cable. Los sensores son dispositivos basados en el fenómeno de la inducción electromagnética.

¹² *Sensores, acondicionadores y procesadores de señal, SILICA, <http://es.scribd.com>, Pág., 45*

3.2.2 RESISTIVOS *SHUNT*.

Una resistencia provoca una caída de tensión proporcional a la corriente que circula por dicha resistencia Shunt.

3.2.3 MAGNÉTICOS (EFECTO HALL).

El sensor mide el campo magnético de un núcleo, generado por la corriente que circula por el cable a medir y que bobina al núcleo.

3.2.4 BOBINA *ROGOWSKY*.

Miden los cambios de campo magnético alrededor de un hilo que circula una corriente para producir una señal de tensión que es proporcional a la derivada de la corriente (di/dt).

3.3 REQUERIMIENTOS.

- El sensor de corriente debe aplicarse de manera que no afecte a los demás circuitos y a la medición de la línea.
- Deberá poder medir un rango de corriente de al menos la nominal o a plena carga del transformador.
- La señal de salida deberá contener todas las características de la señal de corriente censada.

3.4 PARÁMETROS DE SELECCIÓN.

Para la adquisición de la magnitud de corriente que circula en cada una de las líneas que alimenta el transformador, se empleara el uso de sensores de corriente que basan su funcionamiento en el principio físico del efecto hall, cuya propiedad física propicia la medición tanto en corriente alterna así como en corriente continua.

3.4.1 SENSOR DE CORRIENTE DE EFECTO HALL.

3.4.1.1 DEFINICIÓN:

Se basa en el fenómeno por el cual una corriente eléctrica atraviesa un material conductor mientras se aplica un campo magnético que forma un ángulo recto con la corriente. Esto daba como resultado una acumulación de electrones, llamada tensión de Hall, a lo largo de uno de los filos del conductor.

El sensor de efecto Hall o simplemente sensor Hall o sonda Hall (denominado según Edwin Herbert Hall) se sirve del efecto Hall para la medición de campos magnéticos o corrientes o para la determinación de la posición.¹³

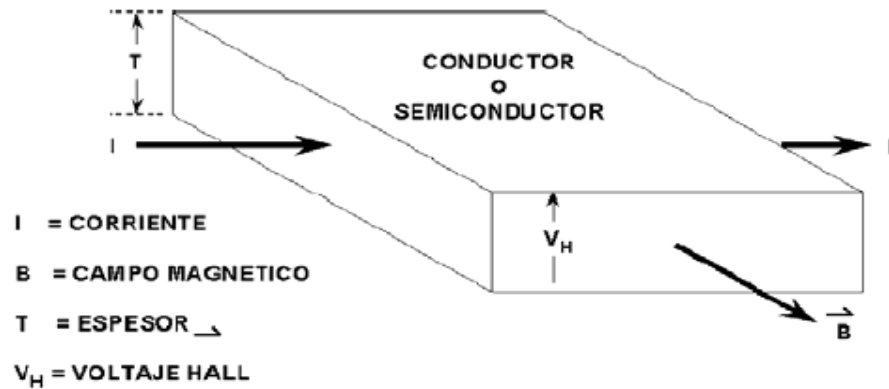
Si fluye corriente por un sensor Hall y se aproxima a un campo magnético que fluye en dirección vertical al sensor, entonces el sensor crea una tensión proporcional al producto de la fuerza del campo magnético y de la corriente. Si se conoce el valor de la corriente, entonces se puede calcular la fuerza del campo magnético; si se crea el campo magnético por medio de corriente que circula por una bobina o un conductor, entonces se puede medir el valor de la corriente en el conductor o bobina¹⁴, las características de un sensor con efecto hall son: [1]

- El sistema tiende a mantener nulo el flujo en el núcleo, para ello la corriente del secundario debe de ser una imagen de la del primario.
- Aísla el primario del secundario.
- Funciona con cualquier forma de onda
- La tensión de salida debe de ser siempre inferior a la de alimentación.

¹³ Sensor de efecto hall <http://es.scribd.com>, Pag.1

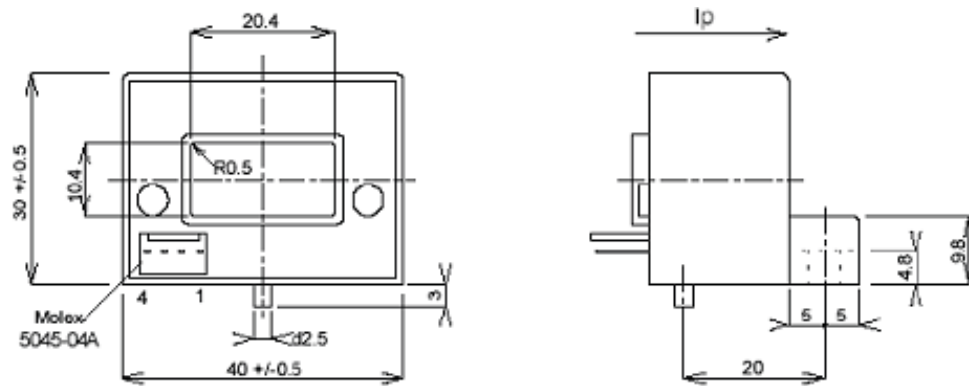
¹⁴ Sensor de efecto hall, <http://es.wikipedia.org>

GRÁFICO 3.1 DETALLE DEL SENSOR DE EFECTO HALL



Fuente: Sensores-Acondicionadores-Procesadores, Pág., 42

GRÁFICO 3.2 MEDIDAS Y DETALLE DE ALIMENTACIÓN EL SENSOR DE CORRIENTE DE EFECTO HALL UTILIZADO



- Terminal Pin:
- 1: Vref (IN/OUT) [V]
 - 2: OUTPUT [V]
 - 3: 0 V
 - 4: +5V



Fuente: Especificaciones Sensor efecto hall, www.lem.com, 2010

3.4.1.2 UTILIZACIÓN:

Los sensores Hall se utilizan en señales salientes análogas para campos magnéticos muy débiles (campo magnético terrestre), ej. Brújula en un sistema de navegación.

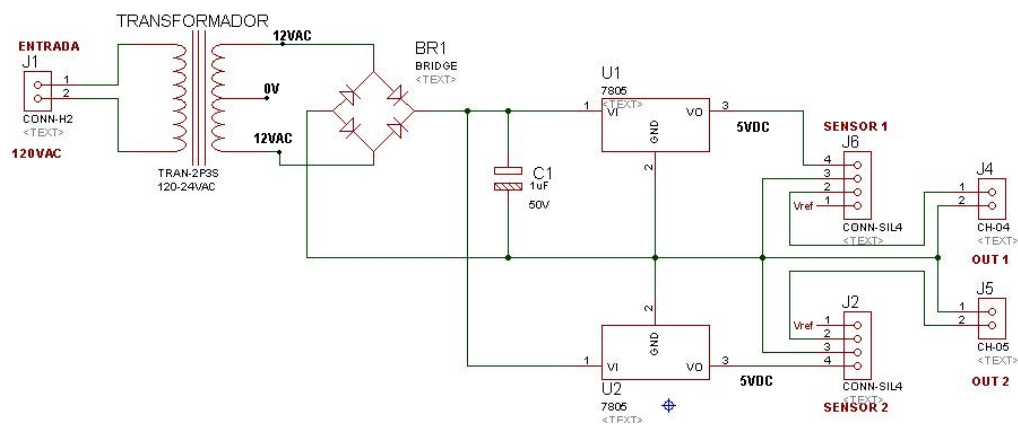
Como sensores de corriente se usan como bobinas, recorridas con una corriente por medir situadas en la separación del núcleo de hierro. Estos sensores de corriente se comercializan como componentes íntegros, son muy rápidos, se pueden usar para la medición de corrientes continuas o alternas (a diferencia de los transformadores de corriente convencionales) y proveen una separación de potencial entre circuitos de rendimiento y la electrónica de control.

3.5 ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL DE CORRIENTE.

3.5.1 CIRCUITO PARA ALIMENTACIÓN DE SENSORES DE CORRIENTE.

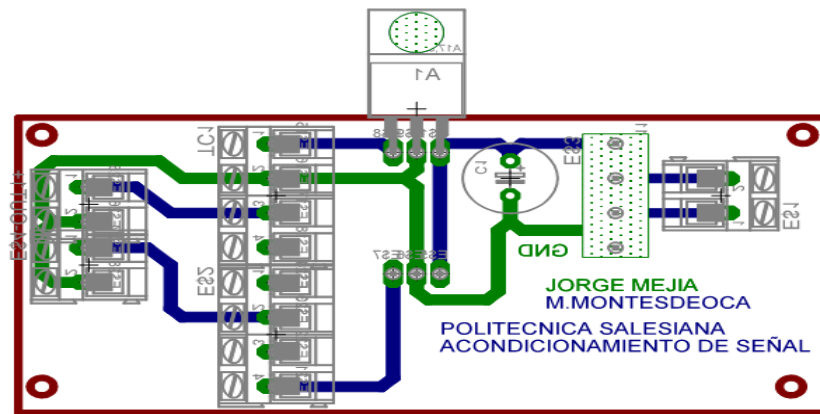
La señal de tensión se toma de la red eléctrica (120V-60Hz), dicha señal se acopla a un transformador con toma central a 12V a 1A de corriente, ingresa a un rectificador y seguido a esto a unos reguladores de tensión tipo (LM7805) los cuales en su salida se obtiene 5VDC que necesita el sensor de corriente de efecto hall.

GRÁFICO 3.3 SIMULACIÓN DEL CIRCUITO UTILIZADO PARA EL SENSOR DE CORRIENTE



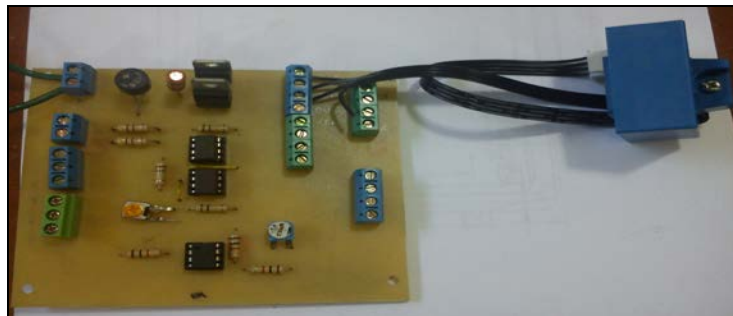
Fuente: Los Autores

GRÁFICO 3.4 DISEÑO DE LA PLACA ELECTRÓNICA PARA MEDICIÓN DE CORRIENTE



Fuente: Los Autores

FIGURA 3.1 MONTAJE DE ELEMENTOS PARA ALIMENTAR AL SENSOR DE CORRIENTE



Fuente: Los Autores

Estos sensores, presentados en la figura 3.1, son unos dispositivos transductores de forma cubica que tiene un orificio en la parte central, el cual permite pasar un cable o barra que lleve la corriente y por lo tanto es sensada en AC/DC.

Debido a que también se realizan mediciones en DC, es importante saber el sentido de la corriente para obtener valores positivos de la corriente y Salida.

3.5.2 CÁLCULO DE LA SALIDA DEL SENSOR DE CORRIENTE.

Esta sección muestra el cálculo de la salida de los sensores de corriente de efecto hall, la tabla 3.1 muestra las especificaciones del sensor de corriente de 50 Amperios, para mejor detalle ver ANEXO C.2

TABLA 3.1. TABLA ESPECIFICACIONES, SENSOR DE CORRIENTE HASS 50-S

| SENSOR DE CORRIENTE EFECTO HALL | |
|--|------------------------------|
| Tipo | HASS 50-S |
| Tensión de salida [Voe] | $= \pm (0.625 * IP/IPN) [V]$ |
| Corriente máxima [IP] | 150 [A] |
| Corriente primaria [IPN] | 50 [A] |
| OFFSET | +2.5 [V] |
| Salida Máxima | $\pm 0.625 [V]$ |

Fuente: Los Autores

Corriente primaria $IP = 0 A$, se obtiene un offset de +2.5V de salida.

La tensión offset, es la diferencia de tensión que se obtiene entre los dos pines de salida del sensor de corriente cuando la tensión de entrada es 5VDC.

@ +50 A se obtiene $= +2.5 v + 0.625 = +3.125V$

@ -50A se obtiene $= +2.5V - 0.625 = +1.875 V$

Ecuación de salida de tension del sensor de corriente:

$$V_{oe} = \pm (0.625 * IP/IPN) [V]$$

EJEMPLO: La corriente secundaria máxima del transformador :

Potencia 3KVA

Tensión de salida $V_{oe} = ?$

Tensión= 120V

Corriente= 25A

$$V_{oe} = (0.625 * 25 / 50) = 0.31 \text{ V}$$

La señal de salida es:

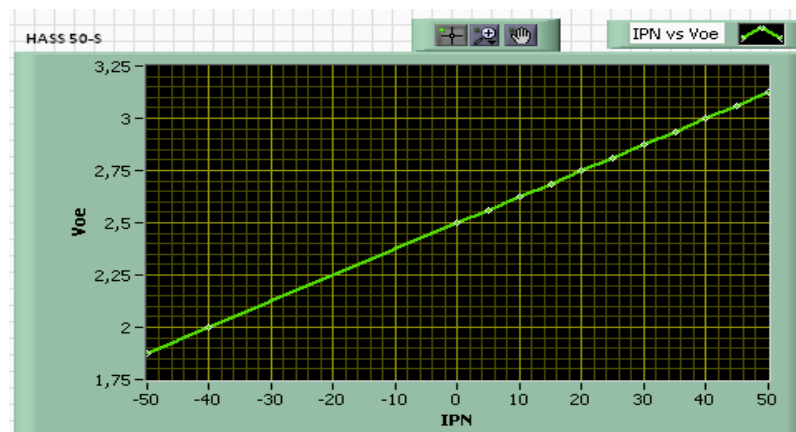
$$V_{oe} = +2.5 + 0.31 = 2.81 \text{ V}$$

TABLA 3.2. SALIDA DEL SENSOR DE CORRIENTE HASS 50-S

| I_{in} [A] | -50 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 50 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| V_{out} [V] | 1.87 | 2.50 | 2.56 | 2.63 | 2.69 | 2.75 | 2.81 | 2.88 | 2.93 | 3,01 | 3.13 |

Fuente: Los Autores

**GRÁFICO 3.5. RELACIÓN DE SALIDA DEL SENSOR DE CORRIENTE HASS 50-S,
OFFSET 2.5V**



Fuente: Los Autores

TABLA 3.3 TABLA ESPECIFICACIONES, SENSOR DE CORRIENTE HASS 100-S

| SENSOR DE CORRIENTE EFECTO HALL | |
|--|--------------------------------|
| Tipo | HASS 100-S |
| Tensión de salida [Voe] | $= \pm (0.625 * IP / IPN) [V]$ |
| Corriente máxima IP | 300 [A] |
| Corriente primaria IPN | 100 [A] |
| OFFSET | +2.5 [V] |
| Salida Máxima | $\pm 0.625 [V]$ |

Fuente: Los Autores

EJEMPLO: La corriente secundaria máxima del transformador :

Potencia 2.4KVA

Tensión de salida Voe = ?

Tensión= 120V

Corriente= 20^a

Ecuación de salida de tensión del sensor de corriente es:

$$V_{oe} = \pm (0.625 * IP / IPN) [V]$$

$$V_{oe} = (0.625 * 20 / 100) = 0.13 V$$

La señal de salida es:

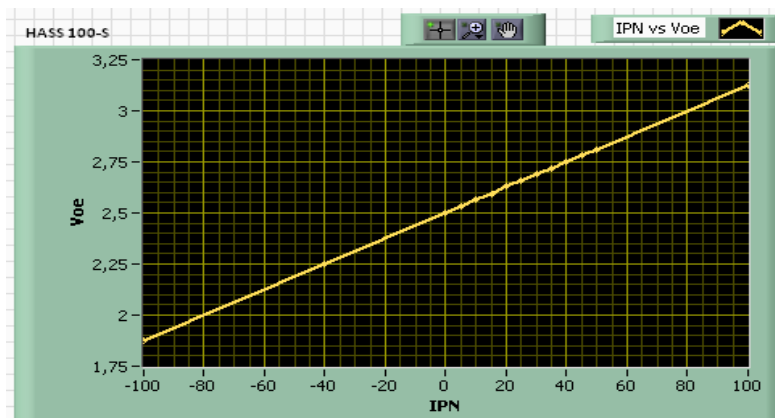
$$V_{oe} = +2.5 + 0.13 = 2.63 V$$

TABLA 3.4 SALIDA DEL SENSOR DE CORRIENTE HASS 100-S

| | | | | | | | | | | | |
|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| I_{in} [A] | -100 | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 100 |
| V_{out} [V] | 1.88 | 2.50 | 2.56 | 2.63 | 2.69 | 2.75 | 2.81 | 2.87 | 2.93 | 3.00 | 3.13 |

Fuente: Los Autores

**GRÁFICO 3.6. RELACIÓN DE SALIDA DEL SENSOR DE CORRIENTE HASS 100-S,
OFFSET 2.5V**



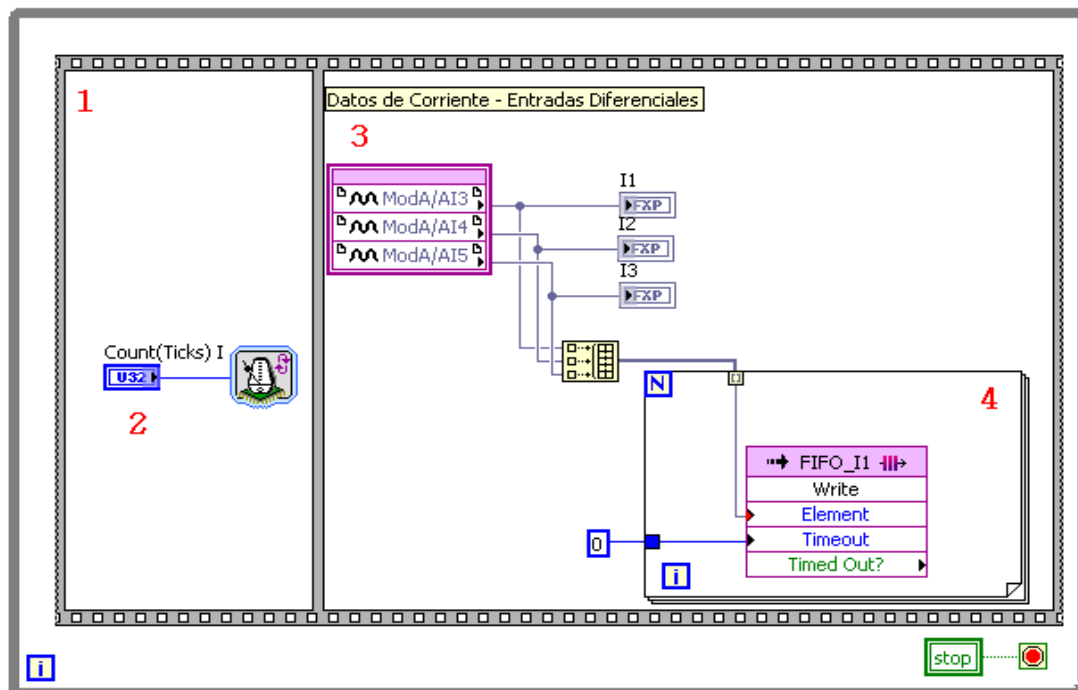
Fuente: Los Autores

3.5.3 PROGRAMA EN LABVIEW FPGA.

En la siguiente gráfico se muestra la ventana de programación en FPGA, (“*Field programmable Gate Array*”, campo programable de compuertas) de los sensores de corriente de efecto hall, muestra las partes y funciones en el diagrama de bloques de LabVIEW que componen el programa.

1. El programa principal se encuentra en un ciclo “WHILE” donde la condición es que se ejecute y adquiera datos de manera continua, hasta que se detenga presionando stop.
2. Después una estructura Flat (consiste en uno o más subdiagramas que se ejecutan secuencialmente) contiene en su primer diagrama un VI de tiempo que controla la adquisición de datos o la frecuencia de muestreo, que puede ser hasta de 25 ns (400Mhz), según la frecuencia que se necesite.
3. Se muestra el nodo FPGA al cual se le pueden agregar las entradas analógicas que se van a usar, colocar indicadores numéricos para su visualización.
4. Muestra la estructura final y se agrego al programa una memoria FIFO, la cual los datos que se están recibiendo de las entradas analógicas no se pierdan.

GRÁFICO 3.7 PROGRAMACIÓN EN FPGA DE LA ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL DE CORRIENTE

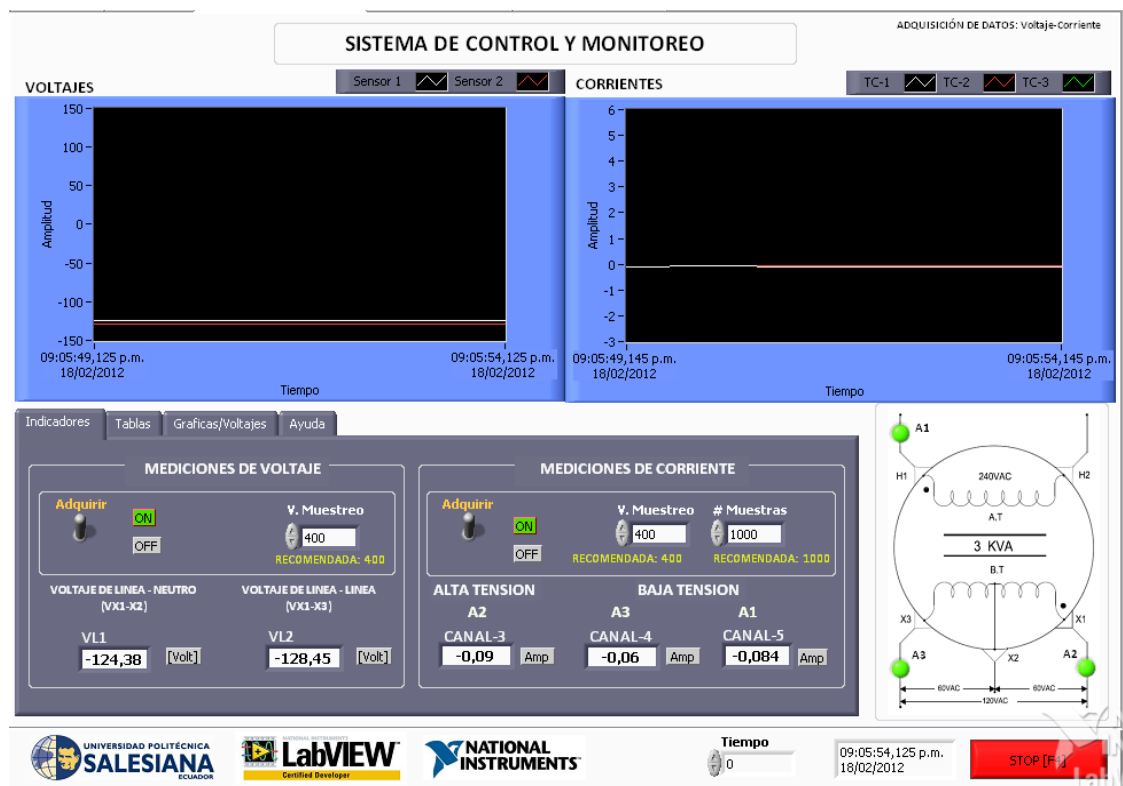


Fuente: Los Autores

La siguiente gráfica muestra el panel de control de adquisición de la señal de corriente, se muestra sus partes y controles que componen el programa en LabVIEW.

1. El control de medición de corriente, posee un Switch que me habilita la adquisición de la señal de los 3 canales de corriente (CH3, CH4, CH5) destinados a esta medición.
2. Además posee dos controles numéricos e indicadores tipo led, los cuales permiten controlar la velocidad de muestreo y el número de muestras que se desee tomar.

GRÁFICA 3.8 PANTALLA PRINCIPAL DEL CONTROL Y ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL DE CORRIENTE.



Fuente: Los Autores

CAPÍTULO IV

ADQUISICIÓN DEL PARAMETRO DE TEMPERATURA EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

4.1 LA TEMPERATURA.

La temperatura es una magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente, en el caso de los transformadores de distribución sumergidos en aceite la temperatura esta directamente relacionada con la duración de los materiales de aislamiento.

Lo cual me permite de cierta manera predecir la vida útil del transformador al obtener la temperatura del devanado y del aceite lo cual hace posible el procedimiento de evaluación de diseño para un transformador, en los diferentes desarrollo de modelo térmico se ha encontrado un procedimiento simplificado al que hacen referencia algunas empresas y fabricas de transformadores este modelo resumido es mas aceptable según las normas IEEE C57.119-2001, ANSI C57-12.90:93 e INEN 2119:98 para predicción de vida útil y diseño.

Estas normas consideran que el método que lleva a la predicción de la vida útil del transformador, es el método de la carga simulada por corto circuito porque es el que mas se acerca a la simulación normal de trabajo del transformador.

En un transformador de distribución sumergido en aceite el bobinado es de cobre o de aluminio, estos materiales tienen un coeficiente de temperatura relativamente alto, lo que significa que al variar la temperatura de la máquina, variará la resistencia del bobinado y se presentan perdidas por efecto Joule el fenómeno por el cual si por conductor circula corriente eléctrica en este caso en el bobinado, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura.

4.2 MEDIOS DE ENFRIAMIENTO DEL TRANSFORMADOR.

Todos los transformadores tienen identificado el método de enfriamiento con que fueron diseñados. En los transformadores sumergidos en aceite, la identificación está expresada en cuatro letras que conforman un código que se describe a continuación.

4.2.1 PRIMERA LETRA.

Medio de enfriamiento interior en contacto con los devanados:

- O** Aceite mineral o líquido aislante sintético con punto de inflamación menor a 300 °C.
- K** Líquido aislante con punto de inflamación mayor a 300 °C.
- L** Líquido aislante con punto de inflamación no medible.

4.2.2 SEGUNDA LETRA.

Mecanismo de circulación para el medio de enfriamiento interior

- N** Flujo por convección natural a través del equipo y en los devanados.
- F** Circulación forzada a través del equipo (por ejemplo con bomba refrigerante), flujo por convección natural en los devanados (también llamado flujo indirecto).
- D** Circulación forzada a través del equipo, dirigido desde el equipo de enfriamiento hasta al menos dentro del devanado principal

4.2.3 TERCERA LETRA.

Medio enfriamiento exterior

- A** Aire
- W** Agua

4.2.4 CUARTA LETRA.

Mecanismo de circulación para el enfriamiento exterior.

N Convección natural.

F Circulación forzada (por ejemplo: ventilador para el caso de enfriamiento con aire; bomba para el caso de refrigeración con agua).

TABLA 4.1. ORDEN DE LOS SÍMBOLOS PARA LA DESIGNACIÓN DEL MÉTODO DE REFRIGERACIÓN SEGÚN NORMA NTC 800

| Primera letra | Segunda letra | Tercera letra | Cuarta letra |
|---|---|-------------------------------|---|
| Medio de enfriamiento interno en contacto con los devanados | Mecanismo de circulación para medio de enfriamiento interno | Medio de enfriamiento externo | Mecanismo de circulación para medio de enfriamiento externo |
| O, K, L | N, F, D | A, W | N, F |

Fuente: Normas sector eléctrico, www.wmsas.co, 2000

4.3 LÍMITE DE CALENTAMIENTO DEL TRANSFORMADOR.

Un valor excesivo de la temperatura de los arrollamientos provoca la carbonización lenta de los aislamientos en contacto con el cobre, por otra parte, el aceite calentado mucho tiempo por encima de ciertos límites, se descompone formando sobre los arrollamientos depósitos de reacción ácida que impiden la evacuación del calor

Cuando se habla de límites de calentamiento del transformador, se hace referencia a la elevación máxima de la temperatura promedio de los devanados con respecto a la temperatura ambiente, y esta elevación máxima se establece bajo las siguientes condiciones que a continuación se describen:

4.3.1 ALTITUD.

La altitud para la cual fue diseñado el transformador es dada por el fabricante, y en caso de no conocerse este dato, se supone que esta no pasará de 1000 m.s.n.m.

Esta condición afecta significativamente a la refrigeración de los transformadores debido a que a mayor altitud la densidad del aire se reduce e incrementa el calentamiento del transformador que hará reducir su vida útil, rendimiento y disminuir su capacidad de potencia nominal para la cual fue construido.

4.3.2 TEMPERATURA DEL AGENTE REFRIGERANTE.

A menos que se especifique lo contrario por el fabricante la temperatura máxima del aire ambiente será de 40 °C y la temperatura promedio diaria del aire será 30 °C.

Se recomienda que la temperatura promedio se calcule mediante el promedio de lecturas consecutivas tomadas cada hora durante 24 h. Cuando el transformador funcione a la intemperie, puede tomarse el promedio de las temperaturas máxima y mínima diaria. En caso de que el transformador opere a altitudes mayores a 1000 m.s.n.m., la temperatura promedio del aire refrigerante no deberá exceder los valores de la tabla siguiente:

TABLA 4.2. TEMPERATURA PROMEDIO MÁXIMA PERMISIBLE DEL AIRE REFRIGERANTE A LA POTENCIA NOMINAL DEL TRANSFORMADOR

| Tipo de refrigeración del transformador | Auto-refrigerado sumergido en líquido refrigerante | | | |
|---|---|-------|-------|-------|
| Altitud (mts) | 1000 | 2000 | 3000 | 4000 |
| Temperatura Máx. (Interna del transformador) | 30 °C | 28 °C | 25 °C | 23 °C |

Fuente: Los Autores

Los límites de calentamiento se han estandarizado de acuerdo el calentamiento admitido por los materiales aislantes utilizados en la construcción del transformador.

4.3.3 CLASE DE MATERIALES.

Clase A.- materiales orgánicos como algodón, seda, papel y fibras análogas, impregnadas con barnices orgánicos.

Clase Ao.- los mismos materiales anteriores sumergidos en aceite.

Clase E.- materiales llamados resistentes al calor, a base de papel bakelizado o barnizado e hilos de esmalte sintético, sin impregnar. Papel impregnado con resinas sintéticas.

Clase B.- materiales inorgánicos como mica, amianto, productos de vidrio y sustancias minerales análogas. Impregnados con barnices sintéticos.

Clase F.- los materiales de la clase anterior impregnados en siliconas modificadas con barnices orgánicos sintéticos.

Clase H.- los mismos materiales de la clase B, pero impregnados con siliconas puras.

Clase C.- mica, porcelana, vidrio, cuarzo y sustancias análogas incombustibles.

TABLA 4.3. LÍMITES DE CALENTAMIENTO DE LOS AISLAMIENTOS DE ACUERDO A SU CLASE.

| Clase de aislamiento | A | Ao | E | B | F | H | C |
|------------------------------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Temperatura máx. [°C] | 105 | 115 | 120 | 130 | 155 | 180 | 220 |

Fuente: Los Autores

La norma técnica ecuatoriana NTE INEN 2126-1998, establece como límites de calentamiento para los transformadores sumergidos en líquido refrigerante son los siguientes:

- El límite de calentamiento para los devanados con clase de aislamiento Ao y cualquier método de refrigeración será de 65 °C medidos por la variación de resistencia.
- El límite de calentamiento del líquido refrigerante con cualquier método de refrigeración (medido por termómetro), será de 60 °C cuando el transformador esté sellado o equipado con un conservador (tanque de expansión) y 55 °C cuando el transformador no esté sellado o así equipado.¹⁵
- La temperatura de los circuitos magnéticos y de otras partes no debe alcanzar en ningún caso un valor susceptible a dañar el circuito magnético mismo o las partes adyacentes.

4.4 FACTORES QUE AFECTAN LA VIDA ÚTIL DEL TRANSFORMADOR.¹⁶

Siendo el transformador una parte fundamental dentro de un sistema eléctrico, es importante conocer sus características básicas para su correcta utilización, mantenimiento y cuidado, de esta forma podemos evitar grandes problemas que podrían evitar paradas en la producción de una fábrica, trabajos en oficinas, iluminación necesaria para el tránsito, etc.

Es decir a partir del conocimiento del equipo que se va a utilizar, se podrá evitar grandes pérdidas o millonarias pérdidas por falta de producción entre otras consecuencias que afectarían al desarrollo de la sociedad tan dependiente de la energía eléctrica.

¹⁵ NORMA NTE INEN 2 126:98, Transformadores. Límites de calentamiento

¹⁶ Vida útil del transformador, www.dspace.espol.edu.ec, 2012.

Como se sabe, un transformador es una maquina eléctrica que se encuentra constituida por varias partes (núcleo, devanados, válvulas, radiadores, etc.). Dentro de estos elementos constitutivos, el sistema de aislamiento (aceite y papel) es el componente más importante y es al que se le debe cuidar en mayor grado.

Existen cuatro factores que afectan al sistema de aislamiento de un transformador en aceite: la humedad, el oxígeno, el calor y la contaminación externa.

La humedad puede presentarse en el interior del transformador la misma que disminuye las propiedades dieléctricas del aceite y al no ser sometido a mantenimiento oportunamente puede convertir en conductor al aceite

El oxígeno es otro de los potenciales enemigos del aislamiento de un transformador, ya que, este reacciona con el aceite para formar ácidos orgánicos. El oxígeno proviene de la atmósfera o es liberado por el transformador como resultado de aplicarle calor, además no es posible eliminar todo el oxígeno existente en un transformador inclusive si el llenado del mismo se lo realiza con vacío

Se sabe que el 90% del deterioro del transformador es de origen térmico. La degradación térmica del aislamiento es función del tiempo, de la temperatura y de cuan seco esta el aislamiento. Las elevadas temperaturas causan un envejecimiento acelerado del transformador empleada como aislamiento, reduciéndose la rigidez mecánica y eléctrica de la misma, produciéndose la de-polimerización o destrucción del papel; otros efectos debidos a las elevadas temperaturas son la generación de agua, materiales ácidos y gases (CO₂, CO).

Los contaminantes externos pueden presentarse en forma de “caspa”, provenientes del proceso de manufactura del transformador y que no han sido propiamente eliminados en el proceso de llenado del transformador con aceite. Partículas diminutas pueden desprenderse cuando el transformador esta en servicio. Otro contaminante es el PCB (policlorhidrato de bifenilo), el cual reduce la capacidad del aceite de soportar sobre tensiones.

4.5 MODELO TÉRMICO DEL TRANSFORMADOR.

El transformador es un dispositivo que es enfriado por convención natural, (por el aire ambiente), o por refrigeración forzada, (por un sistema de agua o sumergido en aceite dieléctrico), o por aire forzado, (sistemas de ventiladores en los radiadores) entre otros.

El modelo térmico del transformador, permite en cierta medida, predecir la vida útil del transformador al obtener la elevación de la temperatura en los devanados y el aceite, haciendo posible seguir el procedimiento de evaluación de diseño para un transformador de potencia o distribución.

La evaluación del comportamiento de los transformadores de distribución se realizó usando el modelo exponencial descrito en las normas IEEE C57-91[4] e IEC 60076-7, puesto que es fácil de implementar y los parámetros requeridos se pueden medir durante el ensayo de calentamiento [2]. En el gráfico 4.1 se muestra un diagrama simplificado del comportamiento térmico de los transformadores de distribución.

En donde:

$\Delta\theta_{BO}$ = Elevación de la temperatura en la parte inferior del aceite

$\Delta\theta_{AO}$ = Elevación de la temperatura en la parte media del aceite

$\Delta\theta_{TO}$ = Elevación de la temperatura en la parte superior del aceite

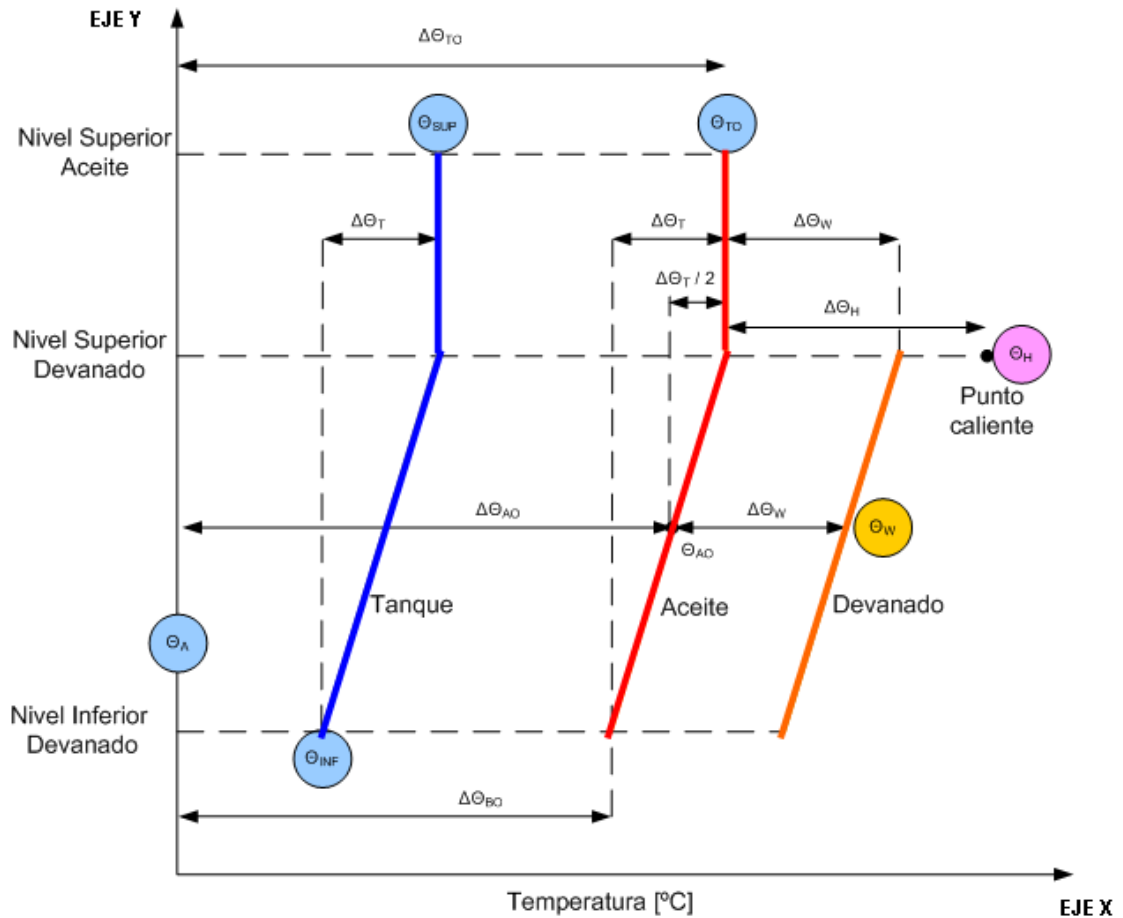
$\Delta\theta_W$ = Elevación de la temperatura en los devanados

θ_{INF} = Temperatura en la parte inferior del tanque

θ_{TO} = Temperatura en la parte superior del aceite

θ_W = Temperatura en los devanados

GRÁFICO 4.1. DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURAS EN EL TRANSFORMADOR



Fuente: Grupo de investigación en alta tensión, Universidad del Valle-Colombia

Estos parámetros se pueden obtener a partir de ensayos, siguiendo el procedimiento sugerido en la IEEE C57.119 teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:¹⁷

- La temperatura del aceite se incrementa linealmente desde la parte inferior hasta la parte superior de los devanados. De aquí hasta el nivel superior la temperatura del aceite se mantiene constante.

¹⁷ CADAVID H, y otros, *Evaluación del comportamiento térmico del transformador de distribución*, Bogotá-Colombia, 2001

- La temperatura en la parte externa del tanque es proporcional a la temperatura del aceite, por lo cual se puede calcular la temperatura en la parte inferior ($\Delta\theta_{BO}$) y en la parte media ($\Delta\theta_{AO}$) del aceite a partir de la temperatura medida en la parte superior (θ_{SUP}) e inferior (θ_{INF}) del tanque y en la parte superior del aceite (θ_{TO}).
- La temperatura de los devanados aumenta linealmente desde la parte inferior hasta la parte superior con una diferencia constante ($\Delta\theta_W$) con respecto al aceite.
- La temperatura del punto más caliente se encuentra en la parte superior del devanado y es mayor a la temperatura promedio del mismo. Esto se debe al incremento de las pérdidas adicionales en esta parte del devanado.

4.6 ELEVACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL ACEITE.

La elevación de temperatura en el aceite es la diferencia entre la temperatura del aceite medida y la temperatura ambiente. La elevación final de la temperatura del aceite sobre el ambiente se logra cuando la elevación de la temperatura no varía más que 2.5% o 1°C durante un periodo consecutivo de tres horas [3]

$$T_o = t_o - t_{amb}$$

Donde:

T_o = Elevación de la temperatura del aceite en °C

t_o = Temperatura superior del aceite en °C

t_{amb} = Temperatura ambiente en °C

La temperatura superior del aceite debe medirse mediante una termocupla o termómetro apropiado; inmerso aproximadamente 50mm bajo la superficie superior del aceite.

Cuando el transformador bajo ensayo no posea radiadores se ubican las termocuplas o termómetros en las alturas que se determinan de la siguiente manera:

- Nivel superior : altura media entre el nivel superior del aceite y el extremo superior del devanado
- Nivel interior : altura media entre la base del tanque y el extremo inferior del devanado

4.7 ELEVACIÓN DE TEMPERATURA PROMEDIO DE LOS DEVANADOS.¹⁸

La elevación de temperatura promedio de un devanado debe ser la temperatura promedio del devanado menos la temperatura ambiente:

$$T_{pd} = T - t_{amb}$$

La temperatura promedio de los devanados debe determinarse por el método de las resistencias, La temperatura promedio de un devanado debe determinarse por la siguiente formula:

$$T = R/R_o (T_k + T_{or}) - T_k$$

Donde:

T = Temperatura promedio del devanado correspondiente a la resistencia en caliente R en °C

T_{or} = Temperatura a la cual se midió la resistencia en frío en °C

R_o = resistencia en frío en Ω; la cual debe ser calculada en un transformador debe haber estado sin excitación o sin carga por lo menos durante 3 horas

R = resistencia en caliente en Ω

T_k = 234,5 °C para cobre, y 225°C para aluminio

¹⁸ CADAVID H, y otros, *Evaluación del comportamiento térmico del transformador de distribución*, Bogotá-Colombia, 2001

4.8 CONSIDERACIONES DE LA TEMPERATURA EN EL PUNTO MÁS CALIENTE.

La temperatura de elevación de los devanados se distribuye de forma no homogénea a lo largo y ancho de los devanados sin tener forma específica, haciendo que la variable de mayor interés en el transformador sea la elevación de la temperatura en el punto más caliente porque muestra en sí el grado de confianza del diseño del transformador y de su vida útil.

Una manera más adecuada de hallar esta temperatura es suponer que la temperatura del punto más caliente del transformador aumenta linealmente desde la parte de abajo hasta la parte de arriba haciendo con este procedimiento la temperatura del punto más caliente esté ubicada en la parte de arriba del devanado y que por tal causa esa temperatura sea mayor a la temperatura promedio de los devanados.

En la guía de la IEEE C57-91 se recomienda añadir a la elevación promedio del devanado 15°C (para transformadores de distribución de baja potencia) con la finalidad de acercarse aun más a la temperatura del punto más caliente. [4]

$$\Delta\theta_H = \theta A + \Delta\theta_{TO} + \Delta\theta_H$$

$$\theta_H = T_{amb} + (\theta_{TO} - T_{amb}) + (15 + \Delta\theta_W)$$

$$\theta_H = T_{amb} + (\theta_{TO} - T_{amb}) + (15 + R/R_o (T_k + T_o) - T_k)$$

4.9 ECUACIONES DE ENVEJECIMIENTO.

Experimentalmente el deterioro del aislamiento con el tiempo sigue una adaptación de la teoría de la velocidad de reacción de Arrhenius y esta dada por la siguiente expresión:

$$\text{Vida (p.u.)} = A \cdot e^{(B / (\theta h + 273))}$$

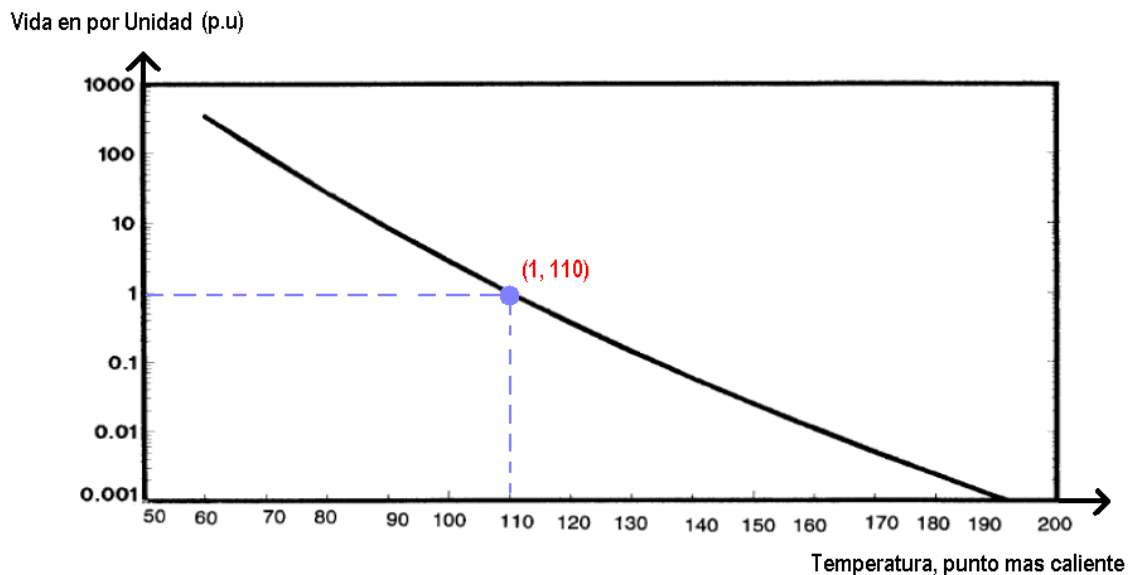
Donde θ_h es la temperatura del punto mas caliente y los valores de las constantes A y B son para transformadores con temperatura de arrollamientos de 65°C.

$$\text{Vida (p.u.)} = 9.80 \times 10^{-18} \cdot E (15000 / (\theta_h + 273))$$

La curva de vida por unidad del aislamiento del transformador de la gráfica relaciona la vida del aislamiento del transformador por unidad con la temperatura del punto mas caliente del bobinado.

El uso de esta curva aísla la temperatura como principal variable que afecta la vida térmica. Indica además el grado de envejecimiento hasta el cual el nivel de envejecimiento es acelerado por encima de lo normal para temperaturas por encima de una temperatura de referencia de 110°C y se reduce debajo de lo normal para temperaturas debajo de 110°C.

GRÁFICO 4.2. CURVA DE VIDA POR UNIDAD RELACIONA, VIDA DEL AISLAMIENTO P.U, CON LA TEMPERATURA MÁS CALIENTE DEL BOBINADO



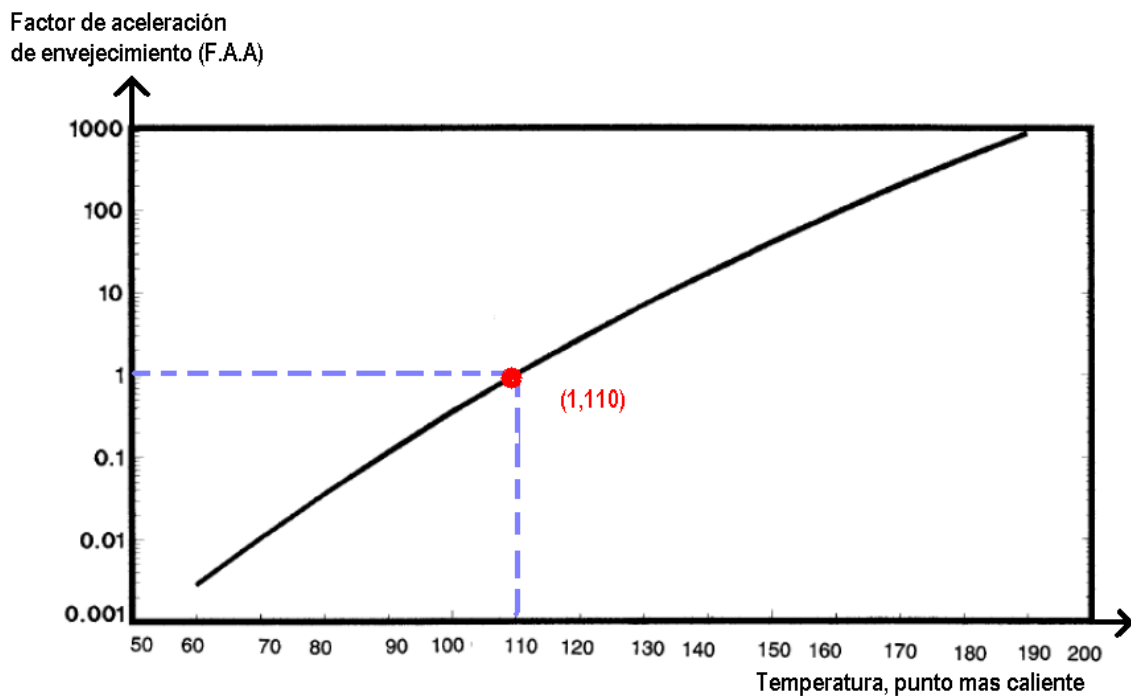
Fuente: Vida residual del aislamiento de un transformador, dspace.epn.edu.ec

En la gráfica 4.3. Muestra los valores del factor de envejecimiento (FAA) vs temperatura del punto más caliente para un sistema de aislación con sobre temperatura de 65°C la expresión de factor de aislamiento es la siguiente:

$$FAA = e \left(\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta H + 273} \right)$$

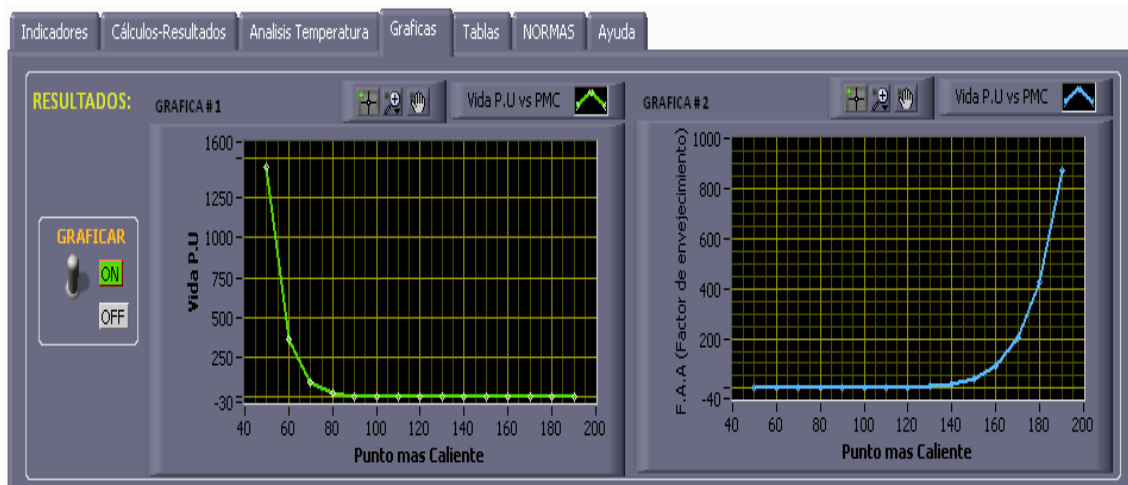
El factor de envejecimiento (FAA) es mayor que 1 cuando θH es mas de 110°C lo que sugiere perdida de vida (para envejecimiento normal y es menor que 1 cuando θH es inferior a 110°C por lo tanto es indicador de extensión de vida sin embargo el equivalente ganado en vida por operar a baja temperatura es menor que la correspondiente perdida por trabajar a altas temperaturas.

GRÁFICA 4.3. SE MUESTRA LOS VALORES DE FAA VS TEMPERATURA DEL PUNTO MÁS CALIENTE



Fuente: Vida residual del aislamiento de un transformador, dspace.epn.edu.ec

GRÁFICA 4.4. GRÁFICA DE RESULTADOS DE LA VIDA ÚTIL Y FACTOR DE ENVEJECIMIENTO VS EL PUNTO MÁS CALIENTE DEL TRANSFORMADOR



Fuente: Los Autores

El uso de la tasa de envejecimiento relativo puede ser considerado despreciable para un θH por debajo de 80°C y se define con la siguiente ecuación:

$$\text{Tasa de envejecimiento relativo} = V = 2^{((\theta H - 98) / 6)}$$

El valor de la tasa de envejecimiento aumenta a medida que la temperatura del punto más caliente es mayor, ya que a mayor temperatura del punto mas caliente la vida útil del transformador disminuye ya que la temperatura elevada le resta eficiencia a la máquina por esta razón las normativas recomiendan que el valor del punto mas caliente no supere los 110°C .

En la mayoría de los transformadores, la distribución de la temperatura no es uniforme, la parte que está operando a la mayor temperatura sufrirá normalmente el mayor deterioro.

Es usual en estudios del envejecimiento tomar en consideración los efectos de envejecimiento producidos por la mayor temperatura (en los puntos más calientes).

TABLA 4.4. TASA DE ENVEJECIMIENTO RELATIVO POR TEMPERATURA DEL PUNTO MÁS CALIENTE

| θH | Tasa de envejecimiento relativo | Factor de Envejecimiento (FAA) |
|--------------|--|---------------------------------------|
| 80 | 0.125 | 0.036 |
| 86 | 0.25 | 0.073 |
| 92 | 0.5 | 0.145 |
| 98 | 1.0 | 0.282 |
| 104 | 2.0 | 0.536 |
| 110 (mínimo) | 4.0 | 1.0 |
| 116 | 8.0 | 1.83 |
| 122 | 16.0 | 3.29 |
| 128 | 32.0 | 5.8 |
| 134 | 64.0 | 10.1 |
| 140 | 128.0 | 17.2 |

Fuente: Los Autores

4.10 SENSOR DE TEMPERATURA TIPO LM35.

El LM35 es un sensor de temperatura de estado sólido con una precisión calibrada de 1°C y un rango que abarca desde -55°C a +150°C. La salida es lineal y cada grado centígrado equivale a 10mV en la salida.

El sensor se presenta en diferentes encapsulados de igual forma que un típico transistor con 3 pines, dos de ellos para alimentarlo (VCC y GND) y el tercero (VOUT) nos entrega un valor de tensión proporcional a la temperatura medida por el dispositivo.

4.10.1 CARACTERÍSTICAS.

Sus características más relevantes son:

- Esta calibrado directamente en grados Celsius.
- La tensión de salida es proporcional a la temperatura.
- Tiene una precisión garantizada de 0.5°C a 25°C.
- Opera entre 4 y 30 volts de alimentación.
- Baja impedancia de salida.
- Baja corriente de alimentación (60uA).
- Bajo costo.
- El LM35 no requiere de circuitos adicionales para calibrarlo externamente.
- La baja impedancia de salida, su salida lineal y su precisa calibración hace posible que esté integrado sea instalado fácilmente en un circuito de control.
- Debido a su baja corriente de alimentación se produce un efecto de auto calentamiento muy reducido.
- Se encuentra en diferentes tipos de encapsulado, el más común es el TO-92, utilizada por transistores de baja potencia

4.10.2 APLICACIÓN.

En nuestro modulo didáctico el LM35 es un elemento que nos permite sensar la temperatura del ambiente, al mismo se le realiza una adecuación de señal mediante amplificadores operacionales para obtener una señal de tensión adecuada, su rango de salida va desde 0V hasta 1.5VDC es decir que antes de ingresar la señal debe ser amplificada.

El circuito de la figura 3.5 detalla la adecuación necesaria para la señal entregada por el sensor tipo LM35.

$$G = \text{POT} / \text{R7}$$

$$G = 6.7\text{K} / 1\text{K} = 6.7$$

La ganancia para el segundo amplificador (U7: B) se define de la siguiente manera:

$$G = \text{R9} / \text{R8}$$

$$G = 1\text{K} / 1\text{K} = 1$$

La tensión V_o se define de la siguiente manera

$$V_o = G (V_{\text{out LM35}})$$

$$V_o = 6.7 (1.5) = 10.05\text{V}$$

4.10.3 LINEALIZACIÓN.

Para determinar la linealización de V_{out} con respecto a la temperatura se determinó la siguiente ecuación:

$$V_{\text{out}} = 1.834 / 28 = 0.0655T$$

Para las pruebas realizadas se obtuvieron los valores de la tabla 4.6.

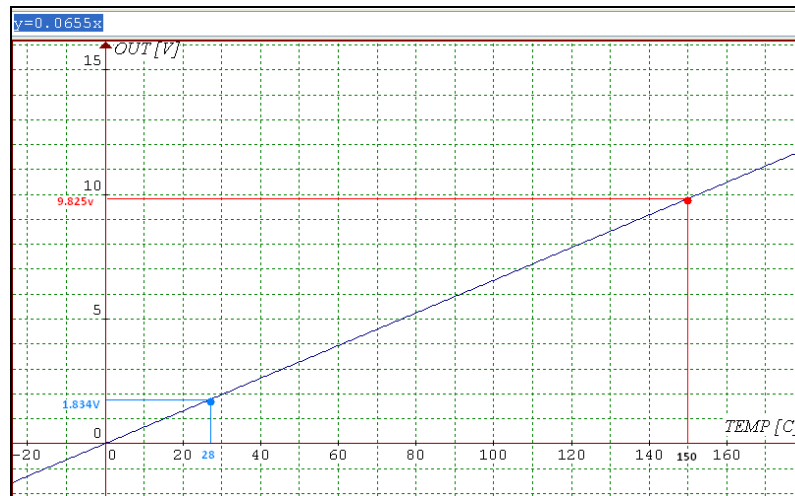
TABLA 4.6. PRUEBAS DE TEMPERATURA VS TENSIÓN DE SALIDA DEL CIRCUITO QUE ADECUA LA SEÑAL DE TEMPERATURA

| Temperatura [°C] | VOUT [V] |
|------------------|----------|
| 0 | 0 |
| 28 | 1.834 |
| 150 | 9.825 |

Fuente: Los Autores

Según los valores de la tabla 4.6, se obtiene la gráfica 4.6. La misma que me muestra los valores de temperatura medidos por el LM35 y la salida del circuito que adecua su señal para ingresarla a la tarjeta SB-RIO.

GRÁFICO 4.6 LA MISMA MUESTRA LA TEMPERATURA (TIN) VS TENSION (VOUT) DE SALIDA DEL CIRCUITO QUE ADECUA LA SEÑAL DEL LM35



Fuente: Los Autores

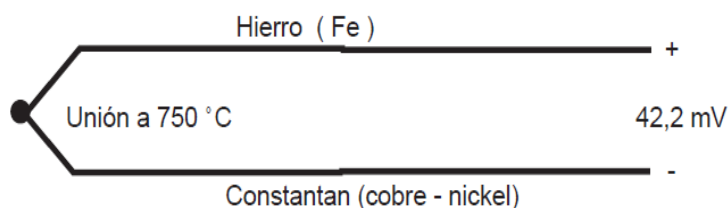
4.11 LA TERMOCUPLA.

La termocupla es un sensor de temperatura más común utilizado industrialmente. Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera una tensión muy pequeña (efecto Seebeck) del orden de los milivolts el cual aumenta con la Temperatura.¹⁹

En nuestro modulo usamos una termocupla "tipo J" está hecha con un alambre de Hierro y otro de constantán (aleación de cobre y nickel) al colocar la unión de estos metales a 750 °C, debe aparecer en los extremos 42.2 mV.

¹⁹ Termocupla, ARIAN, Control e instrumentación, www.arian.cl, pág., 1

GRÁFICO 4.7. DIAGRAMA DE UNA TERMOCUPLA TIPO J



Fuente: Arian, Control e instrumentación, www.arian.cl

4.11.1 TIPOS DE TERMOCUPLAS.

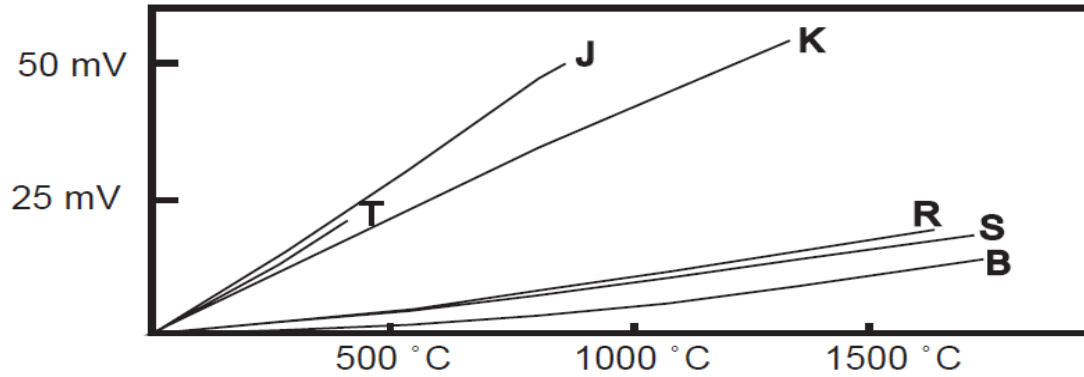
Existen una infinidad de tipos de termocuplas, en la tabla aparecen algunas de las más comunes, pero casi el 90% de las termocuplas utilizadas son del tipo J o del tipo K.

TABLA 4.7 TIPOS DE TERMOCUPLA

| Termocupla | Cable + Aleación | Cable – Aleación | Rango (Mínimo , Máximo) [°C] | Volts Max [mV] |
|------------|---------------------------|--------------------------|------------------------------------|-------------------|
| J | HIERRO | COBRE/NICKEL | (-180,750) | 42.2 |
| K | NICKEL/CROMO | NICKEL/ALUMINIO | (-180,1372) | 54.8 |
| T | COBRE | COBRE/NICKEL | (-250,400) | 20.8 |
| R | 87% PLATINO 13% RHODIO | 100% PLATINO | (0,1767) | 21.09 |
| S | 90% PLATINO 10% RHODIO | 10% PLATINO | (0,1767) | 18.68 |
| B | 70% PLATINO 30% RHODIO | 94% PLATINO 6% RHODIO | (0,1820) | 13.814 |

Fuente: Fuente: Arian, Control e instrumentación, www.arian.cl, 2002

GRÁFICO 4.8 GRÁFICA DE RANGO DE TEMPERATURAS (°C) Y TENSIONES MÁXIMAS (MV) DE DIFERENTES TIPOS DE TERMOCUPLA



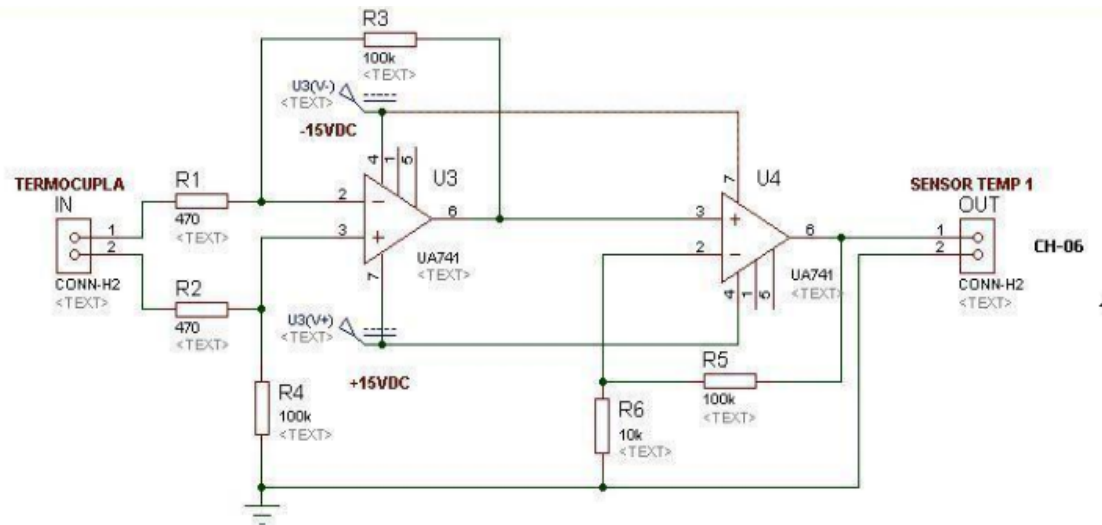
Fuente: Arian, Control e instrumentación, www.arian.cl

4.11.2 LINEALIZACIÓN.

La dependencia entre la tensión entregada por la termocupla y la temperatura no es lineal (no es una recta), el deber del instrumento electrónico destinado es mostrar la lectura y efectuar la linealización, es decir tomar la tensión entregada por la termocupla según el tipo, ver en tablas internas a que temperatura corresponde esta tensión y realizar la adecuación de la señal para ser enviado a la tarjeta de adquisición SB-RIO (*single board rio*).

En el siguiente gráfico se muestra el circuito que realiza la linealización de la tensión entregada con respecto a la temperatura medida, adecua la señal de la termocupla tipo J.

GRÁFICO 4.9 CIRCUITO QUE REALIZA LA LINEALIZACIÓN Y ADECUA LA SEÑAL ENTREGADA POR LA TERMOCUPLA TIPO J



Fuente: Los Autores

4.11.2.1 ECUACIÓN DE LA RECTA DE LA SALIDA DE LA TERMOCUPLA:

$$Y - Y_1 = ((Y_2 - Y_1) / (X_2 - X_1)) (X - X_1)$$

$$Y - 0.9\text{mV} = ((2.9 - 0.9) / (99 - 50)) (X - 50)$$

$$Y - 0.9\text{mV} = (2\text{mV} / 49) (X - 50)$$

$$Y = 0.04082 \times 10^{-3} X - 1.1408 \times 10^{-3}$$

Para los siguientes valores de temperatura medidos durante las pruebas se obtiene los siguientes valores detallados en la tabla 4.6.

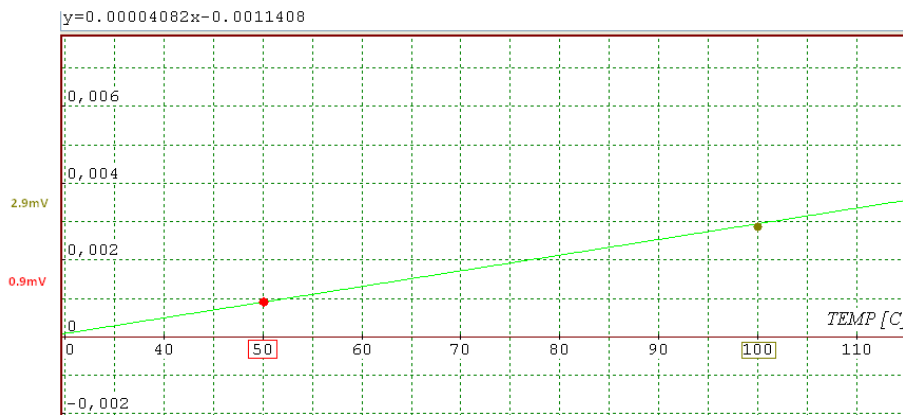
TABLA 4.8 VALORES DE SALIDA DE TENSIÓN VS TEMPERATURA DE LA TERMOCUPLA

| Temperatura [°C] | VOUT [mV] |
|------------------|-----------|
| 50 | 0.9 |
| 100 | 2.9 |

Fuente: Los Autores

En la gráfica 4.10. se muestra la relacion que tiene la tensión de salida de la termocupla con respecto a la temperatura.

GRÁFICO 4.10 RELACIÓN, TENSIÓN DE LA TERMOCUPLA VS TEMPERATURA



Fuente: Los Autores

La señal emitida por la termocupla está en el orden de los milivoltios la cual se requiere amplificar para poder ser ingresada a la tarjeta SB-RIO, la misma se obtiene la siguiente ecuación de la recta que gobierna la salida del circuito que adecua la señal de temperatura de la termocupla.

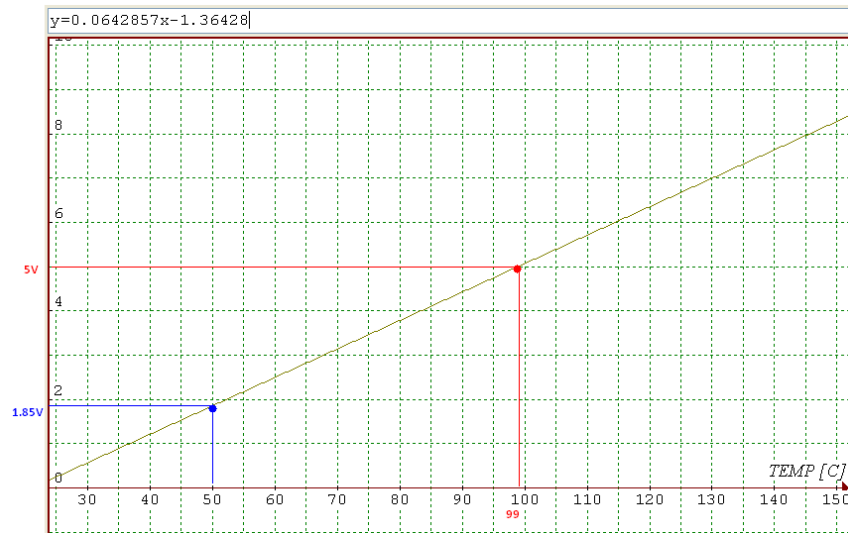
$$Y-Y1=(Y2-Y1/X2-X1)(X-X1)$$

$$Y-1.85=(3.15/49)(X-50)$$

$$Y=0.0642857X-1.36428$$

En la gráfica 4.11. se muestra la relacion de salida que tiene la temperatura medida por la termocupla y la tensión que se ingresara a la tarjeta SB-RIO.

GRÁFICO 4.11 GRÁFICA DEL CIRCUITO QUE ADECUA LA SEÑAL DE TENSIÓN EMITIDA POR LA TERMOCUPLA



Fuente: Los Autores

4.12 ADQUISICIÓN Y PRESENTACIÓN DE DATOS MEDIANTE EL SOTWARE LABVIEW.

La información analizada durante el desarrollo de este capítulo es implementada en labview mediante la adecuación de señales y adquisición de datos, la adecuación de señales se la realiza mediante circuitos electrónicos y la adquisición de datos se da mediante la tarjeta SB-RIO.

Se muestra la ventana de control del parámetro temperatura de un transformador de distribución, en donde se puede observar los valores de la temperatura en el ambiente, temperatura en el aceite, y la temperatura en el punto mas caliente.

Además se pueden ingresar los valores obtenidos durante la prueba de las resistencias para obtener la temperatura en el devanado.

Una vez adquiridos los datos antes mencionados se puede determinar el valor del punto más caliente en °C, la vida absoluta del transformador en p.u., el factor de aceleramiento de envejecimiento, y la tasa de envejecimiento relativa.

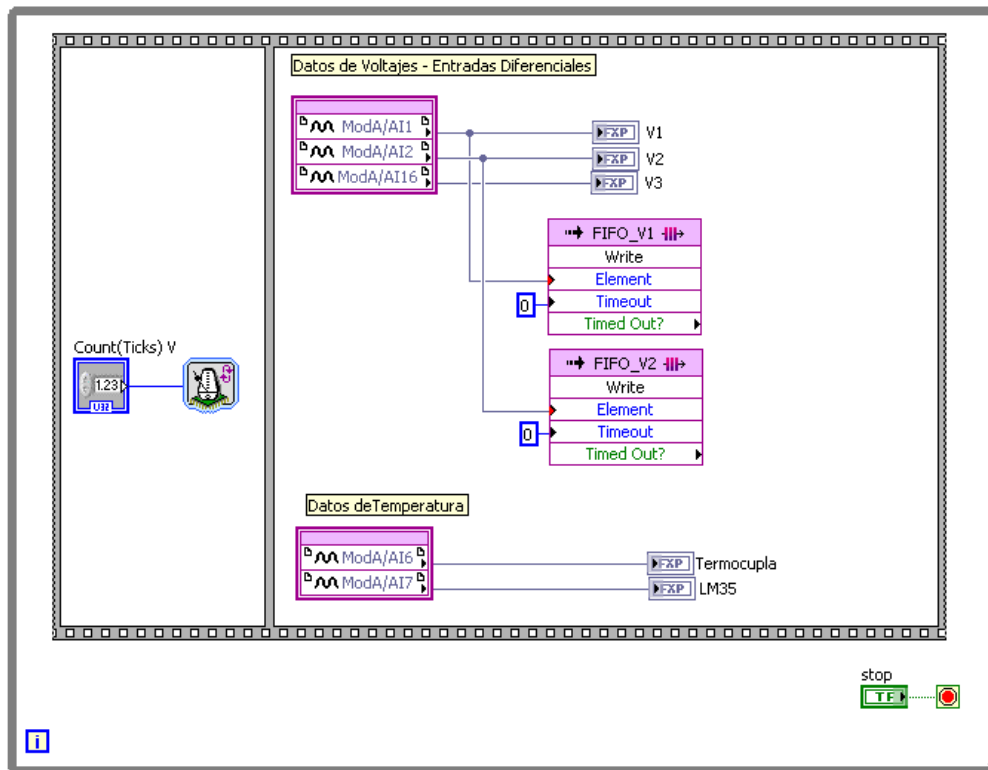
También se muestra gráficos de la temperatura adquirida durante el funcionamiento del transformador.

4.12.1 PROGRAMACIÓN VARIABLE DE TEMPERATURA.

En la siguiente gráfico se muestra la ventana de programación en FPGA de los sensores de corriente de efecto hall, se muestra las partes y funciones en el diagrama de bloques de LabVIEW que componen el programa.

1. El programa principal se encuentra en un ciclo “WHILE” donde la condición es que se ejecute y adquiera datos de manera continua, hasta que se detenga presionando stop.
2. Después una estructura Flat (consiste en uno o más subdiagramas que se ejecutan secuencialmente de acuerdo a la estructura del programa) contiene en su primer diagrama un VI de tiempo que controla la adquisición de datos o la frecuencia de muestreo que se desee utilizar, puede ser hasta de 25 ns (400Mhz), según la frecuencia que se necesite y posea la tarjeta.
3. Se muestra el nodo FPGA (*Field programable gate array*, o campo programable de compuertas) la cual se pueden agregar las entradas analógicas que van a ser utilizadas para cada señal del sensor, conectadas a estas un bloque de memoria FIFO (*First in first out*, o entrada y salida) la cual es ubicada para guardar la información que obtiene el sensor y no dejar que se pierdan los datos, además se pueden colocar indicadores numéricos para su visualización.

GRÁFICO 4.12 PROGRAMACIÓN EN FPGA DE LA ADQUISICIÓN DE LA SEÑAL DE TEMPERATURA



Fuente: Los Autores

El gráfico 4.13 muestra el panel de control y monitoreo de la variable de temperatura, se muestra las partes y funciones del panel frontal en LabVIEW.

1. El panel frontal presenta un *Waveform chart* donde me presenta en forma gráfica los valores adquiridos por los sensores de temperatura del aceite y ambiente.
2. Muestra un *Waveform chart* independiente del resultado obtenido del punto más caliente dentro del transformador, donde se pueden ajustar niveles de baja y alta temperatura.
3. *Switch* donde adquirimos la señal proveniente de los sensores externos, al momento de poner adquirir en posición ON.
4. Indicadores de la temperatura obtenida de los sensores y resultados de análisis.

GRÁFICO 4.13 VENTANA DE CONTROL PARA EL PARÁMETRO DE TEMPERATURA, MUESTRAN LOS DATOS ADQUIRIDOS DURANTE LAS PRUEBAS REALIZADAS

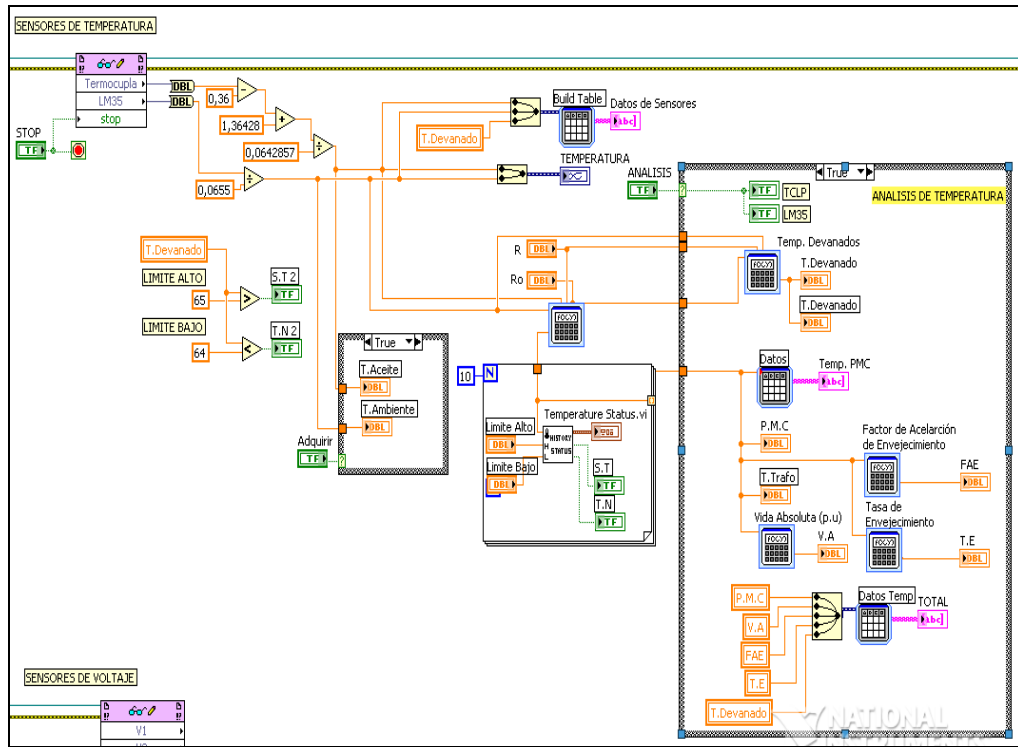


Fuente: Los Autores

El gráfico 4.14 muestra la programación en el diagrama de bloques en LabVIEW para la ventana de control donde se ingresa la ecuación que gobierna ambos sensores de temperatura tanto al LM35 (temperatura ambiente) y a la termocupla tipo J (temperatura del aceite), para la adecuación y linealización de las señales de cada una respectivamente y de esta manera ser mostrado en la ventana de control.

Los datos obtenidos en el análisis se presentan en tablas, poseen límites mínimo y máximo de alarmas, además posee una botonera para almacenar los datos obtenidos para un posterior análisis a futuro.

GRÁFICO 4.14 EN ESTA VENTANA SE MUESTRA LA PROGRAMACIÓN PARA LOS DATOS ADQUIRIDOS POR LA TERMOCUPLA Y LM35

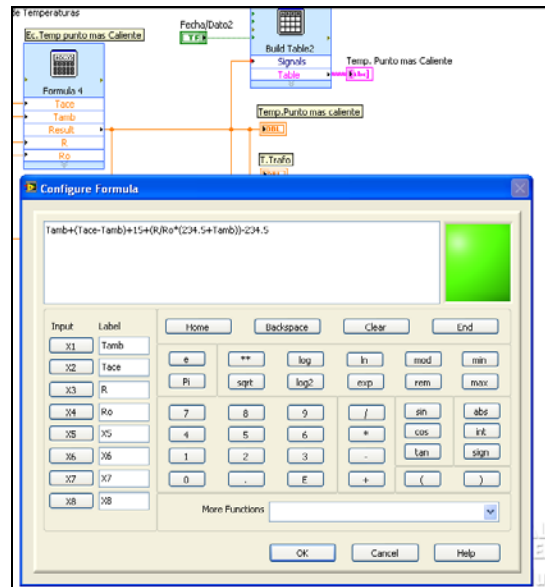


Fuente: Los Autores

En el gráfico 4.14 se detalla el ingreso de las ecuaciones explicadas y analizadas durante el desarrollo de este capítulo.

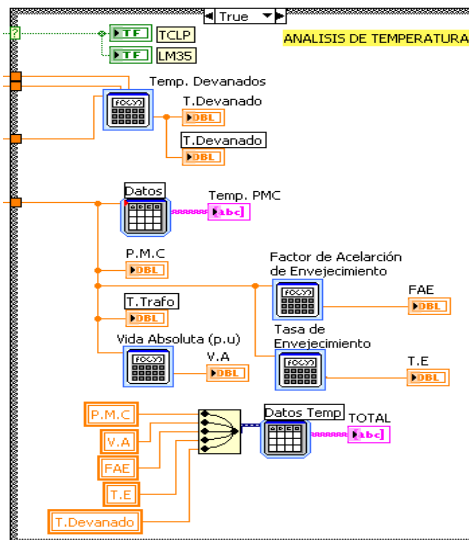
Cada ecuación es ubicada de manera ordenada en una formula dentro de un (“*case structure*”, para obtener dos valores dependiendo si es verdadero o falso) en el diagrama de bloques de LabVIEW, como la que se utiliza para determinar el punto más caliente del transformador, la vida absoluta del transformador en por unidad (p.u), el factor de aceleramiento de envejecimiento y la tasa de envejecimiento relativa, además se ubican tablas e indicadores numéricos para su visualización en el panel frontal.

GRÁFICO 4.15 MUESTRA EL INGRESO DE LA ECUACIÓN PARA DETERMINAR LA TEMPERATURA DEL PUNTO MÁS CALIENTE DEL UN TRANSFORMADOR



Fuente: Los Autores

GRÁFICO 4.16 MUESTRA EL INGRESO Y CÁLCULO DE VIDA ABSOLUTA, FACTOR DE ACELERACIÓN, Y LA TASA DE ENVEJECIMIENTO DEL TRANSFORMADOR



Fuente: Los Autores

La gráfica 4.17 muestra el panel de control del análisis realizado de temperatura al transformador de distribución.

1. El control muestra una opción donde se debe ingresar los datos de la persona que está elaborando la prueba de calentamiento.
2. El ingreso de la resistencia obtenida en las pruebas de calentamiento por medio de un control numérico, donde la R_0 , es la resistencia medida en frío a una temperatura ambiente como ejemplo, el valor de R es la resistencia medida después de haber realizado la prueba de calentamiento al transformador siguiendo las normas técnicas ecuatorianas INEN 2 118:98 [5].
3. Al habilitar el *Switch* de Análisis en ON, el panel frontal muestra los datos obtenidos por los sensores en el transformador, además los resultados de temperatura en el devanado, punto más caliente, su vida útil en por unidad (p.u), factor de envejecimiento y su tasa de envejecimiento.
4. Los datos obtenidos pueden ser guardados posteriormente para un análisis presionando el botón de GUARDAR ANÁLISIS.

GRÁFICA 4.17. PANEL DE CONTROL DE ANÁLISIS DE TEMPERATURA.



Fuente: Los Autores

5. El panel de control posee una pestaña de ayuda en la realización de la prueba de calentamiento y toma de muestras como muestra la figura 4.18.

GRÁFICA 4.18 VENTANA DE AYUDA EN LA REALIZACIÓN DE LA MEDIDA DE RESISTENCIA EN LOS DEVANADOS.

The screenshot shows a software interface with a menu bar at the top containing 'Indicadores', 'Cálculos-Resultados', 'Análisis Temperatura', 'Gráficas', 'Tablas', 'NORMAS', and 'Ayuda'. The 'Ayuda' tab is active, displaying instructions for transformer resistance measurement. The text includes: 'PASOS PARA OBTENER LOS CÁLCULOS DE LA VIDA ÚTIL DEL TRANSFORMADOR.', '- PARA OBTENER LA MEDIDA DE RESISTENCIA EN EL TRANSFORMADOR SE NECESITA LA AYUDA DE UN PUNTE DE WHEASTSTONE', 'NORMA: NTE INEN 2 118:98', and a numbered list of steps: 1. [R] - RESISTENCIA MEDIDA DESPUÉS DE LA PRUEBA; 1.1 PARA OBTENER ESTE VALOR, EL ENSAYO INICIA CON EL TRANSFORMADOR A CUALQUIER TEMPERATURA EN EL ACEITE (COMO EJP, TOMAMOS A TEMP AMBIENTE); 1.2 SE SUMINISTRA UNA CORRIENTE IGUAL AL PORCENTAJE DE CARGA QUE SE DESEA ENSAYAR DURANTE UNA HORA.; 1.3 POSTERIORMENTE SE DESENERGIZA AL TRANSFORMADOR Y SE MIDE LA RESISTENCIA EN EL DEVANADO.; 2. [Ra] - RESISTENCIA MEDIDA EN FRÍO A UNA TEMPERATURA T₀. (EJP A TEMP AMBIENTE). A yellow arrow points to the right with the text 'Medición de [Ra] y [R]'. To the right is a schematic diagram of a 'TRANSFORMADOR MONOFÁSICO 3 KVA' showing a core with windings labeled A.T and B.T, and terminals X1, X2, and X3. A note below the diagram says 'RESISTENCIA A MEDIR'. The bottom of the window features logos for 'UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA ECUADOR', 'LabVIEW Certified Developer', and 'NATIONAL INSTRUMENTS'. On the right side of the bottom bar, there is a 'Tiempo' field with '1', a timestamp '08:32:26,625 p.m. 18/02/2012', and a red 'STOP [F4]' button.

Fuente: Los Autores

CAPÍTULO V

ENTORNO LABVIEW FPGA Y ADQUISICIÓN DE DATOS

5.1 DESCRIPCIÓN DEL FPGA.

En la última década se han desarrollado diferentes diseños de hardware orientados a control de sistemas subactuados. Por un lado están los que se basan en microprocesadores de propósito general adecuadamente programados. Por otro lado están los que utilizan un hardware totalmente específico. Ambos extremos tienen sus ventajas e inconvenientes.

En la actualidad existen dispositivos que contienen lo mejor de los dispositivos mencionados anteriormente, como son los FPGA's.

Un FPGA (*Field Programmable Gate Array*) es un dispositivo semiconductor que contiene bloques de lógica cuya interconexión y funcionalidad se puede programar. La lógica programable puede reproducir desde funciones tan sencillas como las llevadas a cabo por una puerta lógica o un sistema combinacional hasta complejos sistemas en un chip.²⁰

Las FPGA's tienen la ventaja de ser reprogramables (lo que aumenta una enorme flexibilidad al flujo de diseño), los circuitos se ejecutan más rápido que en los otros dispositivos ya que su ejecución es en paralelo, por lo que los circuitos no necesitan competir por los mismos recursos. Cada tarea de procesos se asigna a una sección dedicada del dispositivo y puede ejecutarse de manera autónoma sin ser afectada por otros bloques de lógica. Como resultado, el rendimiento de una parte de la aplicación no se ve afectado cuando se agregan otros procesos. [6]

²⁰ *Field Programmable Gate Array* <http://es.wikipedia.org>

5.2 EVOLUCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS PROGRAMABLES.

Se entiende por dispositivo programable aquel circuito de propósito general que posee una estructura interna que puede ser modificada por el usuario final.

El primer dispositivo que cumplió estas características fue la memoria PROM, luego los PLD`s los cuales consisten en una matriz de puertas AND conectadas a otra matriz de puertas OR más biestables, mas tarde aparecieron las PLA (Programmable Logic Array), estos dispositivos son muy simples y producen buenos resultados con funcionalidades sencillas (sólo combinacional).

En la actualidad las FPGA`s, introducidas por Linux en 1984, son dispositivos programables por el usuario, las cuales consisten en una matriz bidimensional de bloques configurables que se pueden conectar mediante recursos generales de interconexión. Estos recursos incluyen segmentos de pista de diferentes longitudes, más unos conmutadores programables para enlazar bloques a pistas o pistas entre sí. En realidad, lo que se programa en una FPGA son los conmutadores que sirven para realizar las conexiones entre los diferentes bloques, más la configuración de los bloques. [7]

5.3 ARQUITECTURA DE LA FPGA SPARTAN.

Las FPGA Spartan 3 de Xilinx están conformadas por un conjunto de bloques lógicos configurables (*Configurable Logic Blocks: CLBs*) rodeados por un perímetro de bloques programables de entrada/salida (*Programmable Input/Output blocks: IOBs*). Estos elementos funcionales están interconectados por una jerarquía de canales de conexión (*Routing Channels*), la que incluye una red de baja capacitancia para la distribución de señales de reloj de alta frecuencia.²¹

Los elementos funcionales programables que la componen son los siguientes:

²¹ *Arquitectura de la FPGA Spartan III*, <http://es.scribd.com> , Pág,1

5.3.1 BLOQUES DE ENTRADA/SALIDA (Input/Output Blocks – IOBs).

Controlan el flujo de datos entre los pines de entrada/salida y la lógica interna del dispositivo. Soportan flujo bidireccional más operación tri-estado y un conjunto de estándares de voltaje e impedancia controlados de manera digital.

5.3.2 BLOQUES LÓGICOS CONFIGURABLES (*Configurable Logic Blocks – CLBs*).

Contienen *Look-Up Tables* basadas en tecnología RAM (*LUTs*) para implementar funciones lógicas y elementos de almacenamiento que pueden ser usados como *flip-flops* o como *latches*.

5.3.3 BLOQUES DE MEMORIA RAM (*Block RAM*).

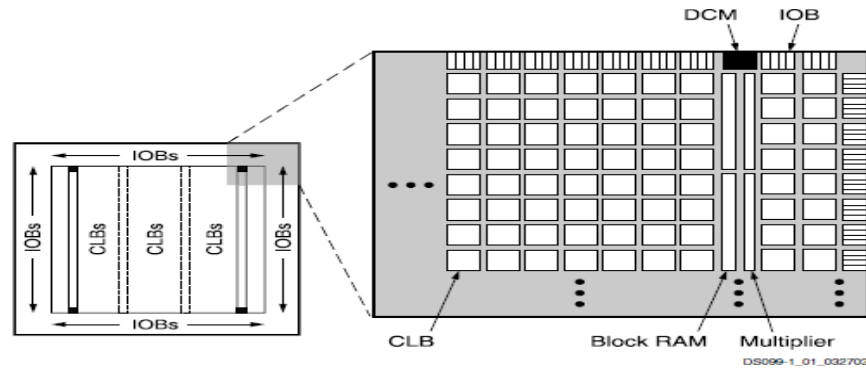
Proveen almacenamiento de datos en bloques de 18Kbits con dos números binarios de 18 bit como entrada y entregan uno de 36 bits.

5.3.4 ADMINISTRADORES DIGITALES DE RELOJ (*Digital Clock Managers – DCMs*).

Estos elementos proveen funciones digitales auto calibrado, las que se encargan de distribuir, retrasar arbitrariamente en pocos grados, desfasar en 90, 180, y 270 grados, dividir y multiplicar las señales de reloj de todo el circuito.

Los elementos descritos están organizados como se muestra en la Gráfica 5.1. Un anillo de IOBs rodea un arreglo regular de CLBs. Atraviesa este arreglo una columna de bloques de memoria RAM, compuesta por varios bloques de 18Kbits, cada uno de los cuales está asociado con un multiplicador dedicado. Los DCMs están colocados en los extremos de dichas columnas.

GRÁFICO 5.1 ARQUITECTURA DE LA SPARTAN 3



Fuente: Arquitectura de la FPGA, www.es.scribd.com

TABLA. 5.1 CARACTERÍSTICAS DE FPGA SPARTAN

| Device | System Gates | Equivalent Logic Cells ⁽¹⁾ | CLB Array (One CLB = Four Slices) | | | Distributed RAM Bits (K=1024) | Block RAM Bits (K=1024) | Dedicated Multipliers | DCMs | Maximum User I/O | Maximum Differential I/O Pairs |
|-------------------------|--------------|---------------------------------------|--------------------------------------|---------|------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|------|------------------|--------------------------------|
| | | | Rows | Columns | Total CLBs | | | | | | |
| XC3S50 ⁽²⁾ | 50K | 1,728 | 16 | 12 | 192 | 12K | 72K | 4 | 2 | 124 | 56 |
| XC3S200 ⁽²⁾ | 200K | 4,320 | 24 | 20 | 480 | 30K | 216K | 12 | 4 | 173 | 76 |
| XC3S400 ⁽²⁾ | 400K | 8,064 | 32 | 28 | 896 | 56K | 288K | 16 | 4 | 264 | 116 |
| XC3S1000 ⁽²⁾ | 1M | 17,280 | 48 | 40 | 1,920 | 120K | 432K | 24 | 4 | 391 | 175 |
| XC3S1500 | 1.5M | 29,952 | 64 | 52 | 3,328 | 208K | 576K | 32 | 4 | 487 | 221 |
| XC3S2000 | 2M | 46,080 | 80 | 64 | 5,120 | 320K | 720K | 40 | 4 | 565 | 270 |
| XC3S4000 | 4M | 62,208 | 96 | 72 | 6,912 | 432K | 1,728K | 96 | 4 | 633 | 300 |
| XC3S5000 | 5M | 74,880 | 104 | 80 | 8,320 | 520K | 1,872K | 104 | 4 | 633 | 300 |

Fuente: Arquitectura de la FPGA, www.es.scribd.com

5.4 PROGRAMACIÓN DE UNA FPGA.

La tarea de programar una FPGA primero es definir la función lógica que realizará cada uno de los CLB, luego seleccionar el modo de trabajo de cada IOB e interconectarlos.

Para ello se tiene entornos de desarrollo especializados en el diseño de sistemas a implementarse en un FPGA. Un diseño puede ser capturado ya sea como esquemático, o haciendo uso de un lenguaje de programación especial. Estos lenguajes de programación especial son conocidos como HDL o *Hardware Description Language* (Lenguajes de Descripción de Hardware). Los HDLs más utilizados son:

1. VHDL
2. Verilog
3. ABEL

En un intento de reducir la complejidad y el tiempo de desarrollo en fases de prototipaje rápido, y para validar un diseño en HDL, existen varias propuestas y niveles de abstracción del diseño. Entre otras, National Instrument con LabVIEW FPGA propone un acercamiento de programación gráfica de alto nivel. [8]

5.5 PROGRAMACIÓN GRÁFICA DE ALTO NIVEL.

Tradicionalmente, se ha utilizado la tecnología FPGA con herramientas de programación avanzadas. Sin embargo, como los FPGA's se han vuelto más rápidos y más rentables, en la actualidad se los puede programar con poca o ninguna experiencia en diseño de hardware digital, aprovechando así a las FPGA's para crear soluciones personalizadas. Para abarcar este creciente interés, los proveedores están creando herramientas de más alto nivel que hacen más fácil programar FPGA's y brindar los beneficios de la tecnología FPGA a nuevas aplicaciones.

El módulo de LabVIEW FPGA de National Instruments extiende las capacidades de desarrollo gráfico de LabVIEW a FPGA's, en donde se puede crear sistemas de medición y control personalizado en hardware sin tener que diseñar en lenguaje descriptor de hardware o a nivel de circuito.

5.6 MÓDULO LABVIEW FPGA.

LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) es un lenguaje de programación gráfica para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control.

Con LabVIEW FPGA, se puede crear VI's que pueden correr en dispositivos reconfigurables como son las FPGA, no se necesita tener conocimiento de HDL (Lenguaje de descripción de hardware) para diseñar sistemas de hardware personalizado.

El módulo de LabVIEW FPGA es parte de la plataforma LabVIEW Embebida que está compuesta por múltiples componentes de software que permite a los usuarios programar hardware embebido o personalizado con LabVIEW. [9]

GRÁFICO 5.2 PLATAFORMA DE LABVIEW EMBEBIDA

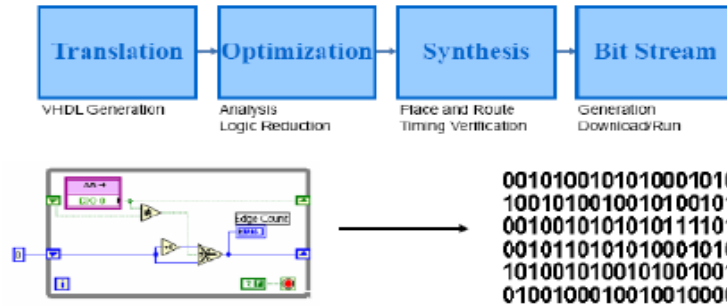


Fuente: Plataforma LabVIEW, www.ni.com

Esto permite a los usuarios utilizar un ambiente de desarrollo común para trabajar con cualquier hardware embebido, esto es utilizarlo para un sistema de tiempo real o un FPGA en el mismo entorno.

Para lograr esta tecnología National Instrument creó diferentes mecanismos para tomar los diagramas de LabVIEW y pasarlos a través de diferentes compiladores dependiendo del hardware final de ejecución. LabVIEW utiliza diferentes tecnologías para compilar el código de LabVIEW en bitfiles o archivos de bits para descargarlo y ejecutarlo en un chip FPGA.

GRÁFICO 5.3 FLUJO DE COMPILACIÓN DE LABVIEW FPGA

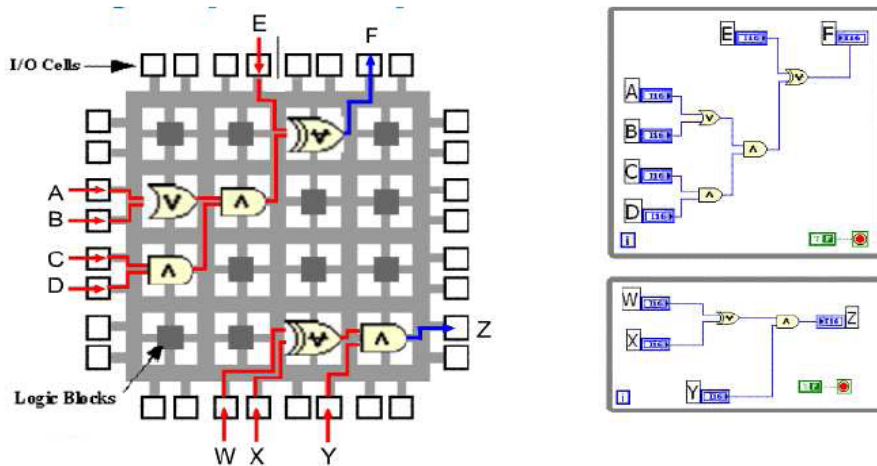


Fuente: Los Autores

La lógica de LabVIEW es similar a la lógica FPGA, ya que simplemente se necesita lazos en paralelo para poder realizar funciones en paralelo, como se muestra en el Gráfico 5.4

El paralelismo es una forma de ejecutar múltiples tareas a la vez. [10]

GRÁFICO 5.4 LÓGICA DEL FPGA Y LABVIEW



Fuente: Paralelismo FPGA, www.ni.com

5.7 ENTORNO LABVIEW FPGA.

El entorno LabVIEW FPGA es similar a un entorno normal de LabVIEW, es decir el VI tiene un panel frontal y un diagrama de bloques, pero la diferencia está en las paletas que contienen opciones limitadas y diferentes a las que se emplean normalmente para crear y modificar los Vis.

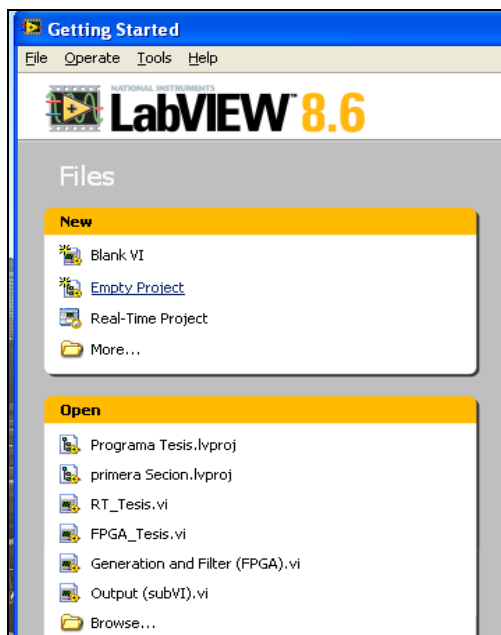
5.7.1 PROGRAMACIÓN BÁSICA LABVIEW FPGA.

Para crear un proyecto con LabVIEW FPGA, se siguen los siguientes pasos:

1. Abrimos LabVIEW y seleccionamos *Empty Project*

Gráfico 5.5 Creación de un nuevo proyecto

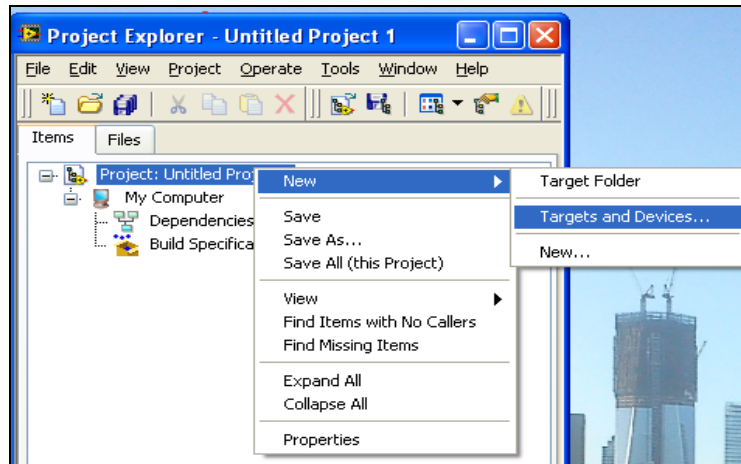
GRÁFICO 5.5 CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO



Fuente: Los Autores

2. Damos click derecho en, *Project: Untitled Project 1 - New – Targets and Devices*.

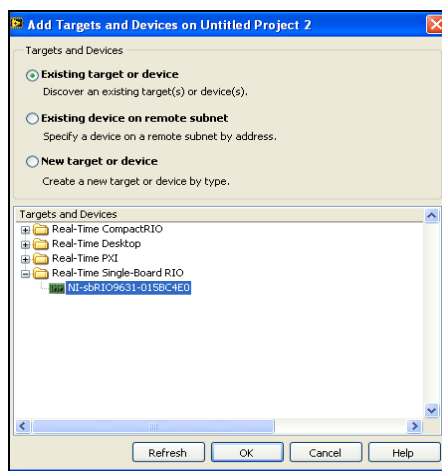
GRÁFICO 5.6 AGREGANDO DISPOSITIVO NUEVO



Fuente: Los Autores

3. Luego se abre la ventana *Add Targets and Devices*, Seleccionamos *Real-Time Single-Board RIO*, NI-sbRIO9631 y damos OK, este paso puede durar algunos segundos hasta detectar el equipo y módulos adicionales.

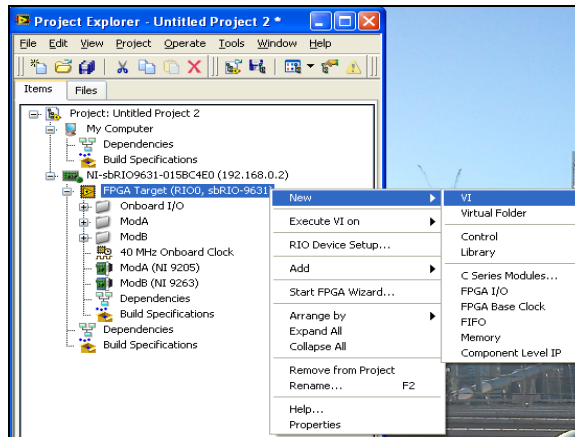
GRÁFICO 5.7 ADD NI-SBRIO9631



Fuente: Los Autores

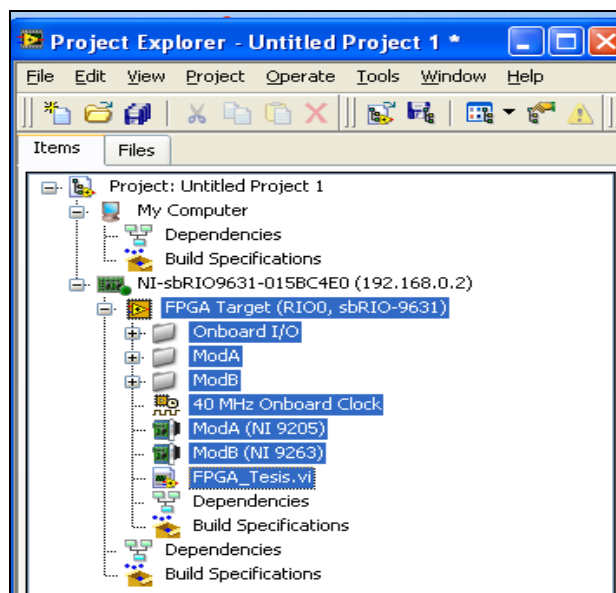
4. Ahora que se tiene agregado el dispositivo en el proyecto Gráfica 5.9, se crea una FPGA VI, se da click derecho sobre el nombre del nuevo dispositivo agregado (FPGA Target (RIO0, sbRIO-9631)) - *NEW – VI*, se debe notar que el FPGA VI está en el árbol del dispositivo FPGA, Gráfico 5.8.

GRÁFICO 5.8 DISPOSITIVO AGREGADO AL PROYECTO



Fuente: Los Autores

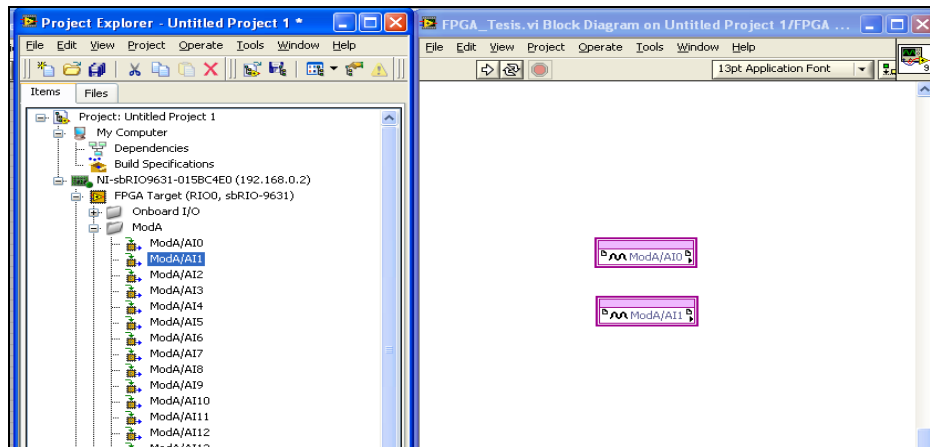
GRÁFICO 5.9 NUEVO PROYECTO CREADO



Fuente: Los Autores

Las entradas y salidas están agregadas al proyecto, ahora se las agrega al diagrama de bloques se arrastra y se suelta la E/S que se desee utilizar desde el Project Explorer hacia el diagrama de bloques. Gráfico 5.10.

GRÁFICO 5.10 E/S AGREGADAS AL DIAGRAMA DE BLOQUES



Fuente: Los Autores

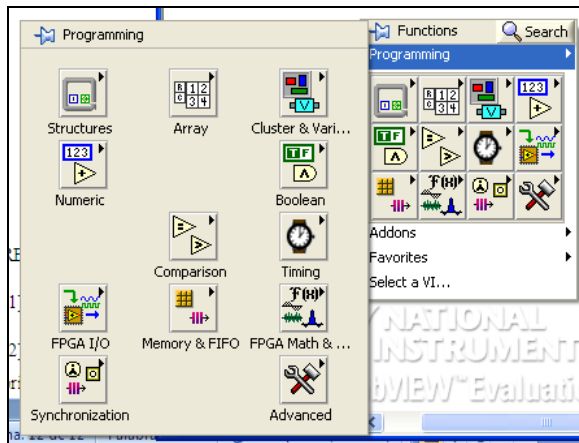
5.7.2 FUNCIONES DE LA PALETA FPGA.

Cuando se selecciona un proyecto con FPGA, LabVIEW muestra solo las opciones disponibles para una FPGA específica, esto es, que solo muestra las funciones y subpaletas que se pueden utilizar con ese dispositivo.

5.7.3 PALETA DE FUNCIONES LABVIEW FPGA.

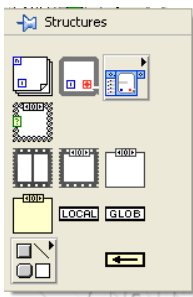
Esta paleta ofrece todas las posibilidades de funciones que se pueden utilizar en el diagrama de bloques dentro del entorno de LabVIEW FPGA, donde al hacer click se escoge y ubica dentro del programa.

GRÁFICO 5.11 PALETA DE FUNCIONES

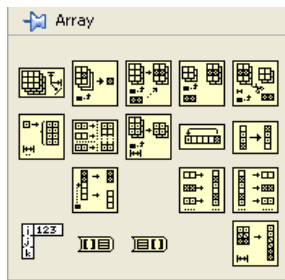


Fuente: Los Autores

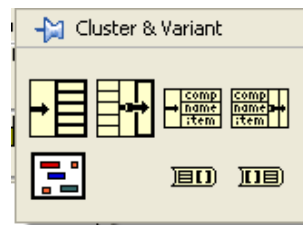
Las funciones contenidas en esta paleta Functions – Programming son:



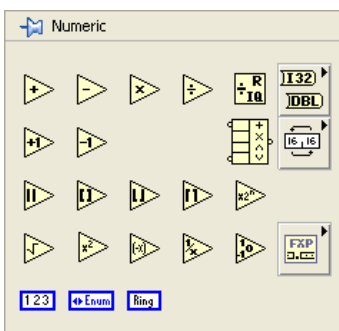
Structures (estructuras)



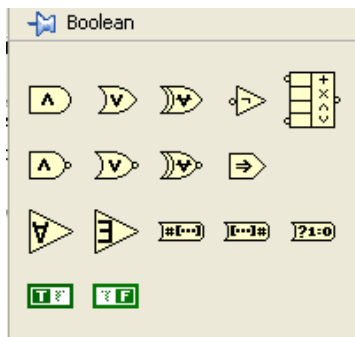
Array (matrices)



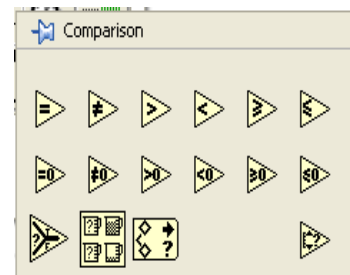
Cluster & Variant (grupos)



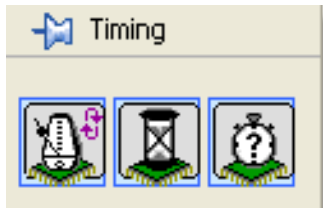
Numeric (operaciones)



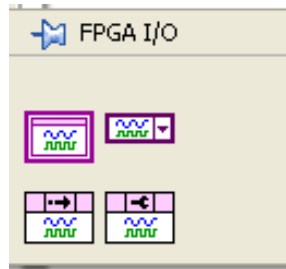
Boolean (booleanos)



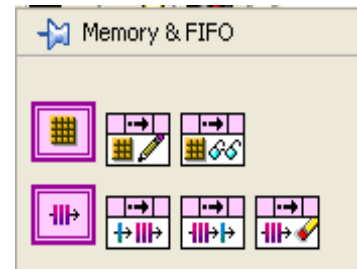
Comparison (comparación)



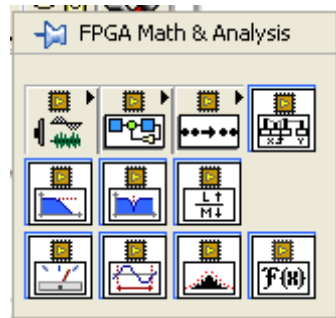
Timing (tiempo)



FPGA I/O (puertas lógicas)



Memory & FIFO (memorias)



FPGA Math & Analysis (matemática y análisis)



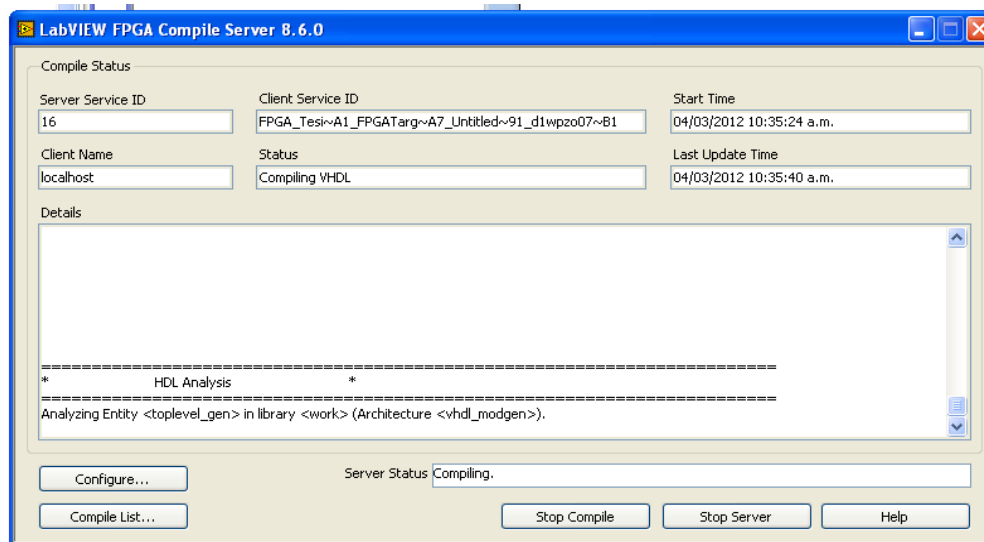
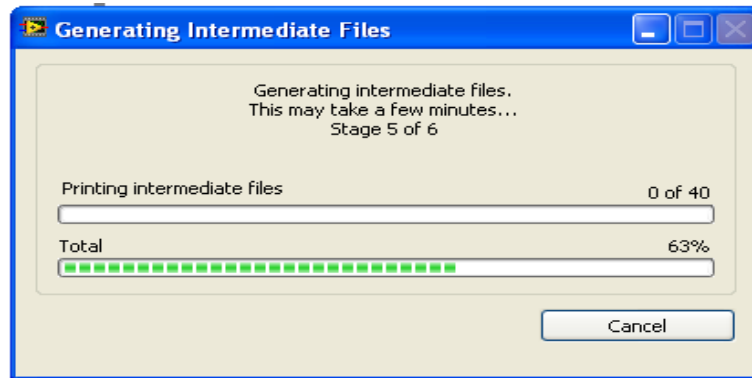
Synchronization (sincronización)

5.8 COMPILACIÓN FPGA VI.

Para poder descargar el sistema de control al FPGA, es necesario compilar el VI, al compilar el archivo, LABVIEW FPGA determina el área utilizada en el FPGA, según el número de slices, flip-flops, lookup tables (LUTs), multiplicadores y bloques de memoria RAM utilizados en el diseño.

1. Primero debemos guardar el proyecto FPGA creado en una carpeta nueva, luego damos click en Run, el programa enviara al proyecto a compilar de manera automática como muestra el Gráfico 5.12, dependiendo del programa el tiempo necesario para la compilación tardara varios minutos.
2. La grafica 5.12 muestra además el servidor de compilación la cual se encarga de convertir la programación grafica realizada en el panel frontal de LabVIEW en un lenguaje VHDL (lenguaje para la descripción de sistemas electrónicos digitales) que es reconocida por la tarjeta.

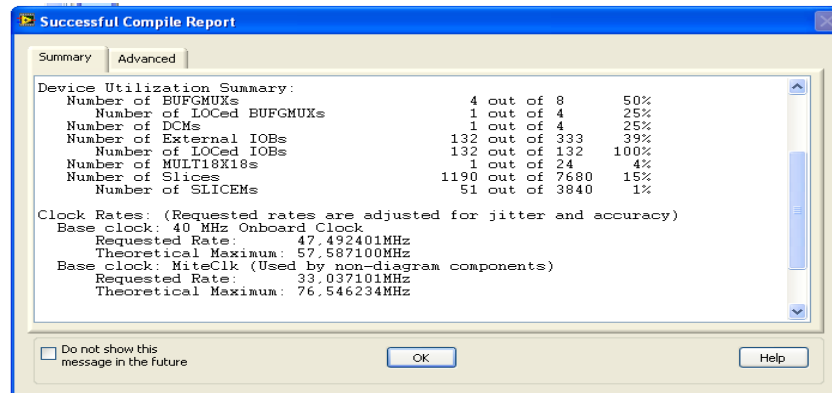
GRÁFICO 5.12 COMPILACIÓN DEL FPGA VI



Fuente: Los Autores

3. El gráfico 5.13 detalla el estado final de compilación que se muestra en un cuadro de dialogo, este cuadro muestra un resumen de utilización del dispositivo, porcentajes de memoria utilizada y la velocidad de la tarjeta, además posee una pestaña de información avanzada de la compilación.
4. Se debe tener en cuenta que por cada modificación que se realice al programa en LabVIEW FPGA se debe realizar una nueva compilación, así los cambios podrán ser guardados.

GRÁFICO 5.13 COMPILACIÓN TERMINADA



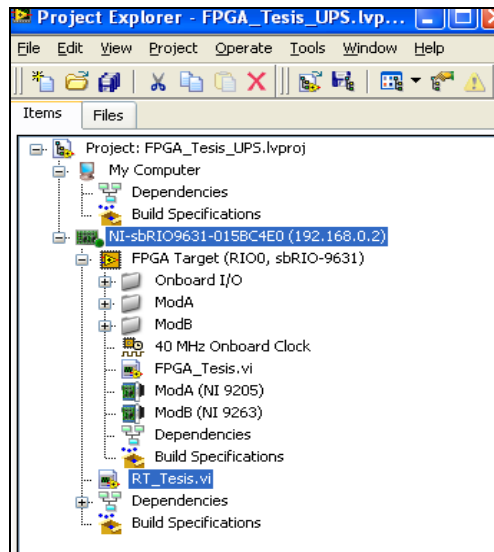
Fuente: Los Autores

5.9 CREACIÓN DE UN VI EN REAL TIME.

Para crear un proyecto con LabVIEW Real Time, se siguen los siguientes pasos:

1. Se hace click derecho sobre NI-sbRIO9631-015BC4E0 y se selecciona New – VI, se nota que el nuevo VI se encuentra bajo el árbol de la Tarjeta sb-RIO

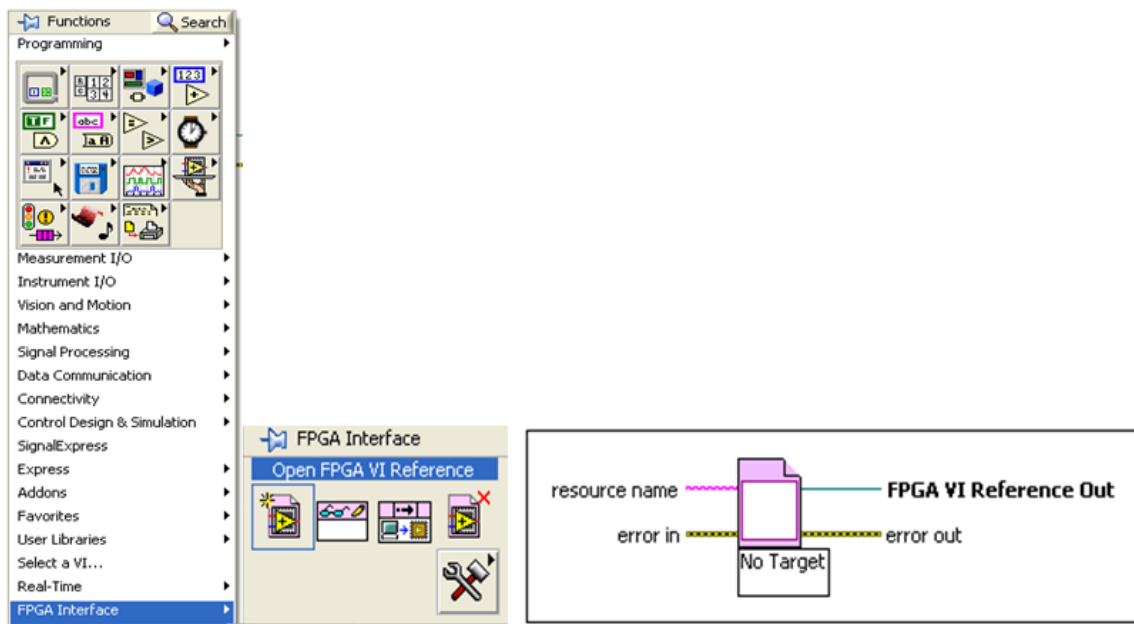
GRÁFICO 5.14 CREACIÓN DE UN VI EN REAL TIME



Fuente: Los Autores

2. Sobre el diagrama de bloques del nuevo VI damos click derecho, ubicamos la función FPGA Interface en la paleta de funciones, luego – *Open FPGA VI Reference*, la función se encuentra en la paleta de funciones en la interfaz de FPGA. El *Open FPGA VI Reference* se utiliza para hacer referencia al FPGA-VI situado en el mismo proyecto.

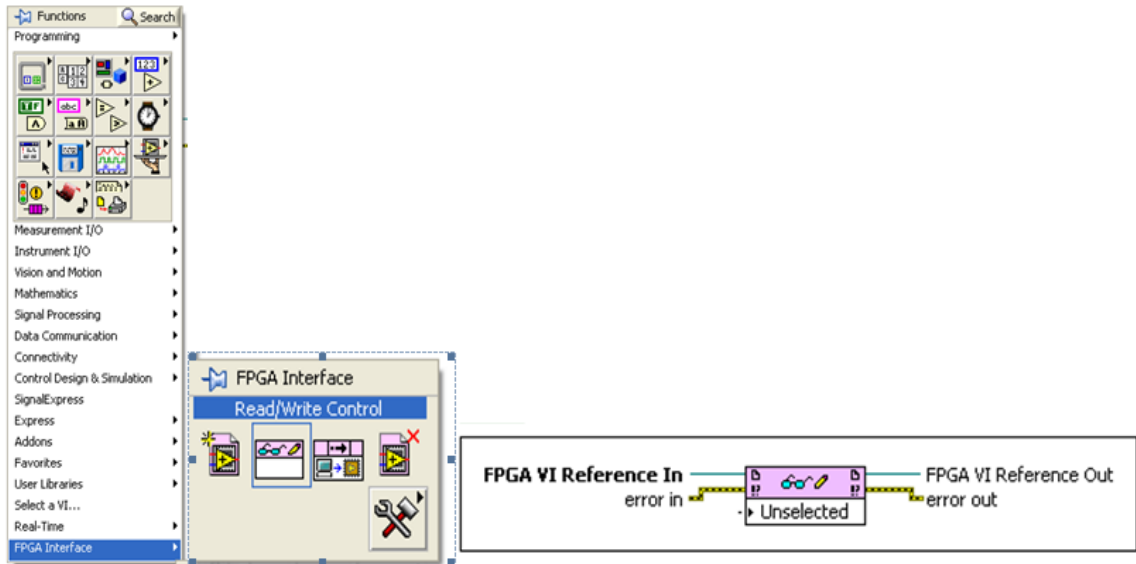
GRÁFICO 5.15 OPEN FPGA VI REFERENCE



Fuente: Los Autores

3. Se coloca la función Read/Write Control (Ubicada en *Functions* – *FPGA Interface* – *Read/Write Control*) el cual hace referencia a los terminales de control del FPGA-VI creado, esta función puede ser de lectura o escritura dependiendo de la programación.

GRÁFICO 5.16 READ/WRITE CONTROL



Fuente: Los Autores

4. Se cierra el recurso abierto en la función, se encuentra ubicada en *Functions* – FPGA Interface – Close FPGA VI Reference.

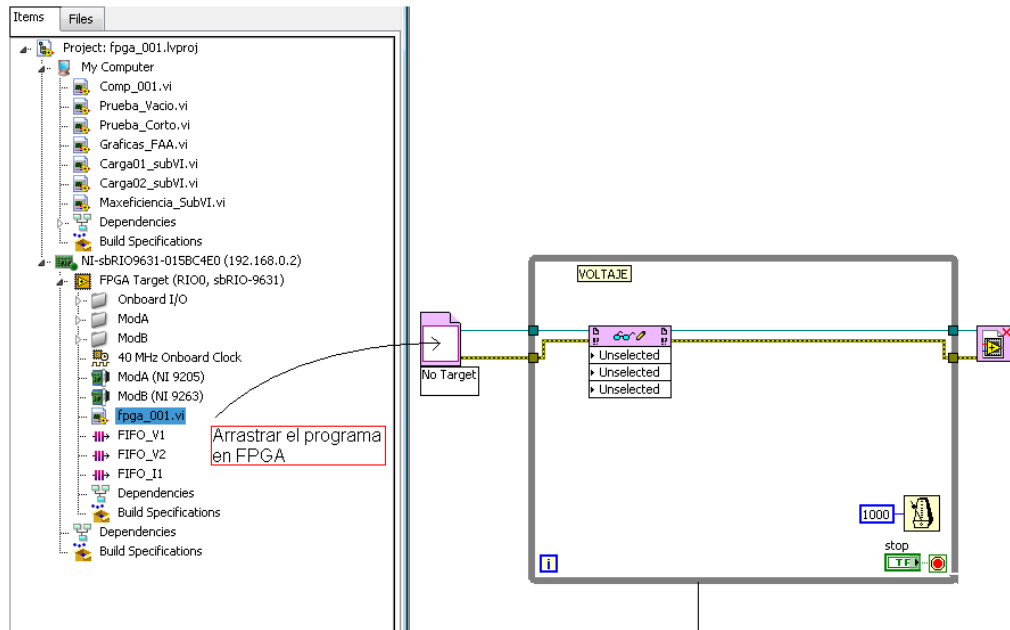
GRÁFICO 5.17 CLOSE FPGA VI REFERENCE



Fuente: Los Autores

5. Arrastrar el programa realizado en FPGA a la función *Open FPGA VI Reference*, como muestra la gráfica 5.18.

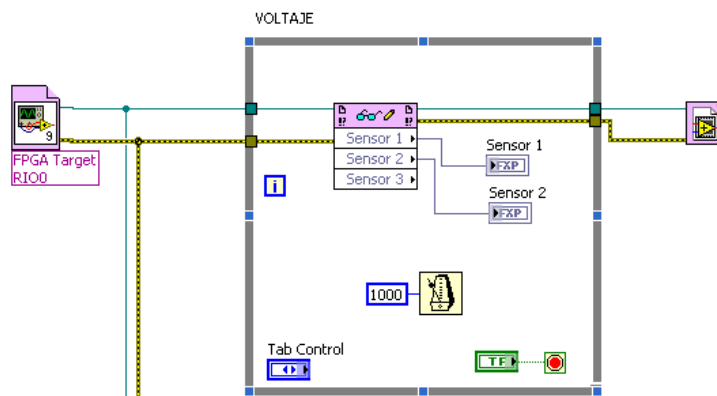
GRÁFICO 5.18 UBICACIÓN DEL PROGRAMA FPGA EN REAL TIME



Fuente: Los Autores

6. Ubicar las funciones descritas de manera que el programa en Real Time Vi, debe ser similar como muestra la gráfica 5.18.

GRÁFICO 5.19 REAL TIME VI



Fuente: Los Autores

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE LAS SEÑALES

6.1 INDRODUCCIÓN.

Este presente capítulo trata sobre el diseño de las diferentes partes constitutivas del Prototipo de adquisición de datos para tensión, corriente y temperatura en función del tiempo, a nivel de hardware como a nivel de software, partiendo de la información descrita en los capítulos anteriores.

En su primera parte de este capítulo se aborda sobre las especificaciones de la tarjeta de adquisición, para lo cual se incluyen un diagrama de flujo de adquisición en la que trabaja cada uno de sus etapas.

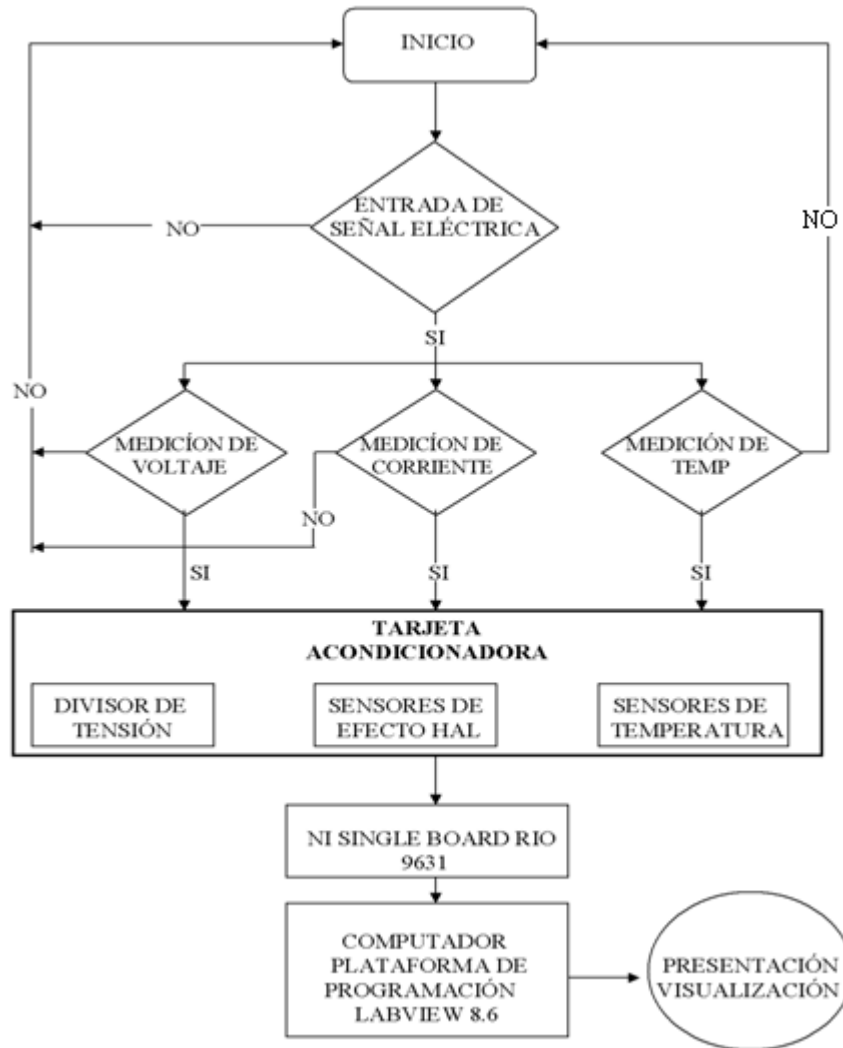
Luego se explica el diseño del software implementado para la adquisición de datos del transformador de distribución, para lo cual se incluyen las diferentes herramientas y opciones con la que cuenta el LabVIEW 8.6 en su paleta.

En la parte final de este capítulo, se explica la función que desempeña cada una de las pestañas implementadas, con sus correspondientes opciones, resultados de la medición y finalmente se describen los diferentes mensajes y avisos que puede desplegar durante su operación.

6.2 DIAGRAMA DE FLUJO DE ADQUISICIÓN DE SEÑALES.

El diagrama del gráfico 6.1, muestra el proceso de las señales eléctricas que debe seguir para poder monitorearlas y así adquirirlas de una manera más precisa y limpia de ruidos que podrían distorsionar las mediciones, ya que se desenvuelve en un ambiente de mucho movimiento y vibraciones.

GRÁFICO 6.1 ESQUEMA DE UN DAQ EN DIAGRAMA DE FLUJO



Fuente: Los Autores

6.3 DESCRIPCIÓN DE LA TARJETA NI-SBRIO 9631.

6.3.1 SISTEMA EMBEBIDO NI SINGLE BOARD RIO.

El dispositivo incluido en el presente proyecto es la tarjeta de adquisición y procesamiento de datos NI Single-Board RIO, una plataforma con entradas y salidas reconfigurables. Este sistema embebido consiste en dos dispositivos de procesamiento,

un controlador en tiempo real el cual se programa con el módulo de LabVIEW Real-Time y un FPGA Xilinx Spartan-3 el cual se programa con el módulo de LabVIEW FPGA estas unidades se conectan internamente por medio de un bus PCI de alta velocidad y el entorno de desarrollo que se utiliza para programar el sistema embebido es LabVIEW instalado en una computadora personal.

La manera de comunicación entre el dispositivo y la computadora que configura y programa es vía Ethernet un protocolo para comunicación entre dispositivos externos.

6.3.2 CARACTERISTICAS.

Single board rio, ideal para realizar adquisición de datos como tensión, corriente, nivel, presión, temperatura y control, cuenta con 110 pines de propósito general de alta velocidad configurables también como salida de PWM o entradas de contador, posee 32 entradas analógicas de 16 bits de resolución con frecuencia de muestreo de 200ks/s, 4 salidas analógicas de 16 bits de resolución de 200ks/s, procesador en tiempo real y controlador FPGA.

TABLA. 6.1 CARACTERÍSTICAS DE LA TARJETA SBRIO UTILIZADA

| Modelo | Velocidad del procesador (Mhz) | Memoria (DRAM) | Tamaño de FPGA | 3.3V DIO | AI | AO | 24V DI/DO Líneas |
|---------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|-----------|-----------|-------------------------|
| SbRIO-9631 | 266 | 64 MB | 1M | 110 | 32 | 4 | 0 |

Fuente: Los Autores

FIGURA 6.1 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS SBRIO-9631



Fuente: Los Autores

GRÁFICO 6.2 GRÁFICA CB-50LP, CONECTOR DE 50 PINES PARA CONEXIÓN DIRECTA



Fuente: Los Autores

GRÁFICO 6.3 NB1, CABLE DE LISTÓN 50 PINES

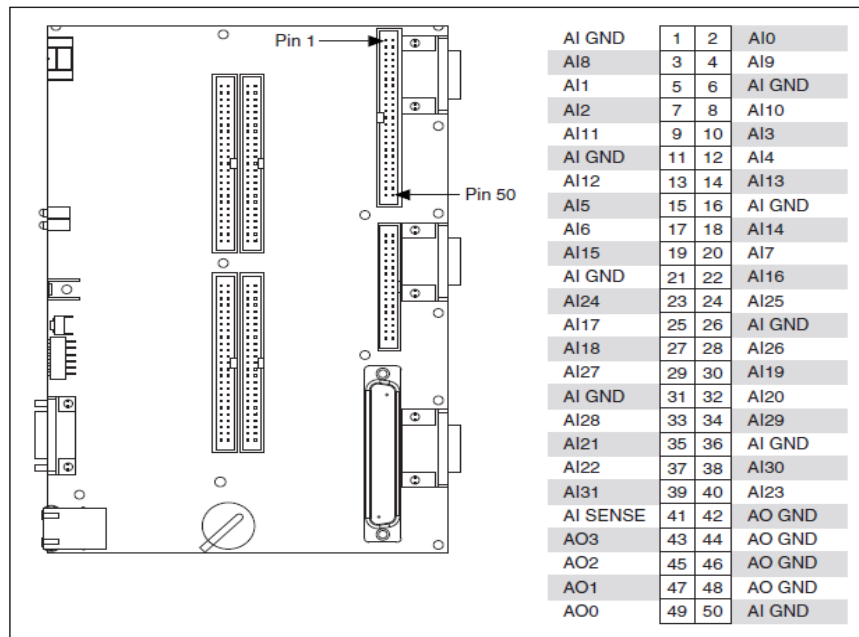


Fuente: Los Autores

Entradas analógicas:

- Números de canales, 32 de un solo término y 16 diferenciales.
- Rangos de entrada nominal $\pm 10V$, $\pm 5V$, $\pm 1V$, $\pm 0.2V$, con resolución de 16 bits.

GRÁFICO 6.4 NI SBRIO PINOUT DE I/O CONECTOR J7, ANÁLOGAS I/O



Fuente: Características SbRio, www.ni.com

TABLA 6.2 CONFIGURACIÓN DE ENTRADAS DIFERENCIALES

| Channel | Signal+ | Signal- | Channel | Signal+ | Signal- |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0 | AI0 | AI8 | 16 | AI16 | AI24 |
| 1 | AI1 | AI9 | 17 | AI17 | AI25 |
| 2 | AI2 | AI10 | 18 | AI18 | AI26 |
| 3 | AI3 | AI11 | 19 | AI19 | AI27 |
| 4 | AI4 | AI12 | 20 | AI20 | AI28 |
| 5 | AI5 | AI13 | 21 | AI21 | AI29 |
| 6 | AI6 | AI14 | 22 | AI22 | AI30 |
| 7 | AI7 | AI15 | 23 | AI23 | AI31 |

Fuente: Características SbRio, www.ni.com

6.3.3 SOFTWARE NECESARIO PARA EL PROYECTO.

Antes de la instalación de cualquier dispositivo se tiene que instalar el software necesario:

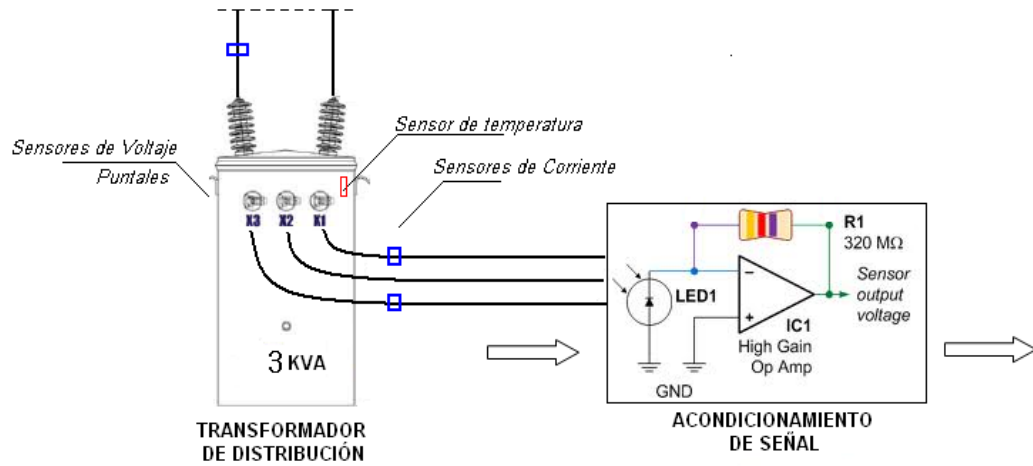
- Sistema Microsoft Windows XP, con service pack 3.
- Se instala LabVIEW 8.6
- Si se está utilizando un procesador Real-Time, se instala el módulo LabVIEW Real-Time.
- Se instala el módulo LabVIEW FPGA.
- Se instala NI-RIO (drivers) u otro tipo de driver para la utilización de los dispositivos.
- Measurement & Automation Explorer versión 4.5
- Labview 8.6 Report Generation toolkit de Microsoft office, (herramienta que permite realizar y generar reportes en office.)

6.4 TRANSDUCTORES.

Transductores son elementos que transforman una magnitud física en una señal eléctrica. Se pueden clasificar en dos grupos: Activos y pasivos. Son transductores activos los que hay que conectar a una fuente externa de energía eléctrica para que puedan responder a la magnitud física a medir como por ejemplo las fotorresistencias y termo resistencias, y son pasivos los que directamente dan una señal eléctrica como respuesta a la magnitud física.

Se puede llevar una señal física, a una representación eléctrica interpretable por un sistema eléctrico – electrónico, a través de los llamados transductores, el gráfico 6.5 muestra la ubicación de cada uno de ellos en el transformador.

GRÁFICO 6.5 UBICACIÓN DE LOS TRANSDUCTORES

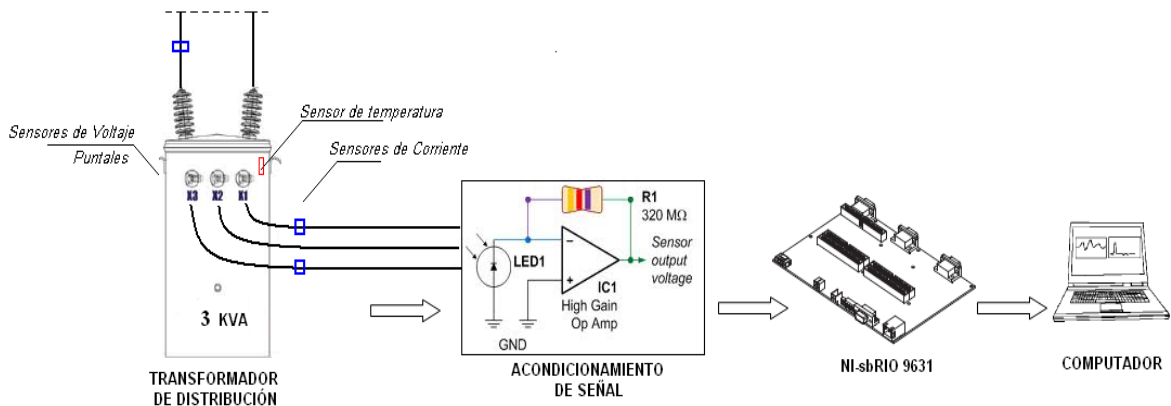


Fuente: Los Autores

Para el desarrollo del proyecto la adquisición de las señales de tensión, corriente y temperatura, serán implementados los siguientes sensores.

- **Sensor de Corriente:** Sensores de efecto hall
- **Sensor de Tensión:** Divisores de tensión
- **Sensor de Temperatura:** LM35, termocupla tipo J

GRÁFICO 6.6 ESQUEMA DEL PROYECTO



Fuente: Los Autores

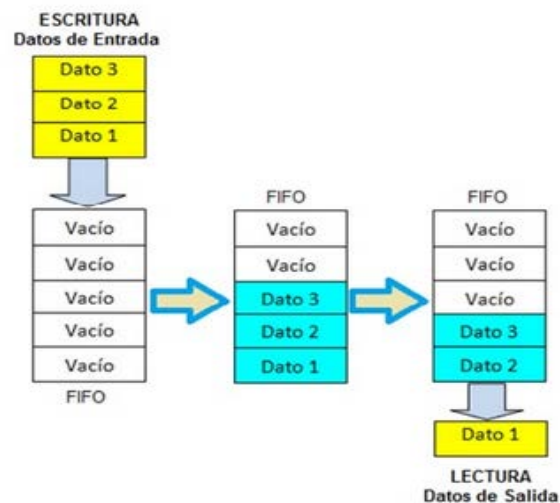
6.4.1 PROCESAMIENTO.

6.4.1.1 ALMACENAMIENTO DE DATOS USANDO FPGA FIFOs.

Cuando se adquiere la señal de forma digital o analógica y está lista para procesarse y/o almacenarse en computadora, se puede enviar a memorias FIFO para no perder la información, así como también se tiene que ir sacando la información a una velocidad determinada y sincronizada con la velocidad de muestreo para que no se produzca sobre flujo volcado el programa y pérdida de información.

Una técnica muy común que emplean los dispositivos con arquitectura RIO para transferir datos (y almacenar datos temporales) entre diferentes partes de un VI FPGA, entre VIs de un mismo target FPGA, o entre distintos dispositivos, es haciendo uso de un buffer FIFO. Un FIFO es una estructura de datos que contiene elementos en el orden en que se reciben y en donde el primer elemento escrito en memoria es el primer elemento leído y removido desde la memoria.

GRÁFICO 6.7 PROCESO DE ALMACENAMIENTO Y TRANSFERENCIA DE DATOS EN UN BUFFER FIFO



Fuente: Lectura de memorias FIFO, www.ni.com

Un buffer FPGA FIFO funciona como una cola de longitud fija donde múltiples datos pueden ser escritos y leídos desde la memoria. A diferencia de una cola, un buffer FPGA FIFO asegura un comportamiento determinístico mediante la imposición de una restricción del tamaño de los datos, y tanto el elemento lector y el escritor pueden acceder a los datos de forma simultánea. Un buffer FIFO se usa para transferir datos en una de las siguientes maneras:

- Entre bucles paralelos dentro del dominio del reloj
- Entre targets FPGA (peer to peer)
- Entre el host (computador o controlador RT) y el FPGA

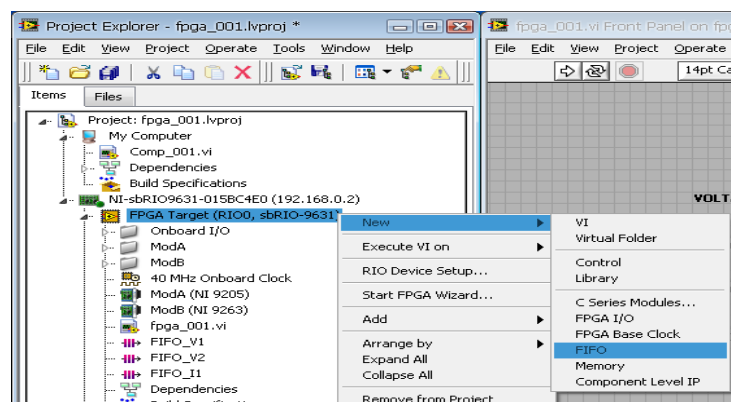
6.4.2 CREACIÓN DE UN FPGA FIFO.

La utilización de las Memorias FIFO`s permiten que los datos obtenidos de los sensores no se pierdan y sean adquiridos en su totalidad para una correcta lectura de valores.

Para crear una memoria FIFO`s se realizan los siguientes pasos.

1. En la rama de FPGA target, se da click derecho, New, y FIFO.

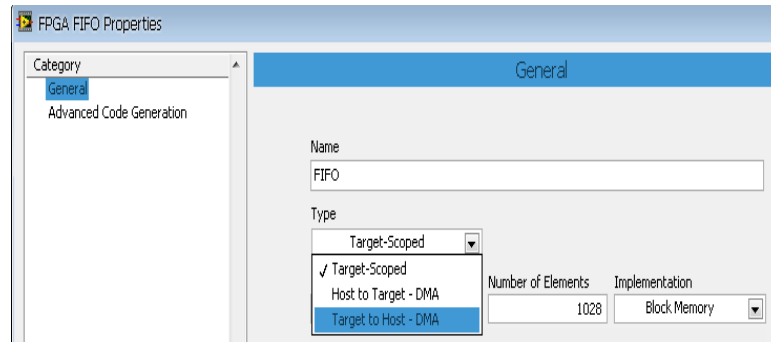
GRÁFICO 6.8 CREACIÓN DE UNA NUEVA MEMORIA FIFO



Fuente: Los Autores

- Se escoge entre los diferentes tipos de memorias FIFO`s, según se requiera utilizar, como muestra la gráfica 6.9.

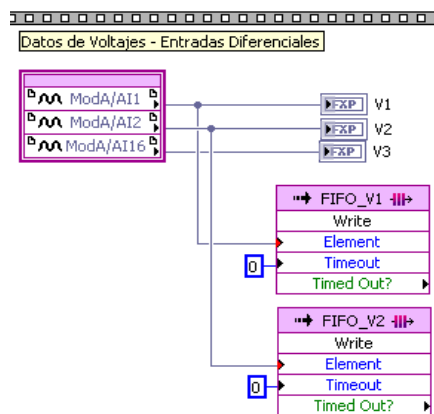
GRÁFICO 6.9 TIPO DE MEMORIA FIFO



Fuente: Los Autores

- Se arrastra desde la rama FPGA donde fue creada la memoria FIFO y se la ubica en el diagrama de bloques, el dato a guardar se cablea en la entrada *Element*, la entrada *Timeout* me introduce el numero de ciclos de reloj que la función espera para que el espacio disponible en el buffer FIFO esté llena, por defecto se debe cablear una constante numérica con valor de cero si la función está siendo usada dentro de un único *timed loop*.

GRÁFICO 6.10 MEMORIA FIFO, ADQUIRIENDO DATOS DE SENSORES.



Fuente: Los Autores

6.4.3 VENTAJAS Y DEVENTAJAS DE PROGRAMAR FPGA EN FORMA GRÁFICA CON LABVIEW.

La ventaja más destacable de la programación del FPGA es utilizando LabVIEW, ya que la forma de programar el FPGA es gráfica sin la necesidad de conocer VHDL y ahorrando muchas líneas y páginas de código secuencial, también ahorrando tiempo en la depuración del código y soluciones más rápidas a los requerimientos de cambios que requiera el usuario o programador de forma personalizada. Se puede personalizar el muestreo de las señales, para cada entrada de la señal puede tener una frecuencia de muestreo diferente, ya que el código se puede dividir en forma paralela permitiendo las distintas velocidades de muestreo.

La desventaja es que se necesita el programa de desarrollo de LabVIEW, el módulo FPGA y el driver RIO que da soporte al FPGA que se tiene.

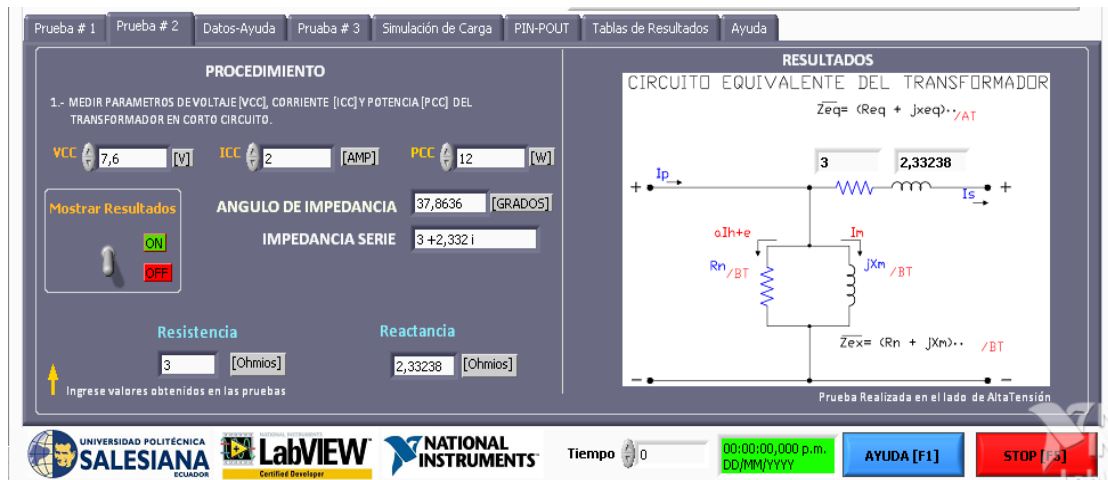
Toda la información necesaria para programar, configurar y algunos consejos para desarrollar en el módulo de LabVIEW FPGA, se puede descargar de la página de National Instruments [11]

6.5 ANÁLISIS DEL TRANSFORMADOR.

Esta ventana muestra el análisis del transformador, este análisis es posible con la ayuda de la adquisición de las señales de tensión y corriente descrita en los capítulos anteriores.

La presente ventana posee indicadores numéricos en cada prueba a realizarse como muestra el gráfico 6.13, posee una tabla de datos donde presenta todos los resultados obtenidos mediante las pruebas, además posee una botonera para registrar los datos para un análisis futuro.

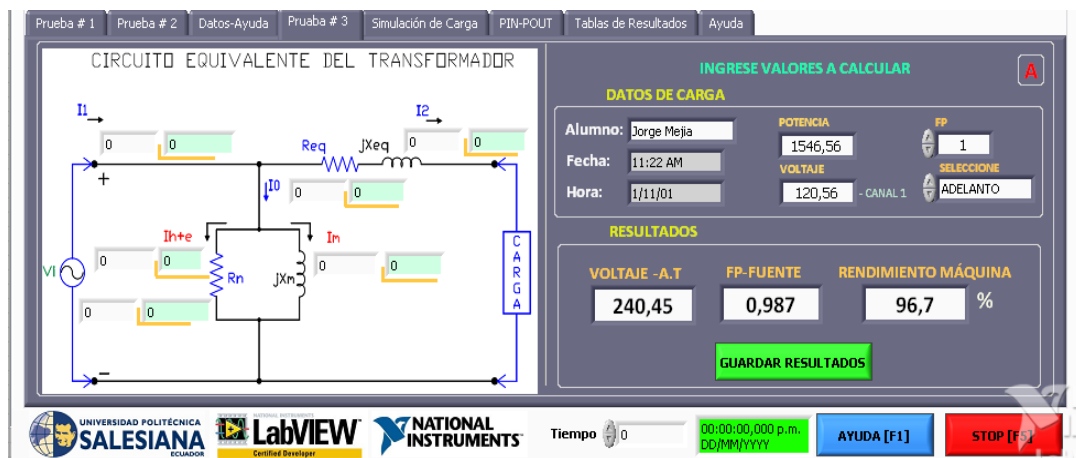
GRÁFICO 6.11 ANÁLISIS DEL TRANSFORMADOR PRUEBA DE CORTO CIRCUITO



Fuente: Los Autores

Por otra parte, también cuenta con selectores de factor de potencia atraso o adelanto como muestra el gráfico 6.12 pestañas individuales donde se realiza cada una de las pruebas como así también una ventana de ayuda y datos.

GRÁFICO 6.12 ANÁLISIS DEL TRANSFORMADOR ANÁLISIS BAJO CARGA Y RENDIMIENTO

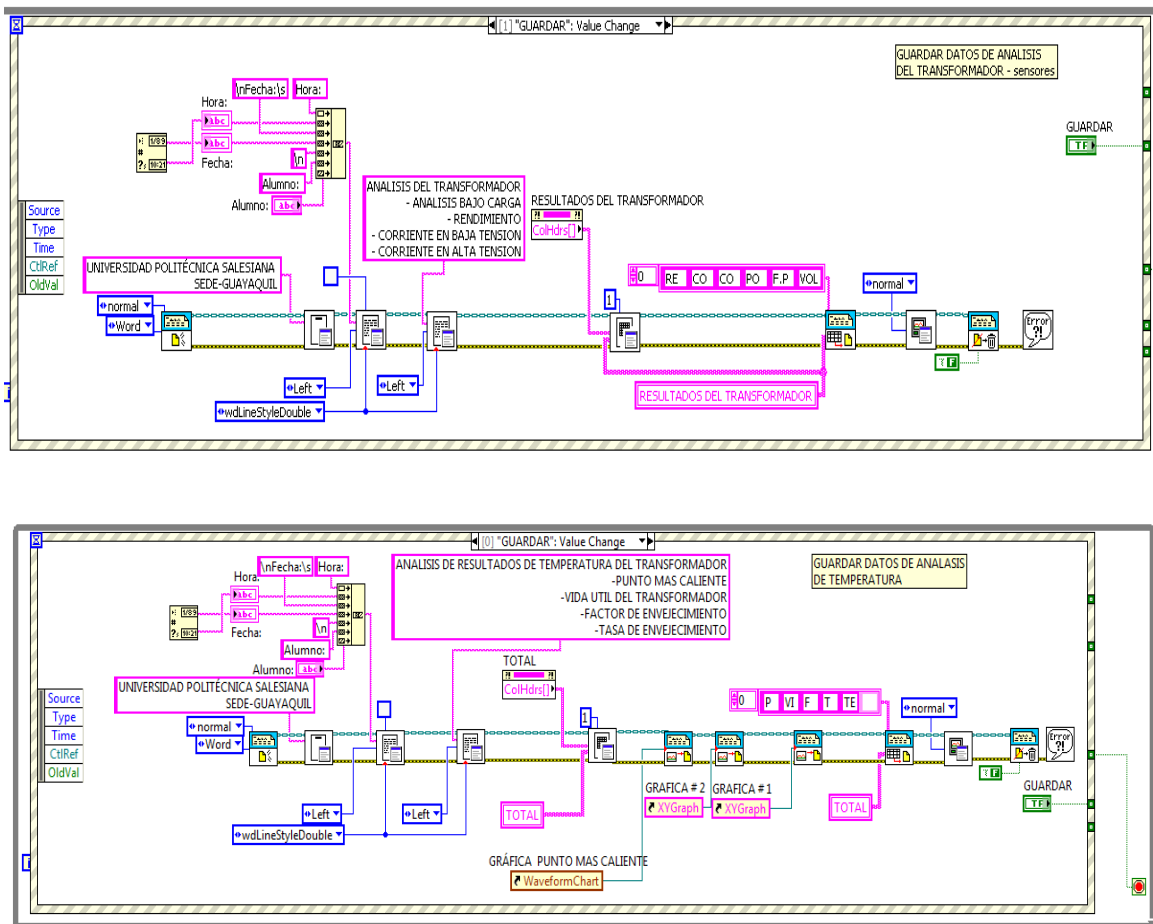


Fuente: Los Autores

6.5.1 ALMACENAMIENTO DE DATOS EN WORD.

LabVIEW permite el almacenamiento de datos adquiridos en una hoja de Word, la programación gráfica para la implementación del almacenamiento de datos se muestra en el gráfico 6.13.

GRÁFICO 6.13 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL ALMACENAMIENTO DE DATOS, ANÁLISIS DEL TRANSFORMADOR Y TEMPERATURA



Fuente: Los Autores

6.5.2 PRUEBAS.

En esta sección detallaremos las pruebas realizadas, las cuales tiene por objetivo verificar y evaluar las condiciones, rendimiento, corrientes y tensiones de carga del transformador. Para la ejecución de las pruebas se utilizo un transformador monofásico junto con el modulo didáctico construido con las siguientes características:

TABLA. 6.3 CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO DIDÁCTICO

| CARACTERÍSTICAS DEL MÓDULO DIDÁCTICO | |
|---|--|
| Alimentación | 120V |
| Sensor de Corriente | Sensores de efecto Hall |
| Sensor de Tensión | Divisor de tensión |
| Sensor de temperatura | Termocupla tipo J, LM35 |
| Adquisición de datos | Single Board Rio 9631 |
| Conector de entradas analógicas | CB-50LP, conector de 50 pines para conexión directa de señales |

Fuente: Los Autores

TABLA. 6.4 CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR

| CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR | |
|--|---------------------------------------|
| Tipo | Transformador monofásico convencional |
| Alimentación A.T | 240V |
| Salida B.T | 60/120V |
| Potencia | 3 KVA |
| Tipo de refrigeración | Aceite libre de PCB`s |
| Frecuencia | 60 Hz |

Fuente: Los Autores

6.5.3 BANCO DE PRUEBAS.

Para la elaboración de las pruebas se construyó un módulo de adquisición de señales como muestra la figura 6.2(a) y un transformador de distribución convencional tipo tanque utilizado en las empresas de distribución eléctrica local, figura 6.2 (b).

FIGURA 6.2 (A) MÓDULO DIDÁCTICO DE ADQUISICIÓN DE SEÑALES, (B) TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN



Fuente: Los Autores

6.6 CIRCUITO EQUIVALENTE EXACTO DE UN TRANSFORMADOR REAL.²²

Las pérdidas que ocurren en los transformadores reales deben tenerse en cuenta para obtener un modelo exacto del comportamiento de un transformador. Los principales aspectos que se deben considerar en la construcción de un modelo como éste son:

²² CHAPMAN Stephen J., *Máquinas Eléctricas*, 4ta Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 2005.

1. Pérdidas en el cobre
2. Pérdidas en el hierro
 - Pérdidas por corrientes parásitas, y por histéresis
3. Flujo disperso

6.6.1 PÉRDIDAS EN EL HIERRO.

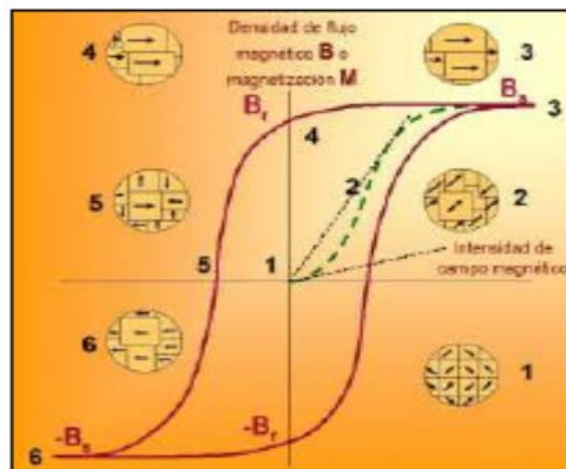
Como se mencionó anteriormente, las pérdidas en el hierro son las perdidas por histéresis y por corrientes parásitas.

6.6.1.1 PÉRDIDA POR HISTÉRESIS MAGNÉTICA:²³

Es el fenómeno que se produce cuando la imantación de los materiales ferro magnéticos no solo dependen del flujo magnético, sino de los estados magnéticos anteriores.

En este caso de los transformadores al someter un material magnético a un flujo variable se produce una imantación que se mantiene al cesar el flujo variable, lo que provoca una pérdida de energía.

GRÁFICO 6.14 CICLO DE HISTÉRESIS DE UN TRANSFORMADOR



Fuente: Slideshare.net, Pérdidas de potencia y eficiencia en los transformadores monofásico

²³ *Perdidas de potencia y eficiencia en los transformadores monofásicos*, www.monografias.com

En la gráfica 6.14, podemos ver una forma más clara lo que se trata de explicar.

De igual forma que en las corrientes parasitas en ciclo histéresis dependerá esencialmente del tipo de material, para calcular numéricamente las perdidas por histéresis podemos usar la siguiente igualdad.

$$Ph = kh \times f \times \beta \max^n$$

Dónde:

Ph = Son las pérdidas por el ciclo histéresis

kh = Coeficiente de cada material

f = Frecuencia

β_{\max} = Inducción máxima

n = 1,6 para $B \leq 1$ tesla

n = 2 para $B \geq 1$ tesla

Y por lo tanto se puede concluir que las pérdidas en el hierro son la suma de las perdidas por los ciclos de histéresis y las perdidas por corrientes parasitas.

6.6.1.2 PÉRDIDA POR CORRIENTES PARASITAS:²⁴

Se producen en cualquier material conductor cuando se encuentran sometidos a una variación de flujo magnético, como los núcleos de los transformadores están hechos de materiales magnéticos y estos materiales son buenos conductores se genera una fuerza electromotriz inducida que origina corrientes que circulan en el mismo sentido dando lugar a el denominado efecto joule.

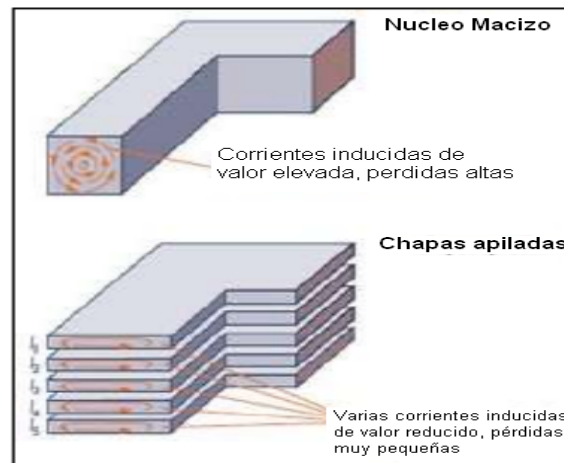
²⁴ *Perdidas de potencia y eficiencia en los transformadores monofásicos, www.monografias.com*

Las pérdidas por corrientes parasitas dependerán del material con el que está construido el núcleo magnético del transformador, para reducir en parte estas pérdidas de potencia es necesario que el núcleo del transformador que está bajo un flujo variable no sea macizo, es decir el núcleo deberá estar construido con chapas magnéticas de espesores muy delgados, colocadas una encima de otra y aisladas entre sí.

Al colocar las chapas magnéticas lo que conseguimos es que la corriente eléctrica no pueda circular de una chapa a otra y se mantenga independientemente en cada una de ellas con lo que se induce menos corriente y disminuye la potencia de pérdida por corrientes parasitas o corrientes de Foucault.

Podemos observar primero un flujo en un núcleo macizo y por consiguiente una gran cantidad de pérdidas de energía que derivan en pérdidas inevitables de potencia.

GRÁFICO 6.15 CHAPAS DEL NÚCLEO



Fuente: Los Autores

En cambio en la gráfica 6.15, podemos observar la función de las chapas en el núcleo reduciendo las corrientes inducidas y por lo tanto menos pérdidas de potencia.

Para realizar un cálculo numérico de las pérdidas en el hierro por las corrientes parasitas recurrimos a la siguiente fórmula:

$$Pf = \frac{2.2 \times f^2 \times \beta_{\max}^2 \times \Delta^2}{10^{11}}$$

Dónde:

Pf = pérdidas por corrientes parasitas

f = frecuencia en Hz

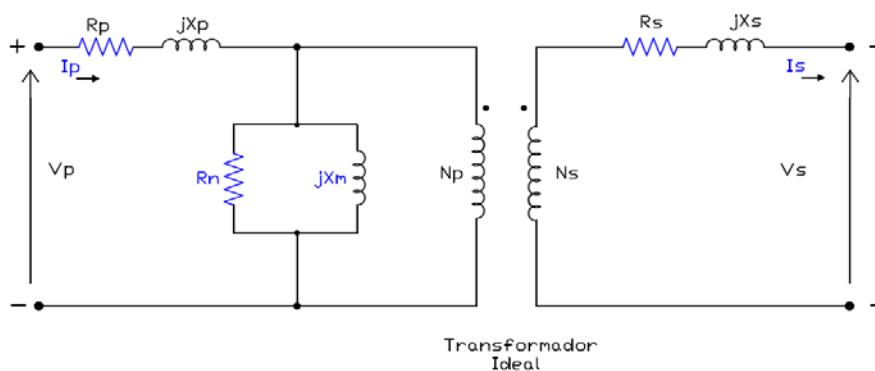
β_{\max} = inducción máxima en Gauss

Δ = espesor de la chapa magnética en mm.

Es posible construir un circuito equivalente que tome en cuenta todas las principales imperfecciones de los transformadores reales. Se considera cada una de estas imperfecciones y se incluye su efecto en el modelo de transformador.

El efecto más sencillo de evaluar son las pérdidas en el cobre. Éstas son pérdidas resistivas en los devanados primario y secundario del núcleo del transformador; equivalen a la colocación de un resistor R_p en el circuito primario del transformador y un resistor R_s en el circuito secundario.²⁵

GRÁFICO 6.16 EL MODELO DE UN TRANSFORMADOR REAL

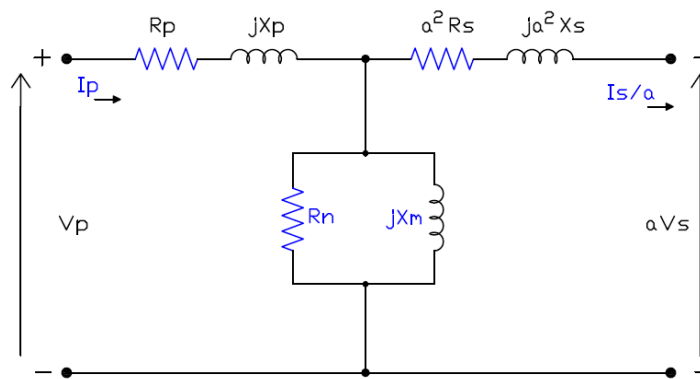


Fuente: Los Autores

²⁵ CHAPMAN Stephen J, *Máquinas Eléctricas*, 4ta Edición, Editorial Mc GrawHill, México, 2005. Pág, 86

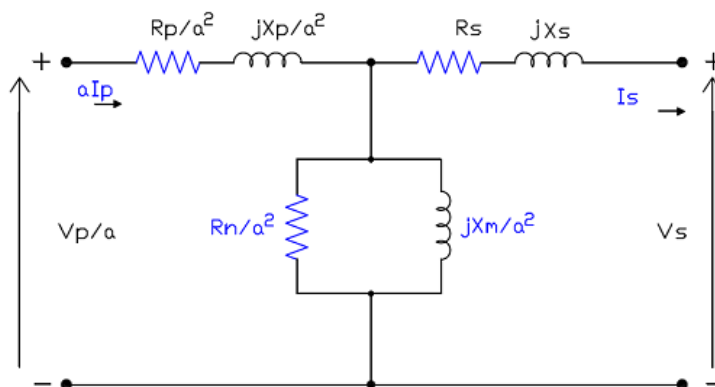
Aunque la gráfica es un modelo exacto de un transformador, no es muy útil. Para analizar circuitos prácticos que contienen transformadores casi siempre es necesario convertir todo el circuito en uno equivalente con un solo nivel de tensión. Por lo tanto, el circuito equivalente se debe referir a su lado primario o a su lado secundario en la solución de los problemas. El gráfico 6.17(a) muestra el circuito equivalente del transformador referido a su lado primario y el gráfico 6.17 (b) muestra el circuito equivalente referido a su lado secundario.

GRÁFICO 6.17(A) EL MODELO REFERIDO A SU NIVEL DE TENSIÓN PRIMARIO



Fuente: Los Autores

GRÁFICO 6.17 (B) EL MODELO REFERIDO A SU NIVEL DE TENSIÓN SECUNDARIO



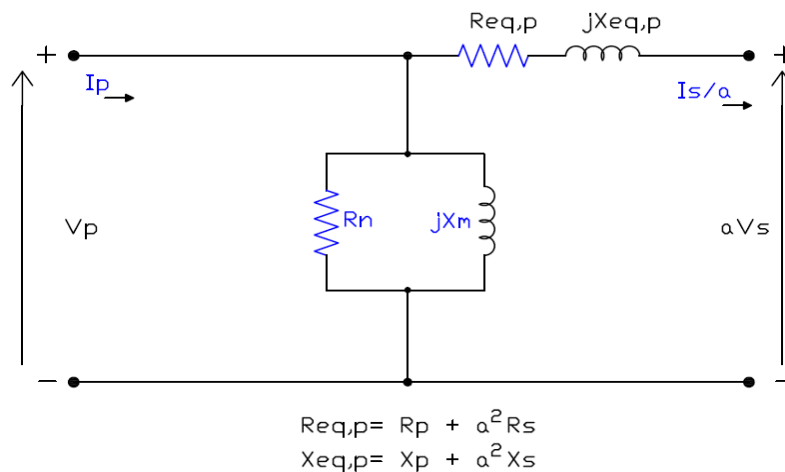
Fuente: Los Autores

6.6.2 CIRCUITOS EQUIVALENTES APROXIMADOS DE UN TRANSFORMADOR.²⁶

Los modelos de transformadores que se han mostrado hasta ahora son más complejos de los que se requiere en la práctica de la ingeniería para obtener buenos resultados. La rama de excitación tiene una corriente muy pequeña comparada con la corriente de carga de los transformadores. De hecho, es tan pequeña que en circunstancias normales causa una caída de tensión despreciable en R_p y X_p . Por esta causa, se puede producir un circuito equivalente simplificado que funciona casi tan bien como el modelo original.

Simplemente se mueve al frente del transformador la rama de excitación y las impedancias primarias y secundarias se dejan conectadas en serie. Se añaden estas impedancias dando como resultado el circuito equivalente aproximado como se muestra en la gráfica 6.18 (a) y (b).

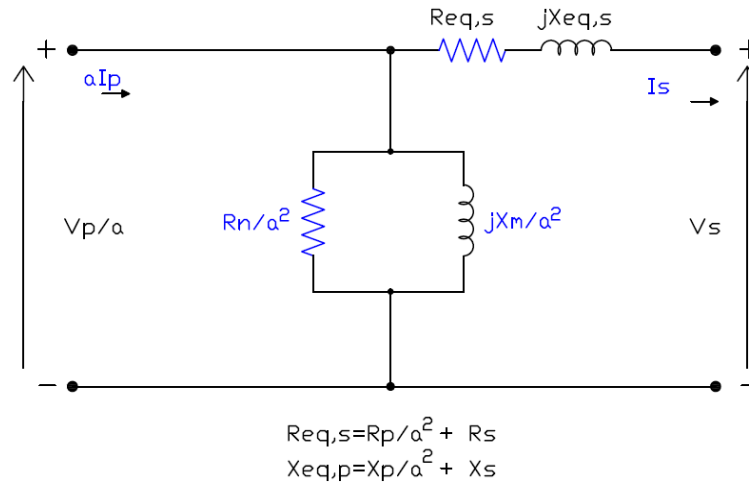
GRÁFICO 6.18 (A) EL MODELO APROXIMADO, REFERIDO AL LADO PRIMARIO



Fuente: Los Autores

²⁶ CHAPMAN Stephen J, *Máquinas Eléctricas*, 4ta Edición, Editorial Mc GrawHill, México, 2005. Pág. 89

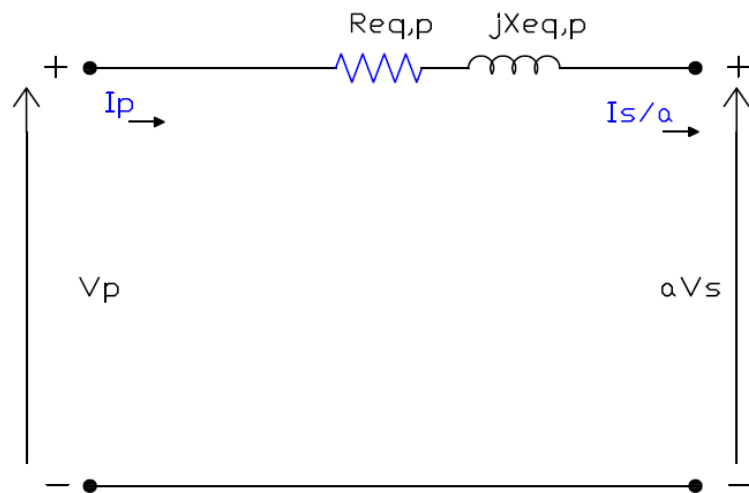
GRÁFICO 6.18 (B) EL MODELO APROXIMADO, REFERIDO AL LADO SECUNDARIO



Fuente: Los Autores

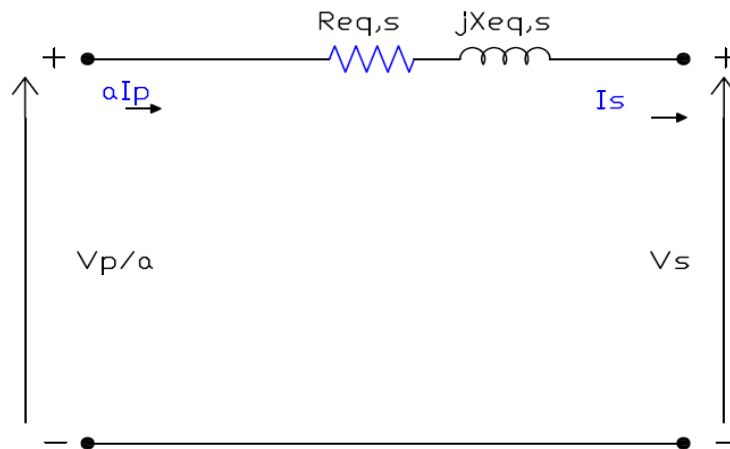
En ciertas aplicaciones se puede omitir por completo la rama de excitación sin causar graves errores. En estos casos, el circuito equivalente del transformador se reduce a los circuitos simples del Gráfico 6.19(a) y (b).

GRÁFICO 6.19 (A) EL MODELO APROXIMADO SIN RAMA DE EXCITACIÓN, REFERIDO AL LADO PRIMARIO



Fuente: Los Autores

GRÁFICO 6.19 (B) EL MODELO APROXIMADO SIN RAMA DE EXCITACIÓN, REFERIDO AL LADO SECUNDARIO



Fuente: Los Autores

6.6.3 DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE LOS COMPONENTES EN EL MODELO DEL TRANSFORMADOR.

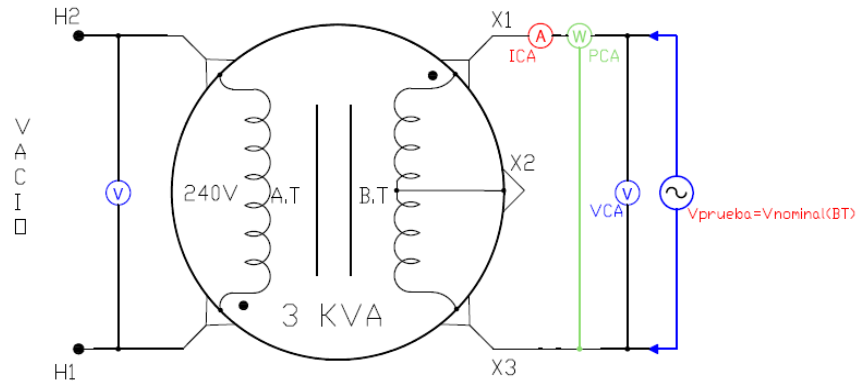
Es posible determinar experimentalmente los valores de las impedancias y resistencias en el modelo del transformador. Se puede obtener una aproximación adecuada de estos valores con únicamente dos pruebas: la prueba de vacío y la prueba de corto circuito.

6.6.4 PRUEBA EN VACÍO.²⁷

En este ensayo se determinan las pérdidas en el hierro, la corriente y el factor de potencia en vacío y los parámetros de la rama paralela del circuito equivalente. El ensayo se realiza aplicando tensión nominal, de frecuencia nominal, preferentemente a un arrollamiento de baja tensión, y con los otros arrollamientos abiertos, se mide la corriente I_{CA} y la potencia P_{CA} absorbidas y tensión aplicada V_{CA} , gráfico 6.22.

²⁷ LEMOZY Norberto A., *Ensayo de transformadores*, 2011 - Pág., 11

GRÁFICO 6.20 CONEXIÓN PARA LA PRUEBA EN VACÍO



Fuente: Los Autores

La indicación de alimentar al transformador “preferentemente” por un arrollamiento de baja tensión se basa en que, de esa forma, la tensión necesaria será más fácil de obtener y medir y, además, la corriente tendrá un valor más acorde con los alcances normales de los instrumentos.

Al estar el transformador en vacío, no entrega potencia, y toda la que absorbe se gasta en pérdidas. Como la corriente secundaria es nula, en ese arrollamiento no hay pérdidas en el cobre y, por otra parte como la corriente primaria en vacío es mucho menor a la nominal, las pérdidas en el cobre del primario son despreciables. Entonces si la tensión y la frecuencia son nominales, las pérdidas en el hierro también serán nominales.

La magnitud de la admitancia de excitación, puede calcularse con la base en la tensión y corriente de la prueba en vacío.

$$YE = \frac{ICA}{VCA}$$

$$YE = \frac{0.249}{120} = 0.002075$$

El ángulo de la admitancia se puede calcular con base en el factor de potencia del circuito.

$$\theta = \cos^{-1} \frac{PCA}{VCA \times ICA}$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{10}{120 \times 0.249}$$

$$\theta = 70.45^\circ$$

El factor de potencia siempre está en retraso en un transformador real, por lo que el ángulo de la corriente está en retraso con respecto al ángulo de la tensión en θ grados, por lo tanto la admitancia es

$$YE = \frac{ICA}{VCA} \angle -\cos^{-1} \theta$$

$$YE = 0.002075 \angle -70.45$$

$$YE = 6.9435 \times 10^{-4} - j1.955 \times 10^{-3}$$

La conductancia del resistor de pérdidas Gn y la susceptancia del inductor de magnetización Bm está dada por

$$YE = Gn - jBm$$

$$YE = \frac{1}{Rn} - j \frac{1}{Xm}$$

Conductancia:

Susceptancia:

$$Gn = \frac{1}{6.9435 \times 10^{-4}}$$

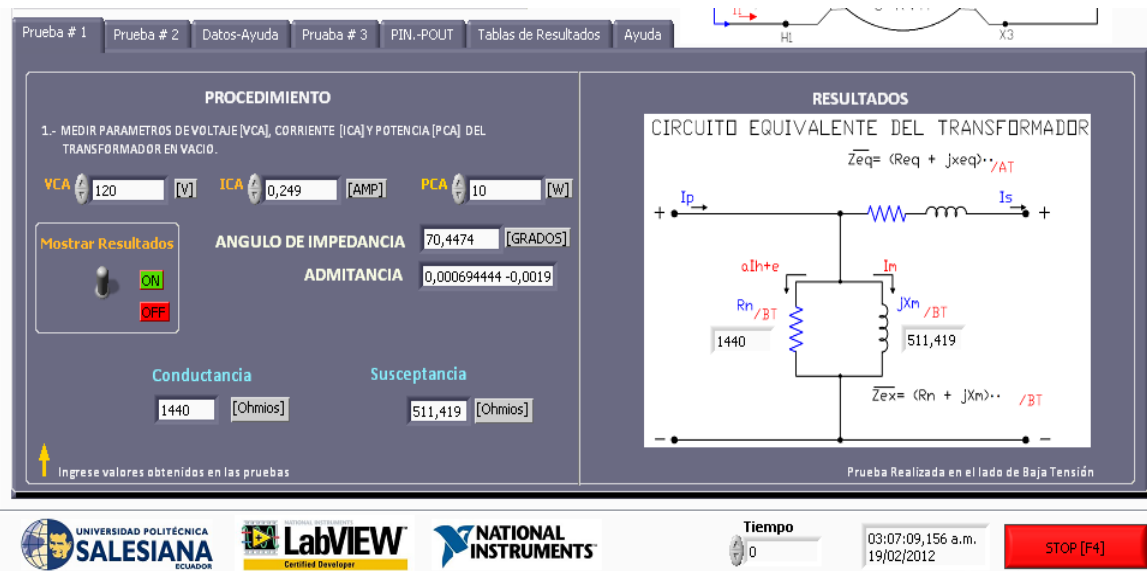
$$Gn = 1440.19 \Omega$$

$$Bm = \frac{1}{1.955 \times 10^{-3}}$$

$$Bm = 511.508 \Omega$$

El gráfico 6.21 muestra el cálculo desarrollado por el panel de control en LabVIEW, donde se encuentran tres controles numéricos en los cuales se deben ingresar los valores de tensión, Corriente y potencia del transformador en Vacío obtenidos en pruebas anteriores.

GRÁFICO 6.21 PANEL DE CONTROL DE PRUEBA EN VACÍO



Fuente: Los Autores

TABLA 6.5 RESULTADOS DE PRUEBAS EN VACÍO

| VALORES OBTENIDOS EN PRUEBAS | |
|-----------------------------------|------------------|
| PCA | 10 W |
| ICA | 0,249 |
| VCA | 120 V |
| Magnitud admitancia de excitación | $YE = 0.002075$ |
| Ángulo admitancia de excitación | $70,45^0$ |
| Conductancia | 1140Ω |
| Susceptancia | $511,419 \Omega$ |

Fuente: Los Autores

FIGURA 6.3 RESULTADOS PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO

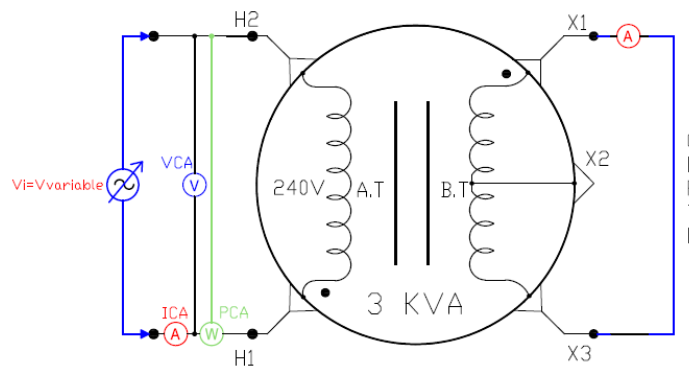


Fuente: Los Autores

6.6.5 PRUEBA DE CORTO CIRCUITO.²⁸

En este ensayo se determinan las pérdidas en el cobre, la tensión y el factor de potencia en cortocircuito y los parámetros de la rama serie del circuito equivalente. El ensayo se realiza haciendo circular una corriente nominal, o próxima a ella, de frecuencia nominal, preferentemente a un arrollamiento de alta tensión, y con el otro arrollamiento cortocircuitado, se mide la corriente ICC y la potencia PCC absorbidas y tensión aplicada VCC , mucho menor que la nominal, gráfico 6.22.

GRÁFICO 6.22 CONEXIÓN PARA LA PRUEBA DE CORTO CIRCUITO



Fuente: Los Autores

²⁸ LEMOZY Norberto A., *Ensayo de transformadores*, 2011 - Pág., 17

FIGURA 6.4 PRUEBA DE CORTO CIRCUITO



Fuente: Los Autores

FIGURA 6.5 RESULTADO PRUEBA DE CORTO CIRCUITO



Fuente: Los Autores

La indicación de alimentar al transformador “preferentemente” por un arrollamiento de alta tensión se basa en que, de esa forma, la corriente necesaria será más fácil de obtener y medir y, además, la tensión tendrá un valor más acorde con los alcances normales de los instrumentos.

La magnitud de las impedancias en serie del transformador es:

$$Z_{serie} = \frac{VCC}{ICC}$$
$$Z_{serie} = \frac{16.2}{13.92} = 1.1637$$

El factor de potencia de la corriente está dado por:

$$FP = \cos \theta \frac{PCC}{VCC \times ICC}$$

Y esta en retraso. Por tanto, el ángulo de corriente es negativo y el ángulo de impedancia total θ es positivo:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{PCC}{VCC \times ICC}$$
$$\theta = \cos^{-1} \frac{216}{16.2 \times 13.92}$$
$$\theta = 16.69^\circ$$

Por lo tanto

$$Z_{serie} = \frac{VCC}{ICC} \angle \theta$$
$$Z_{serie} = 1.1637 \angle 16.69$$
$$Z_{serie} = (1.11467 + j0.334)\Omega$$

Como la prueba de corto circuito es realizada en alta tensión el resultado debemos reflejarlo a su lado de baja tensión dividiendo para a^2 .

$$a = \frac{240}{120} = 2$$

La impedancia serie Z_{serie} referida al lado de baja tensión es igual a:

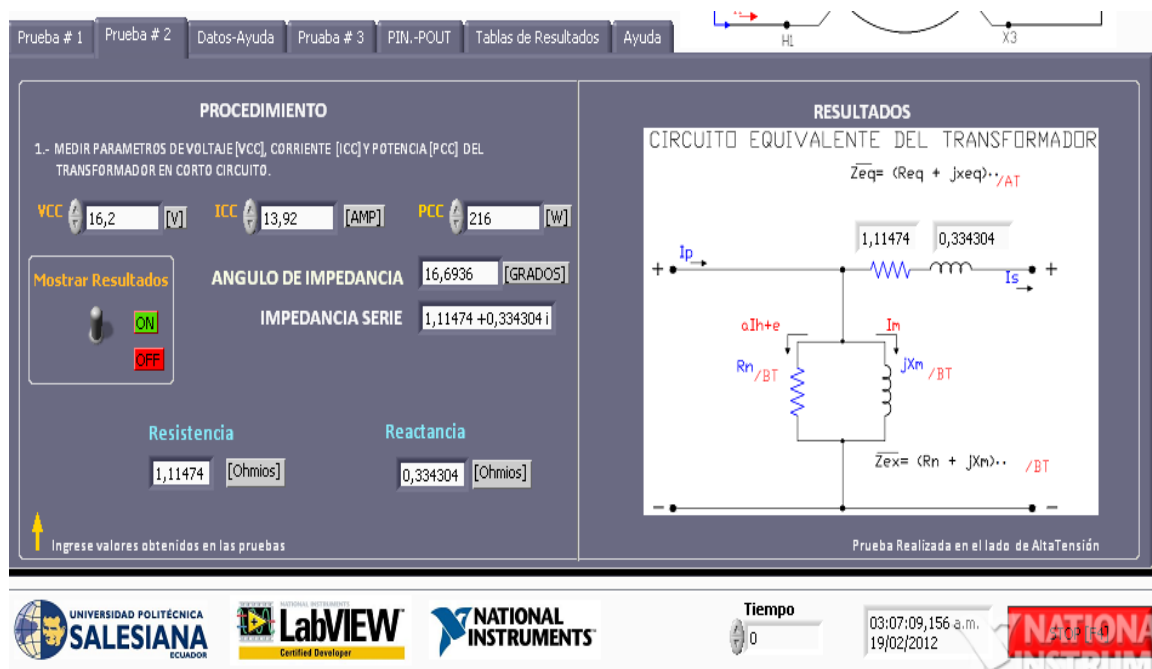
$$Z_{serie}(B.T) = \frac{1.11467}{a^2} + \frac{0.334}{a^2}$$

$$Z_{serie}(B.T) = \frac{1.11467}{4} + \frac{0.334}{4}$$

$$Z_{serie}(B.T) = (0.27866 + j0.0835)\Omega$$

El gráfico 6.23 muestra el cálculo desarrollado por el panel de control en LabVIEW, donde se encuentran tres controles numéricos en los cuales se deben ingresar los valores de tensión, Corriente y potencia del transformador obtenidos en pruebas de corto circuito.

GRÁFICO 6.23 PANEL DE CONTROL DE PRUEBA DE CORTO CIRCUITO



Fuente: Los Autores

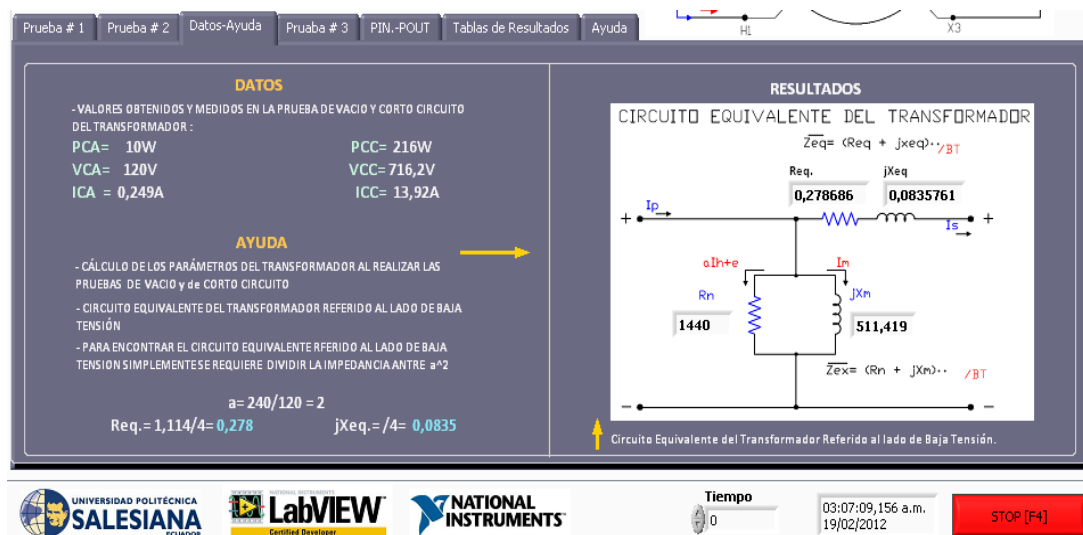
TABLA 6.6 RESULTADOS DE PRUEBAS DE CORTO CIRCUITO

| VALORES OBTENIDOS EN PRUEBAS | |
|------------------------------|--------------------|
| PCC | 216 W |
| ICC | 13,92 |
| VCC | 16,2 |
| Magnitud de Impedancia | 0.290 |
| Ángulo de Impedancia | 16,69 ⁰ |
| Resistencia | 1,1147 Ω |
| Reactancia | 0,334 Ω |

Fuente: Los Autores

Para encontrar el circuito equivalente de nuestro transformador al lado de baja tensión, simplemente se requiere dividir las componentes de la impedancia Req y $jXeq$ entre a^2 . Como $a = N_s/N_p = 2$, los valores resultantes los muestra el gráfico 6.24.

GRÁFICO 6.24 PANEL DE RESULTADOS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE, REFERIDO LADO DE BAJA TENSIÓN



Fuente: Los Autores

6.6.6 CORRIENTES DE MAGNETIZACIÓN.²⁹

Cuando una fuente de potencia de ca se conecta a un transformador fluye una corriente en su circuito primario, aun cuando su circuito secundario esté en circuito abierto. Esta corriente es la corriente necesaria para producir un flujo en el núcleo ferromagnético real. Consta de dos componentes:

1. **La corriente de magnetización i_m** , que es la corriente necesaria para producir el flujo en el núcleo del transformador.
2. **La corriente de pérdidas en el núcleo i_{h+e}** , que es la corriente necesaria para compensar las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas.
 - La corriente de magnetización en el transformador no es sinusoidal. Los componentes de más alta frecuencia en la corriente de magnetización se deben a la saturación magnética en el núcleo del transformador.
 - Una vez que la intensidad máxima de flujo alcanza el punto de saturación en el núcleo, un pequeño aumento en la intensidad pico de flujo requiere un aumento muy grande en la corriente de magnetización máxima.
 - La componente fundamental de la corriente de magnetización retrasa la tensión aplicada al núcleo en 90° .
 - Los componentes de más alta frecuencia en la corriente de magnetización pueden ser más bien grandes, comparados con la componente fundamental. En general, cuanto más se impulse un núcleo de transformador hacia la saturación, tanto más grandes se volverán los componentes armónicos.

La otra componente de la corriente en vacío en el transformador es la corriente necesaria para producir la potencia que compense las pérdidas por histéresis y corrientes parásitas en el núcleo. Esta es la corriente de pérdidas en el núcleo. Supongamos que el flujo en el núcleo es sinusoidal. Puesto que las corrientes parásitas en el núcleo son proporcionales a df/dt , las corrientes parásitas son las más grandes cuando el flujo en el núcleo está

²⁹ Transformadores, alumno.us.es/a/amaluqsen/Transformadores.doc

pasando a través de 0 Wb. La pérdida por histéresis es no lineal en alto grado, pero también es la más grande mientras el flujo en el núcleo pasa por 0.

La corriente total en vacío, en el núcleo, se llama la corriente de excitación del transformador. Es, simplemente, la suma de la corriente de magnetización y la corriente por pérdidas en el núcleo:

$$i_{ex} = I_o = I_m + I_{h+e} \quad [A]$$

Donde la corriente de magnetización y la corriente de pérdidas en el núcleo son,

$$I_m = \frac{V_i}{jX_n}$$

$$I_m = \frac{120}{1440.19 \angle 0^\circ}$$

$$I_m = 0.083 \angle 0^\circ \quad [A]$$

$$I_{h+e} = \frac{V_i}{R_n}$$

$$I_{h+e} = \frac{120}{511.5 \angle 90^\circ}$$

$$I_{h+e} = 0.2346 \angle -90^\circ \quad [A]$$

Por lo tanto I_o es igual a:

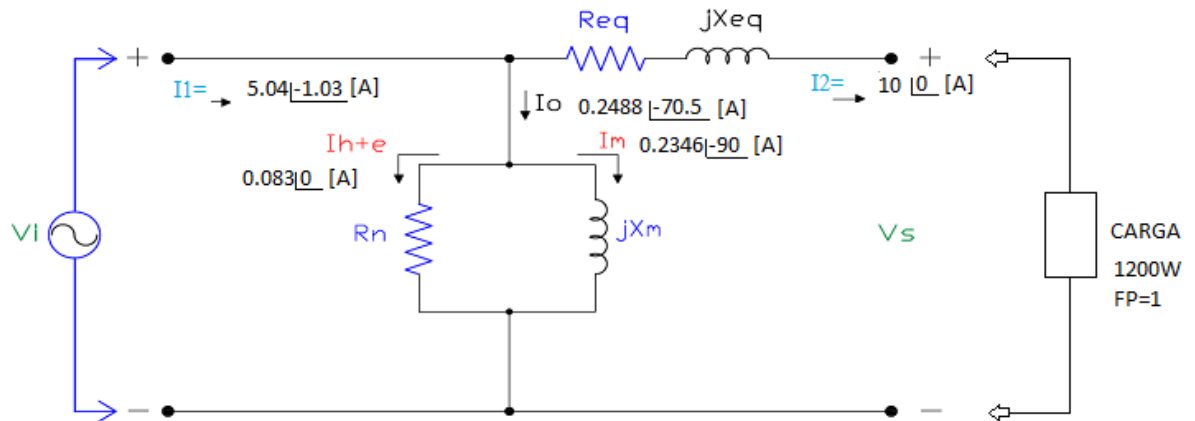
$$I_o = 0.083 \angle 0^\circ + 0.2346 \angle -90^\circ$$

$$I_o = (0.083 + j0) + (0 - j0.2346)$$

$$I_o = 0.083 - j0.2346$$

$$I_o = 0.2488 \angle -70.51 \quad [A]$$

GRÁFICO 6.25 CORRIENTES DENTRO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE



Fuente: Los Autores

6.6.7 RENDIMIENTO.

El rendimiento de un transformador es variable y depende del valor de la potencia suministrada. Un transformador funciona a su máximo rendimiento cuando la intensidad de la corriente de carga es de valor tal que resultan iguales las pérdidas de potencia en el hierro y en el cobre.

Normalmente el valor máximo de rendimiento no corresponde a su régimen nominal. Los transformadores, en la práctica, se calculan para obtener el rendimiento máximo en las condiciones de carga en que se supone que van a trabajar durante más tiempo. Éste se calcula por métodos directos e indirectos.³⁰

1. Directos. Se carga el transformador con una carga real en el secundario y se miden la potencia de salida y la potencia de entrada.

$$\eta = \frac{Pot.Salida}{Pot.Entrada} = \frac{Pout}{Pin} \times 100\%$$

³⁰ MANZANO ORREGO Juan José, *Máquinas Eléctricas*, 1era Edición, Editorial Paraninfo, SA Madrid-España, 2010.

2. Indirectos. Se tiene en cuenta todas las pérdidas que se producen, calculadas en los ensayos de vacío y cortocircuito, teniendo además presente el índice de carga.

Los circuitos equivalentes del transformador facilitan mucho los cálculos de la eficiencia, hay tres tipos de pérdidas que se representan en los transformadores:

- Pérdidas en el cobre.
- Pérdidas en el núcleo
 - Pérdidas por histéresis.
 - Pérdidas por corrientes parásitas.

Para calcular la eficiencia de un transformador bajo carga dada, sólo se suman las pérdidas de cada resistencia y se aplica la ecuación:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{perdidas}} \times 100 \quad \%$$

Puesto que la potencia es $P_{SAL} = V_S * I_S \cos \varphi$, la eficiencia puede expresarse por:

$$\eta = \frac{V_S \times I_S \times \cos \theta}{(V_S \times I_S \times \cos \theta) + P_{cu} + P_{nu}} \times 100 \quad \%$$

En consecuencia el rendimiento:

- Para un índice de carga fijo (C), η_c no varía con el factor de potencia de la carga.
- Para un valor de constante de factor de potencia ($\cos\theta$), η_c varía en función de la carga (C). Así, se puede calcular el rendimiento máximo η_c máx. para un régimen de carga determinado y ($\cos\theta$) constante.

$$\eta = \frac{V_S \times I_S \times \cos \theta}{(V_S \times I_S \times C \times \cos \theta) + P_o + C^2 \times P_{cc}} \times 100 \quad \%$$

Si en esta ecuación dividimos por C en los dos miembros, queda:

$$\eta = \frac{Vs \times Is \times \cos \theta}{(Vs \times Is \times \cos \theta) + \frac{Po}{C} + C \times Pcc} \times 100 \quad \%$$

Lo que indica que el rendimiento es máximo cuando $(Po/C + C * Pcc)$ es mínimo. Esta relación valdrá cero cuando $Po = Pcc * C^2$, o bien $Pcc = Po$

Un índice de carga adecuado para un rendimiento máximo será:

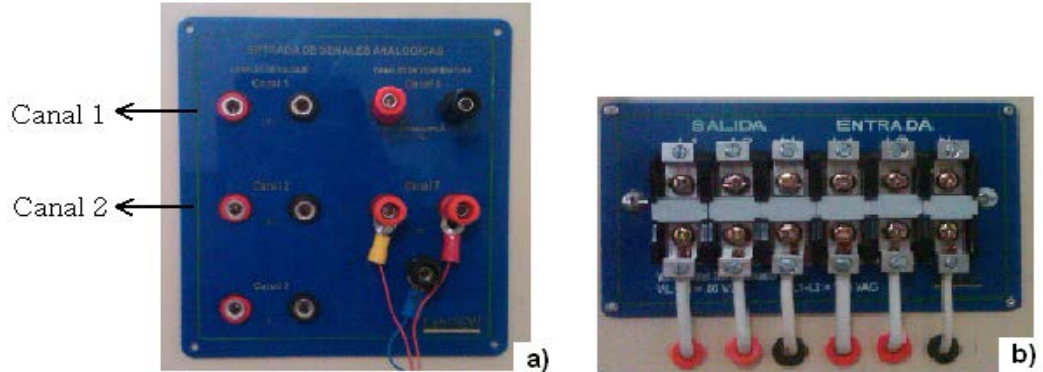
$$C\eta_{\max} = \sqrt{\frac{Po}{Pcc}}$$

6.6.8 ANÁLISIS CON CARGA.

El gráfico 6.28 muestra el análisis del transformador con carga, para poder realizar esta prueba se debe seguir los siguientes pasos:

1. Se debe calcular la potencia de la carga conectada al transformador, para este se utiliza el canal 1 para la tensión en la carga los cuales poseen puntales especiales para la medición de tensión ubicados en la parte externa del tablero, ver figura 6.6(a) para mayor comprensión.
2. El canal 3 me permite realizar la medición de corriente a través de los sensores de efecto hall que se encuentran dentro del módulo ubicados en cada barra, además posee una protección para evitar contactos directos y descargas repentinas como se muestra en la figura 6.6 (b).

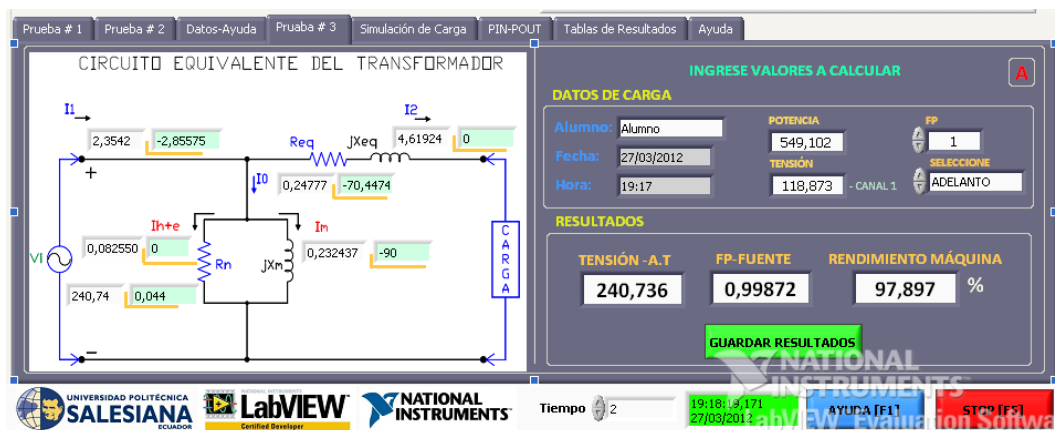
FIGURA 6.6 (A, B) ENTRADA DE CANALES DE TENSIÓN Y CORRIENTE, (A) ENTRADA DE TENSIÓN, (B) ENTRADAS Y SALIDAS DEL TRANSFORMADOR



Fuente: Los Autores

- Indicar el factor de potencia que posee la carga, si esta en adelanto, atraso o en la opción de no realizar cálculo alguno para mantener los valores en los indicadores numéricos en cero.
- A continuación se muestra los valores obtenidos, tensiones en alta tensión para el porcentaje de carga en la salida del transformador, su factor de potencia y el rendimiento total de la máquina.

GRÁFICO 6.26 ANÁLISIS CON CARGA EN EL TRANSFORMADOR



Fuente: Los Autores

TABLA 6.7 DATOS PARA CÁLCULO TEÓRICO

| DATOS | | | |
|---|-----------|-----------------------------------|---------|
| Transformador alimentado en ALTA TENSIÓN, modelo visto desde BAJA TENSIÓN | | | |
| Carga | | Resistiva al 40% de carga [1200W] | |
| PRUEBA EN VACIO | | PRUEBA DE CORTO CIRCUITO | |
| VCA | 120 V | VCC | 16.2 V |
| ICA | 0.249 A | ICC | 13.92 A |
| PCA | 10 W | PCC | 216 W |
| Conductancia | 1440.19 Ω | Req | 0.27866 |
| Susceptancia | 511.508 Ω | jXeq | 0.0835 |
| Corriente de pérdida Ih+e = | | 0.083 | |
| Corriente de magnetización Im = | | 0.0234 | |

Fuente: Los Autores

Corriente secundaria I_2 :

$$I_2 = \frac{P}{V} = \frac{1200W}{120V}$$

$$I_2 = 10 \angle 0^\circ [A]$$

Corriente Primaria I_1 :

$$I_1 = I_s + I_o$$

$$I_1 = 10 \angle 0^\circ + 0.2488 \angle -70.51^\circ$$

$$I_1 = (10 + j0) + (0.083 - j0.2346)$$

$$I_1 = (10.083 - j0.2346)$$

$$I_1 = \frac{10.085 \angle -1.3^\circ}{2} = 5.04 \angle -1.3^\circ [A]$$

Tensión en ALTA TENSIÓN al 40% de carga:

$$V_i = I_p(Z_{serie}) + 240$$

$$V_i = 10.085 \angle -1.3^\circ (0.2909 \angle 16.68^\circ) + 240 \angle 0^\circ$$

$$V_i = 2.933 \angle 15.38^\circ + 240 \angle 0^\circ$$

$$V_i = (2.827 + j0.777) + 240 \angle 0^\circ$$

$$V_i = 242.82 \angle 0.18^\circ [V]$$

$$\theta_{FP} = 6.52 + 2.766 = 9.286$$

$$FP = \cos(9.286)$$

$$FP = 0.986 \quad \text{atraso}$$

Factor de Potencia:

Rendimiento:

Perdidas en el Cobre:

Perdidas en el núcleo:

$$P_{cu} = I^2 \times R_{eq}$$

$$P_{cu} = 5.04^2 \times 0.27866$$

$$P_{cu} = 7.0784W$$

$$P_{nu} = (I_h + e)^2 \times R_n$$

$$P_{nu} = 0.083^2 \times 1440.19$$

$$P_{nu} = 9.92W$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{cu} + P_{nu}} \times 100 \quad \%$$

$$\eta = \frac{1200}{1200 + 7.0784 + 9.92} \times 100$$

$$\eta = 98.6\%$$

TABLA 6.8 RESULTADOS DE ANÁLISIS TEÓRICO

| RESULTADOS: VALORES TEÓRICOS OBTENIDOS | | | |
|---|------------------------------|------------------|------------------|
| Datos de | Tipo | Resistiva | Resistiva |
| Carga | Potencia de carga | 600 W | 1200 W |
| | Tensión | 120 V | 120 V |
| | F.P | 1 | 1 |
| Corrientes | Pérdidas en el núcleo | 0.083 A | 0.083 A |
| | Magnetización | 0.0234 A | 0.0234 A |
| | Carga | 5.088 A | 10.08 A |
| | Fuente | 2.55 A | 5.04 A |
| F.P | Fuente | 0.99 | 0.98 |
| Tensión | Alta Tensión | 241.44 V | 242.82 V |
| Rendimiento | | 97.2% | 98.6% |

Fuente: Los Autores

TABLA 6.9 RESULTADOS PRÁCTICOS CON CARGA EN EL TRANSFORMADOR

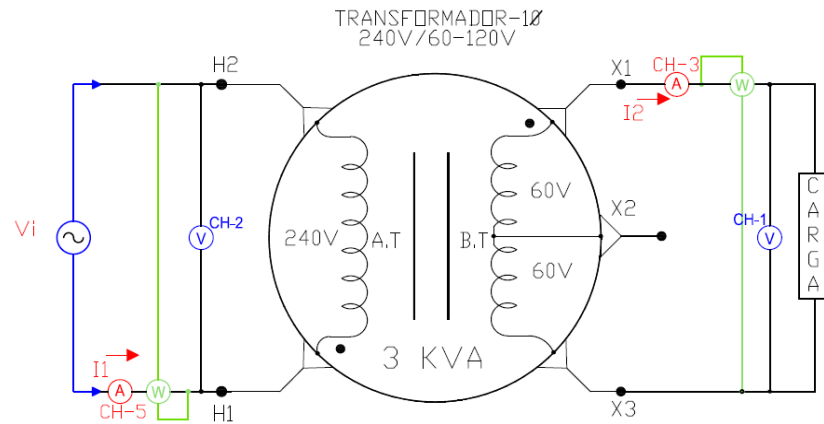
| RESULTADOS: VALORES PRÁCTICOS OBTENIDOS | | | |
|--|------------------------------|-----------|-----------|
| Datos de Carga | Tipo | Resistiva | Resistiva |
| | Potencia de carga | 549 W | 1150 W |
| | Tensión | 118.87 V | 119.6 |
| | F.P | 1 | 1 |
| Corrientes | Pérdidas en el núcleo | 0.083 A | 0.083 A |
| | Magnetización | 0.23 A | 0.23 A |
| | Carga | 4.62 A | 9.61 A |
| | Fuente | 2.354 A | 4.76 A |
| Tensión | Alta Tensión | 240.74 V | 240.91 V |
| F.P | Fuente | 0.99 | 0.98 |
| Rendimiento | | 97.897 % | 98.9 % |

Fuente: Los Autores

La gráfica 6.30 muestra el análisis del transformador con sus potencias de entrada y salida, para poder realizar esta prueba se debe seguir los siguientes pasos:

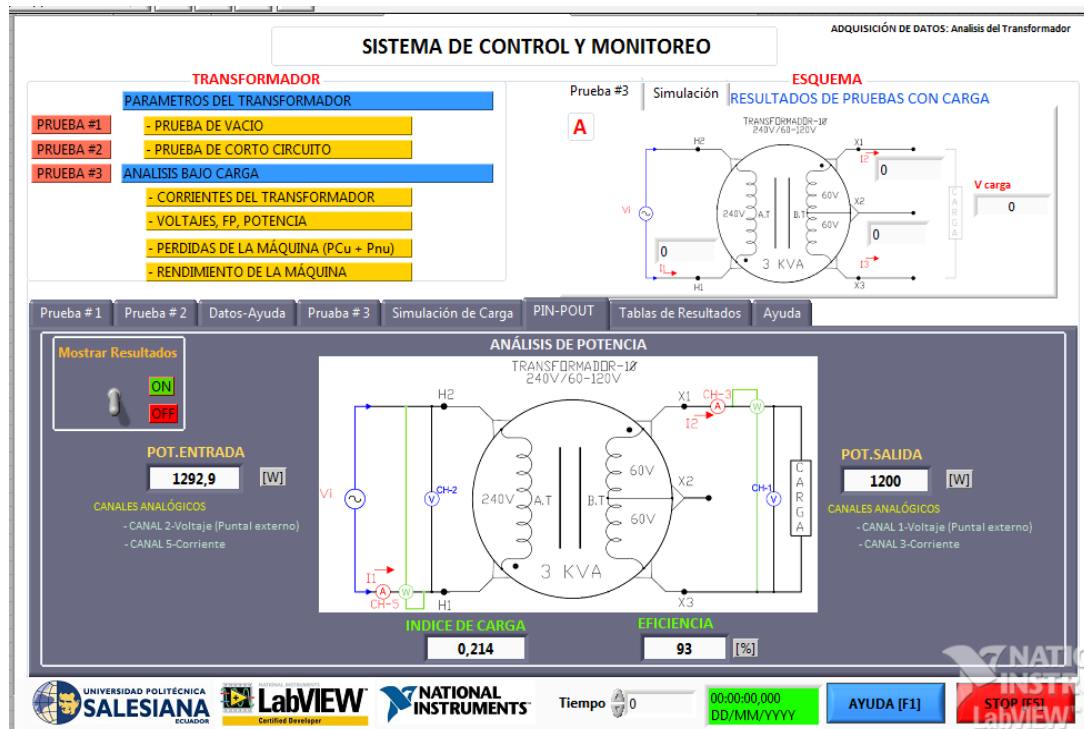
1. Para calcular la potencia de entrada, se debe ubicar los puntales del canal 2 de tensión en los terminales de entrada del transformador, la señal de corriente (CH-5) es censada por el transformador de corriente ubicado en las barras externas al módulo.
2. En la potencia de salida se debe ubicar los puntales del canal 1 de tensión como indica la gráfica 6.29, la señal de corriente (CH-3) es censada por el transformador de corriente ubicado en las barras internas del módulo.

GRÁFICO 6.27 ESQUEMA DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS Y CANALES ANALÓGICOS



Fuente: Los Autores

GRÁFICO 6.28 ANÁLISIS DE POTENCIA DE ENTRADA VS POTENCIA DE SALIDA EN LABVIEW



Fuente: Los Autores

CÁLCULO DE POTENCIAS

Índice de carga:

$$C\eta_{\max} = \sqrt{\frac{P_o}{P_{cc}}}$$

$$C\eta_{\max} = \sqrt{\frac{10}{216}}$$

$$C\eta_{\max} = 0.214$$

Eficiencia máxima :

$$\% \eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + \left(\frac{PCA}{NC} \right) + (NC \times PCC)} \times 100$$

$$\% \eta = \frac{1200}{1200 + \left(\frac{10}{0.214} \right) + (0.214 \times 216)} \times 100$$

$$\% \eta = 92.81$$

TABLA 6.10 RESULTADOS DE PRUEBA CON CARGA EN EL TRANSFORMADOR

| INIDICE DE CARGA | MÁXIMA EFICIENCIA % |
|------------------|---------------------|
| 0.214 | 92.81 |
| 0.5 | 91.6 |
| 0.8 | 86.6 |
| 1 | 84.15 |

Fuente: Los Autores

La presente tabla me especifica que el transformador logrará su máxima eficiencia de 92.81% cuando su índice de carga conectada sea de 0.214.

6.7 ANÁLISIS DE TEMPERATURA.

La operación de un transformador sumergido en aceite refrigerante está relacionada con el calor producido en el núcleo y en los devanados, el cual se transfiere al aceite y de éste al medio ambiente a través del tanque. La capacidad para disipar este calor determina los criterios básicos para los límites de carga y vida útil de un transformador [12].

Básicamente, la degradación del aislamiento dieléctrico determina la vida útil del

transformador. El proceso de degradación del aislamiento depende de muchos factores tales como la humedad, contenido de oxígeno y temperatura. Los sistemas modernos permiten reducir la influencia de la humedad y el oxígeno, dejando la temperatura como única variable de control, más específicamente la temperatura del punto más caliente. Dakin postulo que la pérdida de vida es una función de la temperatura que sigue el principio de la reacción de Arrhenius [13].

$$Vida \text{ util } [pu] = A \cdot e^{\left(\frac{B}{\theta_H + 273}\right)}$$

La prueba que se realizo al transformador sigue la NORMA NTE INEN 2 119 que describe sobre la prueba de calentamiento para transformadores sumergidos en aceite con elevación de 65⁰C de temperatura en los devanados [14], métodos para determinar los parámetros y las temperaturas de los devanados y el aceite de transformadores.

6.7.1 INICIO DE LA PRUEBA DE CALENTAMIENTO.

El transformador debe estar completamente ensamblado y llenado hasta ajustar el nivel normal de aceite, como el transformador está equipado con indicadores térmicos este dispone de un aditamento para introducir una termocupla que permita medir la temperatura del nivel superior del aceite, ver figura.

FIGURA 6.7 ANÁLISIS DE TEMPERATURA

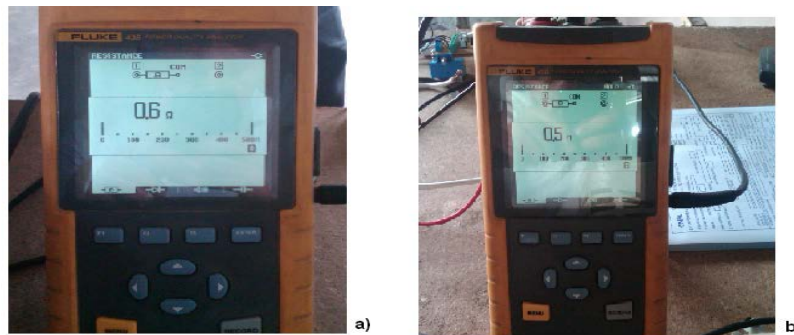


Fuente: Los Autores

La temperatura superior del aceite debe ser medida por una termocupla o termómetro adecuado, inmerso aproximadamente 5 cm bajo la superficie superior del aceite.

Antes de iniciar la prueba y energizar el transformador es necesario efectuar la medida de resistencia óhmica de los devanados de acuerdo con la metodología establecida en la NTE INEN 2 118. Esta resistencia se reconoce como la resistencia en frío de los devanados (R_0) y es tomada a una temperatura de devanados igual a la temperatura del aceite.

FIGURA 6.8 TOMA DE MEDIDA DE RESISTENCIA EN LOS DEVANADOS EN FRÍO, (A) RESISTENCIA EN ALTA TENSIÓN, (B) RESISTENCIA EN BAJA TENSIÓN.



Fuente: Los Autores

FIGURA 6.9 TOMA DE MEDIDA DE RESISTENCIA EN LOS DEVANADOS DESPUÉS DE LA PRUEBA, (A) RESISTENCIA EN ALTA TENSIÓN, (B) RESISTENCIA EN BAJA TENSIÓN.



Fuente: Los Autores

Para obtener los valores de resistencia se siguió la norma NTE INEN 2 118, la cual describe sobre la medida de la resistencia de los devanados para transformadores tipo sumergido en aceite indica:

- Antes de registrar la resistencia, el transformador debe haber estado en aceite y sin excitación o carga, por lo menos durante ocho horas. [15]
- La temperatura del aceite se registra y la temperatura del devanado se considera igual a la temperatura promedio determinada como se especifica en el numeral 4.4.2 de la NTE INEN 2 119.
- La elevación promedio del aceite se da como la diferencia entre la temperatura promedio del aceite y la temperatura ambiente.

$$\Delta T_{ma} = T_{ma} - T_a$$

Dónde:

T_{ma}: Temperatura en el aceite

T_a: Temperatura Ambiente

6.7.2 ELEVACIÓN DE TEMPERATURA DEL ACEITE.

La elevación de temperatura del aceite sobre la temperatura ambiente permite identificar si un transformador presenta una adecuada disipación del calor producido por las pérdidas en el núcleo y los devanados. La elevación de temperatura máxima permitida es 65°C y 60°C para las normas IEEE [16].

El procedimiento para estimar la elevación de temperatura del aceite consiste en medir la temperatura a 50mm por debajo de la parte superior del aceite (θ_{TO}), y externamente en la parte superior (θ_{SUP}) e inferior (θ_{INF}).del tanque como muestra la figura 6.10

FIGURA 6.10 TOMA DE TEMPERATURA, (A) PARTE INFERIOR DEL TANQUE, (B) PARTE SUPERIOR DEL TANQUE



Fuente: Los Autores

Se debe suministrar una corriente que permita obtener las pérdidas totales (pérdidas en vacío más las pérdidas con carga) que tendría el transformador en el porcentaje de carga que se desea ensayar.

$$P_{totales} = P_o + K^2 + P_{cc}$$

Donde P_o son las pérdidas nominales de vacío [W]

P_{cc} son las pérdidas nominales con carga [W]

K es el porcentaje de carga [pu]

$$P_{totales} = 10 + 1.207^2 + 216$$

$$P_{totales} = 227.457W$$

6.7.3 ELEVACIÓN DE TEMPERATURA DE LOS DEVANADOS.

La temperatura promedio de los devanados se determina usando el método de la resistencia. Esto es posible debido a la linealidad que existe entre la temperatura y la resistencia.

$$\theta_w = \frac{R}{R_0}(T_k + T_0) - T_k$$

Donde θ_w es la temperatura promedio del devanado

R es la resistencia medida

R_0 es la resistencia medida en frío a una temperatura T_0

T_k es una constante que depende del material del devanado (234,5°C para el cobre).

Este ensayo se realiza para los tres porcentajes descritos en la norma (75%, 100%, 125% de la corriente nominal).

6.7.3.1 PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO PARA OBTENCION DE DATOS:³¹

Este procedimiento simplificado para la medición de resistencia se basa en el hecho que la temperatura de los devanados y la temperatura del aceite mantienen una relación entre sí denominada elevación de temperatura del devanado sobre el aceite ($\Delta\theta_w$) tal como se demostró en el capítulo de temperatura, es decir que esta elevación es independiente de la temperatura del aceite. Por lo tanto, en este ensayo no se realiza el calentamiento previo del aceite hasta obtener la estabilidad térmica del mismo.

Este ensayo se inicia con el transformador a cualquier temperatura en el aceite (por ejemplo a temperatura ambiente) como muestra la figura 6.11.

³¹ CADAVID H, y otros, *Evaluación del comportamiento térmico del transformador de distribución*, Bogotá-Colombia, 2001, Pág. 4

FIGURA 6.11 TOMA DE TEMPERATURA (A) AMBIENTE, (B) ACEITE POR MEDIO DE TERMOCUPLA



Fuente: Los Autores

Se suministra una corriente igual al porcentaje de carga que se desea ensayar, durante una hora. Posteriormente se desenergiza el transformador y se mide la resistencia de cada uno de los devanados, teniendo en cuenta los mismos criterio del procedimiento INEN 2 119:98.

FIGURA 6.12 TRANSFORMADOR CONECTADO A CORRIENTE NOMINAL 100%



Fuente: Los Autores

Este método simple reduce el tiempo requerido para obtener el modelo térmico del devanado, puesto que no se requiere esperar que la temperatura del aceite se estabilice.

CÁLCULO DE TEMPERATURA

Temperatura en el devanado:

$$\theta_w = \frac{R}{R_0}(T_k + T_0) - T_k$$

$$\theta_w = \frac{0.6}{0.5}(234.5 + 30) - 234.5$$

$$\theta_w = 82.9^\circ$$

Temperatura en el punto más caliente:

$$\theta_H = Tamb + (\theta_{TO} - Tamb) + (15 + \frac{R}{R_0}(T_k + T_0) - T_k)$$

$$\theta_H = 30 + (23.5 - 30) + (15 + 82.9)$$

$$\theta_H = 121.4^\circ$$

Vida absoluta:

$$Vida = A \times e^{\left(\frac{B}{\theta_H} + 273\right)}$$

$$Vida = 9.80 \times 10^{-18} \times e^{\left(\frac{15000}{121.4} + 273\right)}$$

$$Vida = 0.322$$

Factor de envejecimiento:

$$FAA = e^{\left(\left(\frac{15000}{383}\right) - \left(\frac{15000}{\theta_H + 273}\right)\right)}$$

$$FAA = e^{\left(\left(\frac{15000}{383}\right) - \left(\frac{15000}{121.4 + 273}\right)\right)}$$

$$FAA = 3.10$$

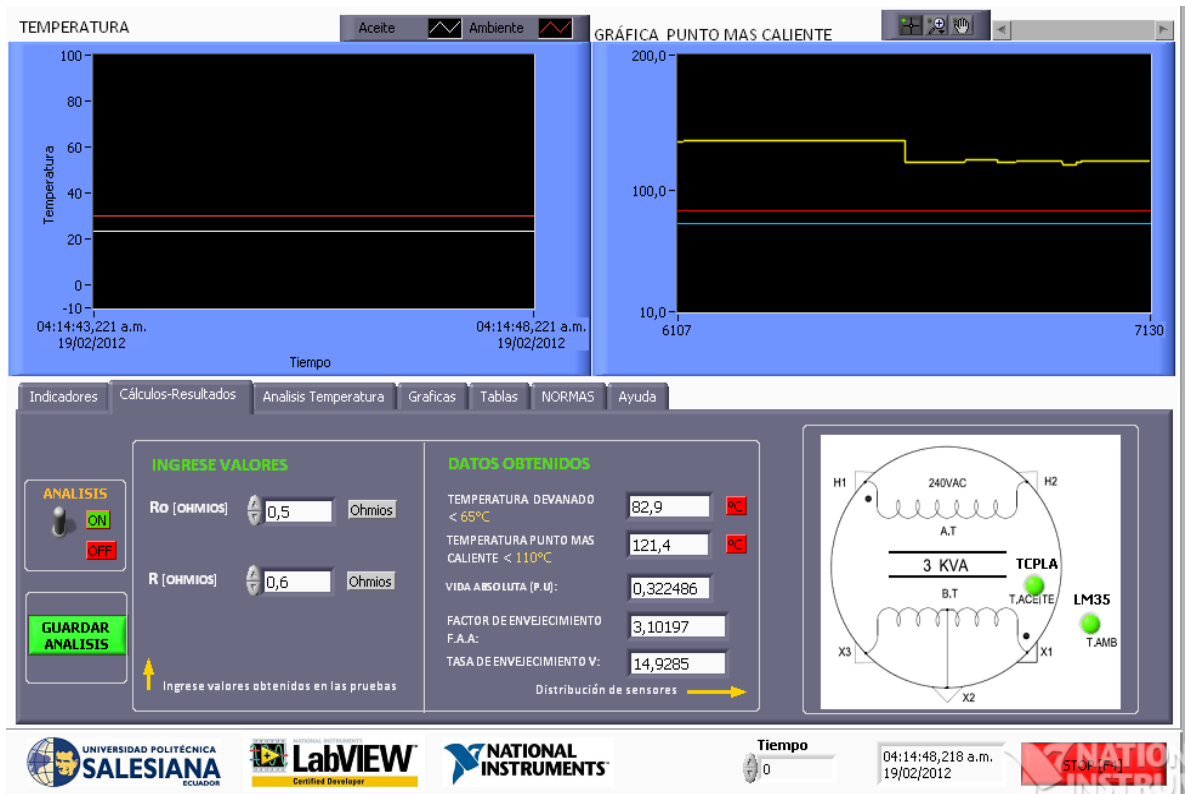
TABLA 6.11 RESULTADOS PRUEBA DE CALENTAMIENTO

| DATOS DE PRUEBA | VALORES OBTENIDOS EN PRUEBAS | |
|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Transformador | Tipo | Convencional |
| | Potencia | 3 KVA |
| | Tensión | 240/120-60V |
| | Polaridad | Aditiva |
| | Tiempo | 120 min |
| Carga | % Carga | 100 % |
| | Corriente | 25,4 A |
| Resistencia | En frio | 0,5 Ω |
| | Después de ensayo | 0,6 Ω |
| Temperaturas sensores | Ambiente | 30 $^{\circ}\text{C}$ |
| | Aceite | 23,5 $^{\circ}\text{C}$ |
| | RESULTADOS | |
| Temperaturas | Devanado | 82,9 $^{\circ}\text{C}$ |
| | Punto más caliente | 121,4 $^{\circ}\text{C}$ |
| Transformador | Vida Absoluta | 0,322 |
| | Factor de envejecimiento | 3.10 |

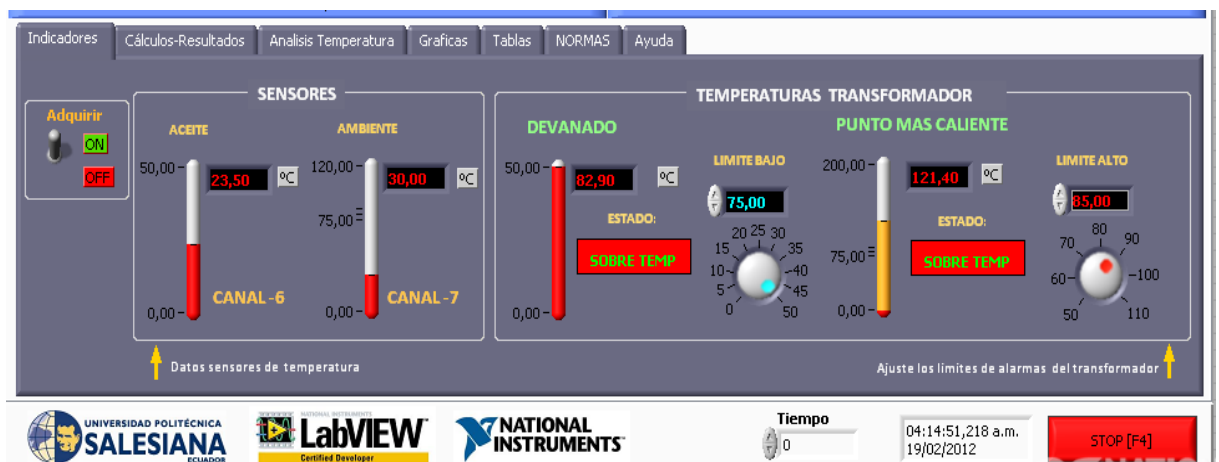
Fuente: Los Autores

La gráfica 6.29 (b), muestra la pantalla de control y adquisición de señales provenientes de los sensores de temperatura externos ubicados en el medio ambiente y en el aceite según normas, los cuales ayudaran a la obtención de las temperaturas del devanado y del punto más caliente del transformador, para su posterior análisis de vida útil y factor de envejecimiento.

GRÁFICO 6.29 ANÁLISIS DE TEMPERATURAS, (A) RESULTADOS, (B) INDICADORES TEMPERATURAS INTERNAS



(a)



(b)

Fuente: Los Autores

6.8 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en el análisis de temperatura muestran, para una temperatura ambiente de 30⁰ C y temperatura en el aceite de 23,5⁰ C, las temperaturas en el devanado y en el punto más caliente es de 82,90⁰ C y 121,40⁰ C respectivamente. Según las normas NTE INEN 2 119:98 que muestra la prueba de calentamiento para transformadores sumergidos en aceite, la elevación de temperatura para el devanado no debe exceder los 65⁰ C y del punto mas caliente no debe exceder los 85⁰ C.

Los rangos de temperatura obtenidos en el análisis, indican que el transformador no cumple con los parámetros según las normas NTE INEN 119:98

TABLA 6.12 RANGOS DE TEMPERATURA SEGÚN NORMAS INEN

| RESULTADOS ANÁLISIS DE TEMPERATURA | | |
|---|------------------------|-----------------------|
| TEMPERATURAS | NTE INEN 119:98 | PRUEBAS |
| DEVANADO | 65 ⁰ C | 82,90 ⁰ C |
| PUNTO MÁS CALIENTE | 85 ⁰ C | 121,49 ⁰ C |

Fuente: Los Autores

El transformador presenta problemas en temperatura trabajando a capacidad nominal, la elevación de temperatura en exceso que presenta el transformador hace que la vida útil del transformador se reduzca a 0,322 en por unidad y tenga un factor de envejecimiento acelerado de 3,10 veces mayor al normal a una temperatura de referencia de 110⁰ C, la cual es la temperatura base donde empieza el desgaste del papel y por consiguiente la perdida de vida en el transformador.

El valor de la tasa de envejecimiento aumenta a medida que la temperatura del punto más caliente θ_H es mayor, la temperatura elevada le resta eficiencia a la máquina por esta razón las normativas recomiendan que el valor del punto más caliente no supere los 110°C.

**TABLA 6.13 TASA DE ENVEJECIMIENTO RELATIVO POR TEMPERATURA DEL PUNTO
MÁS CALIENTE**

| θH | Tasa de envejecimiento relativo | Factor de Envejecimiento (FAA) |
|-----------|--|---------------------------------------|
| 30 | 0.00038 | 0.000032 |
| 40 | 0.0012 | 0.00015 |
| 50 | 0.0039 | 0.00068 |
| 60 | 0.012 | 0.0027 |
| 70 | 0.039 | 0.010 |
| 80 | 0.125 | 0.036 |
| 110 | 4.0 | 1.0 |
| 121,40 | 14.93 | 3.10 |
| 130 | 40.3 | 6.95 |
| 140 | 128 | 17.12 |
| 150 | 406.37 | 40.40 |
| 160 | 1290.16 | 91.64 |
| 170 | 4096 | 200.32 |

Fuente: Los Autores

Una de las causas posibles por las que el transformador no cumple con las pruebas de calentamiento son:

- Conductor utilizado en las bobinas están en mal estado o no fue construido con el conductor ideal para su nivel de capacidad, esto se ve reflejado en las pérdidas de corto circuito las cuales son muy elevadas según la norma INEN 2114 mostrada en la tabla 6.11

**TABLA 6.14 TABLA DE PÉRDIDAS EN LOS ENSAYOS DE VACÍO Y CORTO
CIRCUITO SEGÚN NORMA INEN 2114**

**TABLA 1. Transformadores monofásicos de 3 a 333 kVA
Clase medio voltaje $\leq 25 \text{ kV}_{f.f}$ / clase bajo voltaje $\leq 1,2 \text{ kV}_{f.f}$ referidos a 85° C**

| Potencia Nominal kVA | I_o (% de I_n) | P_o (W) | P_c (W) | P_t (W) | U_{zn} (%) |
|----------------------|---------------------|-----------|-----------|-----------|--------------|
| 3 | 2,5 | 21 | 70 | 91 | 3,0 |
| 5 | 2,5 | 31 | 91 | 122 | 3,0 |
| 10 | 2,5 | 52 | 142 | 194 | 3,0 |
| 15 | 2,4 | 68 | 192 | 260 | 3,0 |
| 25 | 2,0 | 98 | 289 | 387 | 3,0 |
| 37,5 | 2,0 | 130 | 403 | 533 | 3,0 |
| 50 | 1,9 | 160 | 512 | 672 | 3,0 |
| 75 | 1,7 | 214 | 713 | 927 | 3,0 |
| 100 | 1,6 | 263 | 897 | 1 160 | 3,0 |
| 167* | 1,5 | 379 | 1 360 | 1 739 | 3,0 |

* Para potencias entre 167 kVA y 333 kVA, las pérdidas se determinarán en común acuerdo entre fabricante y comprador

Fuente: Instituto Ecuatoriano de Normalización, www.inen.gov.ec

- El núcleo que se utilizó en la construcción del transformador está en malas condiciones.
- Como el transformador es de relación baja – baja (240/120V) las normas que se aplican a este tipo de transformadores son distintas a las normas aplicadas para transformadores con relación alta – baja (13800/120,240V).

CAPÍTULO VII

MANUAL DE USUARIO

7.1 INTRODUCCIÓN.

El Módulo Didáctico de Monitoreo y Control de Transformadores de Distribución, es una serie de elementos electrónicos y eléctricos típicos en los sistemas de instrumentación y control tales como sensores de corriente, voltaje y temperatura, señales analógicas de corriente continua y alterna.

Este manual explica la forma básica de utilización del módulo didáctico de monitoreo y control de transformadores de distribución.

El Módulo Didáctico está diseñado para conectar a un computador mediante una tarjeta de adquisición de datos Sbrío de National Instrument incluida en el módulo, además incluye un programa en la plataforma de desarrollo gráfico Labview de National Instrument para analizar y controlar los datos obtenidos durante las pruebas, finalmente el módulo didáctico es una herramienta diseñada para maximizar el aprendizaje de Labview, adquisición de datos y análisis básico de un transformador.

7.2 OBJETIVOS DE ESTE MANUAL.

El objetivo primordial de éste manual es ayudar y guiar al usuario a utilizar el Software de Monitoreo y Control de Transformadores de Distribución, obteniendo datos de sensores de voltaje, corriente, temperatura, análisis de rendimiento del transformador, su análisis bajo carga real o simulada y análisis de temperatura.

- Guía para acceder al programa principal en LabVIEW
- Conocer el alcance de toda la información por medio de una explicación detallada e ilustrada de cada una de las pestañas que conforman el proyecto.

7.3 QUÉ SE NECESITA PARA EMPEZAR.

Para desarrollar las pruebas se necesita:

- Requerimientos de Hardware:
 - Tarjeta de adquisición de datos de National Instrument, Sbrío (*Single Board Rio*) 9631.
 - Cable cruzado de conexión Ethernet (Incluido en el módulo)
 - Computador con Windows XP

- Requerimiento de Software:
 - Instalación de LabVIEW 8.6
 - Instalación de LabVIEW FPGA
 - Instalación de Measurement & Automation Explorer V4.5
 - Toolkit, Report Generation para LabVIEW 8.6 (Herramienta para generar reportes en office)
 - Network Variable Engine 1.8.0

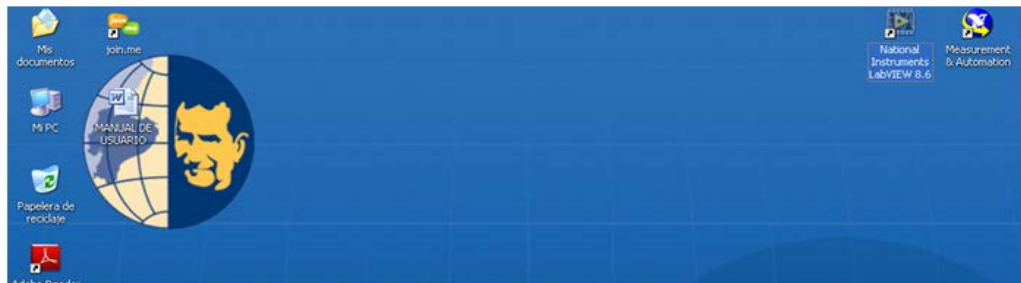
- Prerrequisitos:
 - Conocimientos básicos de programación en LabVIEW y LabVIEW FPGA.
 - Conocimientos básicos en pruebas de transformadores.
 - Conocimientos básicos de sistemas de adquisición de datos y sensores.
 - Conocimiento básico en manejo de sistemas de medición

7.4 INICIACIÓN DEL PROGRAMA.

1.- Abrir el programa de LabVIEW, ubicado en el escritorio.

GRÁFICO 7.1 PANTALLA INICIAL

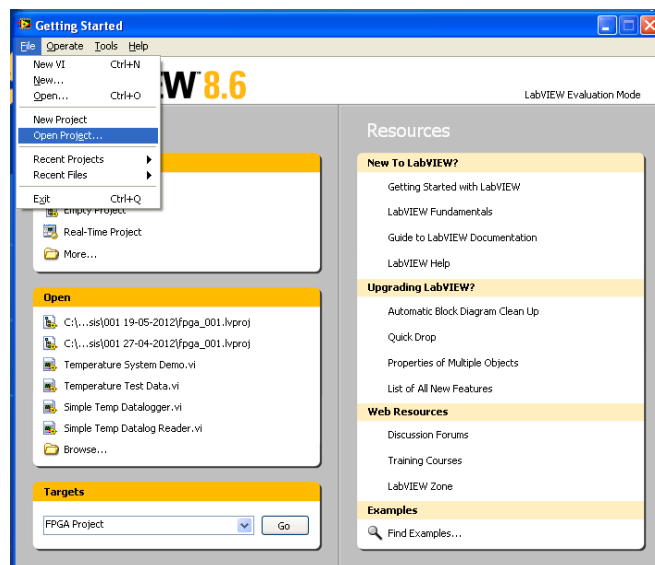
Abrir LabVIEW 8.6



Fuente: Los Autores

2.- Una vez que el programa se abre, muestra una pantalla de opciones, seleccionar File >> Open Project

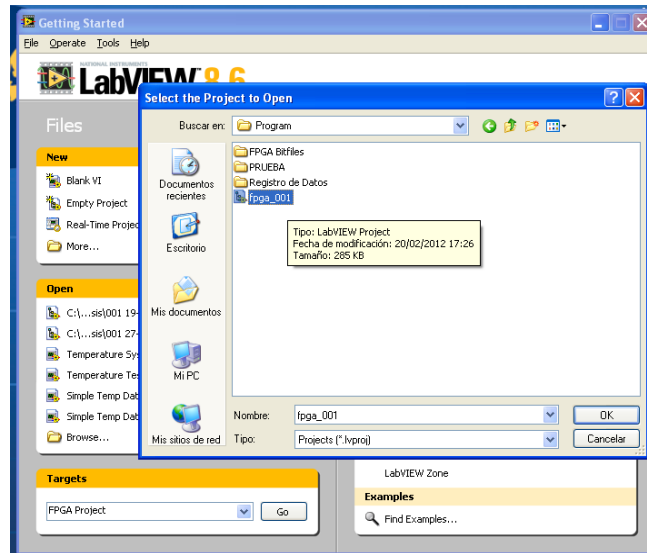
GRÁFICO 7.2 PANTALLA DE OPCIONES



Fuente: Los Autores

3.- El programa principal se encuentra guardado en una carpeta en el escritorio, entonces seleccionar, programa tesis >> program >> fpga_001>> digitamos OK.

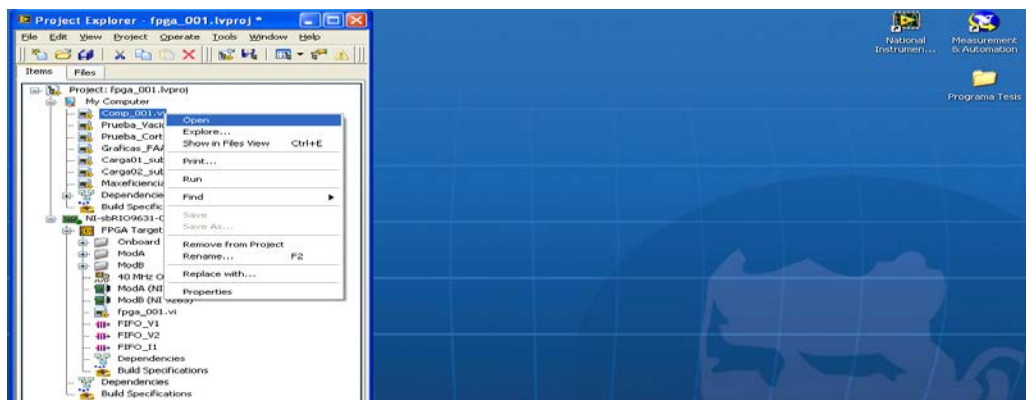
GRÁFICO 7.3 APERTURA DEL ARCHIVO



Fuente: Los Autores

4.-Una vez abierto el archivo fpga_001, LabVIEW muestra la pantalla donde se encuentra ubicado el programa principal llamado Comp_001.vi, click derecho >> Open.

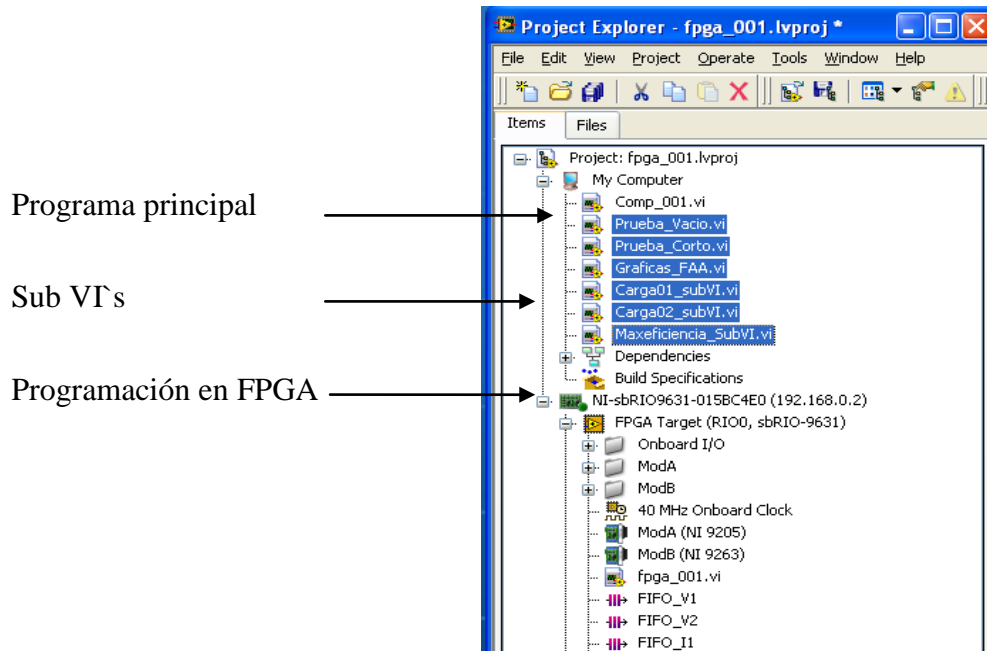
GRÁFICO 7.4 APERTURA DEL PROGRAMA PRINCIPAL



Fuente: Los Autores

- Programa principal, sub VI's utilizados y programa en FPGA.

GRÁFICO 7.5 PROGRAMA PRINCIPAL, SUB VI'S, PROGRAMA EN FPGA



Fuente: Los Autores

5.- Ventana principal del proyecto, presenta 5 pestañas de navegación.

TABLA 1.1 DETALLE DE CONTENIDO DE PESTAÑAS DE NAVEGACIÓN

| PESTAÑAS | SUB-PESTAÑAS |
|-----------------------------------|--|
| Presentación | |
| Introducción | |
| Tensión – Corriente | Indicadores, tablas, gráficos, ayuda |
| Análisis del Transformador | Prueba 1, prueba 2, ayuda, prueba 3, Simulación de carga, PIN-POUT, Tabla de resultados, Ayuda |
| Análisis de Temperatura | Indicadores, Cálculos-Resultados, Análisis de temperatura, Gráficas, Tablas, Normas, Ayuda. |

Fuente: Los Autores

GRÁFICO 7.6 PESTAÑAS DE NAVEGACIÓN

Pestañas de navegación



Fuente: Los Autores

7.5 USO DEL TECLADO.

- Teclas que se utilizan como método abreviado para ejecutar un proceso.

TABLA 1.2 DETALLE DE TECLAS DE NAVEGACIÓN

| TECLA | SIGNIFICADO |
|-------|---|
| [F1] | Muestra una ventana de ayuda |
| [F2] | Muestra ventana de adquisición de sensores |
| [F3] | Muestra ventana de análisis del transformador |
| [F4] | Muestra ventana de análisis de temperatura |
| [F5] | Detiene todo el programa “STOP” |

Fuente: Los Autores

7.6 TIPS PARA TRABAJAR EN LABVIEW.

- Atajos desde el teclado:

TABLA 1.3 DETALLE DE ATAJSOS DESDE EL TECLADO

| FUNCIÓN | SIGNIFICADO |
|-------------------|--|
| < Ctrl-H > | Activa/Desactiva la ventana de ayuda |
| < Ctrl-B > | Remueve todos los cables rotos del diagrama de bloques |
| < Ctrl-E > | Cambiar entre panel frontal y el diagrama de bloques |
| < Ctrl-Z > | Deshacer cambios |
| < Ctrl-S > | Guardar cambios |

Fuente: Los Autores

7.7 CIRCUITOS Y ALIMENTACIÓN DEL MÓDULO.



NOTA IMPORTANTE: Antes de conectar una fuente de alimentación lea completamente esta sección del manual, pues dependiendo del equipo de control y adquisición que esté usando, puede encenderse en condiciones que produzcan calentamiento y posibles daños a los circuitos, e incluso leves quemaduras y descargas eléctricas.

Para iniciar la adquisición y el análisis se necesita seguir los siguientes pasos:

- 1- Alimentar el módulo con 120 V (cable incluido).

FIGURA 7.1 ALIMENTACIÓN DEL MÓDULO



Fuente: Los Autores

- 2- Subir el breaker de protección.
- 3- Encender la regleta de alimentación.
- 4- Encender los circuitos electrónicos.

**FIGURA 7.2 REGLETA DE ALIMENTACIÓN, BREAKER DE PROTECCIÓN,
FUENTE DE ALIMENTACIÓN DE CIRCUITOS**



Fuente: Los Autores



NOTA IMPORTANTE: Los circuitos y alimentación se encuentran ubicados en la parte posterior del módulo para evitar contacto directo con los circuitos de adquisición.

7.8 TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN.

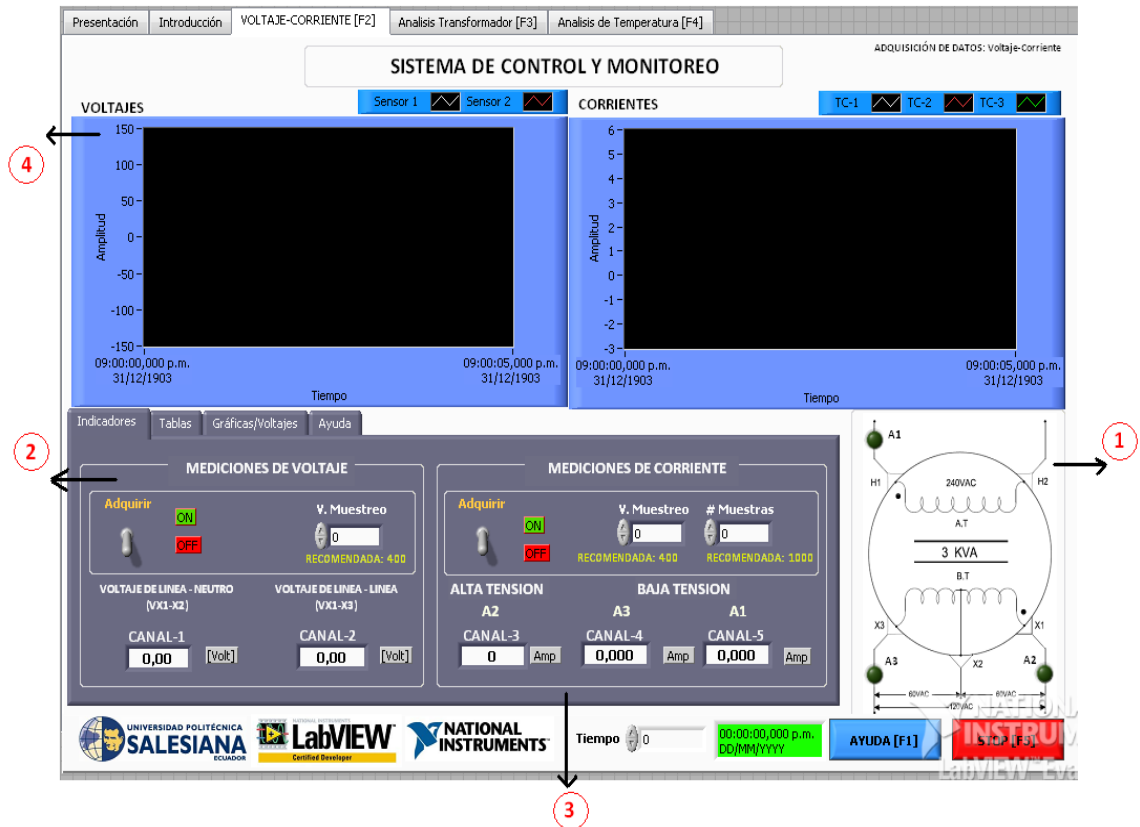


NOTA IMPORTANTE: Antes de manipular al transformador, lea detenidamente las indicaciones que se encuentran pegadas en el transformador para una mejor comprensión, el transformador posee un breaker de protección para la carga.

7.9 ADQUISICIÓN DE SEÑALES DE TENSIÓN-CORRIENTE Y ANÁLISIS DEL TRANSFORMADOR.

- La presente ventana muestra la adquisición de los sensores de voltaje y corriente, para adquirir estos valores se debe setear la velocidad de muestreo (recomendado 400), y el número de muestras (recomendado 1000), luego digamos adquirir a cada parámetro.
- Los canales 1 y 2 son dedicados a los sensores de voltaje, mientras que los canales 3,4 y 5 están destinados para señales de corriente.
- Esta ventana presentara los valores de voltaje y corriente en tiempo real, que están siendo adquiridos dependiendo del canal y salida del transformador que se esté utilizando para su análisis.
- Digitamos RUN, para iniciar el programa y empezar la adquisición.

GRÁFICO 7.7 SISTEMA DE CONTROL Y MONITOREO



Fuente: Los Autores

- 1- Muestra la ubicación de los sensores de corriente distribuidos en el transformador.
 - 2- Mediciones y adquisición de señales de voltaje.
 - 3- Mediciones y adquisición de señales de corriente.
 - 4- Gráficas de los valores de cada sensor.
- Luego de obtener los datos necesarios de voltaje y corriente procedemos al análisis bajo carga, donde determinaremos impedancias, corrientes, y rendimiento de la máquina.

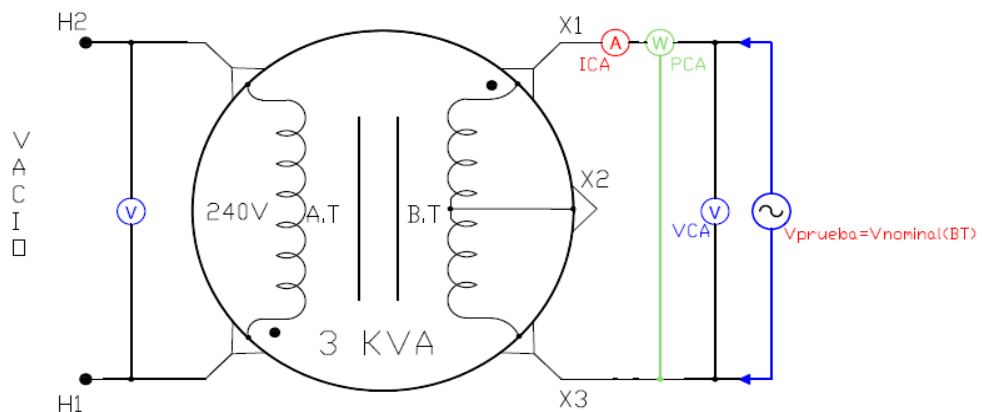
7.10 PRUEBA # 1.

La indicación de alimentar al transformador preferentemente por un arrollamiento de baja tensión se basa en que, de esa forma, la tensión necesaria será más fácil de obtener y medir y, además, la corriente tendrá un valor más acorde con los alcances normales de los instrumentos.

Al estar el transformador en vacío, no entrega potencia, y toda la que absorbe se convierte en pérdidas. Como la corriente secundaria es nula, en ese arrollamiento no hay pérdidas en el cobre y, por otra parte como la corriente primaria en vacío es mucho menos a la nominal, las pérdidas en el cobre del primario son despreciables.

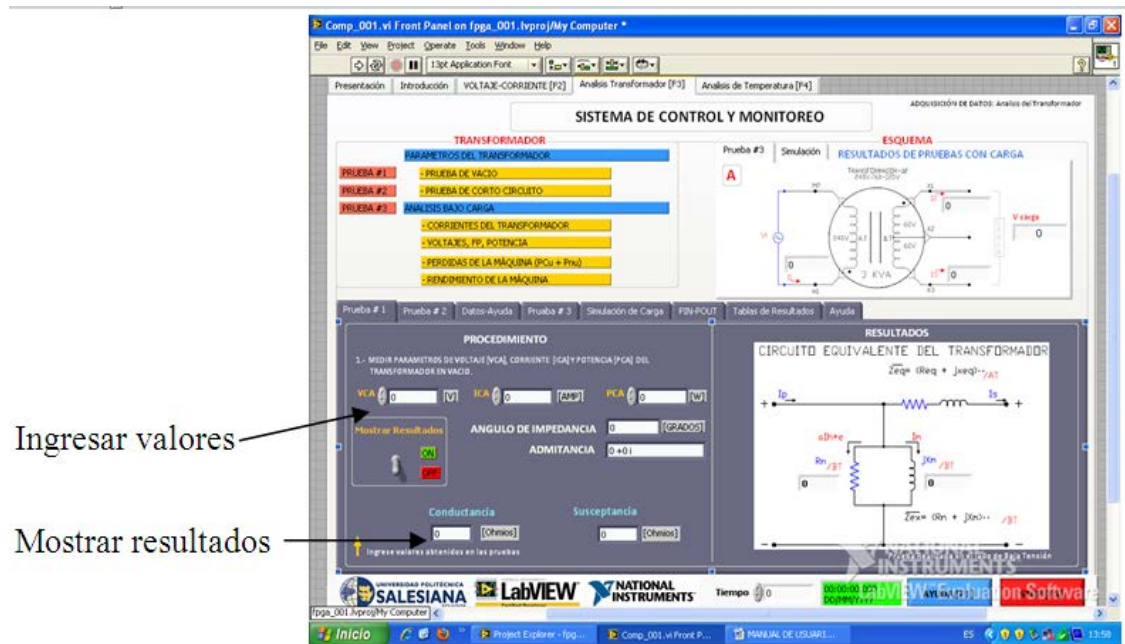
- Esta prueba es el análisis de vacío del transformador, con el cual obtenemos la rama paralela del circuito equivalente y se determina las pérdidas en el hierro.
- Los valores de VCA, ICA, PCA son datos obtenidos en la prueba de vacío realizada de manera externa, mas no con el módulo, como muestra la figura.
- La siguiente figura muestra un esquema de conexión que se debe realizar con el transformador para obtener los datos a ingresar al programa.
- En el programa solo se debe ingresar resultados obtenidos de la prueba de vacío.

GRÁFICO 7.8 PRUEBA EN VACIO



Fuente: Los Autores

GRÁFICO 7.9 INGRESO DE DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE VACÍO



Ingresar valores

Mostrar resultados

Fuente: Los Autores

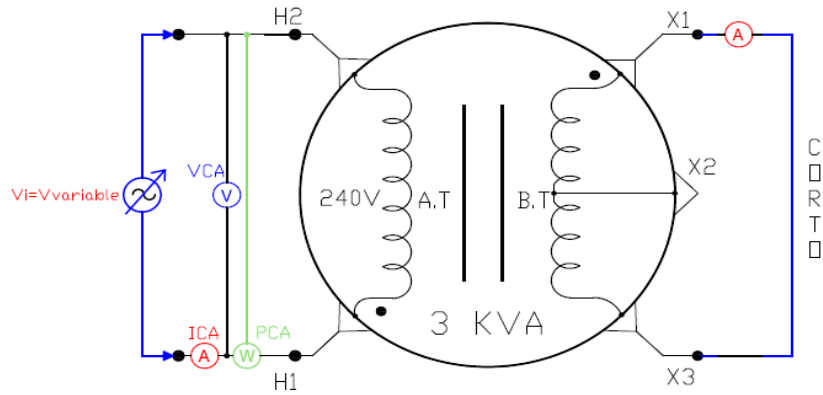
7.11 PRUEBA # 2.

La indicación de alimentar al transformador preferentemente por un arrollamiento de alta tensión se basa en que, de esa forma, la corriente necesaria será más fácil de obtener y medir y, además, la tensión tendrá un valor más acorde con los alcances normales de los instrumentos.

- Esta prueba es el análisis de corto circuito del transformador, con el cual obtenemos la rama serie del circuito equivalente.
- Los valores de VCC, ICC, PCC son datos obtenidos en la prueba de corto circuito realizada de manera externa, mas no con el módulo, como muestra el gráfico 7.10
- La siguiente figura muestra un esquema de conexión que se debe realizar con el transformador para obtener los datos a ingresar al programa.

- En el programa solo se debe ingresar resultados obtenidos de la prueba de corto circuito.

GRÁFICO 7.10 PRUEBA DE CORTOCIRCUITO



Fuente: Los Autores

GRÁFICO 7.11 INGRESO DE RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE CORTOCIRCUITO

Ingresar valores

Mostrar resultados

Fuente: Los Autores

7.11.1 ANÁLISIS CON CARGA.

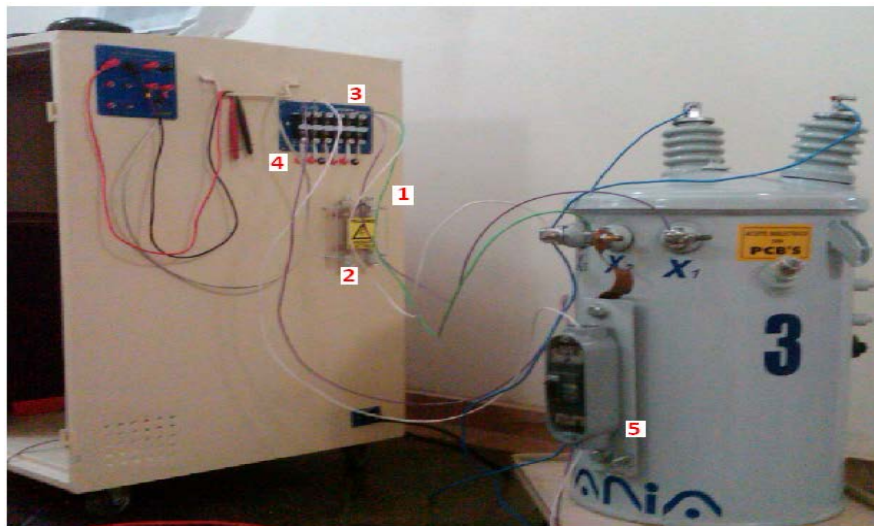
Para el análisis con carga al transformador tenemos 2 opciones:

- 1- Prueba # 3
- 2- Simulación de carga

7.12 PRUEBA # 3.

- 1- Conectar la alimentación principal de 240 voltios a las barras externas (en estas barras se ubicó un sensor de corriente para obtener posteriormente la potencia real de entrada).
- 2- Salida de la barras hacia alimentación del transformador en los bushing de alta tensión.
- 3- Colocar las salidas de baja tensión del transformador, en las entradas al módulo, donde en su interior se encuentran unas barras acopladas con sensores de corriente en X1 y X3 para su análisis con carga.

FIGURA 7.3 ALIMENTACIÓN DEL TRANSFORMADOR Y CONECCIÓN DE LA CARGA



Fuente: Los Autores

- 4- Salida de alimentación del módulo hacia la carga, conectar esta salida al breaker ubicado en el transformador.
- 5- Conectar la carga a la salida del breaker, luego subir el breaker.
- 6- Por seguridad se acoplo al transformador un breaker de protección para la realización de pruebas y evitar daños al usuario como al módulo y transformador.



NOTA IMPORTANTE: Las barras de alimentación del transformador se encuentran en la parte externa del módulo, cuenta con una placa de precaución de utilización para evitar cualquier descarga por contacto directo.

- Para obtener los cálculos y análisis bajo carga se necesita valores de corriente y voltaje, para los cuales se debe utilizar los siguientes canales.

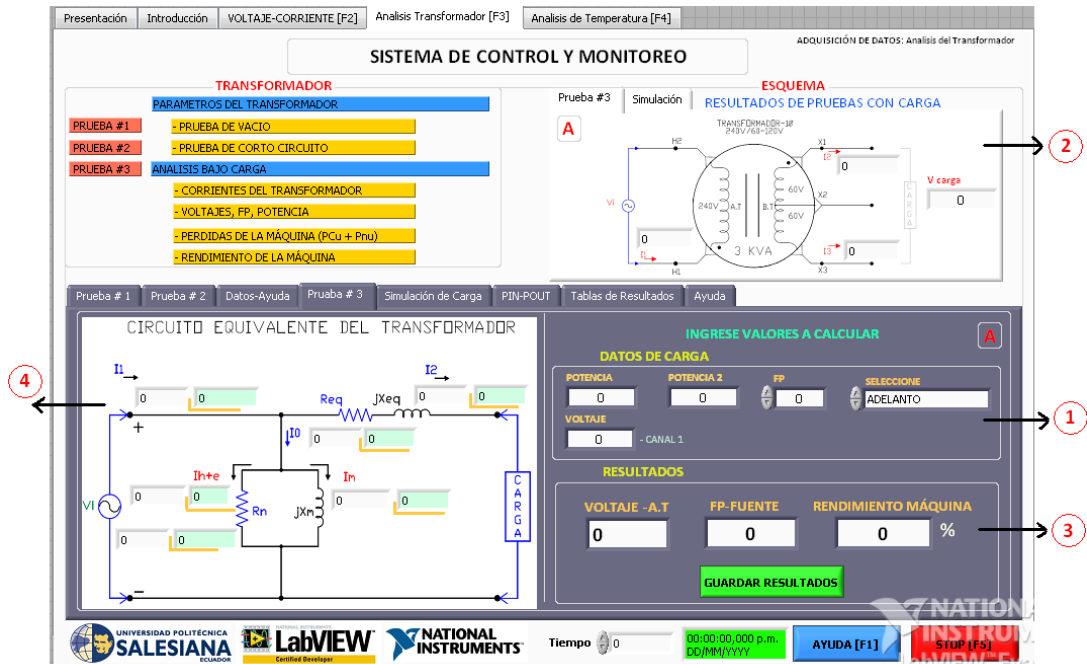
TABLA 1.4 DETALLE DE CANAL 1 DE TENSIÓN Y CANAL 3 Y 4 DE CORRIENTE

| PARAMETRO | DESCRIPCIÓN |
|------------------|--|
| Tensión | Canal 1 (externo al módulo, puntales que debe ubicar donde desea medir) |
| Corriente | Canal 3 y 4 (interno al módulo, incluido en las barras) |

Fuente: Los Autores

- El valor de potencia se obtiene de manera automática y es presentada en la ventana de LabVIEW al ubicar los puntales de voltaje en el punto que desea medir.
- El factor de potencia lo ingresa manualmente.

GRÁFICO 7.12 PRESENTACIÓN DE DATOS MEDIDOS



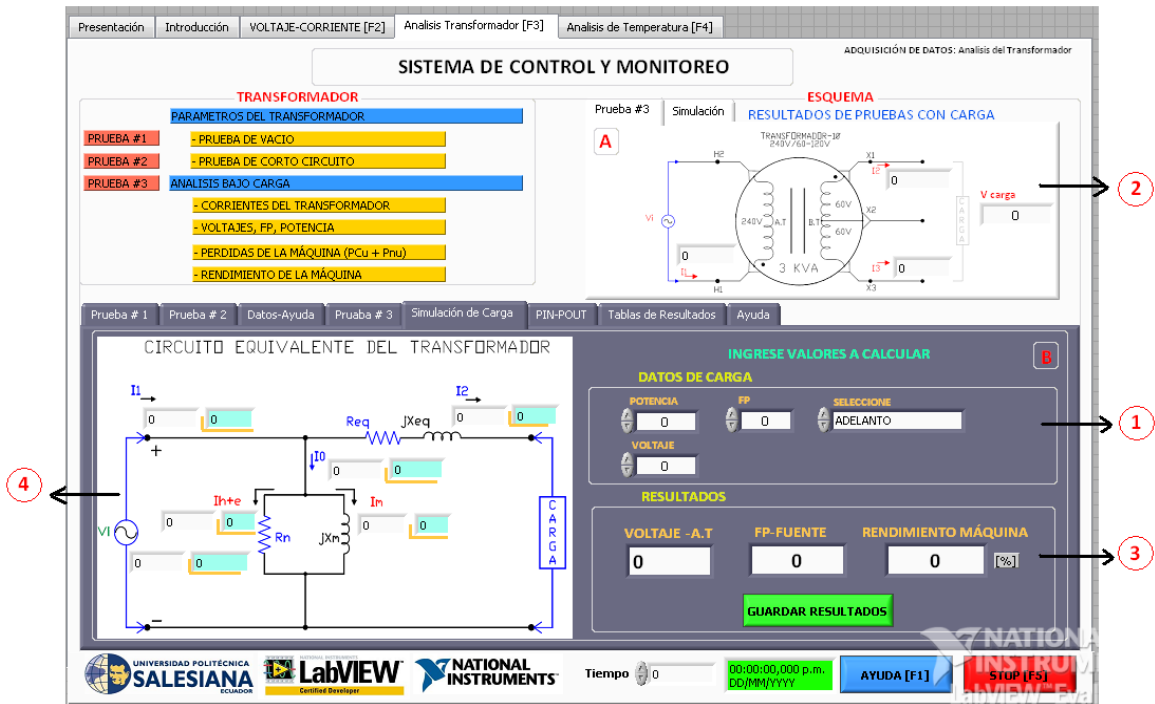
Fuente: Los Autores

- 1- Para medición de tensión en la carga se debe utilizar el canal 1 ubicado en la parte externa del módulo, (este canal de voltaje cuenta con puntales propios.).
- 2- Muestra los valores de corrientes reales circulando por el transformador.
- 3- Resultados obtenidos del transformador, además cuenta con un botón de guardar resultados para análisis.
- 4- Circuito Equivalente del transformador con sus corrientes.

7.13 SIMULACIÓN DE CARGA

- 1- Ingresar valores de potencia, tensión y factor de potencia en atraso o adelanto manualmente.
- 2- Muestra las corrientes del transformador.
- 3- Resultados obtenidos del transformador, además cuenta con un botón de guardar resultados para análisis.
- 4- Circuito equivalente del transformador con sus corrientes.

GRÁFICO 7.13 SIMULACIÓN DE CARGA Y PRESENTACION DE RESULTADOS



Fuente: Los Autores

7.14 POTENCIA DE ENTRADA VS POTENCIA DE SALIDA (PIN-POUT)

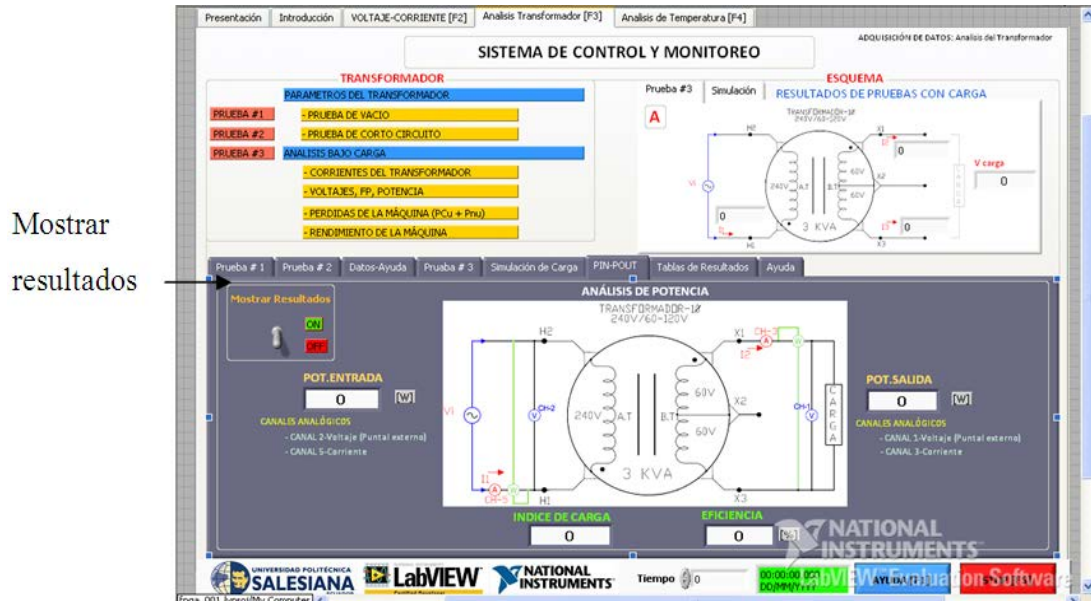
El análisis de potencia de entrada con respecto al de salida, permite obtener la eficiencia del transformador y su índice de carga.

TABLA 1.5 DETALLE DE CANAL 2 DE TENSIÓN Y CANAL 5 DE CORRIENTE

| PARAMETRO | POTENCIA DE ENTRADA | POTENCIA DE SALIDA |
|-----------|---|---|
| Tensión | Canal 2 (externo al módulo, puntales) | Canal 1 (externo al módulo, puntales) |
| Corriente | Canal 5 (externo, incluido en las barras) | Canal 3 (interno, incluido en las barras) |

Fuente: Los Autores

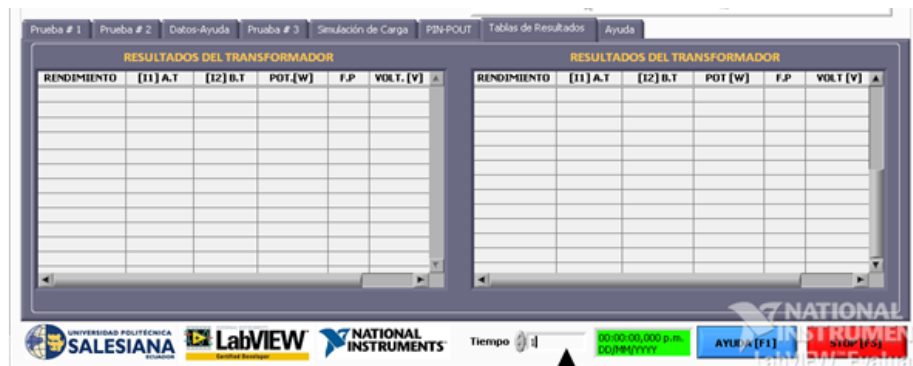
GRÁFICO 7.14 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE POTENCIA, EFICIENCIA, ÍNDICE DE CARGA



Fuente: Los Autores

En la adquisición de señales de tensión-corriente y análisis del transformador, se registran los datos en tablas, los resultados pueden ser controlados por medio de un control numérico, si queremos que los datos se presenten cada 1, 2 o 3 segundos etc.

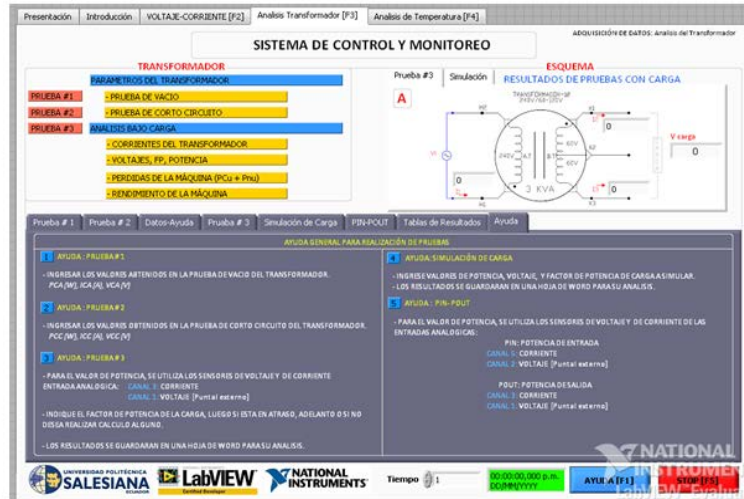
GRÁFICO 7.15 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS EN TABLAS DE REGISTRO



Controlamos la velocidad de cómo se registrarán los datos

Fuente: Los Autores

GRÁFICO 7.16 PRESENTACIÓN DE AYUDA



Ayuda para la realización de pruebas generales.

Fuente: Los Autores

7.15 ANÁLISIS DE TEMPERATURA.

Para obtener el análisis de temperatura de un transformador se debe utilizar 2 sensores de temperatura que se encuentran ubicados en la parte externa al módulo.

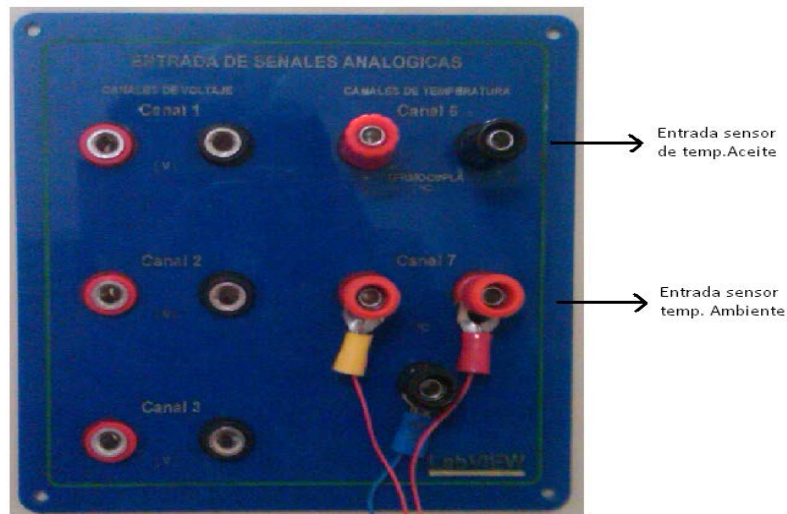
Estos sensores están conectados a las entradas analógicas de la tarjeta Sbrío, con el canal correspondiente a la siguiente tabla:

TABLA 1.6 DETALLE DE CANAL 6 DE LA TERMOCUPLA Y CANAL 7 DEL LM35

| CANAL | TIPO DE SENSOR | MEDICIÓN | UBICACIÓN |
|---------|----------------|--------------------------|--|
| Canal 6 | Termocupla | Temperatura en el Aceite | Aditamento, ubicado a 5cm por debajo de la superficie del aceite |
| Canal 7 | LM35 | Temperatura Ambiente | Cerca del transformador |

Fuente: Los Autores

FIGURA 7.4 ENTRADAS DEL SENSOR DE TEMPERATURA DEL ACEITE Y DEL SENSOR DE TEMPERATURA AMBIENTE

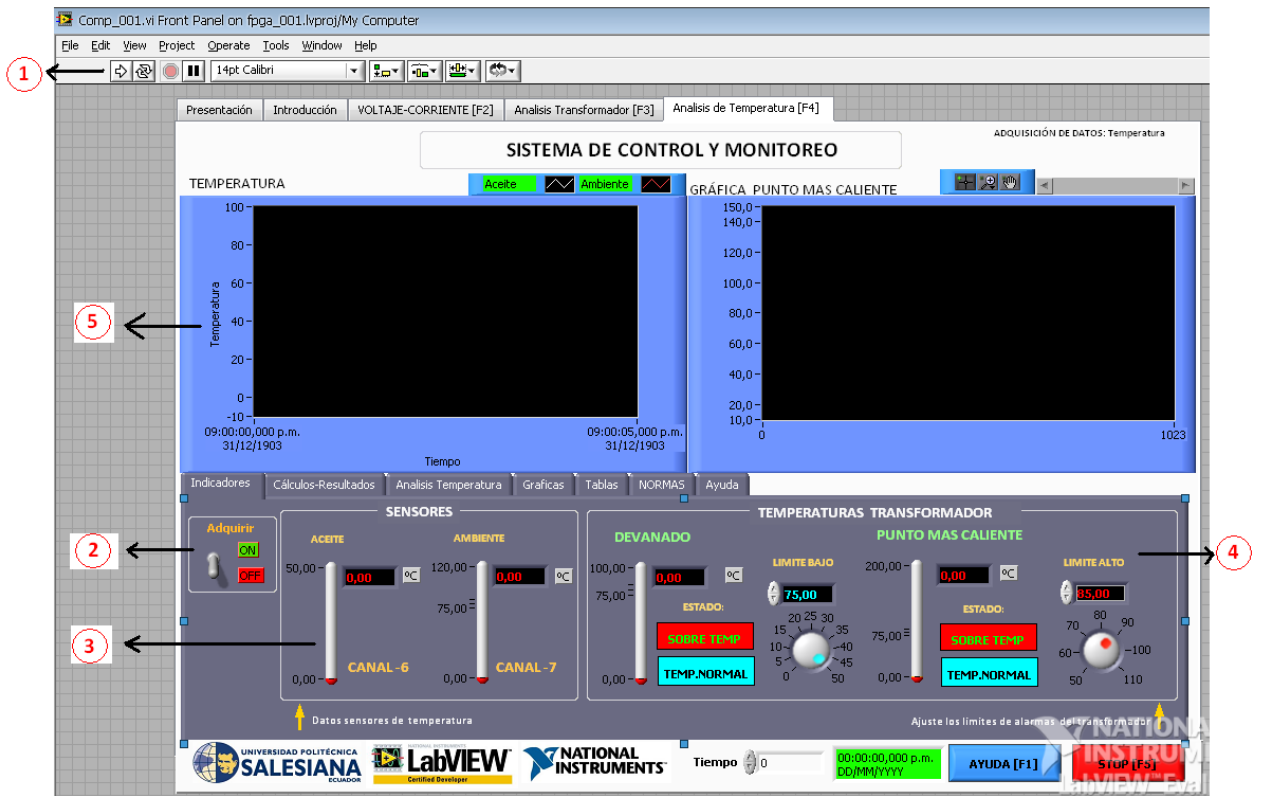


Fuente: Los Autores

- Después de ubicar los respectivos sensores seguimos los siguientes pasos para obtener el análisis de temperatura.

- 1- Digitar RUN para iniciar el programa.
- 2- Elevamos el Switch para iniciar la adquisición de los sensores de temperatura.
- 3- Muestra el estado de los sensores ubicados en el transformador.
- 4- Muestra los resultados obtenidos por medio de los sensores.
- 5- Gráficas de los sensores.

GRÁFICO 7.17 PRESENTACIÓN DE LA MEDICIÓN OBTENIDA POR LOS SENSORES DE TEMPERATURA

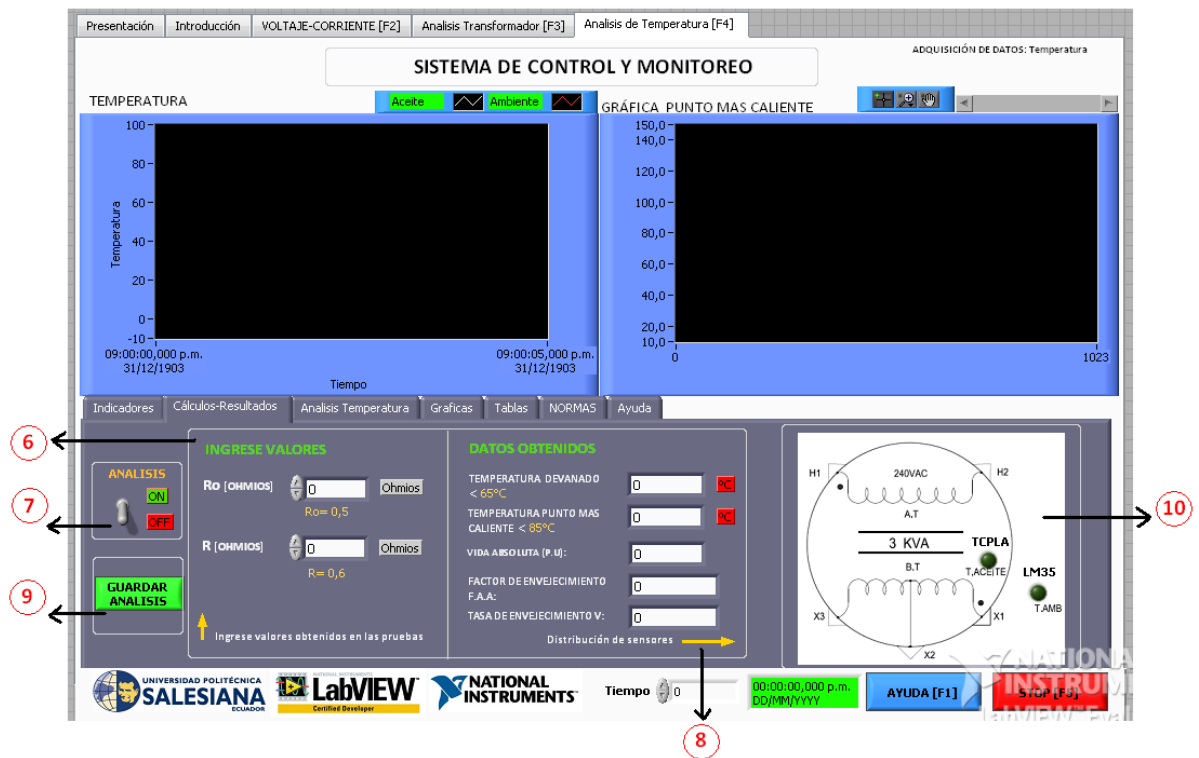


Fuente: Los Autores

La segunda pestaña de análisis de temperatura permite lo siguiente:

- 6- Ingresar los valores de Resistencia obtenida mediante medición.
- 7- Iniciamos análisis.
- 8- Muestra los datos obtenidos
- 9- Opción de guardar los resultados obtenidos.
- 10- Indica donde se deben ubicar los sensores de temperatura.

GRÁFICO 7.18 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS SENSORES DE TEMPERATURA



Fuente: Los Autores

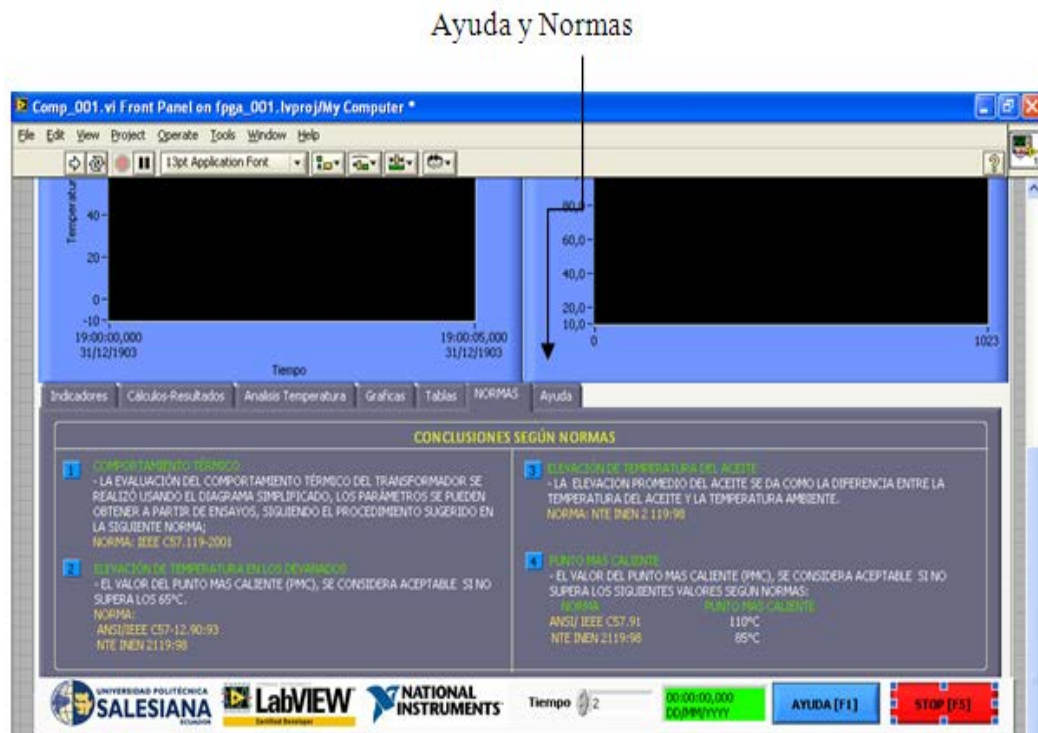


NOTA IMPORTANTE: Para obtener el análisis de temperatura del transformador se debe medir el valor de resistencia en los devanados entre X1 y X3 en frío y después de haber realizado una prueba a corriente nominal en baja tensión.

Primero tomamos el valor de resistencia en frío (R_0), a temperatura ambiente, luego realizamos la prueba de corto circuito dejando circular la corriente nominal en baja tensión por un lapso de 120 minutos, luego desconectamos al transformador y tomamos los valores de resistencia (R).

- La ventana de análisis de temperatura muestra opciones de NORMAS, tablas donde se presentan los datos obtenidos y una pestaña de ayuda para las pruebas.

GRÁFICO 7.19 PRESENTACIÓN DE AYUDA PARA ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE NORMATIVAS



Fuente: Los Autores

- Finalizamos el análisis pulsando STOP[F5], o con el metodo abreviado del teclado [F5].

GRÁFICO 7.20 FINALIZACIÓN DE LA ADQUISICIÓN DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS



Los Autores

CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- La presente tesis se resume en una guía para realizar las pruebas básicas que se acostumbran hacer a transformadores de distribución, todo esto bajo normas Nacionales e Internacionales, con lo que se garantiza un buen funcionamiento del transformador.
- Las pruebas eléctricas que se recomienda realizar, constituyen una parte muy importante dentro del diagnostico del transformador de distribución, ya que nos permite conocer su vida útil, su factor de envejecimiento, que va a prestar el transformador.
- Las pruebas de vacío y corto circuito, nos permite calcular el estado del transformador, encontrar su circuito equivalente general, sus pérdidas en su circuito magnético como en el circuito eléctrico y como resultado mostrar su rendimiento de acuerdo a las tendencias obtenidas en las pruebas
- La vida útil del transformador depende de su sistema de aislamiento, básicamente la degradación del aislamiento depende de muchos factores tales como la humedad, contenido de oxígeno y temperatura. Los sistemas modernos permiten reducir la influencia de la humedad y del oxígeno agregando una capa de nitrógeno en la parte superior del transformador, dejando la temperatura como única variable, por lo que, con el aumento de éste, el transformador no estará en condiciones de seguir prestando un buen servicio, reduciendo su tiempo de vida y operación.

- El realizar las pruebas de rutina a un transformador, es necesario y muy importante, porque mediante estas pruebas se verifica el estado en que se encuentran las partes que constituyen el transformador, antes de su energización, si es nuevo, después de su periodo de mantenimiento, antes de ser reinsertado a las redes para asegurar que el transformador está en condiciones optimas a su funcionamiento.
- Al sobrepasar la temperatura del punto más caliente de un transformador de distribución establecida por las normativas el equipo empezara a disminuir su vida útil más allá de lo que regularmente lo hace en condiciones normales de trabajo.
- Durante las pruebas realizadas se pudo observar cómo puede afectar directamente a la eficiencia de los transformadores trabajar a temperaturas elevadas en el ambiente y de ahí la importancia del diseño de sistemas de enfriamiento.
- La implementación del módulo se convierte en una herramienta de aprendizaje didáctica para los alumnos de la carrera de ingeniería eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil.
- Durante el desarrollo del proyecto de tesis encontramos la aplicación de conocimientos adquiridos durante nuestro periodo como estudiantes en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil.

RECOMENDACIONES

- Como se mencionó, la vida útil del transformador depende de varios factores, en especial de su temperatura la que influye en el desgaste del papel aislante y por ende del transformador, entonces se necesita diagnosticar el estado, en el que se encuentra. Para realizar este diagnostico se recomienda utilizar los sensores de temperatura ubicados en el módulo para su lectura y correspondiente análisis.
- Se recomienda tomar las debidas precauciones en las pruebas eléctricas al momento de las conexiones con carga, ya que una mala conexión podría causar daños tanto al equipo como al personal que está realizando la prueba. Así se evitará accidentes y daños en los equipos eléctricos como electrónicos.
- Se recomienda leer el manual de la tarjeta de adquisición de datos Sb-RIO 9631 antes de cualquier conexión adicional o reconexión de un sensor al módulo ya que la tarjeta presenta niveles de voltaje admisibles para su operación. Así evitara el riesgo de quemar la tarjeta de adquisición.
- Los sensores de voltaje tienen un rango de medición de hasta 240 voltios, si se requiere medir voltaje superiores a este, se recomienda realizar un nuevo diseño y cálculo del sensor.
- Los sensores de corriente poseen un rango de medida de hasta 150 amperios, se recomienda revisar manual del sensor que está anexo a esta tesis.

- Para mejorar la realización de prácticas se recomienda dotar al laboratorio con un instrumento para la realización de pruebas de aislamiento MEGGER y relación de transformación TTR, así aumentaríamos las opciones de análisis en transformadores de distribución.
- La tarjeta de adquisición de datos puede ser desmontada del módulo en cualquier momento, para ser aprovechada en capacitaciones internas de programación FPGA de Labview, dado a la flexibilidad de montaje que posee.
- Elaborar un esquema de seguimiento de las temperaturas en el aceite y de los devanados para prevenir calentamientos excesivos y prevenir daños no planificados.
- Elaborar un registro histórico de los datos tomados del equipo durante su funcionamiento para elaborar planes de mantenimiento preventivo.
- Antes de realizar pruebas con el modulo se recomienda validar la comunicación de la PC con la tarjeta SB RIO y con la demás parte electrónica, luego de cada práctica verificar que los equipos queden desenergizados.

BIBLIOGRAFÍA

TEXTOS:

- MANZANO ORREGO Juan José, *Máquinas Eléctricas*, 1era Edición, Editorial Paraninfo, SA Madrid-España, 2010.
- CHAPMAN Stephen J., *Máquinas Eléctricas*, 4ta Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 2005.
- WILDI Theodore, *Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia*, 6ta Edición, Editorial Pearson, México, 2007
- PEREZ Pedro Avelino, *Transformadores de distribución*, 2da Edición, Editorial Reverté, S.A., México 2001.
- BOYLESTAD Robert L., *Electrónica: Teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*, 8va Edición, Editorial Pearson, México, D.F, 2003

DOMUMENTOS INSTITUCIONALES:

[.] CADAVID H, y otros, *Evaluación del comportamiento térmico del transformador de distribución*, Bogotá-Colombia, 2001

[1] SENSORES DE EFECTO HALL
http://grupos.emagister.com/documento/sensores_inductivo_infrarrojo_magnetico_efecto_hall/17526-411064

[2] INTERNATIONAL STANDARD. Temperature rise power transformer. Switzerland. IEC, 1993 Second edition. 60p. IEC 60076-2 / 1993 Corrigendum 1997

[3] Norma Técnica Colombiana ICONTEC 316:1988. *Transformadores. Prueba de calentamiento para transformadores sumergidos en aceite con elevación de 65o C*

de temperatura en los devanados. Instituto Colombiano de Normas Técnicas, Bogotá, 1988.

[4] INTERNATIONAL STANDARD. Loading guide for oil-immersed power transformer. Switzerland.: IEC, 2005. 60p. IEC 60076-7 / 2005

[5] NORMA TÉCNICA ECUATORIANA, Transformadores, prueba de calentamiento para transformadores sumergidos en aceite, NTE INEN 2 119:98

[6] National Instrument, Introducción a la tecnología FPGA: Los cinco beneficios principales, <http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/8259,2011>

[7] López V. ML., Ayala R “FPGA: Nociones básicas e implementación”, Universidad Politécnica de Madrid, 2004

[8] Programación Gráfica, WIKIPEDIA, <http://es.wikipedia.org/wiki/FPGA>

[9] National Instrument, “Introducción a la plataforma de LABVIEW embebida”, <http://zone.ni.com/wv/app/doc/p/id/wv-598,2008>

[10] National Instrument, “How to program FPGAs without any VHDL knowledge”

[11] NATIONAL INSTRUMENT, Introducción memorias FPGA, www.ni.com/fpga.

[12] D. Susa. Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers. Doctoral Dissertation, Helsinki University of Technology - Finland, August 2005.

[13] M. Arshad, S. Islam, A. Khaliq. Power transformer insulation response and risk assessment. 8th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power System, Iowa State University, 12-16 September 2004.

[14] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN, <http://www.inen.gob.ec/>

[15] IEC Publicación 76.1:1976. Power transformer. Part 1, General. International Electrotechnical Commission. Geneve, 1976

[16] AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers. New York.: ANSI, 2007. 57p. IEEE Std C57.12.00-2006

PAGINAS WEB:

- National Instrument Latinoamérica, Creating FPGA FIFOs, latam.ni.com
- Escuela Politécnica Nacional, *Repositorio Digital*, www.bibdigital.epn.edu.ec
- Universidad Politécnica Salesiana, *Reposito Digital*, <http://dSPACE.ups.edu.ec>
- Universidad Politécnica del litoral, Reposito Digital, <http://www.dSPACE.espol.edu.ec>
- Norberto A. Lemozy, Ensayo de transformadores, http://www.frba.utn.edu.ar/html/Electrica/archivos/maq_elec1/ensayos.pdf
- Tadeo Czerweny S.A. Soluciones transformadoras, Estudio de sobrecarga basado en las normas ANSI/IEEE C57. 91-1995, <http://www.tadeoczerweny.com.ar/newsletters/200507/images/sobrecargasrev1.pdf>
- Solecmexico, Tensión Alterna, www.solecmeico.com
- ARIAN Control & Instrumentación, ¿ Que son y como funcionan las termocuplas?, <http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf>
- Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concordia, Ing., Eléctrica, Año 2009, Operación y mantenimiento a transformadores de distribución, http://www.frcon.utn.edu.ar/download/Cursos/UTN-FRCon_CursoMantenimientoTransformadores.pdf

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A

Amplitud: Es el máximo valor que presenta una onda sinusoidal.

Admitancia: Es la facilidad que este ofrece al paso de la corriente eléctrica.

B

Bushing: Aisladores o boquillas de un transformador.

C

Conductancia: Es la propiedad inversa de la resistencia eléctrica.

Campo electrostático: Es un campo físico que es representado mediante un modelo que describe la interacción entre cuerpos y sistemas con propiedades de naturaleza eléctrica.

D

Diagrama Unifilar: Es una representación gráfica de una instalación eléctrica o de parte de ella.

E

Efecto Hall: Es un conductor por el que circula una corriente, en presencia de un campo magnético perpendicular al movimiento de las cargas, aparece una separación de cargas que da lugar a un campo eléctrico en el interior del conductor, perpendicular al movimiento de las cargas y al campo magnético aplicado. A este campo magnético se le denomina campo hall.

F

Frecuencia: Es el recíproco del periodo y significa número de oscilaciones completas por unidad de tiempo.

FPGA: *Fiel Programmable Gate Array*, Es un dispositivo semiconductor que posee bloques lógicos interconectados para que puedan ser programados

FIFO: Almacenaje y control de flujo de datos, consiste básicamente en unos conjuntos de punteros de lectura/escritura, almacenamiento y lógica de control.

Flujo disperso: Perdidas en el transformador que se produce debido a la inducción magnética.

Fuente Simétrica: Es un circuito especialmente diseñado para alimentar circuitos que requieren voltajes estables y sin fluctuaciones.

H

Histéresis: Es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.

I

Impedancia: es una magnitud que establece la relación (cociente) entre la tensión y la intensidad de corriente.

L

LABVIEW: *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*, Laboratorio de instrumentación virtual de ingeniería, es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante programación.

M

Magnetización: Es la imantación o imanación de un material, la densidad de momentos dipolares magnéticos.

Megger: Equipo de prueba para resistencia de aislamiento

O

Ohmios: Es la unidad derivada de resistencia eléctrica.

P

PWM: Modulación de ancho de pulso.

R

Real Time (LabVIEW): Es una componente adicional para el sistema de desarrollo LabVIEW en tiempo real.

Reactancia: Es la oposición ofrecida al paso de la corriente alterna por inductores, en este caso la bobina del transformador medida en ohmios.

Resistencia: Es la medida de oposición al paso de la corriente eléctrica, medida en ohmios.

S

Sb-RIO: *Single Board Rio*, tarjeta de adquisición de datos.

Sensor: Es un dispositivo de medición que transforma una variable física en una señal eléctrica.

Señal: Es toda información de magnitud física variable que se convierte a magnitud eléctrica mediante un transductor.

Señal Analógica: Es un tipo de señal generada por algún tipo de fenómeno electromagnético y que es representable por una función matemática continua.

Susceptancia: Es la parte imaginaria de la admitancia.

T

Transductor: Es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada, en otra diferente a la salida.

Tensión Eléctrica: o voltaje, es el salto de potencial eléctrico o la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un circuito.

Transformador monofásico: Es una máquina eléctrica estática que se utiliza para variar valores de tensión, corriente.

TTR: Equipo de prueba de relación de espiras en transformadores

V

Velocidad de muestreo: Es el número de muestras por unidad de tiempo.

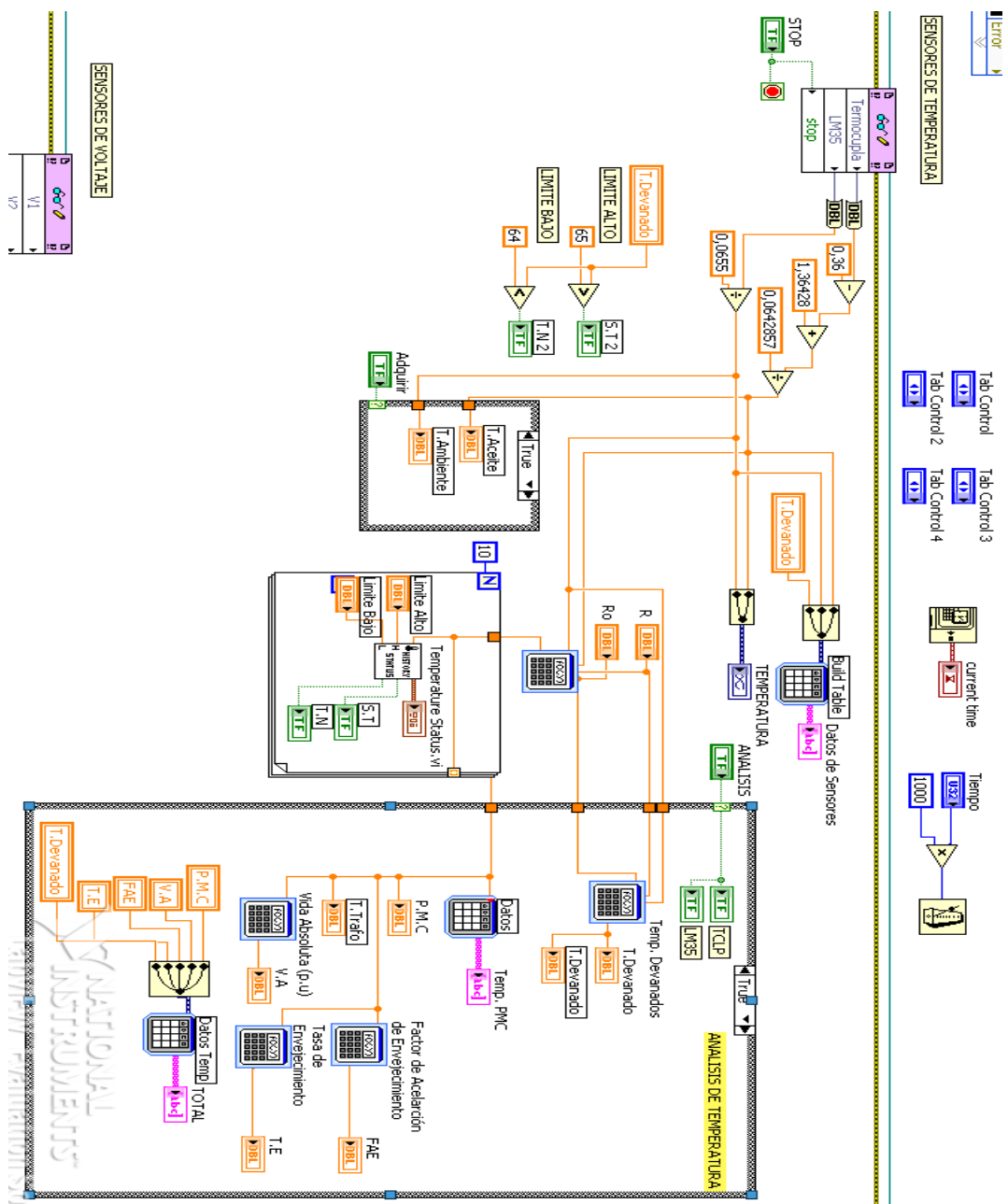
VI: Aplicación realizada con LabVIEW conocida como instrumentos virtuales, *VI*

ANEXOS

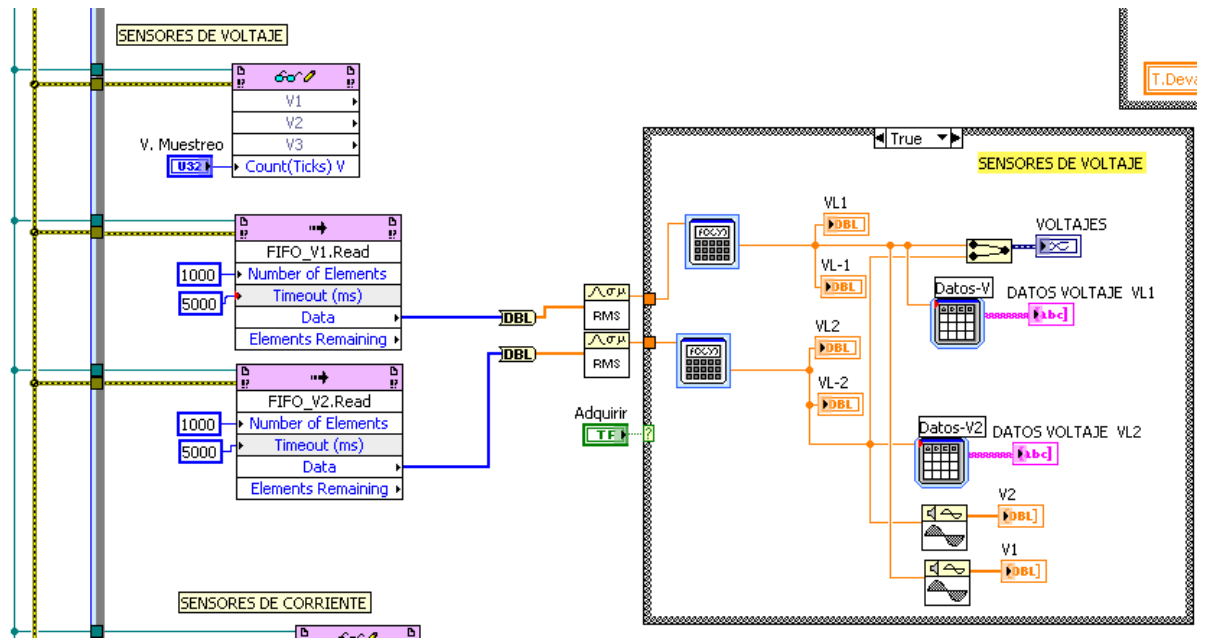
ANEXO A

PROGRAMAS DESARROLLADOS

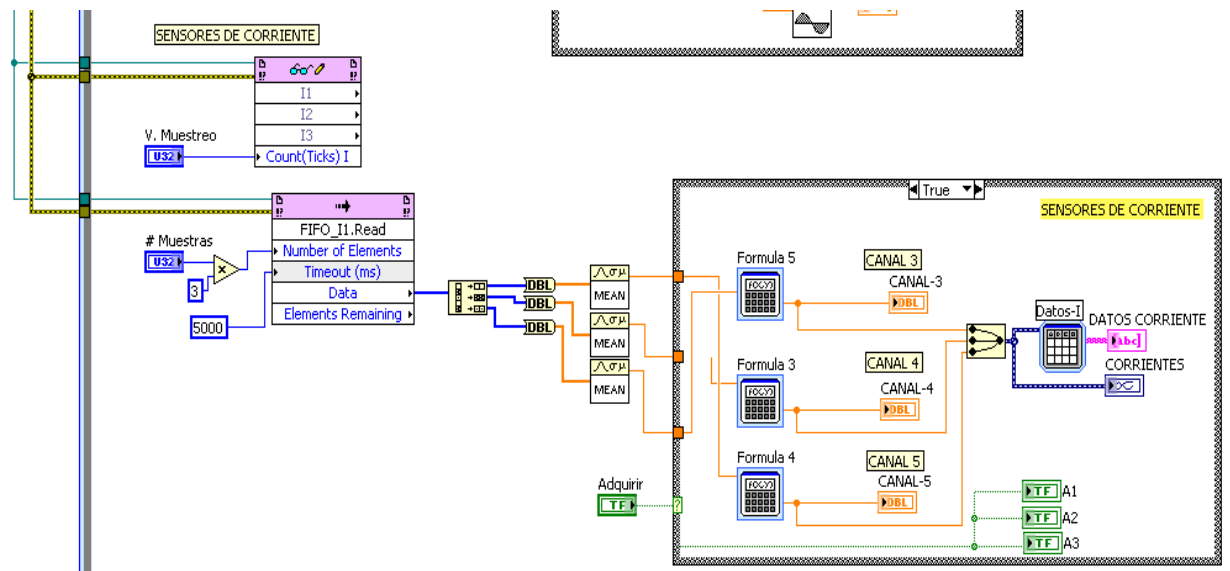
A.1 PROGRAMA PARA EL CONTROL DE TEMPERATURA



A.2 PROGRAMA PARA EL CONTROL DE VOLTAJE

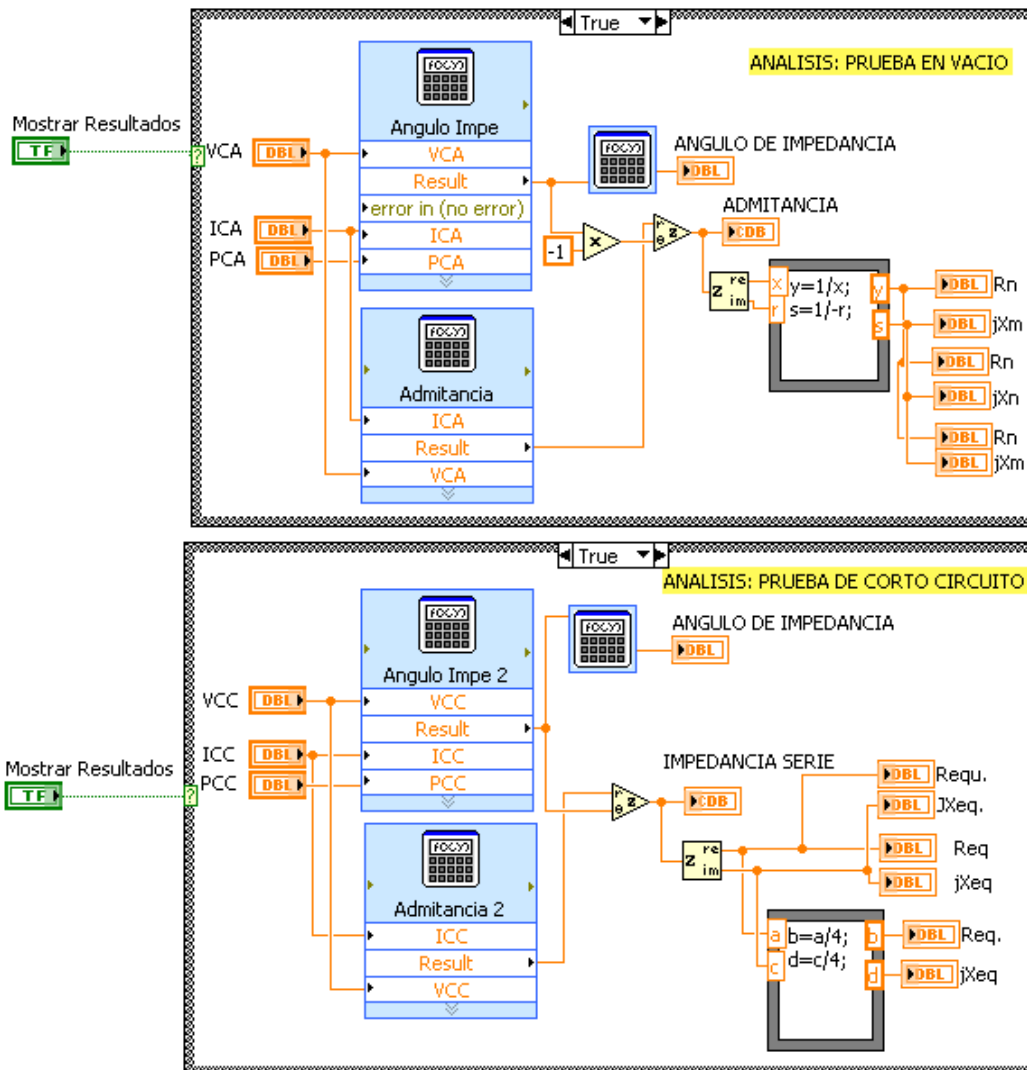


A.3 PROGRAMA PARA EL CONTROL DE CORRIENTE

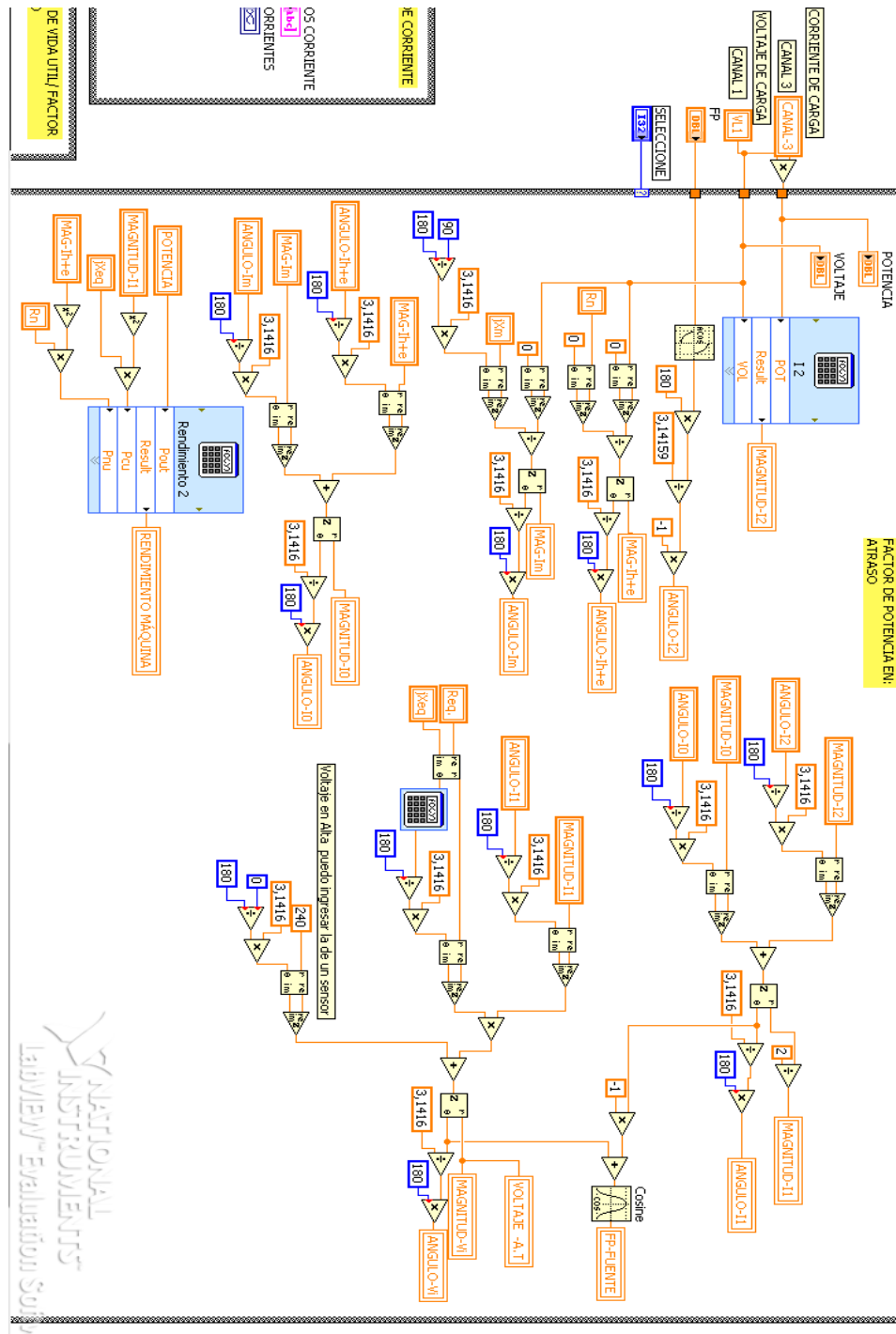


A.4 PROGRAMA PARA EL ANALISIS DEL TRANSFORMADOR

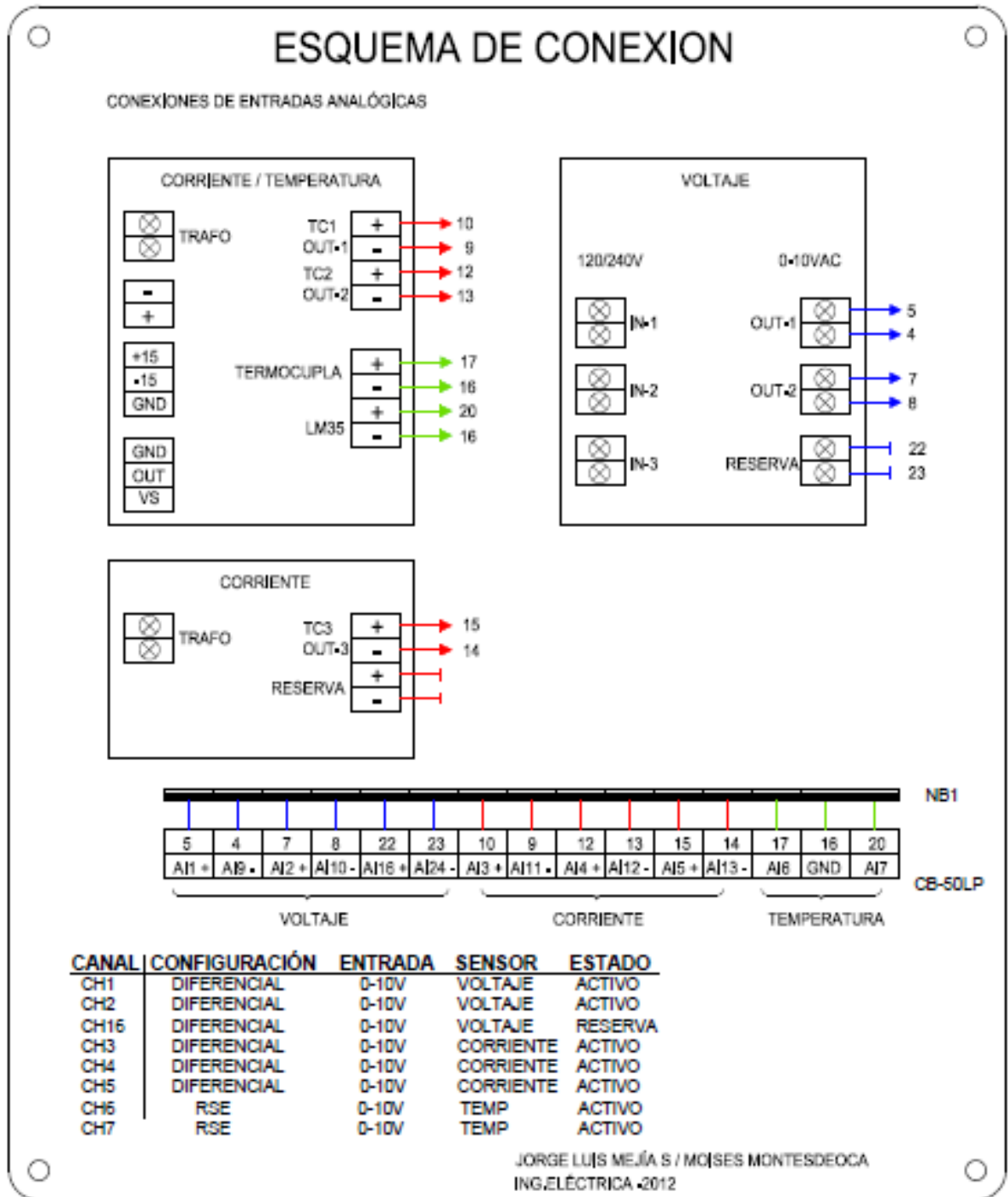
A.4.1 PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE IMPEDANCIAS, PRUEBA DE CORTO CIRUITO Y PRUEBA EN VACIO



A.4.2 PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE CORRIENTES, VOLTAJES Y RENDIMIENTO DE LA MÁQUINA



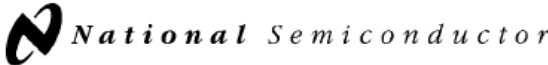
A.4.3 DISTRIBUCIÓN DE ENTRADAS ANALÓGICAS



ANEXO B

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

B.1 ESPECIFICACIONES SENSORES DE TEMPERATURA


December 1994

LM35/LM35A/LM35C/LM35CA/LM35D Precision Centigrade Temperature Sensors

General Description

The LM35 series are precision integrated-circuit temperature sensors, whose output voltage is linearly proportional to the Celsius (Centigrade) temperature. The LM35 thus has an advantage over linear temperature sensors calibrated in ° Kelvin, as the user is not required to subtract a large constant voltage from its output to obtain convenient Centigrade scaling. The LM35 does not require any external calibration or trimming to provide typical accuracies of $\pm 1/4^\circ\text{C}$ at room temperature and $\pm 3/4^\circ\text{C}$ over a full -55 to $+150^\circ\text{C}$ temperature range. Low cost is assured by trimming and calibration at the wafer level. The LM35's low output impedance, linear output, and precise inherent calibration make interfacing to readout or control circuitry especially easy. It can be used with single power supplies, or with plus and minus supplies. As it draws only $60\ \mu\text{A}$ from its supply, it has very low self-heating, less than 0.1°C in still air. The LM35 is rated to operate over a -55° to $+150^\circ\text{C}$ temperature range, while the LM35C is rated for a -40° to $+110^\circ\text{C}$ range (-10° with improved accuracy). The LM35 series is

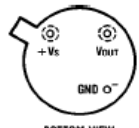
available packaged in hermetic TO-46 transistor packages, while the LM35C, LM35CA, and LM35D are also available in the plastic TO-92 transistor package. The LM35D is also available in an 8-lead surface mount small outline package and a plastic TO-202 package.

Features

- Calibrated directly in ° Celsius (Centigrade)
- Linear + 10.0 mV/°C scale factor
- 0.5°C accuracy guaranteeable (at +25°C)
- Rated for full -55° to $+150^\circ\text{C}$ range
- Suitable for remote applications
- Low cost due to wafer-level trimming
- Operates from 4 to 30 volts
- Less than $60\ \mu\text{A}$ current drain
- Low self-heating, 0.08°C in still air
- Nonlinearity only $\pm 1/4^\circ\text{C}$ typical
- Low impedance output, $0.1\ \Omega$ for 1 mA load

Connection Diagrams

**TO-46
Metal Can Package***

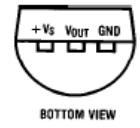


BOTTOM VIEW
TL/H/5516-1

*Case is connected to negative pin (GND)

Order Number LM35H, LM35AH, LM35CH, LM35CAH or LM35DH
See NS Package Number H03H

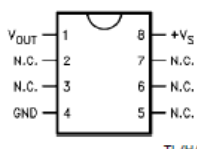
**TO-92
Plastic Package**



BOTTOM VIEW
TL/H/5516-2

Order Number LM35CZ, LM35CAZ or LM35DZ
See NS Package Number Z03A

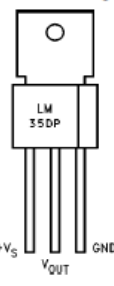
**SO-8
Small Outline Molded Package**



Top View
N.C. - No Connection

Order Number LM35DM
See NS Package Number M08A

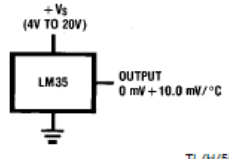
**TO-202
Plastic Package**



TL/H/5516-4

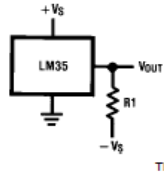
Order Number LM35DP
See NS Package Number P03A

Typical Applications



TL/H/5516-3

FIGURE 1. Basic Centigrade Temperature Sensor (+2°C to +150°C)



TL/H/5516-4

Choose $R_1 = -V_S/50\ \mu\text{A}$

$V_{OUT} = +1,500\ \text{mV}$ at $+150^\circ\text{C}$
 $- +250\ \text{mV}$ at $+25^\circ\text{C}$
 $- -550\ \text{mV}$ at -55°C

FIGURE 2. Full-Range Centigrade Temperature Sensor

TRI-STATE® is a registered trademark of National Semiconductor Corporation.

LM35/LM35A/LM35C/LM35CA/LM35D
Precision Centigrade Temperature Sensors

Absolute Maximum Ratings (Note 10)

If Military/Aerospace specified devices are required, please contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

| | |
|-------------------------------|-----------------|
| Supply Voltage | +35V to -0.2V |
| Output Voltage | +6V to -1.0V |
| Output Current | 10 mA |
| Storage Temp., TO-46 Package, | -60°C to +180°C |
| TO-92 Package, | -60°C to +150°C |
| SO-8 Package, | -65°C to +150°C |
| TO-202 Package, | -65°C to +150°C |

Lead Temp.:

| | |
|---|--------|
| TO-46 Package, (Soldering, 10 seconds) | 300°C |
| TO-92 Package, (Soldering, 10 seconds) | 260°C |
| TO-202 Package, (Soldering, 10 seconds) | +230°C |

SO Package (Note 12):

| | |
|------------------------------|-------|
| Vapor Phase (60 seconds) | 215°C |
| Infrared (15 seconds) | 220°C |
| ESD Susceptibility (Note 11) | 2500V |

Specified Operating Temperature Range: T_{MIN} to T_{MAX} (Note 2)

| | |
|---------------|-----------------|
| LM35, LM35A | -55°C to +150°C |
| LM35C, LM35CA | -40°C to +110°C |
| LM35D | 0°C to +100°C |

Electrical Characteristics (Note 1) (Note 6)

| Parameter | Conditions | LM35A | | | LM35CA | | | Units (Max.) |
|---|---|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | Typical | Tested Limit (Note 4) | Design Limit (Note 5) | Typical | Tested Limit (Note 4) | Design Limit (Note 5) | |
| Accuracy (Note 7) | $T_A = +25^\circ\text{C}$ | ± 0.2 | ± 0.5 | | ± 0.2 | ± 0.5 | ± 1.0 | °C |
| | $T_A = -10^\circ\text{C}$ | ± 0.3 | | | ± 0.3 | | ± 1.0 | °C |
| | $T_A = T_{MAX}$ | ± 0.4 | ± 1.0 | | ± 0.4 | ± 1.0 | ± 1.5 | °C |
| | $T_A = T_{MIN}$ | ± 0.4 | ± 1.0 | | ± 0.4 | | ± 1.5 | °C |
| Nonlinearity (Note 8) | $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$ | ± 0.18 | | ± 0.35 | ± 0.15 | | ± 0.3 | °C |
| Sensor Gain (Average Slope) | $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$ | +10.0 | +9.9, +10.1 | | +10.0 | | +9.9, +10.1 | mV/°C |
| Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1$ mA | $T_A = +25^\circ\text{C}$ | ± 0.4 | ± 1.0 | | ± 0.4 | ± 1.0 | | mV/mA |
| | $T_{MIN} \leq T_A \leq T_{MAX}$ | ± 0.5 | | ± 3.0 | ± 0.5 | | ± 3.0 | mV/mA |
| Line Regulation (Note 3) | $T_A = +25^\circ\text{C}$ | ± 0.01 | ± 0.05 | | ± 0.01 | ± 0.05 | | mV/V |
| | $4V \leq V_S \leq 30V$ | ± 0.02 | | ± 0.1 | ± 0.02 | | ± 0.1 | mV/V |
| Quiescent Current (Note 9) | $V_S = +5V, +25^\circ\text{C}$ | 56 | 67 | | 56 | 67 | | μA |
| | $V_S = +5V$ | 105 | | 131 | 91 | | 114 | μA |
| | $V_S = +30V, +25^\circ\text{C}$ | 56.2 | 68 | | 56.2 | 68 | | μA |
| | $V_S = +30V$ | 105.5 | | 133 | 91.5 | | 116 | μA |
| Change of Quiescent Current (Note 3) | $4V \leq V_S \leq 30V, +25^\circ\text{C}$ | 0.2 | 1.0 | | 0.2 | 1.0 | | μA |
| | $4V \leq V_S \leq 30V$ | 0.5 | | 2.0 | 0.5 | | 2.0 | μA |
| Temperature Coefficient of Quiescent Current | | +0.39 | | +0.5 | +0.39 | | +0.5 | $\mu\text{A}/^\circ\text{C}$ |
| Minimum Temperature for Rated Accuracy | In circuit of Figure 1, $I_L = 0$ | +1.5 | | +2.0 | +1.5 | | +2.0 | °C |
| Long Term Stability | $T_J = T_{MAX}$, for 1000 hours | ± 0.08 | | | ± 0.08 | | | °C |

Note 1: Unless otherwise noted, these specifications apply: $-55^\circ\text{C} \leq T_J \leq +150^\circ\text{C}$ for the LM35 and LM35A; $-40^\circ\text{C} \leq T_J \leq +110^\circ\text{C}$ for the LM35C and LM35CA; and $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +100^\circ\text{C}$ for the LM35D. $V_S = +5\text{Vdc}$ and $I_{LOAD} = 50 \mu\text{A}$, in the circuit of Figure 2. These specifications also apply from $+2^\circ\text{C}$ to T_{MAX} in the circuit of Figure 1. Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

Note 2: Thermal resistance of the TO-46 package is $400^\circ\text{C}/\text{W}$, junction to ambient, and $24^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to case. Thermal resistance of the TO-92 package is $180^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to ambient. Thermal resistance of the small outline molded package is $220^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to ambient. Thermal resistance of the TO-202 package is $85^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to ambient. For additional thermal resistance information see table in the Applications section.

| Electrical Characteristics (Note 1) (Note 6) (Continued) | | | | | | | | |
|--|---|---------|-----------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|-----------------------|--------------|
| Parameter | Conditions | LM35 | | | LM35C, LM35D | | | Units (Max.) |
| | | Typical | Tested Limit (Note 4) | Design Limit (Note 5) | Typical | Tested Limit (Note 4) | Design Limit (Note 5) | |
| Accuracy, LM35, LM35C (Note 7) | $T_A = +25^\circ\text{C}$ | ±0.4 | ±1.0 | | ±0.4 | ±1.0 | | °C |
| | $T_A = -10^\circ\text{C}$ | ±0.5 | | | ±0.5 | | ±1.5 | °C |
| | $T_A = T_{\text{MAX}}$ | ±0.8 | ±1.5 | | ±0.8 | | ±1.5 | °C |
| | $T_A = T_{\text{MIN}}$ | ±0.8 | | ±1.5 | ±0.8 | | ±2.0 | °C |
| Accuracy, LM35D (Note 7) | $T_A = +25^\circ\text{C}$ | | | | ±0.6 | ±1.5 | | °C |
| | $T_A = T_{\text{MAX}}$ | | | | ±0.9 | | ±2.0 | °C |
| | $T_A = T_{\text{MIN}}$ | | | | ±0.9 | | ±2.0 | °C |
| Nonlinearity (Note 8) | $T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$ | ±0.3 | | ±0.5 | ±0.2 | | ±0.5 | °C |
| Sensor Gain (Average Slope) | $T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$ | +10.0 | +9.8, +10.2 | | +10.0 | | +9.8, +10.2 | mV/°C |
| Load Regulation (Note 3) $0 \leq I_L \leq 1 \text{ mA}$ | $T_A = +25^\circ\text{C}$ | ±0.4 | ±2.0 | | ±0.4 | ±2.0 | | mV/mA |
| | $T_{\text{MIN}} \leq T_A \leq T_{\text{MAX}}$ | ±0.5 | | ±5.0 | ±0.5 | | ±5.0 | mV/mA |
| Line Regulation (Note 3) | $T_A = +25^\circ\text{C}$ | ±0.01 | ±0.1 | | ±0.01 | ±0.1 | | mV/V |
| | $4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$ | ±0.02 | | ±0.2 | ±0.02 | | ±0.2 | mV/V |
| Quiescent Current (Note 9) | $V_S = +5\text{V}, +25^\circ\text{C}$ | 56 | 80 | | 56 | 80 | | μA |
| | $V_S = +5\text{V}$ | 105 | | 158 | 91 | | 138 | μA |
| | $V_S = +30\text{V}, +25^\circ\text{C}$ | 56.2 | 82 | | 56.2 | 82 | | μA |
| | $V_S = +30\text{V}$ | 105.5 | | 161 | 91.5 | | 141 | μA |
| Change of Quiescent Current (Note 3) | $4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}, +25^\circ\text{C}$ | 0.2 | 2.0 | | 0.2 | 2.0 | | μA |
| | $4\text{V} \leq V_S \leq 30\text{V}$ | 0.5 | | 3.0 | 0.5 | | 3.0 | μA |
| Temperature Coefficient of Quiescent Current | | +0.39 | | +0.7 | +0.39 | | +0.7 | μA/°C |
| Minimum Temperature for Rated Accuracy | In circuit of Figure 1, $I_L = 0$ | +1.5 | | +2.0 | +1.5 | | +2.0 | °C |
| Long Term Stability | $T_J = T_{\text{MAX}}$, for 1000 hours | ±0.08 | | | ±0.08 | | | °C |

Note 3: Regulation is measured at constant junction temperature, using pulse testing with a low duty cycle. Changes in output due to heating effects can be computed by multiplying the internal dissipation by the thermal resistance.

Note 4: Tested Limits are guaranteed and 100% tested in production.

Note 5: Design Limits are guaranteed (but not 100% production tested) over the indicated temperature and supply voltage ranges. These limits are not used to calculate outgoing quality levels.

Note 6: Specifications in **boldface** apply over the full rated temperature range.

Note 7: Accuracy is defined as the error between the output voltage and $10\text{mV}/^\circ\text{C}$ times the device's case temperature, at specified conditions of voltage, current, and temperature (expressed in °C).

Note 8: Nonlinearity is defined as the deviation of the output-voltage-versus-temperature curve from the best-fit straight line, over the device's rated temperature range.

Note 9: Quiescent current is defined in the circuit of Figure 1.

Note 10: Absolute Maximum Ratings indicate limits beyond which damage to the device may occur. DC and AC electrical specifications do not apply when operating the device beyond its rated operating conditions. See Note 1.

Note 11: Human body model, 100 pF discharged through a 1.5 kΩ resistor.

Note 12: See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" or the section titled "Surface Mount" found in a current National Semiconductor Linear Data Book for other methods of soldering surface mount devices.

B.2 ESPECIFICACIONES SENSORES DE CORRIENTE DE EFECTO HALL



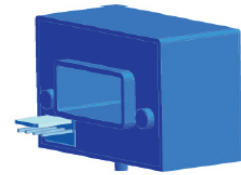
Current Transducer HASS 50..600-S

For the electronic measurement of currents: DC, AC, pulsed, mixed, with galvanic isolation between the primary circuit (high power) and the secondary circuit (electronic circuit).



All Data are given with a $R_L = 10 \text{ k}\Omega$

$I_{PN} = 50 \dots 600 \text{ A}$



Electrical data

| Primary nominal current rms $I_{PN} \text{ (A)}$ | Primary current measuring range $I_{PM} \text{ (A)}$ | Type |
|--|--|------------|
| 50 | ± 150 | HASS 50-S |
| 100 | ± 300 | HASS 100-S |
| 200 | ± 600 | HASS 200-S |
| 300 | ± 900 | HASS 300-S |
| 400 | ± 900 | HASS 400-S |
| 500 | ± 900 | HASS 500-S |
| 600 | ± 900 | HASS 600-S |

| | | |
|-----------|---|---|
| V_{OUT} | Analog Output voltage @ I_p | $V_{OE} \pm (0.625 \cdot I_p / I_{PN}) \text{ V}$ |
| G_{TH} | Theoretical sensitivity | 0.625 V / I_{PN} |
| V_{REF} | Reference voltage ¹⁾ | 2.5 \pm 0.025 V |
| | Output voltage | typ. 200 Ω |
| | Output impedance | $\geq 200 \Omega$ |
| | Load impedance | $\geq 2 \text{ k}\Omega$ |
| R_L | Load resistance | $\geq 2 \text{ k}\Omega$ |
| R_{OUT} | Output internal resistance | $< 5 \Omega$ |
| C_L | Capacitive loading ($\pm 20 \%$) | = 4.7 nF |
| V_C | Supply voltage ($\pm 5 \%$) ²⁾ | 5 V |

| | | |
|-------|---|-------|
| I_C | Current consumption @ $V_C = 5 \text{ V}$ | 19 mA |
|-------|---|-------|

Accuracy - Dynamic performance data

| | | |
|--------------------|---|--|
| X | Accuracy ³⁾ @ I_{PN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$ | $\leq \pm 1 \%$ |
| ε_L | Linearity error $0 \dots I_{PN}$ | $\leq \pm 0.5 \%$ |
| | $0 \dots I_{PM}$ | $\leq \pm 1 \%$ |
| TCV_{OE} | Temperature coefficient of V_{OE} (+25.. +85°C) | $\leq \pm 0.4 \text{ mV/K}$ |
| | (-40.. +25°C) | $\leq \pm 0.525 \text{ mV/K}$ |
| TCV_{REF} | Temperature coefficient of V_{REF} (+25.. +85°C) | $\leq \pm 0.01 \text{ %/K}$ |
| | (-40.. +25°C) | $\leq \pm 0.015 \text{ %/K}$ |
| $TCV_{OE/V_{REF}}$ | Temperature coefficient of V_{OE}/V_{REF} | $\leq \pm 0.15 \text{ mV/K}$ |
| TCG | Temperature coefficient of G | $\leq \pm 0.05\% \text{ of reading/K}$ |
| V_{OE} | Electrical offset voltage @ $I_p = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$ | $V_{REF} \pm 0.025 \text{ V}$ |
| V_{OM} | Magnetic offset voltage @ $I_p = 0$ after an overload of I_{PM} | $< \pm 0.4 \%$ |
| t_{ra} | Reaction time to 10 % of I_{PN} step | $< 3 \mu\text{s}$ |
| t_r | Response time to 90 % of I_{PN} step | $< 5 \mu\text{s}$ |
| di/dt | di/dt accurately followed | $> 100 \text{ A}/\mu\text{s}$ |
| V_{no} | Output voltage noise (DC .. 10 kHz) | $< 20 \text{ mVpp}$ |
| | (DC .. 1 MHz) | $< 40 \text{ mVpp}$ |
| BW | Frequency bandwidth (-3 dB) ⁴⁾ | DC .. 50 kHz |

Notes: ¹⁾It is possible to overdrive V_{REF} with an external reference voltage between 1.5V - 2.8V providing its ability to sink or source approximately 5 mA.

²⁾Maximum supply voltage (not operating) $< 6.5 \text{ V}$

³⁾Excluding Offset and Magnetic offset voltage

⁴⁾Small signal only to avoid excessive heatings of the magnetic core.

Features

- Hall effect measuring principle
- Galvanic isolation between primary and secondary circuit
- Isolation test voltage 3300 V
- Low power consumption
- Single power supply + 5 V
- Fixed offset & Gain
- Isolated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Easy installation
- Small size and space saving
- Only one design for wide current ratings range
- High immunity to external interference
- Internal & external reference.

Applications

- AC variable speed drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

Application domain

- Industrial.

Current Transducer HASS 50..600-S

General data

| | | | |
|-------|-------------------------------|---------------|----|
| T_A | Ambient operating temperature | - 40 .. + 85 | °C |
| T_S | Ambient storage temperature | - 40 .. + 85 | °C |
| m | Mass | 55 | g |
| | Standards | EN 50178:1997 | |

Isolation characteristics

| | | | |
|-------|---|--|--|
| V_b | Rated isolation voltage rms with following conditions | | |
| | -Over voltage category III | | |
| | -Pollution degree 2 | | |
| | -Heterogeneous field | | |

| | EN50178 | IEC61010-1 |
|-----------------------|---------|------------|
| Single insulation | 600V | 600V |
| Reinforced insulation | 300V | 150V |

| | | | |
|-------|--|-------|----|
| V_d | Rms voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 min | 3.3 | kV |
| V_e | Partial discharge extinction voltage rms @ 10 pC | > 1 | kV |
| V_w | Impulse withstand voltage 1.2/50 μ s | 6 | kV |
| dCp | Creepage distance | > 5.5 | mm |
| dCI | Clearance distance | > 5.5 | mm |
| CTI | Comparative Tracking Index (Group I) | > 600 | V |



Safety

This transducer must be used in electric/electronic equipment with respect to applicable standards and safety requirements in accordance with the manufacturer's operating instructions.



Caution, risk of electrical shock

When operating the transducer, certain parts of the module can carry hazardous voltage (eg. primary busbar, power supply).

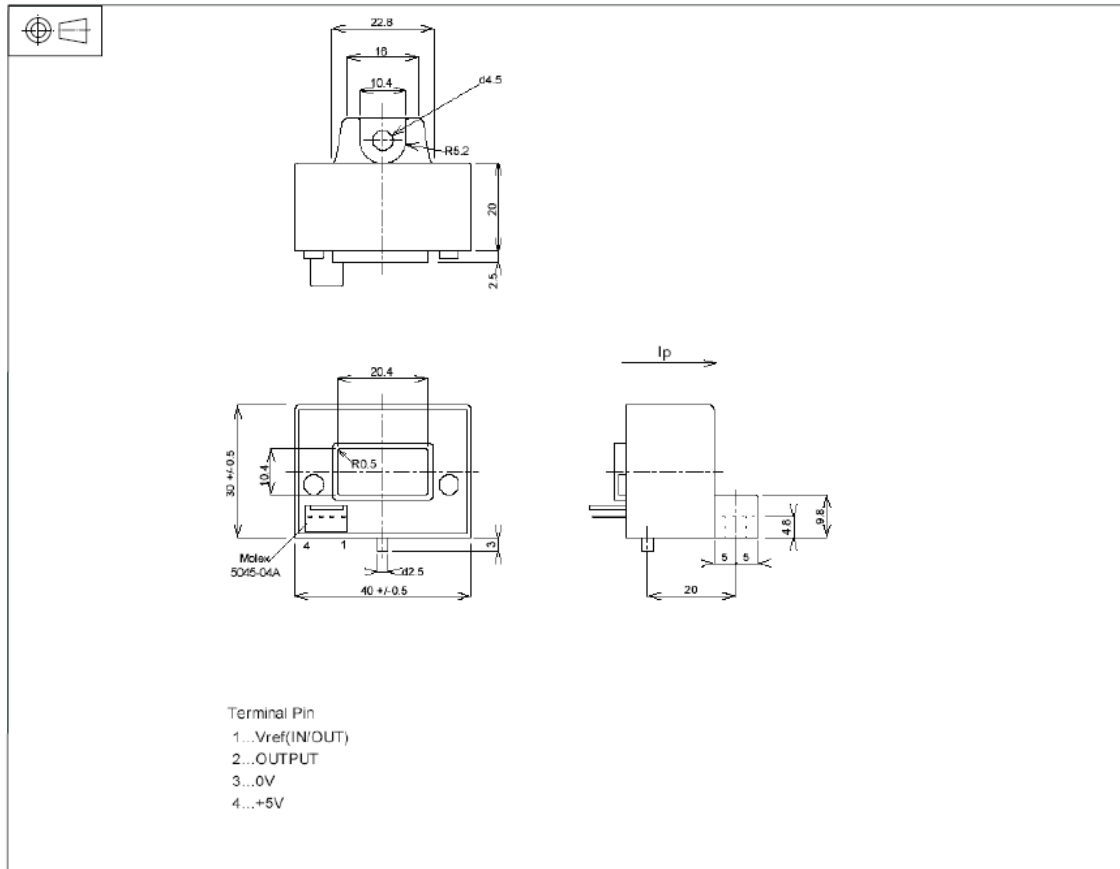
Ignoring this warning can lead to injury and/or cause serious damage.

This transducer is a build-in device, whose conducting parts must be inaccessible after installation.

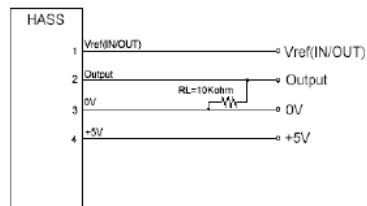
A protective housing or additional shield could be used.

Main supply must be able to be disconnected.

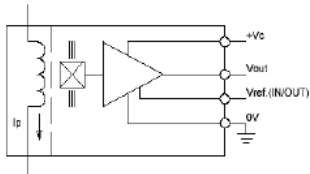
Dimensions HASS 50..600-S (in mm)



Required Connection Circuit



Operation Principle



Mechanical characteristics

- General tolerance $\pm 0.5\text{ mm}$
- Aperture for primary conductor $20.4 \times 10.4 \times 0.5\text{ mm}$
- Transducer fastening M4
- Recommended fastening torque $< 1.5\text{ N}\cdot\text{m}$
- Connection of secondary Molex 5045-04A

Remarks

- Arrow indicates positive current flow direction.
- Temperature of the primary conductor should not exceed 100°C .

B.3 ESPECIFICACIONES TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS SBRIO-9631

I/O and Other Connectors on the NI sbRIO Device

Figure 4 shows the locations of parts on the NI sbRIO device.

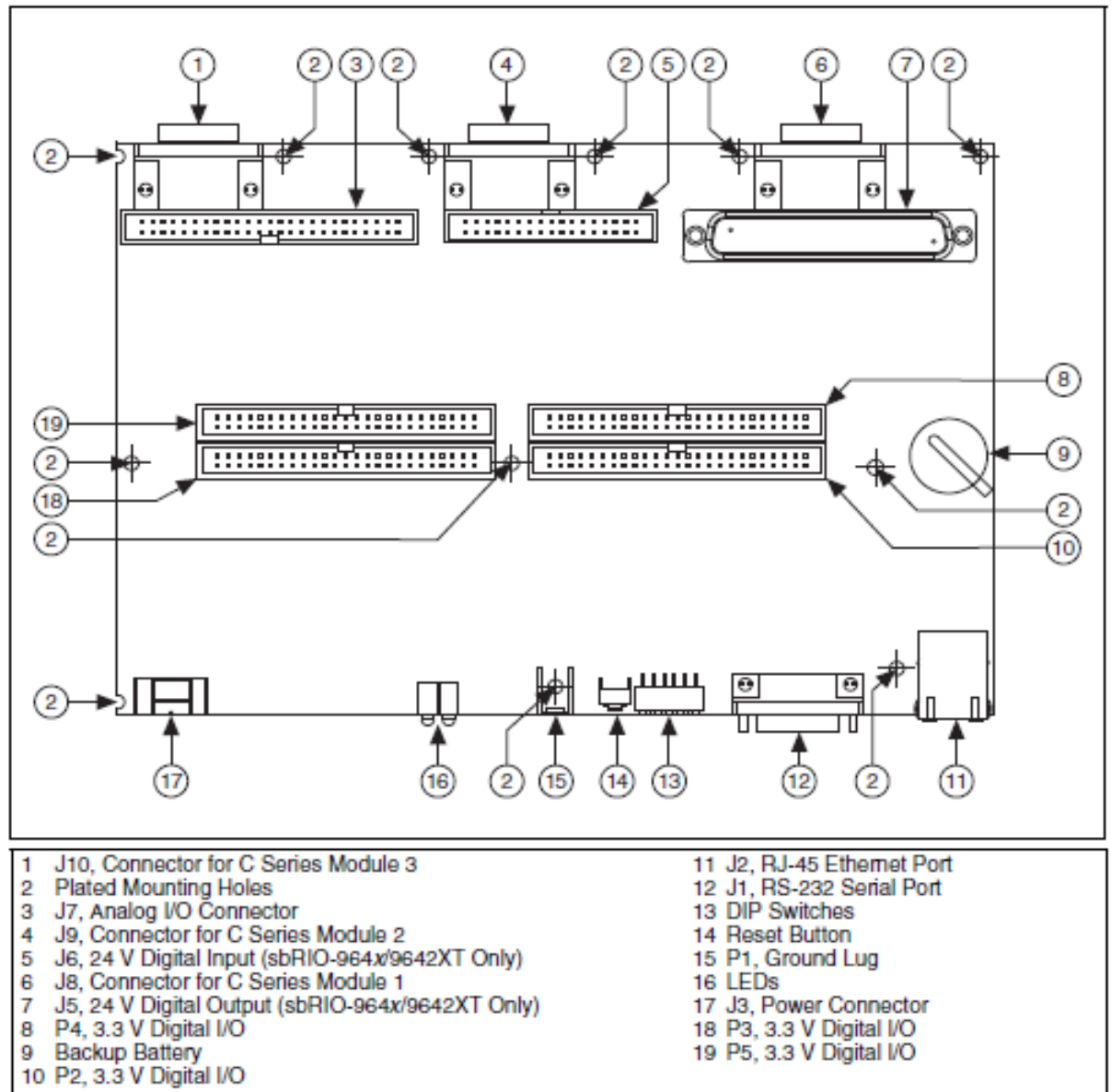


Figure 4. NI sbRIO Device Parts Locator Diagram

NI Single-Board RIO Embedded Control and Acquisition Devices

NI sbRIO-96xx **NEW!**

- Integrated real-time controller, reconfigurable FPGA, and I/O on a single board
- Low-cost systems for high-volume OEM applications
- Up to 2M gate Xilinx Spartan-3 FPGA
- Up to 400 MHz Freescale real-time processor
- Up to 128 MB DRAM, 256 MB nonvolatile storage
- 10/100BASE-TX Ethernet port with built-in FTP and HTTP servers and LabVIEW remote panel Web server
- RS232 serial port for peripheral devices

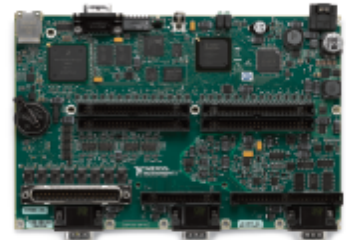
- Low power consumption with single 19 to 30 VDC power supply input
- -20 to 55 °C operating temperature range

LabVIEW Development Software

- LabVIEW Real-Time (VxWorks)
- LabVIEW FPGA

Driver Software

- NI-RIO for reconfigurable embedded systems



| Product | Processor Speed (MHz) | DRAM Memory (MB) | Internal Nonvolatile Storage (MB) | FPGA Size (gates) | 3.3 V DIO Lines | AI Channels | AO Channels | 24 V DI/DO Lines | C Series Expansion (slots) | Size (inches) |
|------------|-----------------------|------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------|-------------|-------------|------------------|----------------------------|---------------|
| sbRIO-9601 | 266 | 64 | 128 | 1M | 110 | 0 | 0 | 0 | 3 | 8.2x3.7 |
| sbRIO-9602 | 400 | 128 | 256 | 2M | 110 | 0 | 0 | 0 | 3 | 8.2x3.7 |
| sbRIO-9611 | 266 | 64 | 128 | 1M | 110 | 32 | 0 | 0 | 3 | 8.2x5.6 |
| sbRIO-9612 | 400 | 128 | 256 | 2M | 110 | 32 | 0 | 0 | 3 | 8.2x5.6 |
| sbRIO-9631 | 266 | 64 | 128 | 1M | 110 | 32 | 4 | 0 | 3 | 8.2x5.6 |
| sbRIO-9632 | 400 | 128 | 256 | 2M | 110 | 32 | 4 | 0 | 3 | 8.2x5.6 |
| sbRIO-9641 | 266 | 64 | 128 | 1M | 110 | 32 | 4 | 32/32 | 3 | 8.2x5.6 |
| sbRIO-9642 | 400 | 128 | 256 | 2M | 110 | 32 | 4 | 32/32 | 3 | 8.2x5.6 |

NI sbRIO-96xx Selection Guide

Overview and Applications

NI Single-Board RIO devices are designed to be easily embedded in high-volume applications that require flexibility, high performance, and reliability. NI sbRIO-96xx devices feature an industrial Freescale MPC5200 real-time processor with speeds up to 400 MHz for deterministic real-time applications. The real-time processor is combined via a high-speed internal PCI bus with an onboard reconfigurable Xilinx Spartan-3 field-programmable gate array (FPGA). The FPGA is connected directly to all onboard 3.3 V digital I/O. Each onboard analog and digital I/O module has a dedicated connection to the FPGA as well.

All sbRIO-96xx devices contain 110 bidirectional digital lines. You can select an NI Single-Board RIO device that includes up to 32 analog inputs, four analog outputs, and 32 industrial 24 V digital inputs and digital outputs. In addition to the built-in I/O capabilities, each NI Single-Board RIO device has three connectors for adding board-only versions of NI, third-party, or custom C Series I/O modules.

The sbRIO-96xx devices accept a 19 to 30 VDC power supply and can operate within a -20 to 55 °C temperature range. With the 10/100 Mb/s Ethernet and serial ports, you can communicate with external devices and systems via TCP/IP, UDP, Modbus/TCP, and serial protocols. The built-in real-time controller also features Web (HTTP) and file (FTP) servers.

Embedded Software

The sbRIO-96xx devices are programmed using the NI LabVIEW graphical programming language. The real-time processor runs the LabVIEW Real-Time Module on the Wind River VxWorks real-time operating system (RTOS) for extreme reliability and determinism. You can integrate your C code libraries within LabVIEW Real-Time.

In addition, you can quickly program the onboard reconfigurable FPGA on sbRIO-96xx devices using the LabVIEW FPGA Module for high-speed control, custom I/O timing, and inline signal processing. LabVIEW contains built-in drivers and APIs for handling DMA or interrupt request (IRQ)-based data transfer between the FPGA and real-time processor. You can reuse your existing hardware description language (HDL) libraries and intellectual property (IP) blocks within LabVIEW FPGA.

Ordering Information

NI Single-Board RIO products are available in quantity 100 or higher volumes only. For complete product specifications and accessory information, go to ni.com/singleboard.

OEM Pricing Available!

Aggressive discounts are available for high-volume customers. For pricing information, call 800 813 3693 (U.S.).

BUY NOW!

For complete product specifications, pricing, and accessory information, call 800 813 3693 (U.S.) or go to ni.com/singleboard.



NI Single-Board RIO Embedded Control and Acquisition Devices

Specifications

Network

| | |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| Network interface..... | 10BASE-T and 100BASE-TX Ethernet |
| Compatibility..... | IEEE 802.3 |
| Communication rates..... | 10 Mb/s, 100 Mb/s autonegotiated |
| Maximum cabling distance..... | 100 m/segment |

Power Requirements

| | |
|--|------------|
| Power supply voltage range..... | 19 to 30 V |
| Power consumption (internal, driving no loads) | |
| sbRIO-960x..... | 6.00 W |
| sbRIO-961x..... | 7.50 W |
| sbRIO-963x..... | 7.75 W |
| sbRIO-964x..... | 8.00 W |

Xilinx Spartan-3 Reconfigurable FPGA

| | |
|---------------------------|--------|
| Number of logic cells | |
| sbRIO-9611/9631/9641..... | 17,280 |
| sbRIO-9612/9632/9642..... | 46,080 |
| Available embedded RAM | |
| sbRIO-9611/9631/9641..... | 432 kb |
| sbRIO-9612/9632/9642..... | 720 kb |

3.3 V Digital I/O

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Number of channels..... | 110 |
| Max current per channel..... | 3mA |
| Output characteristics | |
| Output high voltage..... | 2.7 V min; 3.3 V max |
| Output low voltage..... | 0.07 V min; 0.54 V max |
| Input characteristics | |
| Input high voltage..... | 2.0 V min; 5.25 V max |
| Input low voltage..... | 0 V min; 0.8 V max |

Analog Input (sbRIO-961x/963x/964x only)

| | |
|---------------------------|--|
| Number of channels..... | 32 single-ended or 16 differential |
| ADC resolution..... | 16 bits |
| Conversion time..... | 4 μ s (250 kS/s aggregate) |
| Nominal input ranges..... | ± 10 , ± 5 , ± 1 , and ± 0.2 V |

Analog Output (sbRIO-963x/964x only)

| | |
|--------------------------------|------------|
| Number of channels..... | 4 |
| DAC resolution..... | 16 bits |
| Update time (one channel)..... | 3 μ s |
| Output range..... | ± 10 V |

24 V Digital Input (sbRIO-964x only)

| | |
|-----------------------------|--------------------|
| Number of channels..... | 32 |
| Input type..... | Sinking |
| Digital logic levels | |
| OFF state | |
| Input voltage..... | ≤ 5 V |
| Input current..... | ≤ 150 μ A |
| ON state | |
| Input voltage..... | ≥ 10 V |
| Input current..... | ≥ 330 μ A |

24 V Digital Output (sbRIO-964x only)

| | |
|--|--------------------------------|
| Number of channels..... | 32 |
| Output type..... | Sourcing |
| External supply voltage..... | 6 to 35 VDC |
| Continuous output current on each channel | |
| No heat sinks..... | 250 mA max |
| External heat sink added..... | 1.5 A max (20 A max aggregate) |

Physical Characteristics

If you need to clean the device, wipe it with a dry towel.
Torque for screw terminals (J3)..... 0.5 to 0.6 N-m (4.4 to 5.3 lb-in.)

Weight

| | |
|-----------------|-------------------|
| sbRIO-960x..... | 198.4 g (7.0 oz) |
| sbRIO-961x..... | 266.5 g (9.4 oz) |
| sbRIO-963x..... | 269.3 g (9.5 oz) |
| sbRIO-964x..... | 292.0 g (10.3 oz) |

Safety Voltages

Connect only to voltages that are within these limits.
V-to-C..... 35 V max, Measurement Category I
Caution: Do not connect to signal or use for measurements within Measurement Category II, III, or IV.

Compliance

National Instruments makes no product safety, electromagnetic compatibility (EMC), or CE marking compliance claims for the sbRIO-961x/963x/964x. The end-product supplier is responsible for conformity to any and all compliance requirements.

Note: For UL and other safety certifications, refer to the product label or visit ni.com/certification, search by model number or product line, and click the appropriate link in the Certification column.

Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)

EU Customers: At the end of their life cycle, all products must be sent to a WEEE recycling center. For more information about WEEE recycling centers and National Instruments WEEE initiatives, visit ni.com/environment/weee.htm.

Environmental

The sbRIO-96xx devices are intended for indoor use only. The sbRIO-96xx devices are intended to be built into a suitable enclosure.

Ambient temperature in enclosure

(IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)..... -20 to 55 °C

Storage temperature

| | |
|--|-----------------------------|
| (IEC 60068-2-1, IEC 60068-2-2)..... | -40 to 85 °C |
| Operating humidity (IEC 60068-2-56)..... | 10 to 90% RH, noncondensing |
| Storage humidity (IEC 60068-2-56)..... | 5 to 95% RH, noncondensing |
| Maximum altitude..... | 2,000 m |
| Pollution degree (IEC 60664)..... | 2 |