

Dirección de Área de Conocimiento Industria y Producción

“Propuesta para el diseño de un laboratorio de pruebas para transformadores de distribución para la Universidad Nacional de Ingeniería”.

Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Eléctrico

Elaborado por:

Br. Luis Omar
Díaz Putoy
Carnet: 2016-1263U

Br. Samuel Isaí
Gutiérrez Grijalba
Carnet: 2016-0886U

Tutor:

Ing. Alejandro Hernández

Dedicatoria

Quiero agradecer a Dios por darme la sabiduría y bendiciones a lo largo de mi vida, mi más profundo agradecimiento a mi madre quien es mi mayor fuente de motivación y apoyo durante todo este proceso de formación académica, gracias por creer en mí. A mis hermanos, a mis tíos, a mis abuelos también que de alguna manera me animaron a seguir adelante.

Agradezco al tutor Ing. Alejandro Hernández Solís y que su tiempo dedicado para darnos la guía en finalizar nuestro trabajo monográfico.

Agradezco a mi alma mater, la Universidad Nacional de Ingeniería por brindarme una formación integral con profesores de gran profesionalismo durante mi carrera de ingeniería eléctrica.

Luis Omar Diaz Putoy

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, cuya presencia ha sido mi guía y fortaleza a lo largo de este camino académico. Su sabiduría y amor me han sostenido en los momentos difíciles, y Su luz ha sido mi inspiración para superar cada desafío. Sin Su bendición, este logro no habría sido posible.

Agradezco profundamente a mis padres, familia y amigos, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida y en la realización de esta monografía. Su amor, apoyo incondicional y palabras de aliento me han impulsado a dar lo mejor de mí en cada etapa de este proceso. Este logro es el reflejo del esfuerzo compartido y la fuerza que me han transmitido.

Finalmente, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ingeniero Alejandro Hernández Solís, mi tutor, por su invaluable guía, paciencia y dedicación. Asimismo, dedico este trabajo a la Universidad Nacional de Ingeniería, que me brindó la oportunidad de cursar esta carrera y me proporcionó los conocimientos y herramientas necesarios para alcanzar mis metas. Su apoyo ha sido esencial en mi formación profesional.

Samuel Isai Gutiérrez Grijalva

Resumen de tema

El presente trabajo monográfico tiene como propósito la elaboración de guías para realizar pruebas eléctricas en transformadores de distribución monofásicos con equipos de prueba existentes de marca Phenix Technologies que datan con fecha de fabricación en 1994, la cuales pueden permitir apoyar a los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica con clase prácticas que ayuden mejor a la comprensión de temas relevantes en clases como maquinas eléctricas 1, técnicas de alta tensión, redes de distribución. El trabajo se compone de cuatro capítulos.

En el capítulo 1, se realiza una investigación con manuales del fabricante sobre los equipos de prueba de tal manera se realice un manual que sirva de guía para cada equipo de prueba donde el usuario se familiarice con la instalación, funciones del panel de control y precauciones de uso.

En el capítulo 2, se detallan requisitos de seguridad de importancia que se deben cumplir de tal manera se tenga en cuenta el riesgo, evitar cualquier evento no deseado y el deber de actuar con responsabilidad al momento de desarrollar las pruebas eléctricas.

En el capítulo 3, se definen los conceptos, normas aplicables y procedimientos de los pasos a seguir desarrollar las pruebas eléctricas, para la elaboración de las 4 guías de laboratorio, estas fueron elaboradas a partir de la práctica real con el préstamo un transformador monofásico de 10kVA haciendo uso las maletas de prueba marca Phenix Technologies existentes, y así mismo se presenta un formato de pruebas donde se detallan los resultados obtenidos en las mediciones.

En el capítulo 4, se ha planteado la propuesta de un diseño o espacio funcional como un lugar independiente para el laboratorio de pruebas si en un futuro la UNI pudiera ofrecer este tipo de servicio al sector industrial, proponiendo detalles generales que se deban tener en cuenta para la ejecución de este laboratorio.

Contenido

Introducción	1
Antecedentes	3
Justificación	5
Objetivos.....	6
Objetivo General	6
Objetivos Específicos	6
Marco Teórico	7
El transformador.....	7
Principio de funcionamiento del transformador	8
Fuerza electromotriz inducida.....	9
Relación de transformación.....	11
Perdidas en el transformador	12
Circuito equivalente del transformador.....	16
Transformadores monofásicos de distribución	20
Configuración de terminales en transformadores de distribución.....	22
Polaridad en transformadores de distribución	25
Designación de voltajes del transformador	26
Capítulo 1: Procedimientos de uso y funcionamientos de los equipos de prueba existentes.....	27
1. Introducción	27
2. Información general para el equipo de prueba de rigidez dieléctrica.	28
2.1. Especificaciones técnicas	29
2.2. Controles de Panel Principal	30
2.3. Instrucciones de Uso y Seguridad	32

2.3.1.	Instrucciones de instalación y conexión a tierra.	32
2.3.2.	Instrucciones con celda de prueba TC/DE (ASTM D877)	33
2.3.3.	Seguridad y responsabilidad del operador	34
2.4.	Detalles encontrados en el equipo de prueba	35
3.	Información general para el equipo de prueba de aislamiento.....	36
3.1.	Especificaciones técnicas	37
3.2.	Controles del panel principal	38
3.3.	Instrucciones de uso y seguridad.....	40
3.3.1.	Instalación eléctrica para el uso del equipo de prueba.	40
3.3.2.	Instrucciones de operación	41
3.3.3.	Falla por sobre corriente.....	42
3.3.4.	Cálculo de mega-ohmios $M\Omega$	42
3.3.5.	Conexiones del panel frontal RTN, GND, GRD.....	42
3.3.6.	Seguridad y responsabilidad del operador	44
3.4.	Detalles encontrados en el equipo de prueba	44
4.	Información general para el equipo de prueba de vacío y cortocircuito. ..	46
4.1.	Especificaciones técnicas	47
4.2.	Controles del panel principal	48
4.3.	Instrucciones de uso y seguridad.....	52
4.4.	Detalles encontrados en el equipo de prueba	53
Capítulo 2: Normas técnicas y de seguridad para el uso del laboratorio.....		55
2.	Introducción	55
2.1.	Riesgos eléctricos	56
2.2.	Factores comunes de riesgo eléctrico	57
2.3.	Accidentes eléctricos	60

2.4.	Factores que provocan accidentes eléctricos.	61
2.4.1.	Factores técnicos.....	61
2.4.2.	Factores Organizativos.....	61
2.4.3.	Factores Humanos.....	61
2.5.	Tipos de contacto eléctrico.....	61
2.5.1.	Contactos eléctricos directos	62
2.5.2.	Contactos eléctricos indirectos.....	62
2.6.	Factores que determinan el daño por contacto eléctrico.....	63
2.6.1.	Intensidad de corriente que circula a través del cuerpo humano 63	
2.6.2.	Duración del contacto eléctrico.....	64
2.6.3.	Resistencia eléctrica del cuerpo humano.	65
2.6.4.	Recorrido de la corriente a través del cuerpo humano	65
2.6.5.	Tensión aplicada.....	66
2.6.6.	Factores personales.....	67
2.7.	Efectos del paso de la corriente a través del cuerpo humano	67
2.7.1.	Efectos inmediatos.	67
2.7.2.	Efectos no inmediatos.	68
2.8.	Seguridad eléctrica.....	69
2.8.1.	Prácticas y precauciones de seguridad eléctrica.....	69
2.9.	Medidas de seguridad	70
2.9.1.	Procedimientos de trabajo	71
2.9.2.	Control del área de trabajo.....	72
2.9.3.	Normas del laboratorio	72

Capítulo 3: Procedimientos y especificaciones para guías implementadas en pruebas a los transformadores de distribución	76
---	----

3.	Introducción	76
3.1.	Introducción para la prueba de rigidez dieléctrica del aceite	77
3.1.1.	Composición de aceite dieléctrico.....	77
3.1.2.	Características.....	77
3.1.3.	Funciones.....	78
3.1.4.	Propiedades de los aceites dieléctricos	79
3.1.5.	Degradación del aceite como aislante.....	83
3.1.6.	Evaluación de la rigidez dieléctrica al aceite.....	84
3.1.7.	Normas aplicables para la prueba de rigidez dieléctrica	85
3.1.8.	Procedimientos para la prueba de rigidez dieléctrica	92
3.1.9.	Resultados de la prueba de ruptura dieléctrica del aceite	96
3.2.	Prueba de resistencia de aislamiento.....	96
3.2.1.	Composición del papel aislante	97
3.2.2.	Diagnóstico de la resistencia de aislamiento del transformador 97	
3.2.3.	Causas del fallo en el aislamiento	98
3.2.4.	Principio de la medición del aislamiento	99
3.2.5.	Tipos de pruebas de resistencia de aislamiento	101
3.2.6.	Efectos de la temperatura en la medición.....	104
3.2.7.	Efectos de la humedad	105
3.2.8.	Conexiones para la prueba de aislamiento.....	105
3.2.9.	Procedimiento para la prueba de aislamiento	106
3.3.	Prueba de circuito abierto en un transformador monofásico	108
3.3.1.	Principio de la medición en circuito abierto del transformador	108
3.3.2.	Parámetros para determinar el circuito equivalente en circuito abierto	110

3.3.3.	Referencias según la norma IEEE C57.12.90-2015	111
3.3.4.	Referencias de límites en la medición de perdidas en vacío ..	115
3.3.5.	Procedimientos para la prueba de vacío	116
3.4.	Prueba de corto circuito en un transformador monofásico	118
3.4.1.	Principio en la medición en cortocircuito del transformador ...	118
3.4.2.	Parámetros para determinar el circuito equivalente en cortocircuito.....	119
3.4.3.	Referencias según la norma IEEE C57.12.90-2015	121
3.1.4.	Prueba de impedancia de un transformador monofásico	127
3.1.5.	Referencias de límites en la medición de pérdidas de cortocircuito	129
3.1.6.	Procedimientos para la prueba de cortocircuito	129
Capítulo 4: Propuesta del diseño del área funcional del laboratorio de pruebas para transformadores de distribución		132
4.1.	Introducción.....	132
4.2.	Ubicación física del laboratorio	132
4.3.	Áreas del laboratorio.....	134
4.4.	Diseño de iluminación	137
4.4.1.	Iluminación Interna	139
4.4.2.	Iluminación externa	139
4.5.	Selección de luminaria exterior e interior	140
4.6.	Diseño de circuito de fuerza.....	141
4.6.1.	Cálculo de caída de voltaje	142
4.6.2.	Cálculo del alimentador.....	143
4.7.	Cálculo del transformador	144
4.7.1.	Censo de carga.....	144

4.7.2.	Cuadro de Carga.....	146
4.7.3.	Diagrama unifilar	147
4.7.4.	Selección del transformador.....	148
4.8.	Puesta a tierra.....	148
4.8.1.	Parámetros y normativas	149
4.8.2.	Consideración del sistema de puesta a tierra	150
4.8.3.	Consideraciones de seguridad	150
	Conclusiones.....	151
	Recomendaciones	152
	Bibliografía.....	153
	Anexos	157
	Manual de equipos	158
	Guías de laboratorio	159
	Formato hoja de pruebas.....	160
	Registro fotográfico	161
	Planos propuestos para áreas del laboratorio.....	162

Contenido de Tabla

Tabla 1: Especificaciones del equipo de prueba dieléctrica.....	29
Tabla 2: Especificaciones de la celda de prueba.....	29
Tabla 3: Especificaciones del equipo de prueba de aislamiento	37
Tabla 4: Especificaciones del equipo de prueba para el equipo de prueba de vacío y cortocircuito	47
Tabla 5: Factores comunes de riesgos eléctricos	59
Tabla 6: Efectos producidos por la corriente eléctrica en el cuerpo humano.....	64
Tabla 7: Tiempo para producir graves daños	64
Tabla 8: Tension de contacto de acuerdo con el estado del cuerpo	67
Tabla 9: Composición del aceite dieléctrico	77
Tabla 10: Clasificación de resultados según ASTM D877	87
Tabla 11: Tension de ruptura dieléctrica D1816 - separación 1mm.....	89
Tabla 12: Tension de ruptura dieléctrica D1816 - separación 2mm.....	90
Tabla 13: Comparativa entre norma ASTM D877 y ASTM D1816	91
Tabla 14: Resultados de la medición de ruptura dieléctrica de aceite	96
Tabla 15: Factores de corrección de resistencia de aislamiento a 20°C en transformadores	104
Tabla 16: Valores especificados de perdidas sin carga por ENATREL.....	116
Tabla 17: Requisitos para la corrección de errores de ángulo de fase por IEEE	125
Tabla 18: Valores especificados de perdidas con carga por ENATREL	129

Contenido de Ilustraciones

Figura 1: Esquema del transformador	8
Figura 2: Variación senoidal del flujo con el tiempo	10
Figura 3: Ciclo de histéresis	14
Figura 4: Composición del núcleo por las corrientes parasitas	16
Figura 5: Circuito equivalente del transformador	17
Figura 6: Circuito equivalente del transformador referido al primario.....	18
Figura 7: Circuito equivalente del transformador referido al secundario	18
Figura 8: Circuito equivalente del transformador referido al primario.....	19
Figura 9: Circuito equivalente simplificado del transformador	19
Figura 10: Forma del núcleo acorazado	21
Figura 11: Forma del núcleo no acorazado.....	21
Figura 12: Designación de terminales en el lado de alta tensión	23
Figura 13: Dos terminales, un devanado en el lado de baja tensión	23
Figura 14: Tres terminales, dos devanados conectados en serie en lado de baja tensión.....	24
Figura 15: Tres terminales, dos devanados conectados en paralelo en lado de baja tensión.....	24
Figura 16: Cuatro terminales, dos devanados en devanado de baja tensión	25
Figura 17: Identificación de polaridad en transformadores monofásicos	26
Figura 18: Equipo de pruebas Phenix LD60.....	30
Figura 19: Soporte interno de la cuba de aceite del equipo de prueba.....	30
Figura 20: Placa característica del equipo de prueba LD-60	35
Figura 21: Error de lectura al momento de encender el equipo de prueba.....	35
Figura 22: Equipo Phenix 470-5.....	38
Figura 23: Diagrama simplificado de conexión en modo remoto.....	43
Figura 24: Diagrama simplificado de conexión en modo guarda.....	44
Figura 25: Placa característica del equipo de prueba 470-5.....	45
Figura 26: Retiro de la tapa del kilo voltímetro	45
Figura 27: Equipo Phenix TTS2.5	48
Figura 28: Placa característica del equipo de prueba TTS2.5	53

Figura 29: Estado del fusible F3.....	54
Figura 30: Pantallas de medición sin lecturas	54
Figura 31: a) Contacto directo con cable de herramienta. b) Contacto directo entre dos conductores.	62
Figura 32: Contacto indirecto por una carcasa metálica de una maquina.....	63
Figura 33: Porcentaje de resistencia según trayecto. a) una mano. b) dos manos	66
Figura 34: Trayectos de la corriente más habituales.....	66
Figura 35: Alineación de moléculas polarizadas	100
Figura 36: Corrientes ante un campo dieléctrico CD.....	100
Figura 37: Componentes de la corriente de prueba.....	101
Figura 38: Valores recomendados de aislamiento por ANSI NETA MTS 2015	102
Figura 39: Grafica de prueba tiempo-resistencia	103
Figura 40: Conexión del devanado de alta tensión vs devanado de baja tensión	105
Figura 41: Conexión del devanado de alta tensión vs tanque.....	106
Figura 42: Conexión del devanado de baja tensión vs tanque.....	106
Figura 43: Disposición para prueba de circuito abierto	109
Figura 44: Circuito equivalente de la prueba de circuito abierto.....	111
Figura 45: Disposición para la prueba de circuito abierto según IEEE	112
Figura 46: Conexión de la prueba de circuito abierto.....	116
Figura 47: Disposición de conexión para la prueba de cortocircuito	118
Figura 48: Circuito equivalente de la prueba de cortocircuito	120
Figura 49: Diagrama de conexión para la prueba de cortocircuito	124
Figura 50: Prueba de impedancia de cortocircuito en un transformador monofásico	128
Figura 51: Conexión para la prueba de cortocircuito.....	130
Figura 52: Ubicación del laboratorio, tomada de Google Earth.....	134
Figura 53: Detalle de tomacorrientes a instalar por área.....	142
Figura 54: Censo de carga del laboratorio	145
Figura 55: Factores de demanda para diferentes locales.....	145

Figura 56: Factores de carga.....	146
Figura 57: Selección del número de carga de laboratorio y luminarias.....	148
Figura 58: Cargabilidad de la selección del transformador vs. carga	148

Introducción

El presente trabajo tiene como finalidad presentar la propuesta del diseño de un laboratorio de pruebas para transformadores de distribución con módulos de pruebas que se encuentran en el laboratorio de máquinas eléctricas que no están en uso alguno, esto como aporte al conocimiento teórico y práctico para los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica. Esta investigación será de gran importancia ya que los estudiantes verán reforzados sus conocimientos en las diferentes áreas de clases al tener la oportunidad de realizar pruebas que normalmente se realizan para caracterizar parámetros y estado a transformadores de distribución.

La aplicación del transformador más importante es la desempeñada en las redes de distribución primaria, ya que es el encargado de reducir el voltaje hasta el nivel que necesitan los consumidores del servicio eléctrico. Debido a esto es de suma importancia conocer el estado y el comportamiento de los transformadores a partir de sus parámetros de operación, ya que esto nos permitirá predecir posibles fallas y de alargar su tiempo de vida útil.

Con esta propuesta se podrán realizar pruebas como de rigidez dieléctrica del aceite, prueba de aislamiento, prueba de vacío y prueba de cortocircuito, de tal manera que se determine la relevancia de las mismas. Así mismo este trabajo contará con el uso de normativas y procedimientos adecuado que se deban efectuar estas pruebas conllevando a un buen uso y manejo tanto de los módulos de pruebas; en paralelo se va a trabajar en elaborar guías con formato establecido con base a la reciente acreditación de la carrera de Ingeniería Eléctrica del desarrollo paso a paso de cómo se llevan a cabo, de tal manera que involucren su correcta funcionalidad.

De igual manera se ejecuten para su retroalimentación de clases de la carrera de Ingeniería Eléctrica como Maquinas Eléctricas 1 en la unidad 3: Estudio del Transformador., Técnicas de Alta Tensión en la unidad 3: Ruptura dieléctrica en líquidos y sólidos. y Redes de Distribución en la unidad 4: Aplicación de Transformadores de Distribución.

Las pruebas que se realicen con el fin de verificar que el transformador esté apropiadamente en capacidad de soportar condiciones en las que estará sometido durante su funcionamiento normal, al finalizar se emitirá un respectivo formato de prueba en el cual se escribirá los resultados de cada prueba realizada con el propósito de dejar información sobre el estado de los parámetros del transformador.

Antecedentes

Para la propuesta del diseño de un laboratorio para pruebas de transformadores de distribución, podemos encontrar algunas investigaciones que tienen como base la ejecución de pruebas aplicadas a los transformadores y que se tienen como antecedentes para este presente trabajo monográfico. A continuación, se mencionan algunos estudios relacionados:

En la Universidad de El Salvador, El Salvador, se presentó el trabajo de graduación “Propuesta de diseño para el laboratorio de pruebas para transformadores de distribución y potencia, para la escuela de Ingeniería eléctrica.” para título de ingeniero eléctrico presentado el 2015 por Francisco Antillón y Osmin Magaña, en este documento se realiza el estudio para algunos ensayos que se realizan para conocer el estado y la condición en las que se encuentra el transformador, así mismo aborda el punto la importancia de que un laboratorio esté apegado a los diferentes lineamientos requeridos bajo las normas de calidad..

En el Instituto Politécnico Nacional, México D.F, se realizó un estudio titulado “Manual de pruebas a transformadores de distribución” presentado por Andrés Acevedo, Rubén Ledesma y Eduardo Perera en el 2007, donde este estudio abordó las pruebas que se les aplican a los transformadores según con normativa vigente y la metodología establecida para realizar estas pruebas.

En la Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador, también se presentó un trabajo de graduación “Diseño e implementación de un laboratorio de pruebas de transformadores en la universidad técnica de Cotopaxi sede la maná, del cantón la maná, año 2015” presentado por Jefferson Mora en el año 2015, donde plantean la necesidad de implementar dicho laboratorio para el beneficio de los estudiantes de la institución tengan la posibilidad de conocer las principales pruebas que se aplican a los transformadores con el fin que aprovechen al máximo del contenido teórico-práctico que presentan en el trabajo.

A nivel nacional en la Universidad Nacional de Ingeniería, se presentó el trabajo de graduación “Diseño, pruebas y mantenimiento de transformadores de distribución” presentado por José Granados en el año 2018, donde se recopiló las bases teóricas de los transformadores, información constructiva de los transformadores, pruebas que se les realizan y sobre la normativa aplicable, trabajo que pretende ofrecer referencias de consulta a quienes estén involucrados en la práctica de mantenimiento de transformadores.

Justificación

El presente trabajo monográfico tiene como propósito presentar la propuesta de la implementación de un laboratorio de pruebas para transformadores de distribución en el cual tendría un beneficio para facilitar el conocimiento teórico-práctico para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica e introducirlos en el campo de los transformadores eléctricos. Además, este mismo laboratorio podría prestar servicios a demás empresas que requieran realizar pruebas a sus transformadores antes que sean puestos en servicio o de mantenimiento para conocer el estado que se encuentra.

Es relevante que para la carrera de Ingeniería Eléctrica, en particular, que se requiera de laboratorios equipados con instrumentación y módulos didácticos especializados para apoyar el proceso de enseñanza durante las diversas asignaturas cursadas donde se pueda contribuir al enriquecimiento de la teoría y práctica, en particular a realizar pruebas para transformadores de distribución así como técnicas de uso de los equipos involucrados que se deban implementar al momento de realizar las pruebas, motivando así a los estudiantes en el desarrollo de su formación profesional en la UNI.

Se aprovecharán los equipos en existencia para realizar las guías de laboratorio para las pruebas a los transformadores, actualmente se encuentran sin aprovechamiento alguno en el laboratorio de máquinas eléctricas.

Para el caso del laboratorio que se proyecta a proponer en este trabajo, también podría representar un gran beneficio ya que pueda existir la posibilidad de que sea una fuente de ingreso para la UNI tomando en cuenta que en Nicaragua existe un lugar que realiza pruebas a los transformadores de distribución como es el caso del taller de transformadores de ENATREL.

Objetivos

Objetivo General

1. Proponer el diseño de un laboratorio de pruebas para transformadores de distribución para la Universidad Nacional de Ingeniería.

Objetivos Específicos

1. Describir los procedimientos y funcionamientos de cada uno de los elementos que contienen los equipos de prueba existentes.
2. Definir normas técnicas y de seguridad para el uso del laboratorio.
3. Elaborar procedimientos y especificaciones para cuatro guías implementadas en pruebas a los transformadores de distribución.
4. Proponer el diseño del área funcional del laboratorio de prueba para los transformadores de distribución.

Marco Teórico

El transformador

De acuerdo con (Chapman, 2012) se podrían considerar como dispositivos que cambian los niveles de voltaje aumentando o disminuyendo la tensión a través de la acción de un campo magnético. Su construcción puede ser tipo núcleo o tipo acorazado, pero un transformador básicamente consta de dos o más bobinas de alambre conductor enrolladas alrededor de un núcleo ferromagnético común, donde la única conexión entre las bobinas se realiza por medio de los enlaces de flujo magnético común que fluyen al interior del núcleo.

El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, por medio de inducción electromagnética. Este fenómeno de inducción electromagnética en el que se basa el funcionamiento del transformador fue descubierto por Michael Faraday en 1831 y está basado fundamentalmente en que cualquier variación de flujo magnético que atraviesa un circuito cerrado genera una corriente inducida.

Un transformador está constituido por dos o más bobinas de material conductor, aisladas entre sí eléctricamente y por lo general enrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el núcleo.

Típicamente se definen los devanados de la siguiente manera: el devanado del transformador que se conecta a la fuente de potencia se conoce como devanado primario mientras que el devanado que se conecta a la carga se le asigna el nombre de devanado secundario.

Los transformadores son una parte fundamental en los sistemas eléctricos en general, particularmente los transformadores de distribución tienen una gran demanda comercial (Avelino, 2008). Para este trabajo en particular se consideran únicamente los transformadores monofásicos de distribución.

Principio de funcionamiento del transformador

Cuando se aplica fuerza electromotriz (f.e.m) en el bobinado del lado primario, debido a una corriente eléctrica que pasa por ella, se genera una inducción de flujo magnético en las placas del núcleo. Según Faraday, cuando varía el flujo magnético, se produce una fuerza electromotriz en el bobinado del lado secundario. Así, el circuito eléctrico en ambos devanados queda en acople a través del campo magnético. Además, según la ley de Lenz, la corriente tiene que ser alterna para que se genere la variación de flujo.

Las fuerzas electromotrices (f.e.m.) se inducen por la variación del flujo magnético. Las espiras y el circuito magnético están en reposo uno con respecto al otro, y las f.e.m se inducen por la variación de la magnitud del flujo con el tiempo (Avelino, 2008). En la siguiente figura permite aclarar este concepto.

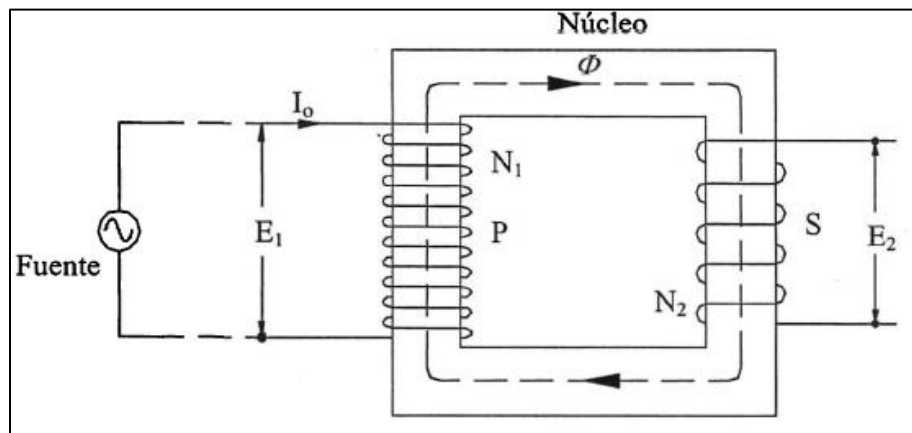


Figura 1: Esquema del transformador

El núcleo, como se representa en la figura 1, está formado de chapas de acero (grado eléctrico) superpuestas y con aislamiento interlaminar propio, de forma rectangular. En uno de los lados del núcleo se arrolla un devanado continuo **P** y en el opuesto un devanado continuo **S**, que puede tener el mismo número de espiras que **P**, o no tenerlo, tal como se representa de una manera esquemática en la figura 1, una fuente suministra corriente alterna al arrollamiento primario **P**, en el que, al estar montado sobre el núcleo, su fuerza magnetomotriz (f.m.m) produce un flujo ϕ alternativo en el mismo. Las espiras del arrollamiento **S**

abrazarán este flujo que, al ser alternativo, induce en **S** una f.e.m de la misma frecuencia que el flujo. Debido a esta f.e.m inducida, el arrollamiento secundario **S** es capaz de suministrar corriente y energía eléctrica. La energía, por lo tanto, se transfiere del primario **P** al secundario **S** por medio del flujo magnético.

El arrollamiento **P**, que recibe la energía, se llama primario. El arrollamiento **S**, que suministra energía, se llama secundario. En un transformador, cualquier de los arrollamientos puede hacer de primario, correspondiendo al otro hacer de secundario, lo que sólo depende de cuál de los dos es el que recibe la energía o el que la suministra a la carga. (Avelino, 2008)

La tensión que se genera en el secundario depende de la cantidad de espiras y de su relación con la cantidad de espiras del lado primario. A esto se le conoce como relación de transformación.

Fuerza electromotriz inducida

El flujo ϕ o flujo común o mutuo, al pasar por el circuito constituido por el núcleo de hierro-acero eléctrico laminado, no solo lo abrazan las espiras del secundario **S**, sino también las del primario **P**, y, por lo tanto, debe incluir una f.e.m en ambos arrollamientos **S** y **P**. Como el flujo es el mismo, en cada uno de ellos debe incluir la misma f.e.m por espira y la f.e.m total inducida en cada uno de los arrollamientos debe ser proporcional al número de espiras que los componen; es decir,

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

Siendo E_1 y E_2 las f.e.m inducida en el primario y en el secundario, y N_1 y N_2 los números de espiras en cada uno de ellos, respectivamente. En los transformadores ordinarios, la tensión en las terminales solamente difiere de la f.e.m inducida en un porcentaje muy pequeño, de modo que para muchos casos prácticos puede decirse que las tensiones en terminales del primario y del secundario son proporcionales a sus respectivos números de espiras. La f.e.m inducida en un transformador es proporcional a tres factores: la frecuencia f , el número de espiras N y el flujo instantáneo máximo ϕ_m . La ecuación de la f.e.m

inducida, suponiendo que el flujo varía según una ley senoidal, puede deducirse de la siguiente manera:

La figura 2 representa el flujo común ϕ que varía según una ley senoidal en función del tiempo; entre los puntos a y b, la variación total del flujo es $2\phi_m$ Maxwell. Esta variación de flujo se produce durante un semiperiodo o en el tiempo $T/2$ segundo., siendo T el periodo o tiempo necesario para que la onda complete un ciclo. El tiempo $T/2$ es igual a $1/2f$ segundos. La f.e.m media inducida es igual a la variación total del flujo dividida por el tiempo.

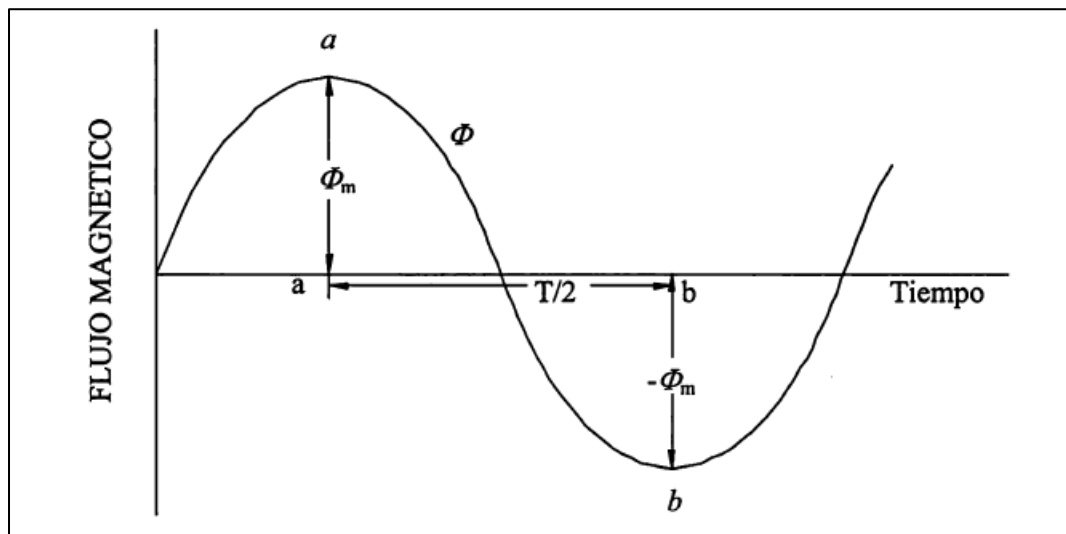


Figura 2: Variación senoidal del flujo con el tiempo

Es decir,

$$e = -N \frac{2\phi_m}{\frac{T}{2}} 10^{-8} \text{ volts} \quad (2)$$

$$e = -N \frac{2\phi_m}{\frac{T}{2f}} 10^{-8} \text{ volts} \quad (3)$$

$$e = -4fN\phi_m 10^{-8} \text{ volts} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que, en la senoide, la relación entre el valor eficaz y el valor medio es 1.11, la f.e.m eficaz inducida es:

$$E = 4,44fN\phi_m 10^{-8} \text{ volts} \quad (5)$$

Donde:

E: Fuerza electromotriz inducida, en V

4.44: Constante que depende del factor de forma.

f: Frecuencia, Hertz (Hz)

N: Número de espiras

ϕ_m : Flujo instantáneo máximo, Maxwell

Habiéndose suprimido el signo negativo. El factor 4,44 es igual a 4 veces el factor de forma, que vale 1,11 para la curva senoidal. Si el flujo varía según una ley que no sea senoidal debe adoptarse *un factor de forma K*, distinto de 1,11 de la ecuación (5).

El flujo máximo es $\phi_m = B_m A$, siendo B_m es la densidad del flujo máximo y A la sección transversal del núcleo, entonces la ecuación (5) puede escribirse:

$$E = 4,44fN B_m A 10^{-8} \text{ volts} \quad (6)$$

Esta forma suele ser más conveniente para el cálculo, ya que los núcleos de los transformadores se proyectan partiendo de la densidad de flujo admisible. A la expresión (6) se le suele llamar, con toda razón, la ecuación general del transformador. Si nos referimos al arrollamiento del lado primario, la tensión inducida es:

$$E = 4,44fN_1 B_m A 10^{-8} \text{ volts} \quad (7)$$

De la misma forma, para el arrollamiento del lado secundario:

$$E = 4,44fN_2 B_m A 10^{-8} \text{ volts} \quad (8)$$

Relación de transformación

La relación de vuelta del primario y secundario $N_1:N_2$ las cuales equivalen a la relación de f.e.m del primario y del secundario $E_1:E_2$, indica que las magnitudes de la f.e.m del primario son reducidas o elevadas. La relación de vueltas o la relación de tensiones inducidas, es llamada la relación de transformación y es representada por la letra *m*, así que:

$$m = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \quad (9)$$

Porque la entrada de tensión, del primario V_1 y la tensión de carga del secundario V_2 son casi iguales a sus tensiones inducidas respectivamente, la relación de las tensiones terminales $V_1:V_2$ Es frecuentemente llamado la tensión de transformación. La verdadera relación de transformación es constante, mientras que la relación $V_1:V_2$ varía cerca del 1 al 8% dependiendo de la carga y del factor de potencia. (Acevedo, 2007)

Perdidas en el transformador

En la actualidad, los transformadores están constituidos de la misma manera, consta de un núcleo magnético, un arrollamiento primario y un arrollamiento secundario. El núcleo está formado por un material ferromagnético que favorezca la propagación del flujo magnético, algunos materiales son acero con aleación de silicio, para minimizar las perdidas en el hierro, debido a las corrientes parasitas de Foucault, la sección conductora del flujo magnético se divide en pequeñas laminas y puestas, una lámina y una lámina de acero un papel o barniz aislante. Las chapas magnéticas se suelen montar a tope para evitar dispersión del flujo y así que cambie la dirección abruptamente. Los arrollamientos, es el número de espiras y la selección del hilo de cada uno de ellos estarán en función de los valores de tensión e intensidad tanto de entrada como de salida. (González, 2010)

Las perdidas en el transformador se manifiestan en forma de calor en los arrollamientos de cobre y respecto al núcleo magnético tenemos perdidas por histéresis magnética y perdidas por corrientes de Foucault. Los transformadores son considerados como maquinas eficientes debido a las baja perdidas a comparación de la potencia que van a transmitir.

Debido a que el transformador es una maquina estática, por lo que, no genera pérdidas mecánicas, solo perdidas eléctricas y magnéticas, las cuales son:

Pérdidas en el cobre

Están dadas por los bobinados de un transformador. El valor de las pérdidas está medido por las intensidades de carga al cuadrado y a la resistencia de los bobinados, la cual es variable desde el funcionamiento hasta plena carga y se representa en forma de calor. El material por el cual va circular la corriente tiene una resistencia mayor a cero, lo que genera pérdidas de energía por calentamiento de los devanados. Se debe considerar una separación no aislada entre sí, para transformadores de baja potencia se usan hilos esmaltados, para el caso de grandes transformadores se utilizan pletinas rectangulares encintadas en papel impregnado en aceite.

Las pérdidas en el lado primario están dadas por:

$$P_{cu1} = I_1^2 R_1 \quad (10)$$

Donde:

P_{cu1} : Pérdidas en el devanado primario

I_1 : Intensidad de corriente en el primario

R_1 : Resistencia del devanado primario

Las pérdidas en el lado secundarios están dadas por:

$$P_{cu2} = I_2^2 R_2 \quad (11)$$

Donde:

P_{cu2} : Pérdidas en el devanado secundario

I_2 : Intensidad de corriente en el secundario

R_2 : Resistencia del devanado secundario

Por lo que las pérdidas totales están dadas por

$$P_{cu} = P_{cu1} + P_{cu2} \quad (12)$$

Pérdidas en el núcleo

Están determinada por las siguientes dos componentes:

Pérdidas por histéresis

Cuando se tiene un material ferromagnético originalmente desmagnetizado y a dicho material se imanta y desimanta sucesivamente, entonces, intrínsecamente el material desarrolla un ciclo llamado histéresis. Cuando se trata de los transformadores, al ser someter un material magnético a un flujo que varía con el tiempo se produce imantación que se mantiene al cortar el flujo variable, esto provoca una pérdida de energía que se manifiesta en forma de calor.

La pérdida por histéresis es causada por la magnetización y desmagnetización del núcleo a medida que la corriente fluye en dirección directa e inversa. A medida que aumenta la fuerza magnetizante (corriente), aumenta el flujo magnético. Pero cuando la fuerza magnetizante (corriente) disminuye, el flujo magnético no disminuye al mismo ritmo, sino de manera menos gradual. Por lo tanto, cuando la fuerza magnetizante llega a cero, la densidad de flujo todavía tiene un valor positivo. Para que la densidad de flujo llegue a cero, la fuerza magnetizante debe aplicarse en dirección negativa. (González, 2010)

La relación entre la fuerza magnetizante, H , y la densidad de flujo, B , se muestra en una curva o bucle de histéresis. El área del bucle de histéresis muestra la energía necesaria para completar un ciclo completo de magnetización y desmagnetización, y el área del bucle representa la energía perdida durante este proceso.

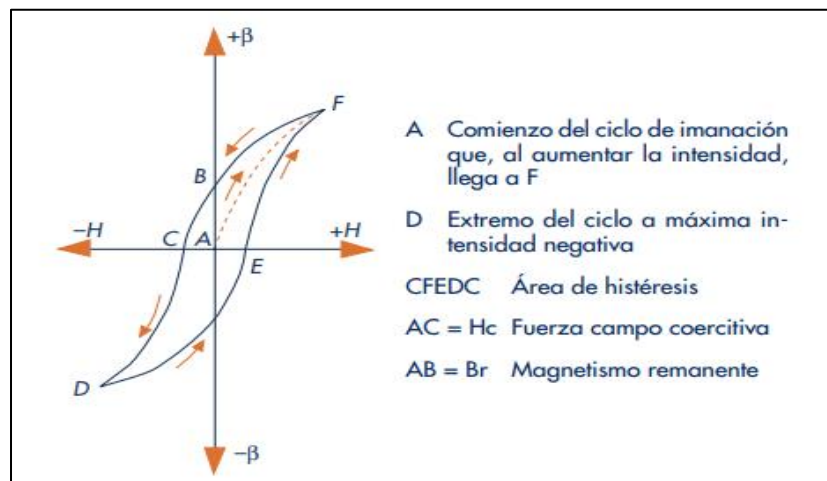


Figura 3: Ciclo de histéresis

La coercitividad, también llamada campo coercitivo o fuerza coercitiva de un material ferromagnético es la intensidad del campo magnético que se debe aplicar a ese material para reducir su imanación a cero después de que la muestra haya sido magnetizada hasta saturación. Por lo tanto, la coercitividad mide la resistencia de un material ferromagnético a ser desimantado. La retentividad magnética es la propiedad de los materiales para retener el magnetismo.

La ecuación para la pérdida por histéresis viene dada por:

$$P_H = K_H f \beta_{max}^n \quad (13)$$

Donde:

P_H : Pérdidas por histéresis (W/kg)

K_H : Coeficiente de histéresis de Steinmetz, dependiendo del material puede estar entre 0.001 para un buen acero al silicio y 0.003 para acero fundido duro (J/m^3)

f : Frecuencia de la señal de excitación (Hz)

β_{max} : Inducción de flujo máxima en Tesla

n : Puede tomar el valor de 1.6 para inducción inferiores a 1 Tesla y 2 para inducciones superiores

Perdidas por corriente parasitas

Se producen en cualquier material conductor que se encuentre sometido a una variación del campo magnético, como núcleos de los transformadores. Están hechos de materiales magnéticos y estos materiales son buenos conductores que generan una fuerza electromotriz inducida que origina corrientes que circulan en el mismo sentido ocasionado por el efecto joule. Las perdidas por corrientes parasitas dependerán del material con el que está construido el núcleo magnético del transformador.

Para reducir estas pérdidas de potencia es necesario que el núcleo del transformador no sea macizo, por lo que el núcleo deberá estar construido por chapas apiladas de espesores muy delgados, colocadas una encima del otro y aisladas entre sí. Al realizar ello, conseguimos que la corriente eléctrica no pueda circular de una chapa a otra y se mantenga independiente en cada una de ellas

con lo que se induce menos corriente y disminuye la potencia de pérdidas por las corrientes parasitas.

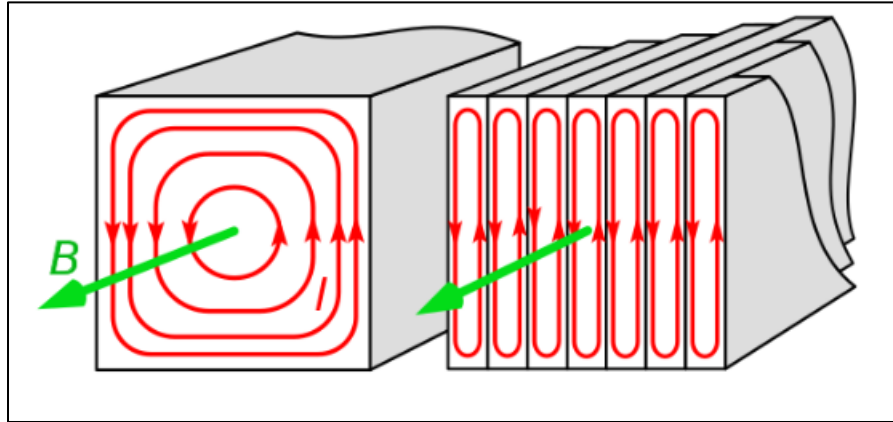


Figura 4: Composición del núcleo por las corrientes parasitas

En los núcleos de bobinas y transformadores se generan tensiones inducidas debido a las variaciones de flujo magnético a que se someten aquellos núcleos. Estas tensiones inducidas son causa de que se produzcan corrientes parásitas en el núcleo (llamadas corrientes de Foucault), que no son óptimas para la buena eficiencia eléctrica de éste. Las corrientes parasitas crean pérdidas de energía a través del efecto Joule. (González, 2010)

La ecuación para la pérdida por corrientes de Foucault viene dada por:

$$P_F = \frac{2.2f^2\beta_{max}^2\Delta^2}{10^{11}} \quad (14)$$

Donde:

P_F : Pérdidas por corrientes de Foucault (W/kg)

f : Frecuencia de la señal de excitación (Hz)

β_{max} : Inducción de flujo máxima en Gauss

Δ : espesor de la chapa magnética en mm

Circuito equivalente del transformador

El circuito equivalente del transformador es la representación del circuito eléctrico de ecuaciones que describen el comportamiento del transformador. Generalmente se reduce el secundario al primario, se reduce ambos devanados al mismo

número de espiras, es decir, $N_2' = N_1$. El circuito equivalente del transformador se muestra en la figura 5.

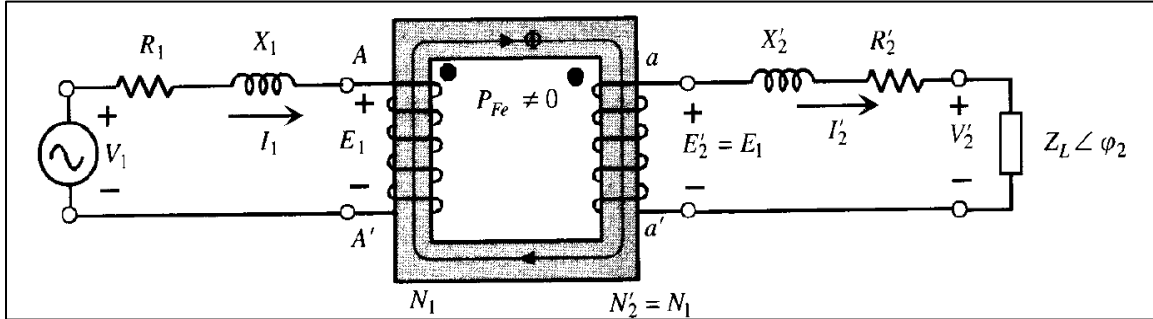


Figura 5: Circuito equivalente del transformador

De acuerdo con el principio de igualdad de potencia o relación de transformación de un transformador ($m = N_1/N_2$) se obtienen las magnitudes secundarias equivalentes:

F.e.m y tensiones:

$$E_2' = E_1 = mE_2 \quad (15)$$

De manera análoga para la tensión V_2' :

$$V_2' = mV_2 \quad (16)$$

Corrientes:

$$I_2' = \frac{I_2}{m} \quad (17)$$

Impedancias:

$$R_2' = m^2 R_2 \quad (18)$$

$$X_2' = m^2 X_2 \quad (19)$$

En general, para cualquier impedancia conectada en el secundario del transformador, se reducirá al primario siguiendo la misma relación de las ecuaciones (18) y (19):

$$Z_L' = m^2 Z_L \quad (20)$$

La corriente de vacío I_0 , tiene dos componentes: corriente de carga y corriente de excitación. Se muestra que circula en el devanado primario del circuito equivalente

de la figura 6, donde la corriente de excitación I_0 se compone de la corriente de pérdida del núcleo I_{Fe} y la corriente de excitación I_μ , se representan como un circuito paralelo formado por una resistencia R_{Fe} , cuyas pérdidas por efecto Joule indican pérdidas en el núcleo del transformador y por una reactancia X_μ por la que se deriva la corriente de magnetización de la máquina. (Mora, 2003)

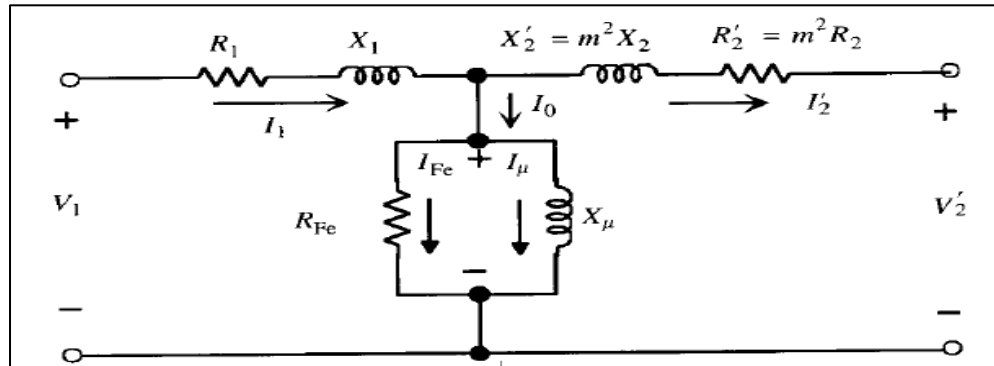


Figura 6: Circuito equivalente del transformador referido al primario

El mismo proceso seguido hasta aquí para obtener el circuito equivalente del transformador referido al primario se puede emplear en sentido inverso, es decir, tomando el primario con un número de espiras $N_1' = N_2$ y dejando inalterado los parámetros del secundario, siendo así el llamado circuito equivalente referido al secundario cuyo esquema y parámetros se indica en la siguiente figura.

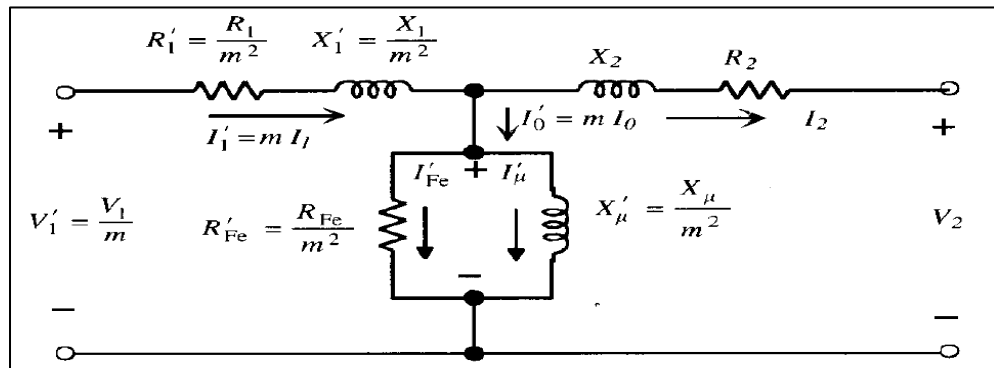


Figura 7: Circuito equivalente del transformador referido al secundario

Para el circuito de la figura 6, en la práctica y debido al reducido valor de I_0 frente a las corrientes I_1 e I_2 , se suele trabajar con un circuito equivalente aproximado que se obtiene trasladando la rama en paralelo por la que se deriva la corriente de vacío a los bornes de entrada del primario, resultando el esquema de la siguiente figura, del cual no se introducen errores apreciables en el cálculo y sin embargo se simplifica enormemente el análisis de la máquina.

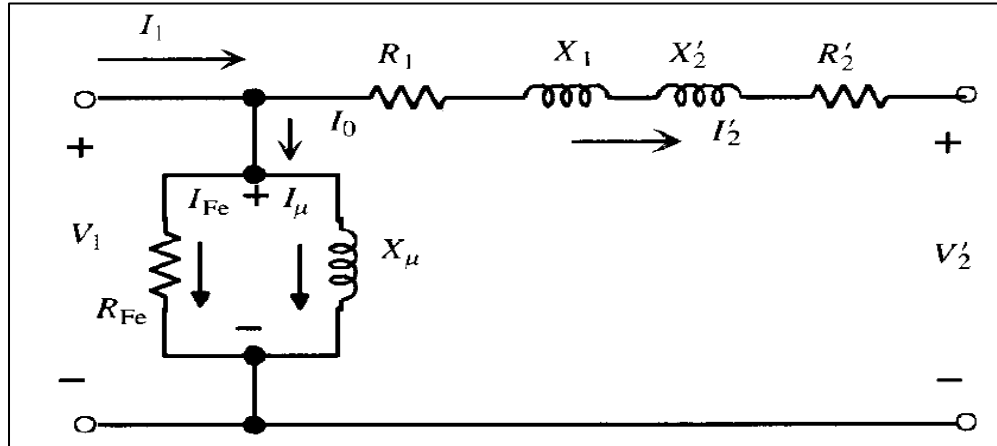


Figura 8: Circuito equivalente del transformador referido al primario

El esquema de la figura 8 puede ser simplificado aún más observando la conexión en serie construida por las ramas primaria y secundaria, si se denomina:

$$R_{cc} = R_1 + R_2' \quad (21)$$

$$X_{cc} = X_1 + X_2' \quad (22)$$

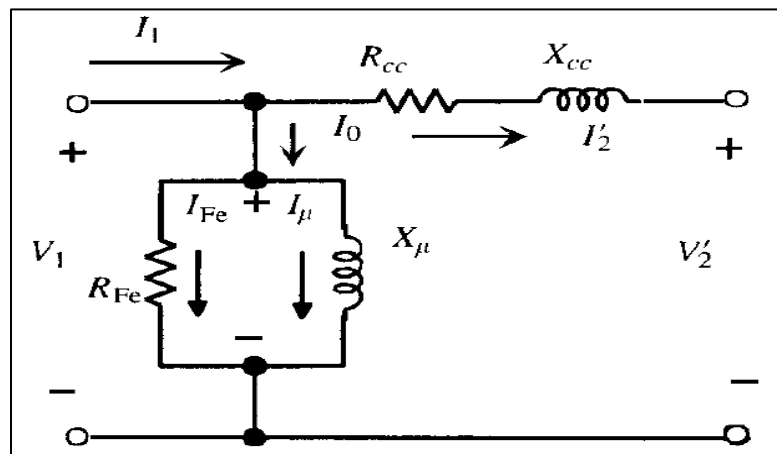


Figura 9: Circuito equivalente simplificado del transformador

Con ayuda de este último circuito equivalente simplificado pueden resolverse una serie de problemas prácticos que afectan a la utilidad del transformador, en particular para el cálculo de la caída de tensión y el rendimiento. Inclusive, si en un problema real se requiere únicamente la determinación de la caída de tensión del transformador se puede omitir la rama en paralelo, ya que no afecta en el cálculo, de este modo el circuito resultante será la impedancia en serie $R_{cc} + jX_{cc}$. En grandes transformadores con una clasificación mayor de 500kVA se cumple que X_{cc} es varias veces R_{cc} , se puede utilizar solamente la reactancia serie X_{cc} . Así mismo el esquema final se utiliza cuando se realizan estudios de grandes redes eléctricas de potencia. (Mora, 2003)

Transformadores monofásicos de distribución

Un transformador de distribución es un transformador que suministra la última etapa de transformación de la red de distribución eléctrica, al reducir la alta tensión a un nivel de tensión requerida para el consumo del usuario final.

Estos transformadores generalmente su capacidad va de: 5kVA, 10kVA, 15kVA, 25kVA, 37.5kVA, 50kVA, 75kVA, 100kVA, 167kVA, 333kVA y su nivel de tensión primaria para su operación no debe ser mayor de 34.5kV conectado a una línea-neutro en la red aérea de media tensión, con una tensión de salida en baja tensión secundaria de 120V, 240V.

Componentes de un transformador de distribución

Las partes que componen un transformador son clasificados en los siguientes cuatro grupos: (Acevedo, 2007)

Circuito magnético

El circuito magnético se conoce comúnmente como núcleo, es el área por el que fluye el campo magnético generado entre las bobinas del lado primario y lado secundario. Usualmente, está formado por varias chapas de material ferromagnético (acero al silicio) apiladas entre ellas sin soldar. Esta condición de laminado se brinda justamente para disminuir las corrientes parásitas, y, por lo

tanto, disminuir la cantidad de pérdidas en el hierro. Así mismo, la disposición del núcleo se construye en los siguientes dos tipos:

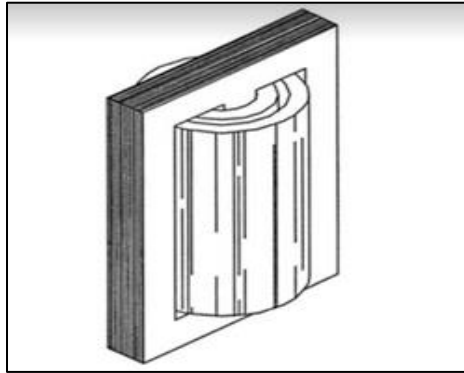


Figura 10: Forma del núcleo acorazado

Núcleo acorazado: también conocido como tipo “Shell”, donde el devanado secundario se enrolla encima del devanado primario con una disposición concéntrica.

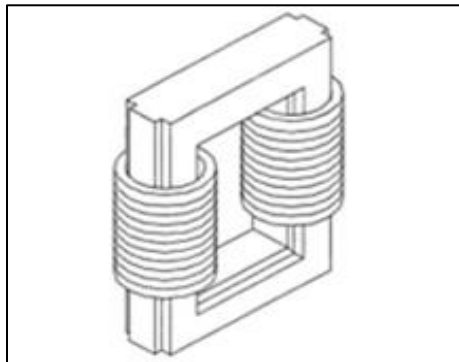


Figura 11: Forma del núcleo no acorazado

Núcleo no acorazado: también conocido como tipo “Columna” o “Core”, donde el devanado primario y secundario se enrollan en lados opuestos del núcleo, y es la disposición en la cual los devanados abarcan una parte considerable del núcleo.

Circuito eléctrico

Los devanados son la parte que componen los circuitos eléctricos del transformador, estas pueden fabricarse de diferentes formas dependiendo de la

necesidad del diseño y de los conductores que se utilicen como lo son el cobre y el aluminio.

Sistema de aislamiento

Como las partes de un transformador operan a distintos niveles de voltaje, se requiere de elementos aislantes para evitar los arcos eléctricos que generan la degradación de las partes internas y el aislamiento puede ser:

- ✓ Entre devanado y núcleo: suele ser de papel con aceite mineral
- ✓ Entre devanados: al igual que con el núcleo, se usa papel impregnado en aceite mineral
- ✓ Entre espiras consecutivas: hilos de cobre o aluminio barnizado.

Tanque, herrajes y accesorios

Los transformadores deben estar contenidos en un tanque hermético, con el objetivo de preservar el aceite, ya que tiene la función de dieléctrico y refrigerante del conjunto de núcleo-devanado, entre los accesorios más importantes del transformador de distribución, están:

- ✓ Bushings de media tensión
- ✓ Terminales de baja tensión
- ✓ Válvula de sobrepresión
- ✓ Soportes de montaje
- ✓ Cambiador de derivaciones

Configuración de terminales en transformadores de distribución

H designa los terminales de alta tensión o lado primario. Cuando se mira hacia el frente del transformador, H1 es siempre el terminal de la izquierda. Si el transformador tiene un segundo terminal primario, es H2. Los transformadores de un solo terminal, se conecta el otro extremo del devanado al tanque del transformador, como tierra. (Alexander, 2017)

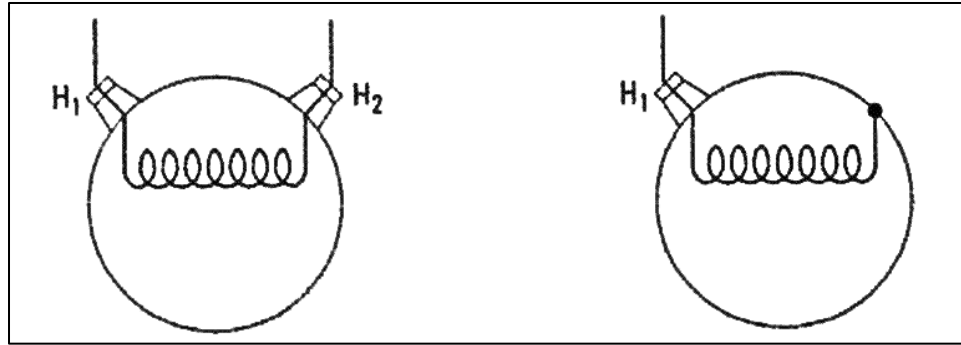


Figura 12: Designación de terminales en el lado de alta tensión

X designa los terminales de baja tensión o lado secundario. En transformadores con polaridad aditiva, los terminales están enumerados de derecha a izquierda, siendo: X3, X2, X1. En transformadores con polaridad sustractiva, los terminales están enumerados de izquierda a derecha, siendo: X1, X2, X3.

El lado secundario del transformador puede tener un devanado y dos terminales, o dos devanados (el más común) de igual tamaño, con tres o cuatro terminales. Dentro del transformador, los extremos del devanado izquierdo se pueden denominar como A y B, los extremos del devanado derecho se pueden denominar como C y D. (Alexander, 2017)

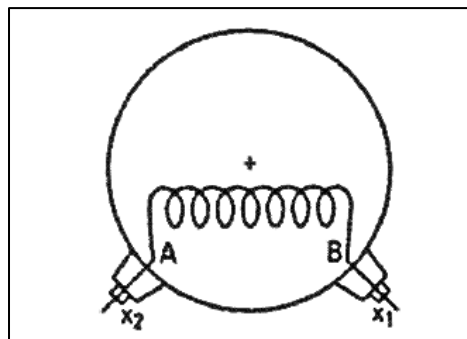


Figura 13: Dos terminales, un devanado en el lado de baja tensión

Tres terminales, dos devanados en el lado secundario conectados en serie. Esta es la configuración más común para transformadores con tres terminales en el lado de baja tensión, ya que con esta configuración puede proporcionar un servicio de 240V entre X1 y X3, y dos servicios de 120V en X1 a X3 y X2 a X3.

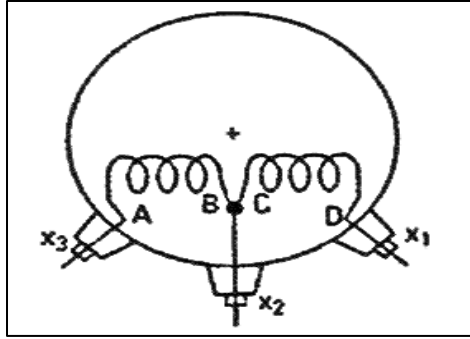


Figura 14: Tres terminales, dos devanados conectados en serie en lado de baja tensión

Tres terminales, dos devanados secundarios conectados en paralelo. La conexión anterior cuenta con dos servicios de 120V, en esta conexión tiene un solo servicio de 120V, pero puede entregar el doble de corriente. En ambas conexiones entregan los mismo kVA, aquí los devanados del lado secundario se conectan X1 a X3 y se deja libre X2. En algunos casos se conectan X1 a X3 dejando libre X2. Se puede realizar el cambio de una conexión en serie a paralelo teniendo desenergizado, abrir la tapa y reposicionar las conexiones secundarias, realizar este procedimiento se debe tener cuidado de no contaminar el aceite ni dejar a caer nada dentro del tanque del transformador. (Alexander, 2017)

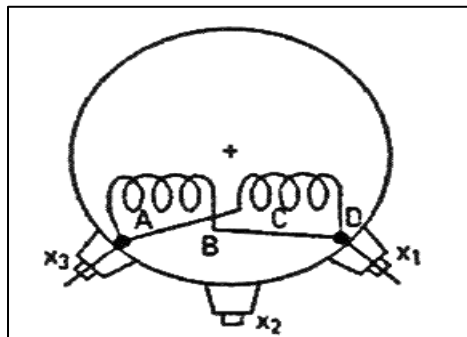


Figura 15: Tres terminales, dos devanados conectados en paralelo en lado de baja tensión

Los transformadores de cuatro terminales en el lado de baja tensión permiten el acceso externo a todos los extremos de los devanados secundarios, esto elimina la necesidad de abrir el transformador para reconfigurar las conexiones. Se observa en la figura 16, los extremos de los devanados en el medio se cruzan

formando las designaciones de los devanados internos en los terminales externos de izquierda a derecha: A-C-B-D o X4, X2, X3, X1, se cruzan los terminales X2 y X3. Esta configuración es para transformadores con capacidad mayores a 100kVA. (Alexander, 2017)

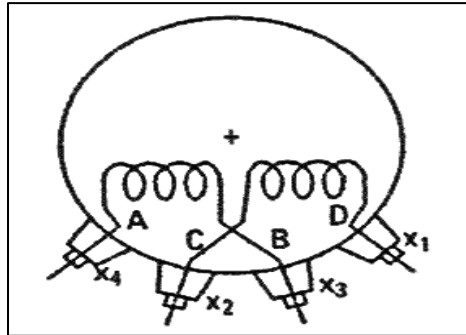


Figura 16: Cuatro terminales, dos devanados en devanado de baja tensión

Polaridad en transformadores de distribución

La polaridad del transformador se refiere a la relación entre el voltaje primario y el voltaje secundario, hay dos posibilidades: los voltajes están en fase o desfasados 180° , depende de si los devanados primario y secundario están enrollados en la misma dirección o dirección opuesta. En otras palabras, la polaridad indica el sentido relativo del flujo de corriente en los terminales de alta tensión con respecto a la dirección del flujo de corriente en los terminales de baja tensión.

La polaridad no es importante cuando un transformador monofásico se instala solo, pero es extremadamente importante cuando los transformadores se instalan en paralelo o como un banco.

En el transformador de polaridad aditiva, el terminal secundario X1 está localizado de forma diagonal a H1.

En el transformador de polaridad sustractiva, el terminal secundario X1 está localizado al mismo lado de H1.

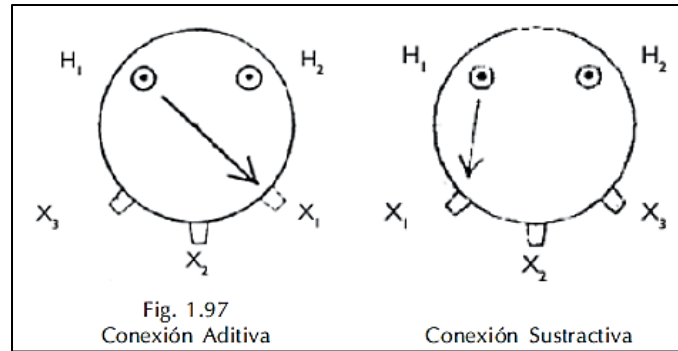


Figura 17: Identificación de polaridad en transformadores monofásicos

Se ha establecido como regla que para transformadores de distribución monofásicos de hasta 200kVA con voltajes en el lado de alta tensión de hasta 8600V o menor, son de polaridad aditiva y todos los demás transformadores monofásicos tienen polaridad sustractiva. (Alexander, 2017)

Designación de voltajes del transformador

Se utiliza una barra diagonal (/) para definir voltajes que se pueden aplicar al devanado primario de un transformador, o los voltajes disponibles en los devanados secundarios. Por ejemplo, en el primario:

- 7,200/12,460 GrdY
- 14,400/24,940Y
- 4,160/7,200 GroundedY

El primer número (7,200, 14,400, 4,160) es el voltaje que se puede aplicar a través del devanado primario. Si el transformador está instalado en un sistema en estrella, este primer número es la fase a neutro de tensión primaria, el segundo número es el voltaje que se obtendrá fase a fase (en un sistema en estrella, el voltaje entre fases es 1.73 veces el voltaje entre fases y el punto central de la estrella). Si el transformador está instalado en un sistema en triángulo, el primer número es el voltaje primario entre fases y el segundo número no es aplicable en una instalación en triángulo. (Alexander, 2017)

Capítulo 1: Procedimientos de uso y funcionamientos de los equipos de prueba existentes.

1. Introducción

Cuando estamos listos para efectuar una prueba en un ambiente de alto voltaje, deben seguirse las precauciones generales de seguridad, ya que los equipos de alta tensión pueden suministrar VOLTAJES POTENCIALMENTE MORTALES. La operación o las prácticas de prueba inapropiadas pueden causar lesiones fatales al operador o del personal que se encuentre cerca.

La operación del equipo de prueba de alto voltaje sólo debe ser realizada por personal familiarizado con los equipos de prueba y con los procedimientos de seguridad. El operador que trabaje con los equipos debe ser consciente de todos los peligros asociados a las pruebas eléctricas.

A continuación, se enumeran algunas prácticas generales de seguridad para trabajar con equipos de prueba de alta tensión para su referencia.

1. Familiarícese con el equipo de prueba antes de realizar una prueba real.
2. Conozca su área de trabajo, compruebe que todos los circuitos están sin tensión y bloqueados.
3. No trabaje nunca solo; hágalo siempre con otro trabajador cualificado.
4. Acotar toda la zona de trabajo con barreras y cinta de advertencia.
5. Haga que todo el personal esté al tanto de sus actividades de prueba.
6. Sea consciente de las condiciones peligrosas que pueden surgir al energizar una muestra de la prueba.
7. Nunca modifique el equipo de prueba, las modificaciones al equipo podrían introducir un peligro desconocido o dificultar una característica de seguridad diseñada.

2. Información general para el equipo de prueba de rigidez dieléctrica.

El equipo de prueba dieléctrica de líquidos, modelo LD60, está diseñado para probar y medir la ruptura dieléctrica del aceite aislante utilizado en transformadores y otros equipos de alto voltaje relacionados, de acuerdo con la norma ASTM D877, con la celda de prueba TC/DE (electrodos planos) de discos de latón pulido de 25 mm de diámetro con una fijación de la brecha de 0.1"

El equipo de prueba es totalmente automático. El líquido para ensayar se coloca en la celda de prueba y luego se coloca en el compartimiento de prueba sobre los contactos de la cuna, se ajusta la velocidad de subida de la tensión seleccionable con tres velocidades de 500/2000/3000 Voltios por segundo, se cierra la tapa de la cámara de prueba y se mueve el interruptor a la posición de inicio. El equipo de prueba aumentará automáticamente la tensión. Cuando se produce la ruptura del líquido, la lámpara de fallo se iluminará y el nivel de ruptura se podrá leer en la pantalla del voltímetro.

Este equipo de prueba es de tipo portátil, incorporado en un robusto maletín de transporte. Debajo y protegido por la tapa se encuentra el panel de control con el voltímetro, así como el compartimiento de prueba de alta tensión. El compartimiento de pruebas está provisto de una tapa transparente interconectada al circuito de pruebas con un interruptor de límite para garantizar la seguridad total de la operación.

2.1. Especificaciones técnicas

N° Modelo	Voltaje de Entrada	Voltaje de Salida	Tensión Seleccionable	Mediciones			Tamaño Pulgada	Peso (Kg)	Condición Ambiental
				Rango	Tipo	Precisión			
LD 60	120 voltios a 60 Hz	0-60 kV RMS	500/2000/3000 Voltios por segundo	0-60 kV	Digital	+/- 1%	24 1/4" ancho 16 3/4" largo 13 3/4" alto	23	10-40°C, interior/exterior

Tabla 1: Especificaciones del equipo de prueba dieléctrica

Tipo	Estándar de Prueba	Electrodo de Prueba		Ajuste de la Brecha
TC/DE (electrodos planos)	ASTM D877	Disco de bronce pulido de 25mm (1") de diámetro		0.1" +/-0.0005"

Tabla 2: Especificaciones de la celda de prueba

2.2. Controles de Panel Principal

Equipo de prueba dieléctrica de aceite Phenix Technologies LD60.

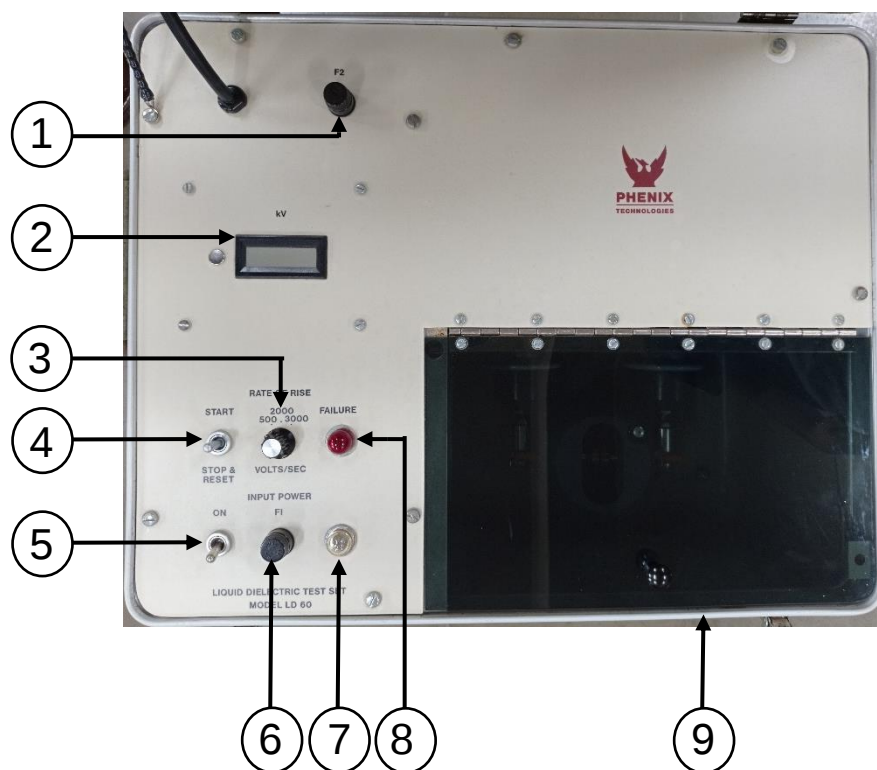


Figura 18: Equipo de pruebas Phenix LD60

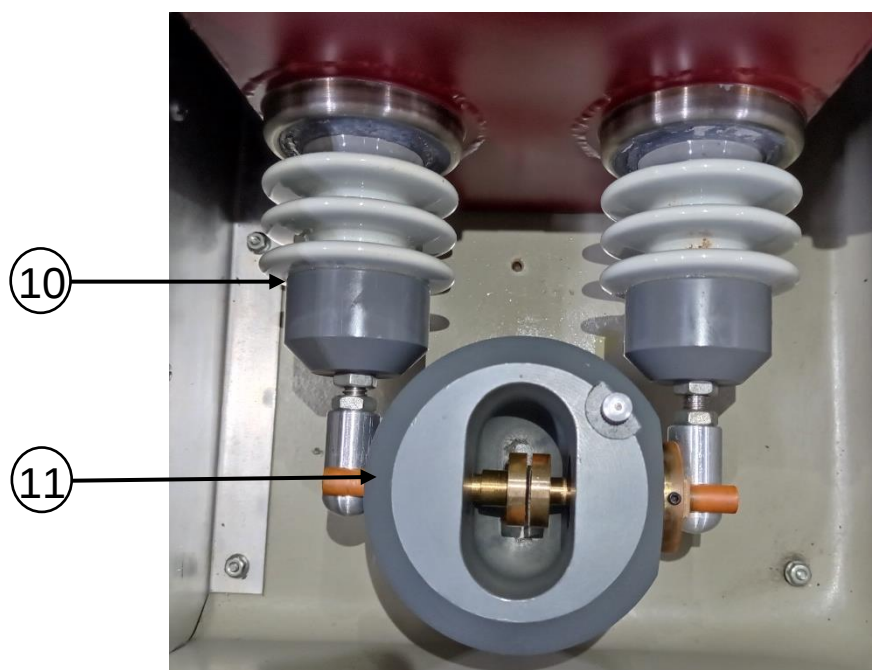


Figura 19: Soporte interno de la cuba de aceite del equipo de prueba

Descripción de los elementos del panel principal:



1- Fusible F2: Es una protección contra cualquier falla que pueda ocurrir en el equipo, la capacidad de este fusible es para dos tipos de alimentación, una a 120V, 5A y 240V, 3A.



2- Pantalla: En este módulo se puede visualizar como aumenta la tensión según la selección del regulador de voltaje e indica el nivel de ruptura al ocurrir la falla.



3- Regulador de Voltaje:

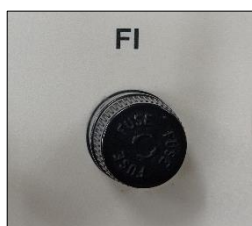
Este interruptor se utiliza para seleccionar el nivel de voltios por segundo aplicado al aceite dieléctrico, el rango seleccionable con tres velocidades es 500/2000/3000.



4- Swich de STAR (inicio): Este interruptor tiene dos funciones, la primera es iniciar la prueba aplicando el voltaje seleccionado y la segunda función es detener y reiniciar para una nueva lectura.



5- Swich ON de encendido: Este interruptor es el que enciende o apaga al equipo cuando es conectado a la red eléctrica.



6- Fusible F1: Es una protección contra cualquier falla que pueda ocurrir en el equipo, la capacidad de este fusible es para dos tipos de alimentación, una a 120V, 5A y 240V, 3A.



7- Luz Piloto Naranja: Este es un indicador visual que permite saber si el equipo está encendido o está apagado, aunque se encuentre conectado a la red eléctrica.



8- Luz Piloto Roja: Este indicador visual permite saber cuándo se dio la ruptura dieléctrica dentro del aceite.



9- Visor o Tapa: Tapa de color oscuro que protege al usuario de la celda cuando se realizan las pruebas pertinentes.



10- Soporte o Bushin: También conocida como cuna y su función es la de sostener la celda de prueba y por medio de las barras aplicar el voltaje a la celda.



11- Celda de Prueba: Celda tipo TC/DE está compuesto por disco de latón pulido y su función es de almacenar el aceite para las pruebas. Este cuenta con un calibrador en la parte superior derecha con el cual se ajusta los discos internos.

2.3. Instrucciones de Uso y Seguridad

2.3.1. Instrucciones de instalación y conexión a tierra.

Para llevar a cabo la instalación para este equipo se debe llevar a cabo una serie de pasos tales como:

- A. Colocar el equipo de prueba sobre una mesa o superficie plana similar.
- B. Hay que asegurar que el equipo de prueba esté nivelado.
- C. Abrir el equipo de prueba.

- D. Comprobar que la tensión de entrada corresponda con la entrada de tensión del equipo de prueba.
- E. Comprobar que el tomacorriente tenga conexión a tierra.
- F. Conectar el cable de alimentación al tomacorriente.
- G. El equipo de prueba está instalado y listo para funcionar.

2.3.2. Instrucciones con celda de prueba TC/DE (ASTM D877)

Antes de llevar a cabo una prueba primero se debe verificar o ajustar la brecha de los electrodos de la celda de prueba mediante los siguientes pasos:

- A. Ajustar el electrodo de la celda de prueba mediante el uso de la varilla de medición situada en la celda de prueba de la siguiente manera:
 - a. Retirar la varilla de medición desenroscándola de su soporte.
 - b. Soltar el tornillo de fijación, que mantiene el electrodo ajustable en su lugar en la celda de prueba.
 - c. Colocar la varilla de medición entre los electrodos.
 - d. Mover el electrodo ajustable hasta que quede ajustado a la varilla de medición.
 - e. Apretar moderadamente el tornillo de fijación para asegurar la posición.
 - f. Retire la varilla de medición y colocarla en su soporte para guardarla. La distancia entre los electrodos debe ser de 0.1" si no se utiliza la varilla de medición.
- B. Llenar la celda de prueba con la muestra de aceite según el procedimiento estándar.
- C. Colocar la celda de prueba en la cámara de prueba de la unidad y cerrar la tapa de la cámara.
- D. Encender el interruptor ON de alimentación de CA.
- E. Seleccionar una tasa de aumento entre 500/2000/3000 voltios por segundo.
- F. Mover el interruptor de inicio a la posición START cuando se hayan cumplido los requisitos.
- G. Se encenderá la alta tensión; la unidad aumentará automáticamente la tensión a la velocidad deseada por segundo hasta que se produzca el fallo.

- H. Si se produce un fallo, la tensión se cortará, el indicador luminoso de fallo se iluminará y la tensión de ruptura se indicará en el kilo voltímetro.
- I. Para volver a cero, ponga el interruptor de START en la posición de STOP/RESET.
- J. Retire la muestra de aceite de prueba y repita el procedimiento anterior para otras muestras.

2.3.3. Seguridad y responsabilidad del operador

El equipo LD60 de prueba de rigidez dieléctrica debe ser utilizado por el operador que debe leer y comprender el manual de instrucciones completo antes de operar el equipo y en el caso de que el equipo funcione mal, la unidad debe ser desenergizada de inmediato. Este equipo debe ser considerado como una fuente de energía eléctrica capaz de producir lesiones letales de forma instantánea. Respetar las siguientes precauciones de seguridad:

- ✓ Utilice este equipo solamente para los propósitos descritos en esta guía. Respete la información de advertencia.
- ✓ Nunca conecte el equipo de prueba a un equipo energizado.
- ✓ Desconectar siempre los cables de prueba de los equipos bajo prueba antes de intentar desconectarlos del equipo de prueba.
- ✓ El personal debe utilizar equipo de seguridad adecuado para prevenir lesiones corporales.
- ✓ Utilice barreras, barricadas y/o advertencias para mantener alejadas de las actividades de prueba a personas que no están directamente involucradas con el trabajo.
- ✓ Utilice todas las precauciones de seguridad prácticas para evitar el contacto con las partes energizadas del equipo y los circuitos relacionados.

Antes de conectar el equipo de prueba a la fuente de alimentación, verificar que el enchufe de entrada de potencia debe ser insertado solamente en un tomacorriente adecuado con un contacto de tierra.

2.4. Detalles encontrados en el equipo de prueba

En esta sección se detallan los hallazgos encontrados en el equipo de prueba Phenix Technologies modelo LD 60, para realizar la prueba de ruptura dieléctrica del aceite mineral ocupado en transformadores. Siendo los siguiente que se encontró:

1. La fecha de fabricación del equipo de prueba es de diciembre – 1994.
2. El equipo no ha tenido calibraciones, por ende, las lecturas mostradas pueden ser no precisas.
3. Al encender el equipo la pantalla del kilo voltímetro muestra un valor de 00.2, el cual es indicativo de que necesita ser calibrado.
4. El estado de la maleta físicamente se encuentra bien.
5. Accesorios como cable de alimentación, fusibles, luces indicadoras, cuba de la celda de prueba, tapa de visor, se encuentran en buenas condiciones.

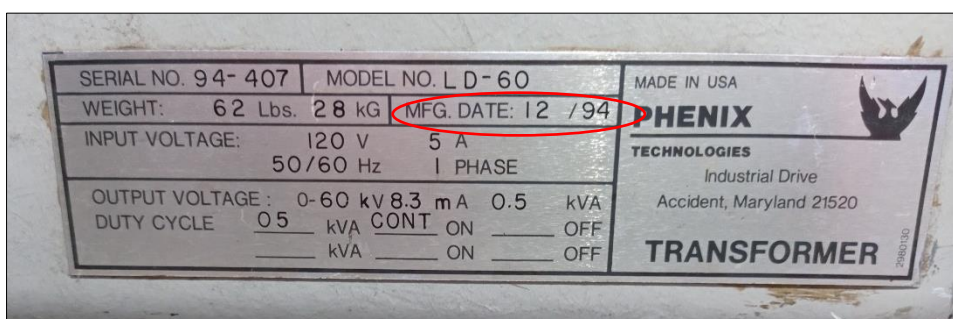


Figura 20: Placa característica del equipo de prueba LD-60



Figura 21: Error de lectura al momento de encender el equipo de prueba

3. Información general para el equipo de prueba de aislamiento

La línea de Hipot (alta potencia) CC que ofrece Phenix Technologies tiene una construcción robusta y es adecuado para uso en campo o laboratorio. Son especialmente útiles para cuando se necesita determinar la idoneidad del aislamiento recién instalado o para determinar cuándo se necesitan pasos correctivos para devolver el equipo a una condición de operación segura.

El sistema de Prueba de Aislamiento, modelo 470-5, ha sido diseñado para suministrar voltajes empleados para probar y medir el nivel aislamiento en los transformadores de distribución. El sistema de prueba es de tipo portátil construido dentro de un casco de fibra de vidrio y provisto de un panel frontal que consta de selectores de rangos terminales de salida, LED indicadores, voltímetro y amperímetros con diferentes tipos de escalas las cuales se pueden variar para lograr una mayor exactitud en la medición.

Los resultados de las pruebas de CC ayudaran a predecir la vida útil del aislamiento, establecer un programa de pruebas de mantenimiento constante reduce las fallas y prolonga la vida útil del equipo. Las pruebas de CC son populares porque el equipo de prueba es más compacto y liviano que un equipo de CA comparable y en general, también menos costosos.

El equipo 470-5 proporciona hasta 70 kV de CC con seguridad, precisión y facilidad de uso. Las características de seguridad incluyen protección de sobrecarga instantánea y térmica para el operador y el objeto de prueba, cable de alto voltaje blindado y características de puesta a tierra cuidadosamente diseñadas. El equipo tiene 3 rangos de mediciones seleccionables que va de 0-14/35/70 kV, incluye características como:

- ✓ Control manual del voltaje de salida.
- ✓ Pulsadores de encendido/apagado de alto voltaje con indicadores.
- ✓ Circuito de sobrecarga ajustable con indicador e interruptor de reinicio.
- ✓ Circuito de descarga incorporado.
- ✓ Medición multi rango.
- ✓ Modo de protección para mediciones de corriente precisas.
- ✓ Disposición de enclavamiento externo.
- ✓ Interbloqueo de arranque cero.

3.1. Especificaciones técnicas

N° Modelo	Alimentación Principal	Mediciones				Ciclo de trabajo a 70kV		Peso (kg)	Tamaño	Condición Ambiental
		Rango de Voltaje	Rango de Corriente	Tipo	Precisión	ON	OFF			
470-5	120V, 4.4A, 60Hz	0- 14/35/70 kV	0-5/50/500/5000 μ A 0-x1/x10/x100/x1k	Analógico	+/- 2%	1 hora	1 hora	41	21" ancho 17" largo 14" alto	10-40°C Interior Exterior

Tabla 3: Especificaciones del equipo de prueba de aislamiento

Humedad: <90%

3.2. Controles del panel principal

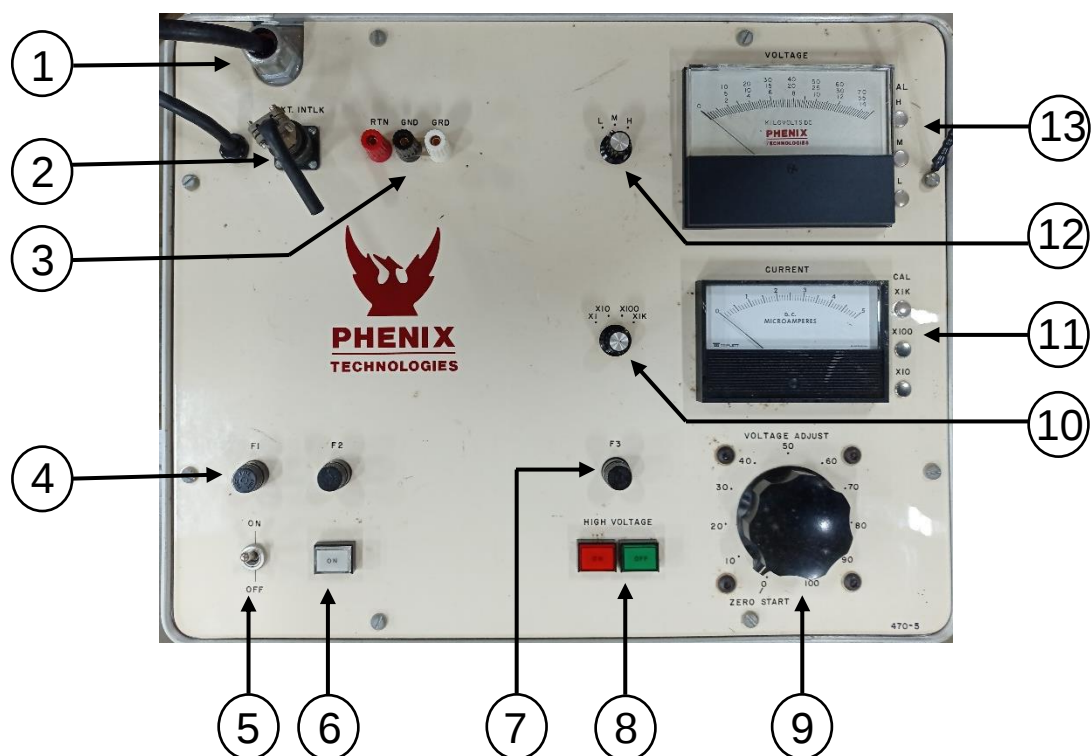


Figura 22: Equipo Phenix 470-5

Descripción de los elementos del panel principal:



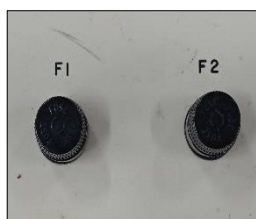
1- Cable de salida de alto voltaje: Este cable se conectará con el equipo bajo prueba.



2- Interruptor de interbloqueo externo: Los contactos se mantienen cerrados durante la prueba, se puede sustituir con algún interruptor de pie.



3- Terminales de conexión: Terminal de retorno RTN, punto para medir la corriente de salida del equipo de prueba. Terminal de tierra GND, punto de conexión a tierra. Terminal de guarda GRD, donde las corrientes que necesitan pasar por alto en el medidor de corriente.



4- Fusibles principales: F1 y F2, fusible de potencia de control 1Amp, se puede verificar su estado presionando hacia abajo y girar en sentido antihorario para extraerlo.



5- Interruptor de alimentación principal: Posición OFF sin alimentación y posición ON con alimentación.



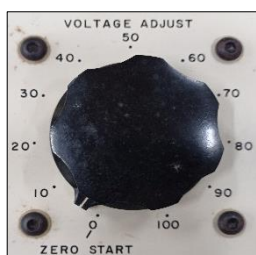
6- Indicador de alimentación principal: Se iluminará ON para indicar que la energía eléctrica está presente en el equipo.



7-. Fusible de respaldo: F3 fusible de potencia de control, se puede verificar su estado presionando hacia abajo y girar en sentido antihorario para extraerlo.



8-. Botones para alto voltaje: Posición ON está apagado y posición OFF este encendido el alto voltaje. Se debe estar el control de tension en la posición 0 en cualquier momento.



9-. Control de voltaje de salida: Para aumentar la salida de voltaje del equipo de prueba girar en sentido de las agujas del reloj de forma gradual hasta alcanzar el voltaje requerido.



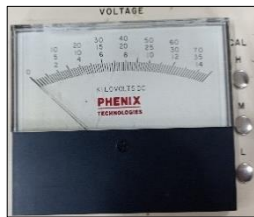
10-. Selector de rango del medidor de corriente: Girar en el rango deseado, al probar muestras que son capacitivas (como transformadores es necesario colocar en la posición X1K).



11-. Amperímetro analógico: Muestra la corriente de prueba según en el rango seleccionado.



12-. Selector del rango del voltaje de salida:
Selección para ajustar el voltaje máximo de salida,
L: 0 - 14 kV, M: 0 - 35 kV y H: 0 – 70 kV



13-. Voltímetro analógico: Muestra el voltaje de salida en kV según el rango seleccionado.

3.3. Instrucciones de uso y seguridad

3.3.1. Instalación eléctrica para el uso del equipo de prueba.

Para la conexión de alto voltaje se deben seguir los siguientes pasos antes de realizar la prueba:

1. Localizar la ubicación deseada para el equipo, prepare el cable de entrada para alimentación principal y conectarlo a la fuente de alimentación adecuada para el equipo.
2. Verificar que el interruptor de alimentación principal este en la posición OFF antes de continuar.
3. Colocar el medidor de corriente en el modo de operación deseada conectando el clip entre los puntos de conexión de retorno RTN y tierra GND o guarda GRD y tierra GND, aunque la conexión normal es entre RTN y GND. Leer más sobre estas conexiones en la sección: conexiones del panel frontal.
4. Conectar la conexión de tierra GND a la tierra de la instalación usando el cable provisto por el equipo.
5. Conectar en el lado de bajo voltaje de la muestra bajo prueba al terminal de retorno RTN provisto por el cable proporcionado por el equipo.

6. Conectar el cable de salida de alto voltaje al lado de alto voltaje de la muestra bajo prueba, mantener la parte blindada del cable de alto voltaje alejada de los puntos de conexión de la muestra bajo prueba.
7. Leer y comprender la sección de las instrucciones de operación completas antes de aplicar la prueba.

ADVERTENCIA

El contacto inadecuado con los cables de prueba de este equipo puede causar descargas eléctricas dañinas o fatales por lo que no se debe tocar los cables mientras se esté ejecutando una prueba.

3.3.2. Instrucciones de operación

Antes de ejecutar una prueba se deben conocer los procedimientos para llevarse a cabo, por lo que se deben seguir los siguientes pasos:

1. Asegurarse que las conexiones eléctricas se hayan realizado adecuadamente.
2. Verificar que el disco de control de voltaje esté en la posición inicial "0".
3. Seleccionar apropiadamente el rango del voltímetro y el rango del amperímetro.
4. Encender el interruptor de alimentación principal, la lámpara de ON se iluminará.
5. Presionar momentáneamente el botón de HV ON, el alto voltaje se aplicará y se iluminará el interruptor HV ON.
6. Con el HV en la posición ON girar el disco de control de voltaje de salida y observar el voltímetro hasta alcanzar el nivel de kV deseado al igual que el amperímetro.

Nota: al probar transformadores, por comportamiento natural capacitivo, es necesario colocar el interruptor del amperímetro en la posición X1K.

7. Registrar los datos obtenidos en las mediciones.
8. Reducir el voltaje de salida a 0 después de completar la prueba.
9. Presionar el botón HV OFF así el alto voltaje desaparecerá, se apagará la iluminación del botón HV ON y se iluminará el botón de HV OFF.

10. Después de concluir con la prueba, apague el interruptor de alimentación principal y retire el cable de alimentación de entrada de la fuente de alimentación de la instalación.

3.3.3. Falla por sobre corriente

Si ocurre esta situación, el relé de sobrecorriente se activará desenergizando el equipo (HV OFF). Para recobrar el alto voltaje, el disco de control de salida de voltaje debe regresar a la posición 0 y el botón que enciende el alto voltaje HV ON debe ser bajado momentáneamente para volverlo a encender

Cualquier fallo interno en la sección de alto voltaje o sobrecorriente masiva serán detectadas por los fusibles del panel frontal (F1, F2 y F3). Si esto ocurre, entonces apague el interruptor de alimentación principal y checar los fusibles si sufrieron algún daño. Vuelva a chequear las conexiones para realizar la prueba y repita las instrucciones de operación.

3.3.4. Cálculo de mega-ohmios MΩ

Con los datos obtenidos durante la prueba, la resistencia de aislamiento del objeto de prueba se puede determinar de forma manual y es la desventaja de este equipo de prueba, realizando mediante la fórmula de Ley de Ohm:

$R = V/I$, cuando el voltaje V están en kilovoltios kV y las corrientes en miliamperios mA, directamente nos da como resultado la resistencia en megaohmios MΩ.

Si aplicamos una tensión continua de valor conocido (por ejemplo: 2.5 kV) y después medimos la corriente en circulación, se determina fácilmente la resistencia. La medición de la resistencia de aislamiento se encuentra en rangos de MΩ o superiores para indicar el buen estado del aislamiento.

Luego se realiza el diagnóstico del aislamiento según sea el criterio para interpretar los resultados como Índice de Polarización (IP) o Relación de Absorción Dieléctrica (DAR), métodos que se describirán más adelante.

3.3.5. Conexiones del panel frontal RTN, GND, GRD

Este equipo de prueba contiene la función de medir la corriente útil en la medición de diferentes fuentes de corriente.

Modo de retorno (RTN)

El panel frontal tiene conectado a sus bornes un clip instalado entre el borne GND y RTN, este modo mide toda la corriente de salida que fluye del lado alto voltaje de la muestra de prueba a tierra y entonces el amperímetro censa la corriente de retorno de la tierra a la terminal RTN del lado de alto voltaje de la muestra bajo prueba. Todas las corrientes a tierra GND y retorno RTN se medirán en este modo, la mayoría de las mediciones solo se utilizan estas terminales. El equipo suministra el alto voltaje en la terminal RTN con respecto a GND, y la corriente se mide en el terminal de GND. Cualquier conexión a GRD debe ser aislada de GND en este modo.

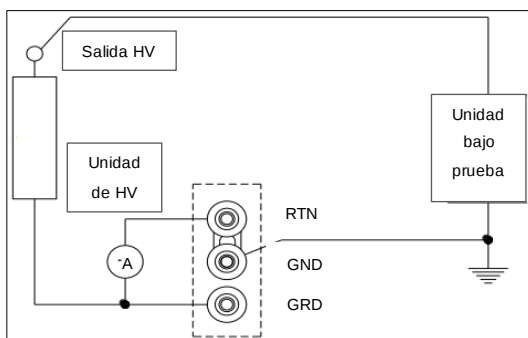


Figura 23: Diagrama simplificado de conexión en modo remoto

Modo de guarda (GRD)

En este modo, el clip o puente de tierra GND está conectado al terminal de guarda GRD, si hay un cambio significativo en la cantidad de corriente siendo drenada a tierra, pasando por la muestra en prueba, se usa el modo de conexión GRD. Cualquier corriente de fuga a tierra o de fuentes conectadas a GRD pasaran por alto en el medidor de corriente, es decir, no se medirá.

Cuando sea necesario eliminar el efecto de fugas de corriente en pruebas de alto voltajes se puede fijar alrededor del aislamiento y conectarlo a la terminal de GRD. La misma terminal se encuentra en el mismo potencial que la terminal negativa, dado que la fuga esta efectivamente en paralelo con la resistencia a medir, en general el uso de la terminal GRD hace que la corriente que fluye a través de la fuga en la superficie debido a suciedad o humedad esta se desvíe del circuito de medición.

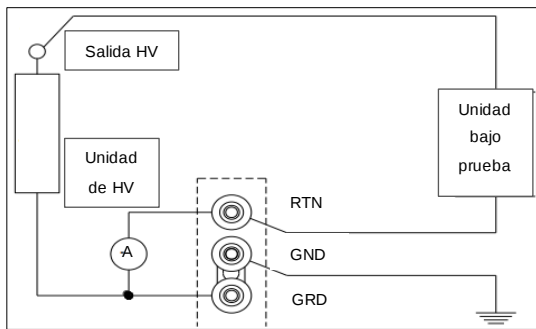


Figura 24: Diagrama simplificado de conexión en modo guarda

3.3.6. Seguridad y responsabilidad del operador

El equipo 470-5 para prueba de aislamiento debe ser utilizado por el operador que debe leer y comprender el manual de instrucciones completo antes de operar el equipo y en el caso de que el equipo funcione mal, la unidad debe ser desenergizada de inmediato. Este equipo debe ser considerado como una fuente de energía eléctrica capaz de producir lesiones letales de forma instantánea. Respetar las siguientes precauciones de seguridad:

- ✓ Utilice este equipo solamente para los propósitos descritos en esta guía. Respete la información de advertencia.
- ✓ Nunca conecte el equipo de prueba a un equipo energizado.
- ✓ Desconectar siempre los cables de prueba de los equipos bajo prueba antes de intentar desconectarlos del equipo de prueba.
- ✓ El personal debe utilizar equipo de seguridad adecuado para prevenir lesiones corporales.
- ✓ Utilice barreras, barricadas y/o advertencias para mantener alejadas de las actividades de prueba a personas que no están directamente involucradas con el trabajo.
- ✓ Utilice todas las precauciones de seguridad prácticas para evitar el contacto con las partes energizadas del equipo y los circuitos relacionados.

3.4. Detalles encontrados en el equipo de prueba

En esta sección se detallan los hallazgos encontrados en el equipo de prueba Phenix Technologies modelo 470-5, para realizar la prueba de resistencia de aislamiento en transformadores. Siendo los siguientes que se encontró:

1. La fecha de fabricación del equipo de prueba es de diciembre – 1994.
2. El equipo no ha tenido calibraciones, por ende, las lecturas mostradas pueden ser no precisas.
3. La aguja que indica el nivel de tension aplicado no se puede mover si se tiene puesta la tapa que cubre el kilo voltímetro, se debe retirar la tapa para que se pueda apreciar el nivel de tension aplicado.
4. Las mediciones de nivel de tension y de corriente de este equipo son analógicas.
5. El estado de la maleta físicamente se encuentra bien.
6. Accesorios como cable de alimentación, cables de prueba, fusibles, luces indicadoras, se encuentran en buenas condiciones.

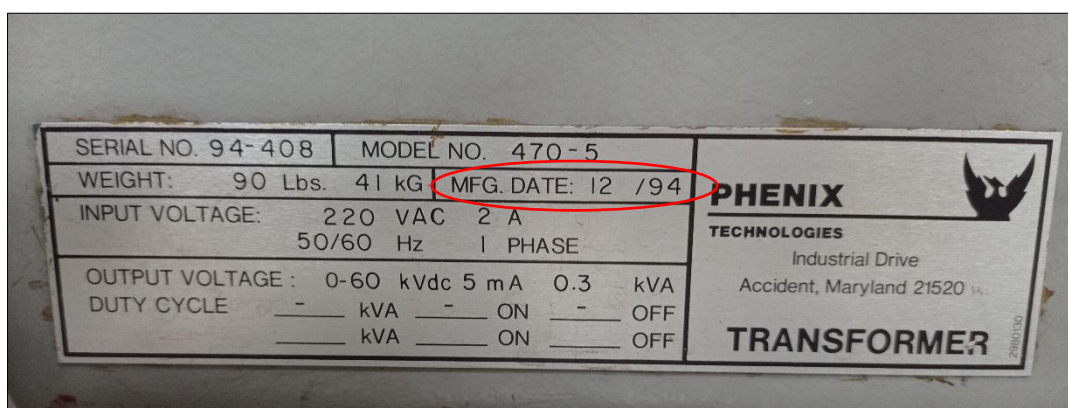


Figura 25: Placa característica del equipo de prueba 470-5



Figura 26: Retiro de la tapa del kilo voltímetro

4. Información general para el equipo de prueba de vacío y cortocircuito.

El sistema de pérdida de transformador portátil TTS2.5 de PHENIX TECHNOLOGIES está diseñado para proporcionar voltajes y corrientes para probar transformadores de distribución monofásicos. Los transformadores que se pueden probar variarán con la impedancia.

El TTS2.5, por supuesto, probará transformadores con otras impedancias. Las pruebas se realizan para asegurar que el transformador cumpla con las especificaciones de compra y funcione adecuadamente después de la instalación. El equipo de prueba consta de:

- ✓ Transformador variable monofásico para control de tensión y corriente.
- ✓ Transformador de tomas múltiples.
- ✓ Medidores digitales para medir el voltaje de salida, la corriente y la potencia suministrada por el equipo de prueba.
- ✓ Medidor de temperatura digital para medir la temperatura del transformador que se está probando para corregir las lecturas de pérdida de carga.
- ✓ Protección de sobrecarga.
- ✓ Enclavamiento de seguridad.

Debido a que el TTS2.5 está diseñado para suministrar voltajes altos, se le han incorporado protecciones. Estas protecciones solo son efectivas si también se utilizan prácticas de trabajo seguras. Este TTS2.5 puede realizar pruebas en transformadores de distribución de acuerdo con las normas C57.12.00, tales como:

1. Prueba de pérdidas en el núcleo.
2. Prueba de relación de transformación.
3. Prueba de pérdidas en los devanados.
4. Prueba de impedancia.

Asegurando de que un transformador cumpla con los requisitos de rendimiento y confiabilidad, desde la línea de producción o puesta en marcha.

4.1. Especificaciones técnicas

N° Modelo	Voltaje de Entrada	Voltaje de salida				Instrumentación				
		Monofásico				Voltímetro	Amperímetr o	Watímetro	Termómetro	Tamaño Pulgadas
TTS2.5	120V, 60 Hz.	Selector (Taps)	Voltaje	Corriente Continua	15Min ON- 15Min OFF	seleccionable valor verdadero RMS o Rangos promedio de respuesta AVG: 0-125/250/500 VCA	Rangos de respuesta RMS real: 0-1.999- 19.99- 199.9 AAC	Rangos: 0-199,9 W-1999 W-19,99 kW	Rango: 0-100 °C	22,5" ancho 21" largo 16" alto
		1	0-125 Voltios	20 A	30 A	Precisión del sistema: +/- 0,5%	Precisión del sistema: +/- 0,5%	Precisión del sistema: +/- 0,5%	Precisión: +/- 1°C	
		2	0-250 Voltios	10 A	15 A					
		3	0-500 Voltios	5 A	7.5 A					

Tabla 4: Especificaciones del equipo de prueba para el equipo de prueba de vacío y cortocircuito

4.2. Controles del panel principal

Equipo para sistema de prueba de transformador número de modelo TTS

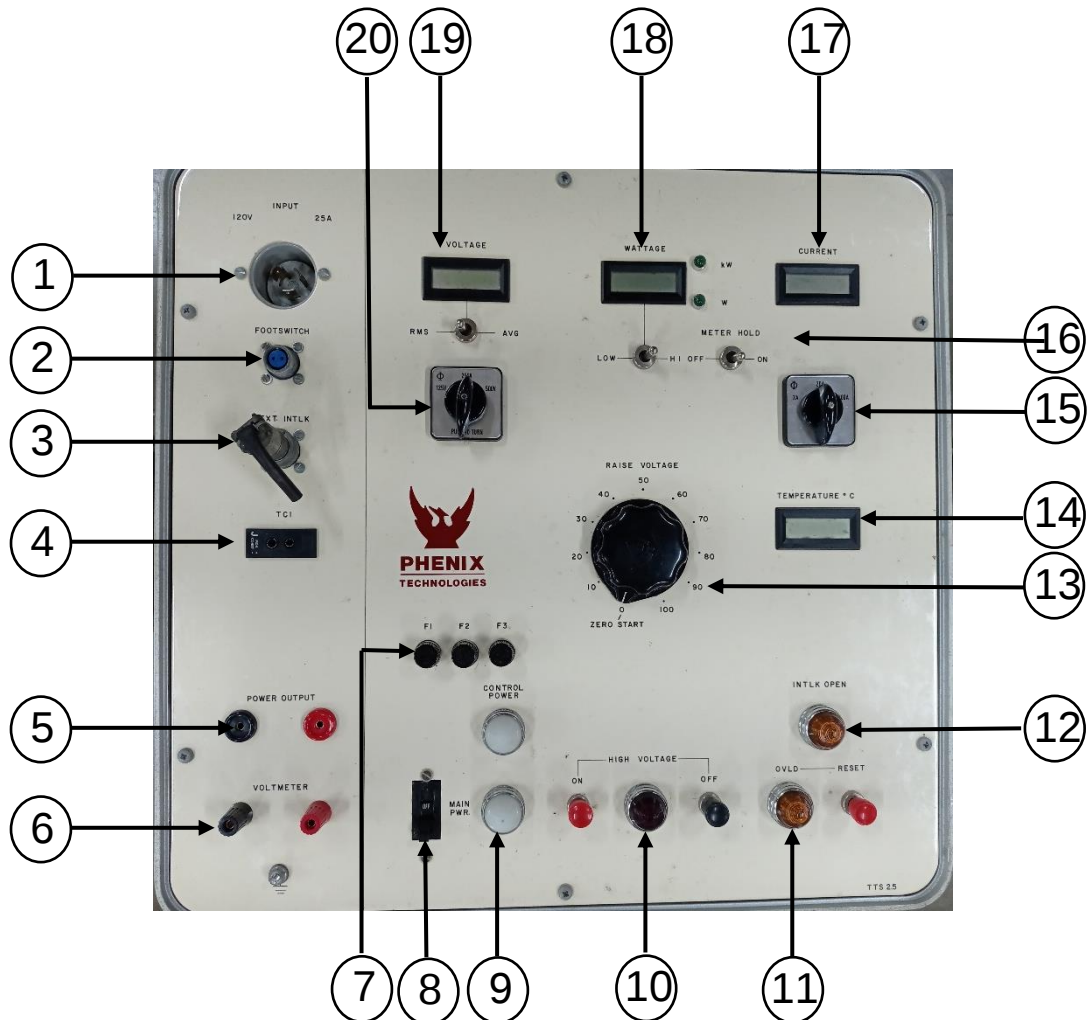


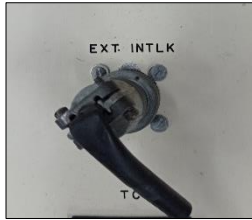
Figura 27: Equipo Phenix TTS2.5



1-. Receptáculo de alimentación de entrada: Aquí se conecta el cable de alimentación de entrada.



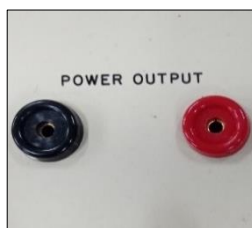
2-. Interruptor de Pies: Este conector acepta el cable al interruptor de enclavamiento operado con el pie, que debe estar cerrado antes de que se pueda energizar la prueba



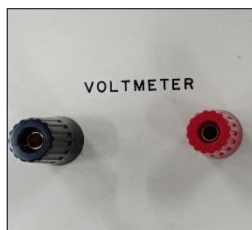
3-. Interbloqueo externo: Se puede instalar un circuito de enclavamiento externo para mayor seguridad usando este conector. NOTA: Este conector se envía de fábrica con un puente instalado.



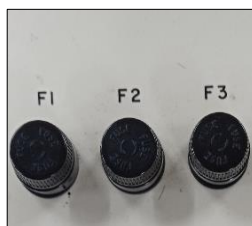
4-. El termopar: Es un sensor para medir la temperatura. Se compone de dos metales diferentes, unidos en un extremo. Al calentar o enfriar la unión de los dos metales se produce una tensión que es proporcional a la temperatura.



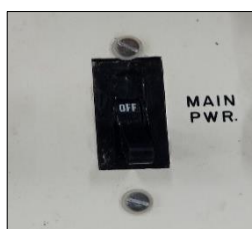
5-. Conectores de salida de alimentación: Aquí se conectan los cables de alimentación de salida.



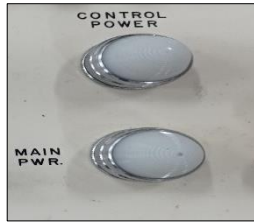
6-. Conectores de voltímetro: Aquí se conectan los cables de medición de tensión.



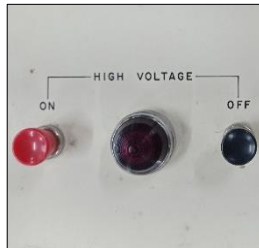
7-. Fusibles de protección: F1, Proporciona protección de sobrecarga de salida (30A) F2, Protege el circuito de control (5A). F3, Protege el devanado de corriente baja y el rango bajo del medidor de corriente (3A)



8-. Breaker de la fuente principal: Sirve como interruptor principal de ENCENDIDO/APAGADO y dispositivo de protección contra sobrecargas.



9-. Indicador de potencia de control: El indicador se enciende cuando el breaker principal está encendido y el fusible F2 está en correcto funcionamiento.



10-. Indicador y encendido/apagado de alto voltaje: Activan/desactivan el voltaje del equipo de prueba. La luz indica que la salida está energizada. El enclavamiento externo y el circuito del interruptor de pie deben estar cerrados y la perilla de ajuste de voltaje debe estar en el inicio cero (0) para que se active el alto voltaje.



11-. Indicador de sobrecarga/reinicio: Esta luz indica muestra si se ha producido una condición de sobrecarga establecida. El voltaje se habrá apagado si la luz está encendida. Presionar Reset y restablecer la perilla de voltaje a cero para volver a energizar.



12-. Intlk Indicador abierto: Se iluminará si el circuito de enclavamiento externo o el circuito del interruptor de pie están abiertos. La salida no se encenderá si la lámpara está encendida.



13-. Ajuste de voltaje: Esto controla el voltaje de salida del equipo de prueba. La perilla debe estar completamente en sentido contrario a las manecillas del reloj para energizar el equipo de prueba.



14-. Medidor de temperatura: Esta pantalla digital muestra la temperatura del termopar.



15-. Interruptor de rango del medidor de corriente:

El interruptor selector de rango triple selecciona la escala del medidor de corriente de salida.



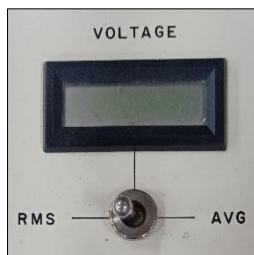
16-. Retención de los medidores: Congela todas las pantallas de los medidores para registrar las lecturas.



17-. Medidor de corriente: Este medidor de corriente digital muestra la corriente de salida.



18-. Vatímetro e indicador de rango: Este vatímetro digital muestra los vatios de salida en vatios o kilovatios, según el LED que esté iluminado. El rango está determinado por el interruptor low/high y el interruptor de rango del medidor de corriente.



19-. Voltímetro: Este voltímetro digital muestra el voltaje de salida del equipo de prueba; el rango está determinado por el selector RMS/AVG: Este selector permite que el operador muestre el voltaje de salida en RMS o AVG



20-. Selector de tomas de voltaje de salida: Esto permite seleccionar uno de los tres rangos de voltaje de salida. Empuje antes de girar. No cambie las tomas durante el funcionamiento, cambiar las tomas cuando el equipo de prueba está energizado hace que el alto voltaje se apague.

4.3. Instrucciones de uso y seguridad

Al realizarse las pruebas con este equipo, se estará trabajando con niveles de voltaje altos por lo tanto tenga en cuenta lo siguiente:

1. El equipo de prueba debe conectarse a tierra antes de conectar la alimentación de entrada.
2. Las pruebas descritas aquí deben usarse ÚNICAMENTE en transformadores DESENERGIZADOS y aislados.
3. SE GENERAN ALTOS VOLTAJES (DE VALOR LETAL) DURANTE LAS PRUEBAS Y EXTREMOS SE DEBE TENER PRECAUCIÓN. SIGA TODOS LOS PROCEDIMIENTOS DE SEGURIDAD.
4. Mantenga una distancia de trabajo segura cuando el equipo de prueba esté energizado.

El equipo de prueba debe estar ubicado cerca del transformador que se está probando y en una posición donde su salida de alto voltaje no ponga en peligro a ninguna persona. El transformador que se está probando debe estar aislado y des energizado.

1. Coloque el equipo de prueba en la ubicación deseada.
2. Conecte a tierra el equipo de prueba utilizando el perno de conexión a tierra proporcionado.
3. Conecte el cable de alimentación entre el equipo de prueba y una fuente de alimentación monofásica de 120 VCA, 25 A y 60 Hz.
4. Conecte el interruptor de pie a su salida.
5. Si se va a utilizar un circuito de enclavamiento externo, conecte el circuito a su conector. Todos los interruptores de enclavamiento deben tener una clasificación de 115 VCA, 5 A, con los contactos normalmente abiertos cableados en serie con los terminales de enclavamiento externo en el equipo de prueba.
6. NOTA: El conector para el circuito de enclavamiento externo se envía de fábrica con un puente instalado. Si no hay un circuito de enclavamiento externo, este conector con su puente debe conectarse antes de que se pueda energizar el equipo de prueba.
7. Conectar el cable del termopar a su conector.

4.4. Detalles encontrados en el equipo de prueba

En esta sección se detallan los hallazgos encontrados en el equipo de prueba Phenix Technologies modelo TTS2.5 para realizar las pruebas de vacío y cortocircuito de un transformador. Siendo los siguiente que se encontró:

1. La fecha de fabricación del equipo de prueba es de diciembre – 1994.
2. El equipo no ha tenido calibraciones, por ende, las lecturas mostradas pueden ser no precisas.
3. El selector de voltaje se encuentra fijo en la posición de 500V, se puede mover la manecilla, pero no acopla con la fuente de 125V y 250V.
4. Las pantallas de mediciones de voltaje, vatios, corriente y temperatura no presentan mediciones, esto es un gran inconveniente para la anotación de resultados, teniendo que utilizar instrumentos externos para presenciar las lecturas.
5. La fuente de voltaje presenta dificultades para poder activarse al mantener presionado el Footswitch.
6. El cartucho del fusible F3 se encuentra un poco fuera de su lugar, pero en si el estado del fusible se encuentra bien.
7. Accesorios como cable de alimentación, cables de prueba, interruptor de pie o footswitch, iluminación de encendido, termocupla, maleta física, se encuentran en buenas condiciones

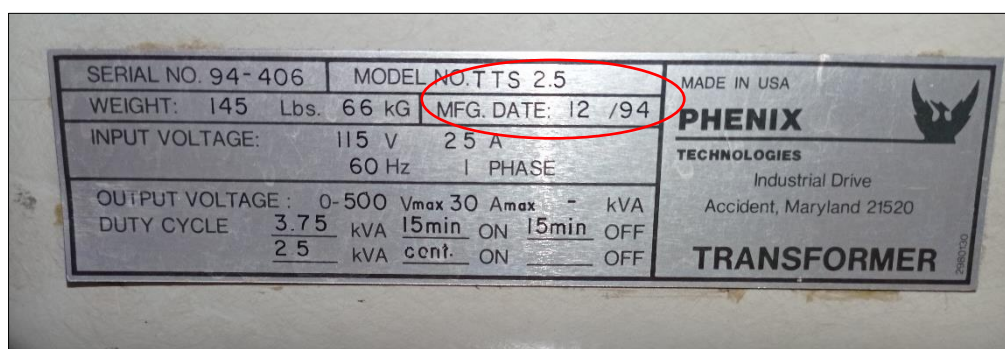


Figura 28: Placa característica del equipo de prueba TTS2.5



Figura 29: Estado del fusible F3



Figura 30: Pantallas de medición sin lecturas

Capítulo 2: Normas técnicas y de seguridad para el uso del laboratorio.

2. Introducción

Si bien la electricidad está presente en toda la existencia de la humanidad, la evolución de su conocimiento y aplicación fue lenta en la antigüedad. El filósofo Griego Tales de Mileto 600 años AC demostró que al frotar una barra de ámbar sobre una lana o una piel aparecían pequeñas cargas eléctricas y si se frotaba rápidamente podría generarse una chispa, pero solo fue hasta el Siglo XVIII cuando se iniciaron las observaciones de los fenómenos eléctricos con rigurosidad científica, empezando a mostrar resultados a comienzos del siglo XIX con investigaciones como las de Alessandro Volta, André-Marie Ampère, Michael Faraday o Georg Ohm, a quienes la electrotecnia moderna honra su memoria con los nombre de las unidades de las magnitudes del fenómeno eléctrico.

Entendido el fenómeno del electromagnetismo, se iniciaron las aplicaciones prácticas, que lo convierten en la fuerza motriz de la segunda revolución industrial, trabajos como los de Kelvin, Gramme, Tesla, Westinghouse, Von, Siemens, y Edison, al incorporar la novedosa forma de combinar la investigación científica con la técnica, el capital y el mercado, han permitido en buena medida el desarrollo socioeconómico y la mejora del nivel de vida que actualmente ostenta la mayor parte de la humanidad. (Fundación Endesa, s.f)

De otra parte, las investigaciones mostraron que la electricidad también podría causar daños a los seres vivos y a los bienes e inclusive la muerte de las personas o animales y además con el crecimiento de sus aplicaciones, también se incrementó el número de personas expuestas a los riesgos de origen eléctrico. Es así como desde 1879 se tiene conocimiento de la primera muerte causada por la electricidad generada por el hombre en la ciudad de Lyon, Francia. Suceso descrito por A. J. Jex-Blake en “The British Medical Journal” (“La Revista Médica Británica”), artículo: The Goulstonian Lectures ON DEATH BY ELECTRIC CURRENTS AND BY LIGHTNING, paginas 425-430. Desde entonces se han publicado un gran número de publicaciones sobre lesiones eléctricas. (Fundación Endesa, s.f)

Conociendo los riesgos asociados a la electricidad, paralelo a las investigaciones y desarrollos científicos sobre sus aplicaciones, también se fueron estableciendo normas técnicas de seguridad que permitieron mitigar o eliminar tales riesgos, llegando a ser el sector con la mayor estandarización. La aplicación correcta de esta normatividad hace que las aplicaciones del electromagnetismo se pueden considerar seguras y confiables.

Es por lo que reglamento o normativas establecen los requisitos que deben cumplir y tomar las medidas necesarias para evitar que tales riesgos se materialicen en accidentes, conocer y acatar tales requisitos será la mejor opción de aprovechar las ventajas de la electricidad, sin que ésta cause daños.

Teniendo siempre en cuenta principios generales que orienten la mitigación del riesgo, como son los de: igualdad, protección, conciencia, disciplina, solidaridad social, autoconservación, participación, interés público o social, precaución, gradualidad, coordinación, concurrencia, y oportuna información. Esperamos que todos los involucrados en procesos del uso de electricidad, actúen bajo los principios antes señalados, tanto en lo personal como en lo social. (RETIE, 2013)

En este capítulo se corresponderá a establecer los requisitos que garanticen los objetivos de protección contra los riesgos de origen eléctrico, para ello se recopila información y preceptos esenciales que definen el ámbito de aplicación de seguridad y requisitos que puedan incidir en las relaciones entre personas que interactúan dentro de las instalaciones. Hay que considerar que los reglamentos establecidos deben entenderse como “estar obligado”.

2.1. Riesgos eléctricos

Se refiere a la posibilidad de contacto del cuerpo humano con la corriente eléctrica y que puede resultar en un peligro para la integridad de las personas. El riesgo eléctrico está presente en cualquier tarea que implique manipulación o maniobra de instalaciones eléctricas de baja, media y alta tensión, operaciones de mantenimiento de estas, utilización, manipulación o reparación de equipos eléctricos. (Renovetec, 2014)

Entendemos por riesgo eléctrico “aquel originado por energía eléctrica, tales como: choques eléctricos por contacto con elementos en tensión, quemaduras

por choque o arco eléctrico, caídas o golpes a consecuencia de choque o arco eléctrico, así como explosiones o incendios causados por la electricidad”. De esta forma se puede tratar la situación de exposición a riesgo eléctrico en función de las instalaciones, o de las técnicas y procedimientos de trabajo. (M.T.M.S.S, 2018)

Es evidente que la electricidad es la energía que más ha contribuido al progreso de la humanidad en todos los campos, tanto en la industria como fuera de ella, conlleva riesgos que es preciso conocer y prever, estos pueden originar desde simples incidentes y accidentes hasta grandes siniestros, si no se cumplen las normas definidas, tanto de tipo general como específicas.

2.2. Factores comunes de riesgo eléctrico

El tratamiento preventivo de la problemática del riesgo de origen eléctrico obliga a saber identificar y valorar las situaciones irregulares, antes de que suceda algún accidente. Por ello, es necesario conocer claramente el concepto de riesgo; a partir de ese conocimiento, del análisis de los factores que intervienen y de las circunstancias particulares, se tendrán criterios objetivos que permitan detectar la situación de riesgo y valorar su grado de peligrosidad. Identificado el riesgo, se han de seleccionar las medidas preventivas aplicables. (RETIE, 2013)

En la Tabla 1 se ilustran algunos de los factores de riesgo eléctrico más comunes, sus posibles causas y algunas medidas de protección.

La electricidad tiene diversos tipos de factores de riesgo, por un lado, puede constituir un foco de ignición y provocar un incendio o una explosión, por otro lado, tiene efectos negativos sobre el cuerpo humano.

	Ausencia de electricidad (en determinados casos)	
	Causas	Medidas de protección
	Apagón o corte del servicio, no disponer de un sistema ininterrumpido de potencia UPS, no tener plantas de emergencia, no tener sistemas de transferencia.	Disponer de sistemas ininterrumpidos de potencia y de plantas de emergencia con transferencia automática.
	Arcos eléctricos	
	Causas	Medidas de protección
	Malos contactos, cortocircuitos, aperturas de interruptores con carga, manipulación indebida de equipos de medida, acumulación de óxido o partículas conductoras.	Utilizar materiales envolventes resistentes a los arcos, mantener distancia de seguridad, usar prendas acordes al riesgo y lentes de protección.
	Contactos directos	
	Causas	Medidas de protección
	Práctica laboral insegura o incompetencia del trabajador para manipular circuitos, faltar a las reglas de distancias mínimas de seguridad eléctrica.	Establecer distancias de seguridad, interposición de obstáculos, aislamiento o recubrimiento de partes activas, EPP, puesta a tierra, probar ausencia de tensión.
	Contacto indirecto	
	Causas	Medidas de protección
	Fallas de aislamiento, mal mantenimiento, falta de conductor de puesta a tierra.	Establecer distancias de seguridad, aislamiento de partes activas, EPP, puesta a tierra, probar ausencia de tensión.

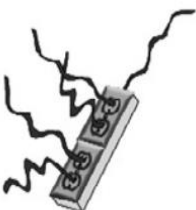
	Cortocircuito	
	Causas	Medidas de protección
	Fallas de aislamiento, impericia de los técnicos, vientos fuertes, humedades, equipos defectuosos.	Interruptores automáticos con dispositivos de disparo de máxima corriente o cortacircuitos fusibles.
	Electricidad estática	
	Causas	Medidas de protección
	Unión y separación constante de materiales como aislantes, conductores, sólidos o gases con la presencia de un aislante.	Sistemas de puesta a tierra, conexiones equipotenciales, aumento de la humedad relativa.
	Equipos defectuosos	
	Causas	Medidas de protección
	Mal mantenimiento, mala instalación, mala utilización, tiempo de uso.	Mantenimiento predictivo y preventivo.
Descargas atmosféricas		
	Causas	Medidas de protección
	Fallas en el diseño, construcción, mantenimiento del sistema	Pararrayos, puestas a tierra, apantallamientos.
	Sobrecarga	
	Causas	Medidas de protección
	Superar los límites nominales de los equipos o de los conductores.	Uso de interruptores automáticos dimensionamiento técnico de conductores y equipos.

Tabla 5: Factores comunes de riesgos eléctricos

2.3. Accidentes eléctricos

Es de suma importancia, que todas las personas, especialmente las que realizan trabajos eléctricos, tomen conciencia del riesgo que implica actuar desprevenidamente al enfrentar actividades de tipo eléctrico y tengan presente que las consecuencias pueden ser muy desafortunadas.

Se puede deducir fácilmente que el uso de la energía eléctrica conlleva una proporción de riesgo, pero con la natural salvedad de que se adopten las debidas precauciones para proteger a las personas y el medio ambiente, pero a su vez la gravedad de los daños que ella puede provocar en caso de accidente es notoriamente alta. (Robledo, 2008)

Cabe preguntarse qué tipo de accidentes puede provocar el uso de la energía eléctrica, para producir resultados tan graves. Para responder este interrogante debemos hacer una clasificación en dos grupos de accidentes que afectan al ser humano, estos son aquellos en que la corriente eléctrica circula por el cuerpo y aquellos en que no lo hace. Además, debemos nombrar otro bloque de accidentes que son los daños a la propiedad, los cuales no afectan directamente al hombre, pero sí en forma indirecta, en lo económico, como puede ser la falla de la maquinaria o la explosión de equipos defectuosos.

Entre los accidentes con circulación de corriente eléctrica a través del cuerpo se encuentran los siguientes:

- Lesión traumática por contracciones musculares violentas.
- Muerte por fibrilación ventricular.
- Lesiones o muertes provocadas por quemaduras internas.
- Lesiones permanentes por deterioro del tejido nervioso.
- Quemaduras por acción de un arco eléctrico

Entre los accidentes en los que no hay circulación de corriente a través del cuerpo se anotan los siguientes:

- Lesión traumática por caídas
- Lesión o muerte provocada por explosión de líquidos volátiles o de explosivos, debido a chispas eléctricas.
- Lesión o muerte provocada por explosión de equipos de interrupción.

Entre los accidentes a la propiedad podemos destacar los siguientes:

- Incendio de origen eléctrico.
- Accidentes a la propiedad por falla del equipo eléctrico.
- Pérdidas económicas producidas por falla del equipo eléctrico.

De lo anterior podemos inferir que es de suma importancia dar una buena seguridad, tanto a las personas como a las maquinarias y equipos eléctricos. (Robledo, 2008)

2.4. Factores que provocan accidentes eléctricos.

Todo tipo de accidente eléctrico se presenta debido a la presencia de estos factores que son factores técnicos, humanos y organizativos. Esto implica que es necesario saber con exactitud cuáles son las causas que provocan o por lo menos representan un riesgo para el personal y aparatos eléctricos.

2.4.1. Factores técnicos: También se los llama fallas técnicas y son las condiciones inseguras en las que un operario podría ejecutar su trabajo, ya sea por mantenimiento o por cualquier actividad que se encuentre realizando cerca de los materiales inseguros o peligrosos. Como por ejemplo una mala instalación eléctrica.

2.4.2. Factores Organizativos: Este factor se relaciona con la capacidad de organización y los métodos de trabajo empleados. Un ejemplo claro se ve en la comunicación entre el personal que se encuentre ejecutando un trabajo específico y asegurar o limitar las áreas de trabajo.

2.4.3. Factores Humanos: En este punto se presenta las acciones o descuido o exclusión de alguna labor que luego represente un riesgo y consecuente un accidente también se los llama actos inseguros o fallos que presenta el personal. (Zamora, 2016)

2.5. Tipos de contacto eléctrico

El riesgo eléctrico está presente en cualquier tarea que implique manipulación o contacto en instalaciones eléctricas de baja, media y alta tensión, mantenimiento de estas, manipulación y reparación de equipos eléctricos, así

como utilización de aparatos eléctricos en condiciones no apto para el dispositivo (ambientes húmedos y/o mojados), entre otros. (ACHS, s.f)

El paso de la corriente eléctrica se da a través del cuerpo humano por el contacto directo con un elemento en tensión o por un conductor. Cuando tocamos un elemento activo de la instalación eléctrica o un elemento puesto accidentalmente en tensión se establece una diferencia de potencial entre la parte de nuestro cuerpo que lo haya tocado y la parte del cuerpo puesta en tierra (normalmente mano-pie) llamado “tensión de contacto”.

2.5.1. Contactos eléctricos directos.

Se conoce por contacto directo al roce físico de una persona con la parte energizada de una instalación o equipo, las partes energizadas pueden ser conductores activos y/o piezas conductoras bajo tensión, incluidas el conductor neutro. El contacto directo, es decir el toque directo con la fase o línea viva por la que fluye una intensidad de corriente. (ACHS, s.f)

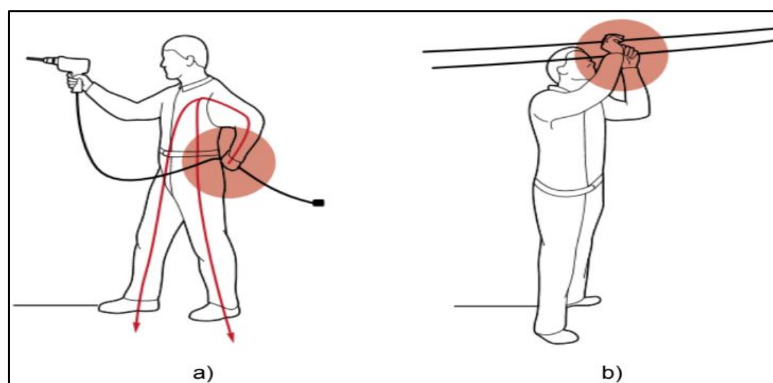


Figura 31: a) Contacto directo con cable de herramienta. b) Contacto directo entre dos conductores.

2.5.2. Contactos eléctricos indirectos.

El contacto indirecto es el contacto físico con algún elemento de la instalación o de los equipos que no forman parte del circuito eléctrico y que en condiciones normales no debería tener tensión, pero por un fallo de aislamiento adquirió accidentalmente tensión. El contacto indirecto también se puede dar por mala organización en el momento de ejecutar un trabajo, además de la falta de conocimiento y capacitación del personal. (ACHS, s.f)

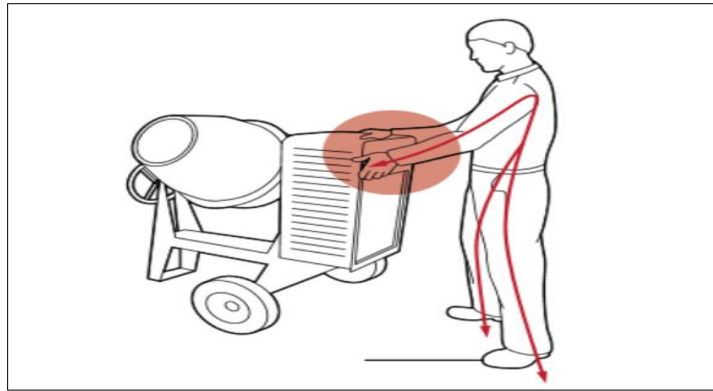


Figura 32: Contacto indirecto por una carcasa metálica de una maquina

2.6. Factores que determinan el daño por contacto eléctrico

2.6.1. Intensidad de corriente que circula a través del cuerpo humano.

La unidad de medida de la corriente es el Amperio, se determina por la cantidad de carga contenida por el paso de corriente entre dos puntos con diferente potencial, es decir, es la manera de cómo medir la cantidad de corriente que pasa a través de un conductor.

Esto suele ser el factor determinante de la gravedad de las lesiones, de tal forma que, a mayor intensidad, peores consecuencias, lo que significa que “lo que mata es la intensidad, no el voltaje”. En un sistema de corriente alterna a baja frecuencia, a medida que el valor de la corriente incrementa esta produce mayor daño a nuestro cuerpo y con tan solo con medidas de miliamperios provocan efectos que pueden llegar a ocasionar la muerte. (ISASTUR, 2010)

Corriente	Efectos	Motivo	
1 a 3 mA	Percepción	El paso de la corriente produce cosquilleo. No existe peligro.	
3 a 10 mA	Electrización	El paso de la corriente puede provocar movimientos bruscos	

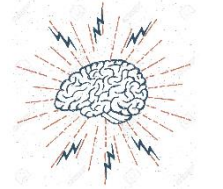
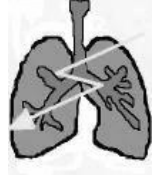
10 mA	Tetanización	El paso de la corriente provoca contracciones musculares, agarrotamiento.	
25 mA	Paro respiratorio	Si la corriente atraviesa el cerebro.	
25 a 30	Asfixia	Si la corriente atraviesa el tórax.	
60 a 75	Fibrilación ventricular	Si la corriente atraviesa el corazón.	

Tabla 6: Efectos producidos por la corriente eléctrica en el cuerpo humano

2.6.2. Duración del contacto eléctrico

Junto con la intensidad, el contacto eléctrico es el factor que más influye en el resultado de accidente ya que ésta determina la gravedad de las lesiones (tener en cuenta que en baja tensión el tiempo de contacto se puede alargar debido a la tetanización que se produce a partir de 10 mA). (ISASTUR, 2010)

Corriente	Tiempo
15 mA	2 min
20 mA	1 min
30 mA	0.5 min
100 mA	3 seg
500 mA	110 mseg
1 A	30 mseg

Tabla 7: Tiempo para producir graves daños

2.6.3. Resistencia eléctrica del cuerpo humano.

El cuerpo humano no tiene una resistencia constante, de hecho, la resistencia de los tejidos humanos al paso de la corriente es muy variable y dependerá mucho de la tensión a la que esté sometido y de la humedad del emplazamiento.

La piel es la primera resistencia al paso de la corriente al interior del cuerpo. Gran parte de la energía eléctrica es usada por la piel produciendo quemaduras, pero evitando lesiones profundas graves sobre los tejidos profundos. Al bajar la resistencia de la piel, una corriente de bajo voltaje puede convertirse en una amenaza para la vida. Para el organismo humano y como base de cálculo pueden considerarse los siguientes valores:

- Valor máximo: 3,000 Ohmios
- Valor medio: 1,000 – 2,000 Ohmios
- Valor mínimo: 500 Ohmios

El cuerpo humano actúa como un semiconductor, de ahí que su resistencia varíe con la tensión.

El Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión de España fija un valor de resistencia eléctrica de valor medio la resistencia del cuerpo humano en 2,500 Ohmios. (ISASTUR, 2010)

2.6.4. Recorrido de la corriente a través del cuerpo humano

El punto de entrada y salida de la corriente eléctrica por el cuerpo humano es muy importante cuando se determina la gravedad de las lesiones por contacto eléctrico, así las lesiones son más graves cuando la corriente pasa a través de los centros nerviosos y órganos vitales, como el corazón o el cerebro.

Existe una regla: “la regla de una sola mano”, que establece que al trabajar con circuitos eléctricos en tensión se debe emplear una sola mano, manteniendo la otra apartada hacia otro lado. Con ello se evita que la corriente pase de un brazo a otro y por tanto que afecte a los órganos vitales.

Las cifras de la figura 26 indican el porcentaje % de resistencia del cuerpo humano para el trayecto correspondiente con relación al trayecto mano-mano o mano-pie. (ISASTUR, 2010)

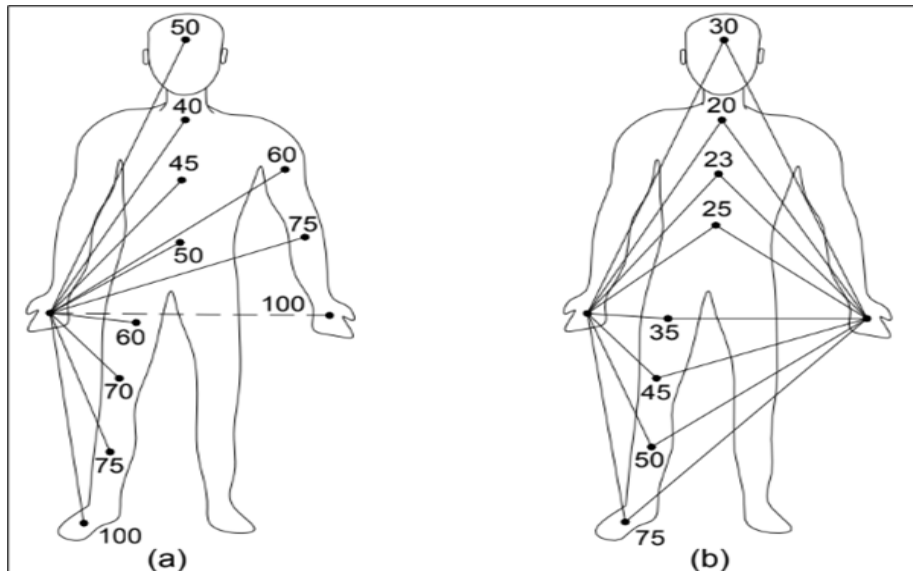


Figura 33: Porcentaje de resistencia según trayecto. a) una mano. b) dos manos

También se puede observar en la figura 27 como se representa el recorrido de la corriente a través del cuerpo humano en diferentes circunstancias.

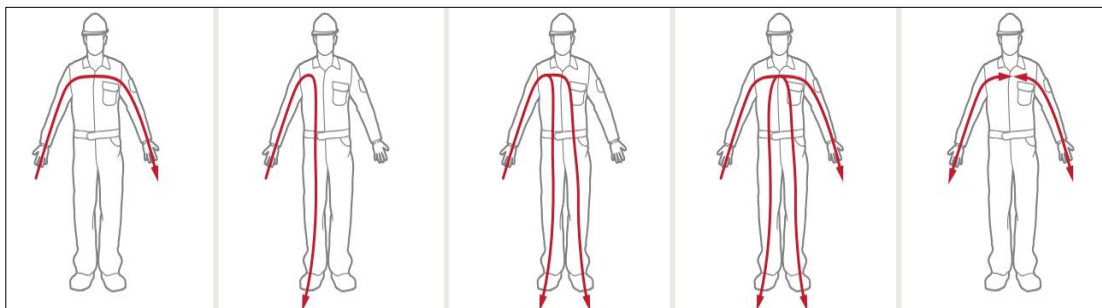


Figura 34: Trayectos de la corriente más habituales

2.6.5. Tensión aplicada

Es un factor que, ligado a la resistencia, provoca el paso de la intensidad por el cuerpo. Las lesiones por alto voltaje tienen mayor poder de destrucción de los tejidos y son las responsables de las lesiones severas; aunque con 120-220 voltios también pueden producir electrocuciones. En circunstancias normales, hasta 50 voltios las descargas eléctricas no suelen dañar al organismo, ya que es una tensión denominada de seguridad.

Cuando la tensión de contacto supera la tensión de contacto límite de seguridad, se define el tiempo máximo al que el cuerpo humano puede estar sometido a esa tensión, según el estado (seco o mojado).

Tensión Máximos de segundos (S)		
Tensión de Contacto (V)	Estado seco	Estado mojado
25	∞	∞
30	∞	0,48
75	0,60	0,30
90	0,45	0,25
120	0,34	0,18
150	0,27	0,12
220	0,17	0,05
280	0,12	0,02
350	0,08	-
500	0,04	-

Tabla 8: Tension de contacto de acuerdo con el estado del cuerpo

2.6.6. Factores personales

Además del sexo y la edad, una serie de condiciones personales pueden modificar la susceptibilidad del organismo a los efectos de la corriente eléctrica como por ejemplo el estrés, la fatiga, el hambre, la sed, enfermedades, etc.

2.7. Efectos del paso de la corriente a través del cuerpo humano

Como punto adicional se muestra los efectos que puede producir la corriente a través de nuestro cuerpo con el objetivo no de provocar miedo al lector sino más bien concientizar a las personas sobre el riesgo al que está expuesto sino no se toma las medidas indicadas para tratar de minimizarlos.

Estos accidentes son provocados por el choque eléctrico o electrización y cuando una persona se pone en contacto con la corriente eléctrica, no todo el organismo se ve afectado por igual. Hay partes del cuerpo que resultan más dañadas que otras. (Zamora, 2016)

2.7.1. Efectos inmediatos.

Se producen en un instante corto de tiempo que ocurre el accidente eléctrico, produciendo severos daños a nuestra piel u organismos como, por ejemplo: Paros respiratorio o asfixia, Paro cardíaco por fibrilación ventricular, músculos

contraídos, pérdida de extremidades por tetanización, lesiones por caídas y golpes, quemaduras internas y externas. (Zamora, 2016)

Piel: Supone el primer contacto del organismo con la electricidad. La principal lesión son las quemaduras debido al efecto térmico de la corriente. En baja tensión se originan unas quemaduras superficiales en el punto de entrada y salida de la corriente. En alta tensión se pueden llegar a producir grandes quemaduras con destrucción de tejidos en profundidad.

Músculos: cuando un impulso eléctrico externo llega al músculo, éste se contrae. Si los impulsos son continuos, producen contracciones sucesivas conocidas como “tetanización” de forma que la persona es incapaz físicamente de soltarse del elemento conductor por sus propios medios. En esta situación, y dependiendo del tiempo de contacto, la corriente sigue actuando con lo que pueden producirse daños en otros órganos, además de roturas musculares y tendinosas. La tetanización puede provocar además una contracción mantenida de los músculos respiratorios y generar una situación de asfixia que puede dañar irreversiblemente al cerebro y producir la muerte.

Corazón: la corriente eléctrica produce una alteración total en el sistema de conducción de los impulsos que rigen la contracción cardiaca. Se produce así la denominada “fibrilación ventricular”, en la que cada zona del ventrículo se contrae o se relaja descoordinadamente. De esta forma, el corazón es incapaz de desempeñar con eficacia su función de mandar sangre al organismo, interrumpiendo su circulación y desembocando en la parada cardiaca.

Sistema nervioso: los impulsos nerviosos son de hecho impulsos eléctricos. Cuando una corriente eléctrica externa interfiere con el sistema nervioso aparecen una serie de alteraciones, como vómitos, vértigos, alteraciones de la visión, pérdidas de oído, parálisis, pérdida de conciencia o parada cardiorrespiratoria. También pueden afectarse otros órganos, como el riñón (insuficiencia renal) o los ojos (cataratas eléctricas, ceguera). Además, indirectamente, el contacto eléctrico puede ser causa de accidentes por caídas de altura, golpes contra objetos o proyección de partículas. (Zamora, 2016)

2.7.2. Efectos no inmediatos.

Estos no son provocados por la propia corriente, sino que son debidos a:

Afectados por golpes contra objetos, caídas, etc. Ocasionados tras el contacto con la corriente, que, si bien por él mismo a veces no pasa de ocasionar un susto o una sensación desagradable, sin embargo, sí puede producir una pérdida de equilibrio con la consiguiente caída al mismo nivel o a distinto nivel y el peligro de lesiones, fracturas o golpes con objetos móviles o inmóviles que pueden incluso llegar a producir la muerte.

Quemaduras de la víctima debidas al arco eléctrico. La gravedad de estas puede abarcar la gama del primer al tercer grado.

Incluso puede ocurrir luego de un lapso como pueden ser días, semanas, e incluso años. Como, por ejemplo: Daños renales, daños en el metabolismo. Trombosis, aneurismas. Pérdida o daños en la memoria; necrosis muscular. Edema y hemorragia cerebral, lesiones medulares, produciendo a la larga incapacidad muscular, neuropatía periférica, entre otras. (Zamora, 2016)

2.8. Seguridad eléctrica

La seguridad en los sistemas eléctricos se refiere a tres áreas diferentes: protección de la vida, protección de la propiedad y protección de la producción ininterrumpida. La inversión requerida para lograr una seguridad mejorada a menudo consiste simplemente en un esfuerzo de planificación adicional sin ninguna inversión adicional en equipo. La protección de la vida humana es primordial, la propiedad del lugar de trabajo se puede reemplazar y la producción perdida se puede recuperar, pero la vida humana nunca se puede recuperar ni el sufrimiento humano se puede compensar. Contar con programas de capacitación y normas de seguridad en el lugar de trabajo, los usuarios que lleven a cabo sus funciones deben de conocer las reglas y prácticas de seguridad que se tengan que aplicar a su lugar de trabajo. Los estándares y requisitos de seguridad eléctrica son variados brindando una orientación para trabajar de manera segura con energía eléctrica. (Gill, 2009)

2.8.1. Prácticas y precauciones de seguridad eléctrica

Antes de realizar una asignación, cada usuario debe recibir las siguientes reglas, debe revisarlas y cumplirlas mientras realiza la asignación.

1. Conocer el contenido del trabajo y la secuencia de trabajo, especialmente con las medidas de seguridad

2. Conocer los equipos e instrumentos adecuados necesarios para el trabajo
3. Verificar que los equipos estén en buen estado
4. Verificar que las conexiones a tierra estén colocadas en todos los lados del área de trabajo antes de comenzar con las actividades
5. Delimitar el área de trabajo con barreras o cintas y evite el acceso no autorizado
6. Cuando se comience con la actividad, use el EPP apropiado requerido para la tarea (guantes, lentes, casco, calzado, vestimenta reflectiva)
7. Trabajar en compañía de alguien más con los conocimientos sobre la actividad
8. Discuta cada paso de trabajo con su compañero antes de comenzar
9. No toque directamente a su compañero de trabajo inconsciente ya que puede estar en contacto con el circuito o equipo energizado
10. No realice ni continúe realizando la actividad cuando tenga dudas sobre los procedimientos a seguir
11. No trabaje en, o cerca de, ningún circuito o equipo energizado a menos que se sienta alerta y de buen goce de salud (Gill, 2009)

2.9. Medidas de seguridad

Antes de abordar temas relacionados sobre los procedimientos de pruebas eléctricas en los transformadores, lo más importante y por lo primero que debemos empezar es hablar de la seguridad, existen diversas técnicas y procedimientos a ejecutar en el momento previo de realizar prácticas o trabajos eléctricos, no olvidemos que se utilizaran equipos y procedimientos que pueden generar cierto peligro, sobre todo si se utilizan de forma inadecuada.

En todo laboratorio se requiere de equipos adecuados para la seguridad en la ejecución de las actividades que en el mismo se desarrollan. Para garantizar que se cumplan con las medidas de seguridad, recomendamos el empleo de listas propias de comprobación que se acomoden a sus particulares necesidades y métodos, ya que las mismas servirán de salvaguardar contra

olvidos y omisiones. A continuación, detallamos una lista que podrá servir de base:

1. Aseo, orden y distribución en el laboratorio
2. Adecuado espacio de trabajo
3. Protección en el área de trabajo
4. Adecuada iluminación
5. Verificación de equipos a manejar en buen estado
6. Cumplir con requerimientos para ejecutar actividades en el laboratorio
7. Medios publicitarios dentro del laboratorio

2.9.1. Procedimientos de trabajo

Todas las conexiones y manipulaciones se deberán realizar sin tensión, por lo que tomarán los siguientes pasos a seguir:

1. Antes de realizar cualquier conexión se debe comprobar que el equipo de prueba esté apagado
2. Una vez realizada todas las conexiones, se comprobará que se ajustan al esquema de conexión que se desea probar
3. A continuación, se deberá comprobar que todas las conexiones sean firmes ya que en caso contrario cualquier movimiento puede desprenderse del punto de conexión y crear algún evento no deseado
4. Se comprobará que los parámetros en el equipo de prueba estén en su escala adecuada para la medición a realizar
5. Se debe tener a mano una libreta para realizar anotación durante la ejecución de la prueba
6. La puesta en tensión del circuito, se activará el interruptor del equipo de prueba para iniciar con la prueba e ir anotando las mediciones sin realizar contacto con el equipo
7. La desconexión del circuito, se apagará equipo y se desconectará de la fuente de alimentación

2.9.2. Control del área de trabajo

Cuando se realice la delimitación del área del trabajo, se debe mantener una gran precaución para mantener seguridad durante el desarrollo de las actividades, así mismo como el de advertir o restringir el ingreso de personas ajenas con desarrollo de las actividades puedan interferir.

El objetivo de delimitar el área de trabajo será transmitir mensaje de prevención, prohibición o informar para todos que es una zona en la que se ejecutaran trabajos eléctricos o zonas de operación de máquinas, equipos o instalaciones que entrañen algún peligro potencial. No eliminan por sí misma el peligro, pero dan advertencias o directrices que permitan aplicar medidas adecuadas para la prevención de accidentes. (RETIE, 2010)

Las únicas personas permitidas dentro del área son personas con conocimientos de uso y operación de los equipos. Es importante mantener el área estrictamente controlada y se deba cumplir con los siguientes requisitos:

- ✓ Hacer barreras con conos reflectivos con altura de 1m y colocar cinta de color rojo que encierre el área donde se ejecuten las pruebas, con un perímetro de al menos 3m x 3m
- ✓ Hacer uso de señalización lumínica y sonora cuando se empiece a ejecutar pruebas
- ✓ Hacer uso como mínimo de alfombras dieléctricas clase 2 (aislante hasta 17kV) donde se ubicará el operador
- ✓ Durante la prueba de vacío y cortocircuito se deberá colocar como mínimo una manta aislante clase 2 (aislante hasta 17kV) en las terminales de alta tensión (H1, H2) del transformador de distribución
- ✓ Mantener una distancia de al menos 2.0m entre el transformador y el operario

El marcaje sobre el piso también será una buena manera de delimitar el área de pruebas en el laboratorio, deberán ser de franjas amarillas que indicara el lugar del trabajo.

2.9.3. Normas del laboratorio

Establecer una guía a seguir desde entrar hasta salir del laboratorio para el desarrollo de las prácticas tendrá el objetivo para trabajar de forma eficiente y

segura dentro del laboratorio, dando a conocer cuáles son las responsabilidades y reglas básicas que se deben seguir para minimizar cualquier riesgo existente. Debe ser conocido, comprendido y aplicado por todos los operarios e instructores que ingresen al área de trabajo.

Las practicas del laboratorio tienen como objetivo el contribuir al desarrollo de competencias para el futuro profesional de los usuarios y a su formación integral, mediante la interacción directa con los equipos, instrumentos, materiales y procedimientos que debe aplicar bajo la supervisión del instructor. También el de consolidar y profundizar los conocimientos impartidos en las asignaturas como Maquinas Eléctricas I, Técnicas de Alta Tensión, Redes de Distribución, mediante estas prácticas experimentales. Es por ello por lo que se pide total seriedad en cumplir con las siguientes normas.

Todo personal operativo que ingrese al laboratorio será responsable de su seguridad y debe estar completamente informado de todas las normas de seguridad para su protección y la de los demás.

Para los operarios

1. No debe ingresar con cadenas, anillos u otros elementos metálicos que puedan hacer contacto con los conductores o partes metálicas de los equipos.
2. No debe ingresar con alimentos o bebidas.
3. No debe ingresar objetos ajenos al área de las practicas.
4. Debe ingresar con buena salud y alerta en todo momento.
5. Debe dejar objetos personales en el lugar asignado.
6. Debe familiarizar con la localización y la guía de uso de los equipos.
7. Debe informar de manera inmediata cualquier anomalía encontrada en los equipos o herramientas a ocupar.
8. Debe mantener orden y disciplina al momento de iniciar las practicas.
9. No debe realizar bromas, gritar y otras actividades que puedan crear confusión a los demás operarios.

10. Debe acatar todas las indicaciones del instructor y en caso de duda siempre consultar.
11. Debe informar al instructor antes de energizar las conexiones de pruebas para su verificación.
12. Debe ordenar y limpiar el área de trabajo al momento de finalizar las prácticas.
13. Debe ingresar con vestimenta adecuada, se recomienda:
 - Calzado de seguridad dieléctrico con puntera en composite y suela en poliuretano antideslizante
 - Pantalones desahogados que cubran por encima al calzado de seguridad
 - Guante de nitrilo o de cuero para realizar conexiones del equipo al transformador bajo prueba
 - Lentes de seguridad transparentes
 - Chaleco reflectivo
 - Casco de seguridad

Para el instructor

1. Debe de velar por el cumplimiento de las medidas de seguridad establecidas en el laboratorio.
2. Debe exigir a los operarios cumplimiento del horario de las prácticas.
3. Debe realizar preguntas de control a operarios antes de iniciar las prácticas.
4. Debe dar indicaciones básicas sobre las actividades a realizar.
5. Debe estar presente en todo momento de las prácticas.
6. Debe verificar que al finalizar las prácticas todo quede limpio y en orden.

Para el encargado del laboratorio

1. Debe garantizar el cumplimiento de las normas de seguridad cuando se deban realizar prácticas.

2. Debe garantizar la debida identificación de los equipos y demás elementos en el laboratorio.
3. Debe garantiza el orden y aseo en el laboratorio.
4. Debe verificar las condiciones de los equipos y herramientas estén en buen estado.

Capítulo 3: Procedimientos y especificaciones para guías implementadas en pruebas a los transformadores de distribución

3. Introducción

En el presente capítulo se desarrollarán las pruebas de rigidez dieléctrica del aceite, resistencia de aislamiento, pruebas de circuito abierto y cortocircuito, con las maletas de pruebas Phenix Technologies donde se procede a explicar los procedimientos paso a paso y dejarlos plasmados en las guías que se detallarán más adelante.

Para esta sección se pudo realizar el ingreso de un transformador monofásico de voltaje primario 14.4/24.9kV y voltaje secundario 120/240V con una potencia de 10kVA, al laboratorio de máquinas eléctricas del recinto UNI-RUSB el cual ayudo de mucho para realizar los diagramas de conexión para las pruebas y así mismo para la extracción de la muestra de aceite. Aunque el transformador no se pudo realizar las pruebas de vacío y cortocircuito, y resistencia de aislamiento debido a que presentaba una falla interna y es por ello por lo que lo habían sacado de servicio, sin embargo, los diagramas de conexión presente se pueden aplicar a cualquier otro transformador monofásico y de capacidad diferente.

También se detallan los cálculos que se deben de realizar para determinar o evaluar los datos obtenidos durante las 4 pruebas a realizarse, las guías para cada prueba y formato de prueba se encontraran en la sección de anexo del presente trabajo monográfico.

3.1. Introducción para la prueba de rigidez dieléctrica del aceite

El aceite mineral aislante es un elemento esencial en el funcionamiento del transformador, posee excelentes características físicas, químicas y eléctricas para ser utilizado con fines aislantes y refrigerantes. Su mecanismo de operación es impregnar el papel que envuelve el cobre de las bobinas y transportar el calor generado en este punto por las variaciones de corrientes, como característica principal que proporciona de medio dieléctrico que actúa como aislante que rodea a los conductores energizados.

El aceite mineral se obtiene de la refinación de los hidrocarburos recogidos durante la destilación del petróleo. Luego es sometido a diversos procesos químicos para obtener las propiedades eléctricas deseadas y conferirle un alto grado de estabilidad química.

3.1.1. Composición de aceite dieléctrico.

El rendimiento y la calidad final de los aceites vienen determinada por el tipo de petróleo, su origen y su calidad, si bien la flexibilidad de los procesos de refino debe evitar que afecte el impacto de estos cambios. Todos los crudos tienen una composición similar, los hidrocarburos que componen la mayor parte del aceite están compuestos principalmente de carbono e hidrogeno, y en menor medida de un compuesto de azufre, nitrógeno, oxígeno y otros metales. (Reis, 2009)

Elemento	Porcentaje (%)
Carbono	84-87
Hidrogeno	11-14
Azufre	0-2
Nitrógeno	0-2
Oxígeno y metales	0-1

Tabla 9: Composición del aceite dieléctrico

3.1.2. Características

Los aceites minerales aislantes deben presentar unas características físicas, químicas y eléctricas adecuadas que le permiten desarrollar satisfactoriamente sus funciones, para lo cual ser analizados en servicios con una frecuencia determinada.

Deben de poseer elevada calidad dieléctrica, deben tener baja viscosidad para facilitar la formación de corriente de convección entre las fuentes de calor y las paredes frías, y particularmente en los canales de refrigeración. (Reis, 2009)

Deben estar libre de la humedad, de los gases, de las impurezas químicas y de los contaminantes mecánicos para evitar descargas eléctricas innecesarias.

3.1.3. Funciones

A medida que se ha desarrollado el uso en general, en particular, de aceite mineral se hizo evidente que en un transformador inmerso en aceite cumple con cuatro funciones que contribuyen a la operación del mismo. (Myers, 2005)

3.1.3.1. El aceite como aislante dieléctrico

Los dos materiales más utilizados como aislantes en los transformadores son: papel Kraft (como aislante sólido) y aceite mineral (como aislante líquido). La combinación del papel empapado de aceite es un aislante dieléctrico más fuerte de lo que se pudiera esperar en caso de sumar aritméticamente la rigidez dieléctrica del aceite y la del papel, un buen estimado de esta combinación es aproximadamente de 20% - 25% mayor de lo que se puede obtener de sumar la rigidez dieléctrica de ambos materiales.

3.1.3.2. El aceite como medio de transferencia de calor.

La composición del aceite determina sus propiedades físicas, la distribución y tipo de hidrocarburos presentes, así como dichos componentes determina propiedades físicas importantes como el perfil de viscosidad, el calor específico, la densidad relativa y el coeficiente de expansión del aceite. Tales propiedades físicas determinan cuan bien el aceite se moverá hasta un punto en el que se pueda recoger el calor del núcleo y las bobinas, absorber el exceso de calor, transportar el exceso de calor de donde no es conveniente que este hacia la armazón del transformador y por último disipar el exceso de calor en la atmosfera. Las características del aceite, en relación con la transferencia de calor, cambian muy lentamente, a medida que el aceite envejece en servicio.

3.1.3.3. El aceite como protector del papel

El aceite protege al papel de la acción del calor, el oxígeno y la humedad. El aceite extrae el calor del papel de la bobina y en el núcleo a medida que se

origina. El proceso de envejecimiento acarrea la aparición de ciertos productos de la reacción entre el papel y el aceite, tales productos son muy agresivos con el papel, lo cual reduce radicalmente la rigidez mecánica del aislamiento sólido, esta comienza a producirse inmediatamente a un grado significativo al formarse cualquier subproducto a partir del envejecimiento del aceite. Es obvio que esa función es la primera en desaparecer cuando el aceite envejece, dado que influye en la capacidad de éste para cumplir con su tercera función.

3.1.3.4. El aceite como herramienta de diagnostico

Interpretar los resultados de las pruebas de aceite y relacionar cuidadosamente con las condiciones que pueden suceder en el interior de quipo, a pesar de que el envejecimiento del aceite afecta los resultados de pruebas, siempre podemos obtener un valor que nos permita evaluar y monitorear las condiciones del equipo. (Myers, 2005)

3.1.4. Propiedades de los aceites dieléctricos

La norma que describe propiedades sobre los aceites minerales para uso como medio aislante es la ASTM 3487, las propiedades funcionales del aceite se dividen en tres categorías:

3.1.4.1. Propiedades físicas

Viscosidad (ASTM D88 / D445)

Tiene una importante influencia sobre las características de transferencia de calor de un aceite. Esta propiedad es necesaria en transformadores, en donde el calor generado en los devanados y núcleo debe removerse eficientemente, por la transmisión del calor a través del aceite y enseguida al medio ambiente. Mientras más viscoso es el aceite, mayor será la resistencia que ofrecerá al moverse dentro del transformador y será menos efectiva su función de refrigeración. Por esta razón, los aceites dieléctricos deben tener una baja viscosidad para facilitar la disipación del calor generado por su operación.

Punto de fluidez (ASTM D97)

Se define como la temperatura a la cual el aceite deja de fluir, mientras se somete a un proceso de enfriamiento progresivo, este dato sirve para identificar diferentes tipos de aceites aislantes. Un punto de fluidez igual o mayor que 0°C

indica la presencia dominante de hidrocarburos parafínicos, en tanto que puntos de fluidez del orden de -10°C son propios de las fracciones en las cuales predominan los hidrocarburos isoparafínicos. Las fracciones de hidrocarburos nafténicos tienen puntos de fluidez entre -20°C a -35°C y las fracciones de hidrocarburos aromáticos llegan a tener puntos de fluidez del orden de los -40°C a -60°C

Punto de inflamación (ASTM D92)

Se define como la mínima temperatura a la cual el aceite emite una cantidad de vapores que es suficiente para formar una mezcla explosiva con el oxígeno del aire en presencia de una llama. El punto de inflamación de los aceites dieléctricos se ha fijado con un valor mínimo de 145°C y mientras más alto, será más segura su utilización en transformadores. Se especifica como razón de seguridad.

Tensión interfacial (ASTM D971)

Cuando dos líquidos son insolubles forman una superficie o interfaz cuando se ponen en contacto, tal como sucede con el aceite y el agua, existen compuestos que se forman de la descomposición natural de los aceites dieléctricos de origen mineral, que son igualmente solubles tanto en el agua como en el aceite. Ayuda en la determinación de la presencia de contaminantes polares en el líquido dieléctrico mediante la medición de la tensión del aceite contra el agua. La tensión interfacial es sensible a la presencia de productos derivados de la oxidación del aceite como indicador de deterioro.

Punto de anilina (ASTM D611)

Es una característica física de los compuestos de hidrocarburos, como los aceites, y se refiere a la temperatura mínima a la que el hidrocarburo y la misma cantidad del compuesto de anilina son perfectamente miscibles. En especificaciones vigentes para los aceites dieléctricos se establece que el punto de anilina debe ser entre 63°C hasta 84°C máximo. Un aceite dieléctrico con bajo punto de anilina (menos 80°C) disolverá mayor cantidad de lodos a temperaturas moderadas. De esta forma el lodo no se depositará en el

transformador y, por lo tanto, no ensuciaran sus partes energizadas ni se tapará los conductos por donde circula el aceite para enfriar el equipo. También este dato es utilizado para estimar la naturaleza del aceite dieléctrico, cuando el producto muestra valores de punto de anilina entre 65°C y 75°C es una indicación de su naturaleza nafténica

Color (ASTM D1500)

La intensidad de color del aceite dieléctrico depende de los tipos de hidrocarburos que predominen en dicho aceite. Así, por ejemplo, las fracciones parafínicas e isoparafínicas son blancas y transparentes, color agua. Las nafténicas varían de amarillo claro a amarillo verdoso. Las aromáticas poseen coloraciones que van desde el amarillo rojizo (naranja) al marrón oscuro. Para los aceites dieléctricos se ha fijado un color máximo de 0,5 (amarillo claro), buscando que el aceite sea predominantemente nafténico. A medida que el aceite envejece y se oxida se oscurece, la contaminación también puede producir un rápido cambio de color

Examen visual (ASTM D1524)

La muestra de aceite se somete a una apreciación visual para comprobar la opacidad, turbidez, partículas en suspensión, sedimentos visibles o lodos, carbón, agua libre o cualquier otra cosa que lo invalide como un aceite claro y homogéneo. Para que un aceite sea aceptable debe tener una apariencia "clara y brillante" toda apariencia distinta es inaceptable y debe averiguarse la causa.

Densidad relativa (ASTM D1298)

También llamada gravedad específica, es una propiedad física de los aceites dieléctricos dada por la relación entre la masa de un volumen específico del aceite y la masa del mismo volumen de agua a la misma temperatura. El aceite dieléctrico está formado por hidrocarburos cuyo origen puede ser nafténico, parafínico o aromático de acuerdo con su estructura molecular. El aceite de transformador de origen nafténico tiene una densidad relativa entre 0.84 y 0.91, los valores menores a 0.84 indican que el aceite es de origen parafínico y los valores mayores a 0.91 indican una contaminación del aceite posiblemente de

PCB (Bifenilos Policlorados). Cabe indicar que la densidad relativa del aceite no cambia a medida que este se envejece debido a que el efecto de la oxidación tiene poca incidencia al evaluar esta prueba.

3.1.4.2. Propiedades eléctricas

Factor de potencia (ASTM D924)

El factor de potencia mide las pérdidas dieléctricas del aceite y por lo tanto, de la cantidad de energía disipada como calor que tienen lugar dentro del equipo cuando se encuentra en operación. Estas pérdidas de corriente son debidas a las existencias compuestos polares en el aceite y a su vez son la causa de los aumentos anormales de temperatura que suceden en los equipos bajo carga. Cuando comienza el deterioro de un aceite, es posible detectar un incremento en el factor de potencia al inicio del proceso de oxidación. Generalmente se realiza a dos valores de temperaturas: 25°C y 100°C, sin embargo, la prueba realizada a 100°C es más sensible a pequeños cambios en la característica del aceite.

Rigidez dieléctrica (ASTM D877 / D1816)

La rigidez dieléctrica de un aceite aislante es el mínimo voltaje en el que un arco eléctrico ocurre entre dos electrodos metálicos. Indica la habilidad del aceite para soportar tensiones eléctricas sin falla. Una baja resistencia dieléctrica indica contaminación con agua, carbón u partículas conductoras en el líquido y una alta resistencia dieléctrica es la mejor condición de que el aceite no contiene contaminantes. Existen dos métodos reconocidos para la medición de la rigidez dieléctrica en aceites aislantes: Electrodos planos y Electrodos esféricos.

3.1.4.3. Propiedades químicas

Inhibidor de oxidación (ASTM D4768 / D2668)

En el aceite para transformadores se utilizan como inhibidores de la oxidación el 2,6-ditertiario-butil para-cresol (DBPC) y 2,6-ditertiario-butil fenol (DBP), utilizados como antioxidantes en el aceite. Se recomienda el uso de un inhibidor de oxidación en el aceite para equipos que no cuenten con sistemas

adecuados para preservación del aceite. El nivel óptimo para el inhibidor de oxidación es 0.3% en los que se recomienda el uso de este antioxidante.

Numero de neutralización (ASTM D974)

Para calcular el número de neutralización o de acidez utilizan el hidróxido de potasio (KOH) que reacciona con los componentes ácidos que se encuentran en el aceite. La cantidad de KOH necesarios para esta reacción está dada por un cambio de color del indicador incluido en el aceite o por un cambio eléctrico medido por electrodos con lo cual se conoce la concentración de ácido. El número de neutralización es expresado en miligramos de KOH por gramo de muestra de aceite (mg KOH/g muestra). Estos ácidos orgánicos son supremamente dañinos para el sistema de aislamiento y puede inducir a la oxidación de las piezas metálicas cuando hay humedad también presente. Un incremento en el número de neutralización es un índice de la degradación del aceite.

Humedad en el aceite (ASTM D1533)

La humedad disuelta puede afectar la rigidez dieléctrica del aceite, aun cuando su significado es determinado por varios factores como el porcentaje de saturación de humedad, la cantidad y tipo de contaminantes presentes en la muestra. En los niveles de humedad muy alta, las temperaturas de funcionamiento en el equipo pueden ser lo suficientemente altas como para permitir que el equipo energizado presente un arco eléctrico gracias a el aislamiento húmedo, lo que puede llevar a una falla catastrófica.

3.1.5. Degradación del aceite como aislante

El proceso de degradación está relacionado a la oxidación del aceite, la operación de los equipos a altas temperaturas entre otros factores favorece la degradación de este, se enunciará los elementos principales que afectan de un modo negativo al estado del aceite:

Contenido de oxígeno: altos niveles de oxígeno aceleran la reacción de oxidación que ocurre en el transformador. La mayor parte del oxígeno contenido en el transformador es de origen atmosférico, el aire es 20% oxígeno (entre otros elementos) el cual se mezcla con el aceite expuesto. Las fallas en

los transformadores pueden incrementar la cantidad de aire que ingresa al equipo.

Temperatura: condiciones de operación en alta temperatura no solo conllevan cambios significativos en la composición química del aceite, sino también el deterioro del aislamiento sólido. El calor contribuye en forma de energía en la formación de radicales libres activando los átomos de hidrogeno. La vida útil del aceite dieléctrico se reduce rápidamente a mayores temperaturas. En vista de lo expuesto es conveniente mantener temperaturas de operación no superiores a los 60°C.

Celulosa (papel aislante): es sabido que la descomposición del papel aislante desencadena reacciones químicas en el aceite, funcionando como catalizador (cediendo electrones a las moléculas del aceite) acelerando la oxidación en el aceite. El papel aislante absorbe agua y los derivados ácidos que se generan como producto del deterioro del aceite formando enlaces de hidrogeno que debilitan el papel. (Myers, 2005)

3.1.6. Evaluación de la rigidez dieléctrica al aceite

El aceite en un transformador desempeña un papel importante en la expectativa de vida de él, y una de sus propiedades es ser elemento aislante, por eso es importante realizar esta prueba, ya que este sufre deterioro o degradación debido a sus condiciones de trabajo. El proceso donde se empieza a deteriorar el aceite pierde la cualidad de ser aislante, debido a que disminuye su rigidez dieléctrica.

La prueba se realiza usando un vaso de pruebas que tiene dos electrodos montados en su interior, con una separación entre ellos, la muestra del aceite se introduce en el vaso y se aplica un voltaje en corriente alterna a los electrodos. El voltaje se incrementa hasta que el aceite se rompe, es decir, hasta que se produzca una chispa entre los electrodos. El voltaje de prueba se desactiva de inmediato, por lo que este voltaje será el resultado y se evalúa en forma típica comparándolo con las directivas establecidas por las normas. (Megger, 2011)

El voltaje de ruptura dieléctrica de un líquido aislante es importante como medida de la capacidad del líquido para resistir la tensión eléctrica sin fallar. El

voltaje de ruptura dieléctrica sirve para indicar la presencia de agentes contaminantes como agua, suciedad, fibras celulósicas o partículas conductoras en el líquido, uno o más de los cuales pueden estar presentes en concentraciones significativas cuando se obtienen voltajes de ruptura bajos. Sin embargo, un alto voltaje de ruptura dieléctrica no indica necesariamente la ausencia de todos los contaminantes; simplemente puede indicar que las concentraciones de contaminantes que están presentes en el líquido entre los electrodos no son lo suficientemente grandes como para afectar negativamente el voltaje de ruptura promedio del líquido cuando se prueba con este método de prueba.

3.1.7. Normas aplicables para la prueba de rigidez dieléctrica

Hay varias normas de prueba para líquidos aislante, dos de estas son más comunes en sus usos como ASTM (EE. UU.) estas normas son:

1. ASTM D877 – Método de prueba estándar del voltaje de ruptura dieléctrica de líquidos aislantes por el uso de electrodos en forma de discos.

Esta norma especifica el uso de electrodos con forma de disco con 25.4 mm (1 pulg.) de diámetro, de al menos 3.18 mm (0.125 pulg.) de espesor y una separación entre ellos de 2.5 mm (0.1 pulg.), los electrodos se fabrican de bronce pulido y se montan de modo de tener sus caras paralelas y horizontalmente en línea con el vaso de prueba.

Esta norma se estipula que se debe generar un voltaje con una tasa de crecimiento de 3 kV/seg a frecuencia de rango entre 45 a 65 Hz, hasta que se genere la ruptura. Hay que tomar en cuenta que los electrodos son planos relativamente insensibles a la humedad en concentraciones por debajo del 60% del nivel de saturación, según estudios desarrollados, para este caso es necesario complementarse con prueba de contenido de humedad cuando se utilice este método. Por esta restricción se recomienda el uso de la norma ASTM D877 como aceptación para aceites nuevos, con el fin de asegurar que el aceite fue almacenado y transportado correctamente, sin embargo, algunos laboratorios de prueba de aceite todavía recomiendan su uso para aplicaciones específicas en servicio.

Se pueden elegir dos procedimientos diferentes al ejecutar esta prueba estándar:

Procedimiento A: se realizan 5 mediciones de ruptura en un llenado de celda de prueba con un intervalo de 1 minuto entre las rupturas. La media de los 5 rellenos se considera la tensión de ruptura.

Procedimiento B: se realiza 1 medición de ruptura en cada uno de los 5 llenados sucesivos de la celda de prueba. La media de las 5 rupturas se considera la tensión de ruptura

Para determinar rangos aceptables de prueba se calcula la media de las 5 o 10 mediciones de ruptura utilizando la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = n^{-1} \left(\sum_{i=1}^n X_i \right)$$

Donde:

$\bar{x}$ = media de los n valores

x_i = i-ésimo voltaje de ruptura

n = número de rupturas (5 o 10)

Se determina que el rango de las 5 rupturas no es mayor que el 92% del valor medio. Si el rango es aceptable, reportar este valor medio como el voltaje de ruptura dieléctrica. Si el rango supera el 92 % del valor medio de las cinco rupturas, se debe repetir con el mismo número de rupturas. Si se determine el número de las 10 rupturas y si el rango es menor al 151% del valor medio de las diez rupturas, informe este valor medio como el voltaje de ruptura dieléctrica para la muestra. Si se excede el rango permitido, el error es demasiado grande. Investigue la causa del error y repita las pruebas.

Ejemplos de aplicación de este criterio:

Los voltajes de ruptura registrados son 43, 45, 52, 40 y 38kV. El valor más bajo es de 38kV y el más alto es 52kV, de modo que el rango es de 14kV. El valor medio de los valores registrados es 43.6kV de modo que el rango es $14/43.6 \times 100\% = 32.11\%$ del valor medio. Estos resultados de prueba son, por lo tanto, validos.

Los voltajes de ruptura registrados son 33, 45, 52, 18 y 20kV. El valor más bajo es de 18kV y el más alto es 52kV, de modo que el rango es de 34kV. El valor medio de los valores registrados es 33.6kV de modo que el rango es $34/33.6 \times 100\% = 101\%$ del valor medio. Este resultado es más que el límite de 92%, lo que significa que la prueba se debe repetir.

Para un reporte de prueba con este método se debe incluir la siguiente información:

1. Designación ASTM del método de prueba usado (D877)
2. Procedimiento usado: Procedimiento A o Procedimiento B
3. El tipo de fluido probado
4. Temperatura de la muestra
5. Valores de descomposición individuales y la descomposición media
6. Número de ruptura, ya sea 5 o 10
7. Si se observa que la muestra contiene agua libre, el informe debe indicarlo

A continuación, se presenta la clasificación de los resultados de tensión de ruptura dieléctrica mediante el uso del método D877:

Aceptable	Cuestionable	Inaceptable
$\geq 30\text{kV}$	$< 30\text{kV}$ $\geq 25\text{kV}$	$< 25\text{kV}$

Tabla 10: Clasificación de resultados según ASTM D877

Para el desarrollo de este método se debe asegurar que se tenga una temperatura ambiente entre 20°C y 30°C para proceder al llevado de la cuba, se vierte el aceite de manera que descienda lentamente a lo largo de las paredes de la misma, con el objetivo de evitar la formación de burbujas de aire, en caso de que se generen burbujas se deben eliminar utilizando una varilla de vidrio y esta debe ser limpiada con el mismo aceite de la muestra.

El llenado se debe realizar hasta un nivel no menor de 20.3 mm o 0.8 pulg sobre la parte superior de los electrodos. Luego se procede a colocar la cuba en el probador de rigidez dieléctrica y se deja reposar el líquido por un periodo de no más de 3 minutos ni menos de 2 minutos.

2. ASTM D1816 – Método de prueba estándar del voltaje de ruptura dieléctrica de líquidos aislantes generados desde el petróleo por el uso de electrodos VDE.

Esta norma especifica el uso de una cuba con electrodo de cara semiesféricas en forma de hongo según norma VDE (por sus siglas Verband Deutscher Elektrotechniker o Federación de Electrónicos Alemanes) con un diámetro de 36mm. Al igual que con los de la ASTM D 877, los electrodos son de latón pulido, bronce y acero inoxidable para ser libre de cualquier ataque químico, rasgadura, picadura, o la acumulación de carbono. Los electrodos deben estar en forma paralela con una separación que puede ser de 1 mm o 2mm (0.04o 0.08 pulg.).

Este método para determinar la tensión de ruptura dieléctrica es más sensible a la humedad y a los compuestos polares, como por ejemplo los productos de la oxidación del aceite. Este método también ofrece mayor consistencia en cuanto a la sensibilidad ante la presencia de ciertas partículas, en especial, las fibras provenientes del aislamiento sólido.

Debido a la mayor sensibilidad, la velocidad de incremento de tensión es de 500V por segundo. Además, la celda de prueba de este método cuenta con un agitador motorizado, el cual se activa durante la prueba y hace que el aceite fluya entre los electrodos, arrastrando partículas suspendidas hasta el espacio de separación entre los electrodos planos VDE, en donde pueden influir en la tensión de ruptura.

Para determinar rangos aceptables de prueba se calcula la media de las 5 mediciones de ruptura utilizando la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 X_i$$

Donde:

$\bar{x}$ = media de las 5 rupturas.

x_i = i-ésimo voltaje de ruptura.

Ajuste de espacio de 1mm

Se determina que el rango debe ser inferior al 120 % de la media de los 5 voltajes de ruptura. Si el rango es aceptable, reportar este valor medio como el voltaje de ruptura dieléctrica. Si el rango supera el 120 % del valor medio de las cinco rupturas, se debe repetir con el mismo número de rupturas.

Ajuste de espacio de 2mm

Se determina que el rango debe ser inferior al 92 % de la media de los 5 voltajes de ruptura. Si el rango es aceptable, reportar este valor medio como el voltaje de ruptura dieléctrica. Si el rango supera el 92 % del valor medio de las cinco rupturas, se debe repetir con el mismo número de rupturas.

Para un reporte de prueba con este método se debe incluir la siguiente información:

1. Designación ASTM del método de prueba usado (D1816)
2. Voltajes de cada ruptura
3. El tipo de fluido probado
4. Temperatura de la muestra
5. Valores de descomposición individuales y la descomposición media
6. El espaciado entre los electrodos
7. Si se observa que la muestra contiene agua libre, el informe debe indicarlo

La clasificación para los resultados de tensión de ruptura dieléctrica según la prueba D1816 depende de la clase de tensión primaria del equipo y se puede observar en las siguientes tablas que aparecen a continuación para las dos separaciones establecidas:

Clase de tensión del equipo	Aceptable	Cuestionable	Inaceptable
$\leq 69 \text{ kV}$	$\geq 23 \text{ kV}$	$< 23 \text{ kV}$ $\geq 18 \text{ kV}$	$< 18 \text{ kV}$
$> 69 \text{ kV}$ $< 230 \text{ kV}$	$\geq 28 \text{ kV}$	$< 28 \text{ kV}$ $\geq 23 \text{ kV}$	$< 23 \text{ kV}$
$\geq 230 \text{ kV}$	$\geq 30 \text{ kV}$	$< 30 \text{ kV}$ $\geq 25 \text{ kV}$	$< 25 \text{ kV}$

Tabla 11: Tension de ruptura dieléctrica D1816 - separación 1mm

Clase de tensión del equipo	Aceptable	Cuestionable	Inaceptable
$\leq 69 \text{ kV}$	$\geq 40 \text{ kV}$	$< 40 \text{ kV}$ $\geq 35 \text{ kV}$	$< 35 \text{ kV}$
$> 69 \text{ kV}$ $< 230 \text{ kV}$	$\geq 47 \text{ kV}$	$< 47 \text{ kV}$ $\geq 42 \text{ kV}$	$< 42 \text{ kV}$
$\geq 230 \text{ kV}$	$\geq 50 \text{ kV}$	$< 50 \text{ kV}$ $\geq 45 \text{ kV}$	$< 45 \text{ kV}$

Tabla 12: Tension de ruptura dieléctrica D1816 - separación 2mm

Para el desarrollo de este método se debe asegurar que se tenga una temperatura ambiente entre 20°C y 30°C, para proceder a llenar la cuba. Luego se llena la cuba con la muestra de aceite, con una separación entre los electrodos de 1 mm se recomienda una cantidad de 0.5 litros y para la de 2 mm de 0.95 litros. Cuando se hace el llenado de la cuba se debe hacer lentamente para evitar generar burbujeo, si se genera se debe eliminar utilizando una varilla de vidrio limpia; esta debe ser limpiada con el mismo aceite de la muestra, también se puede utilizar un agitador con hélice de dos palas de diámetro 35 mm, donde debe tener un paso de 40 mm entre cada hoja, el ángulo de inclinación debe ser de 20 grados y el proceso se debe realizar con una velocidad de 200 a 300 vueltas por minuto.

Luego se espera que el aceite tenga un reposo antes de aplicar el primer voltaje de ruptura, el tiempo del reposo debe ser de no más de 5 minutos ni menos de 3 minutos. Luego se aplica el voltaje de prueba con una tasa de crecimiento de 0.5 kv/seg hasta que ocurra la ruptura del aceite. Igual que en la norma anterior se toman entre 5 rupturas para obtener un valor más aproximado y exacto con un tiempo de espera entre cada ruptura no menos de 60 segundos (1 minuto) pero no más de 90 segundos (1 minuto y medio).

La tabla 9 muestra una comparación entre las características más importantes para los dos métodos.

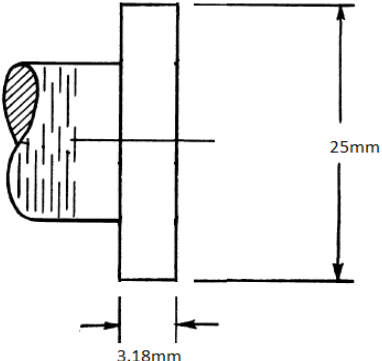
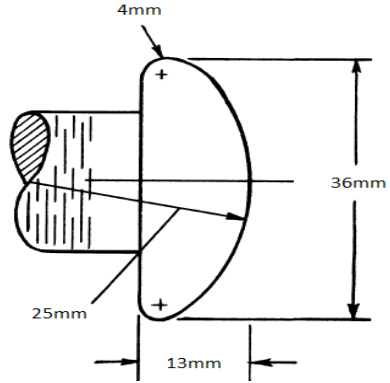
	ASTM D-877		ASTM D-1816
	Procedimiento A	Procedimiento B	
Forma de electrodos			
Separación	2.54 mm	2.54 mm	1 mm o 2 mm
Frecuencia	45-65 Hz	45-65 Hz	45-65 Hz
Voltaje de prueba	3 kV/s	3 kV/s	0.5 kV/s
Cantidad de secuencia	5	1 – 5 diferentes	5
Tiempo entre rupturas	1 min	1 min	1 – 1.5 min
Tiempo de llenado e inicio de prueba	2 – 3 min	2 – 3 min	3 – 5 min
Agitamiento	N/A	N/A	200 – 300 r.p.m.
Temperatura	20° - 30° C (se debe registrar)	20° - 30° C (se debe registrar)	20° - 30° C (se debe registrar)
Aplicación	Aceptación Aceite Nuevo		Aceite en Servicio

Tabla 13: Comparativa entre norma ASTM D877 y ASTM D1816

3.1.8. Procedimientos para la prueba de rigidez dieléctrica

Al iniciar el proceso de toma de muestra es importante tomar en consideración los siguientes elementos para garantizar la eficacia del resultado y la seguridad del operario tomando la muestra.

Para la toma de muestra se tomarán las recomendaciones por parte de la norma IEC 60475-2013 “Método de toma de muestras de líquidos aislantes”:

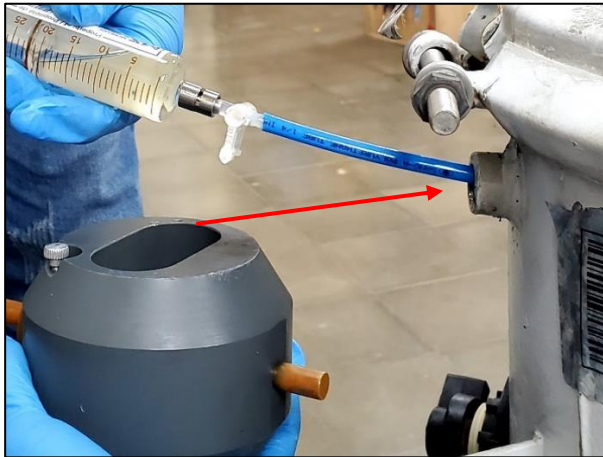
1. Durante la toma de la muestra se podrán utilizar bandejas u otro recipiente con la finalidad de contener derrames (goteos o salpicaduras) para que no lleguen al suelo o piso.
2. La jeringa de extracción debe estar limpia y seca.
3. El punto o válvula para extraer la toma de aceite deberá estar limpia.
4. Evitar tomar muestras en días con alta humedad atmosférica.
5. Asegurarse que el transformador, la muestra y etiqueta se correspondan.
6. Hacer el uso de equipos de protección personal como guantes de nitrilo, calzado de seguridad y el uso de lentes de seguridad.
7. Contar con artículos tales como bolsas plásticas o papel absorbente para limpiar cualquier derrame de aceite.

Los transformadores de distribución no cuentan con una válvula especial para poder tomar una muestra de aceite. A continuación, se detallan los pasos a seguir para tomar la muestra de aceite del tanque de un transformador de distribución.

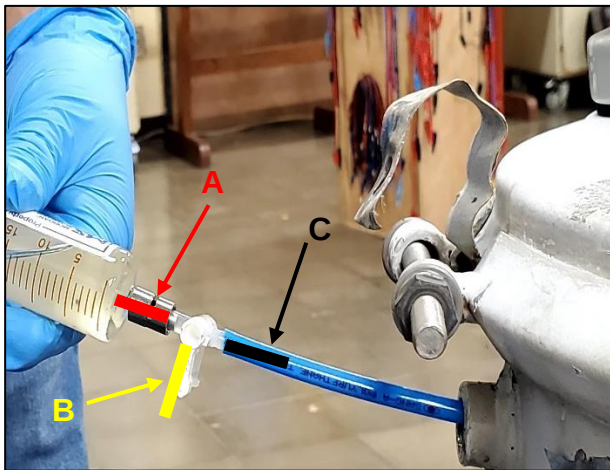
Paso 1: se debe retirar la válvula de alivio ubicada en la parte superior del tanque



Paso 2: se insertará una manguera de 1/4" de caucho en el lugar donde se retiró la válvula de alivio, con un largo de al menos 40cm



Paso 3: se acopla una jeringa de vidrio 30ml/cc con una válvula compuesta de 3 vías, se describe su función como posición A, B, C



Posición A: indica una posición cerrada que permite hermeticidad a la jeringa

Posición B: permite realizar extracción de la muestra en la jeringa

Posición C: permite drenar toda la muestra hacia la celda de prueba del equipo

Paso 4: una vez introducida la manguera y acoplada la jeringa, se procede a extraer el aceite pasando a la posición B de la llave, suavemente ir llenando los 30ml de la jeringa

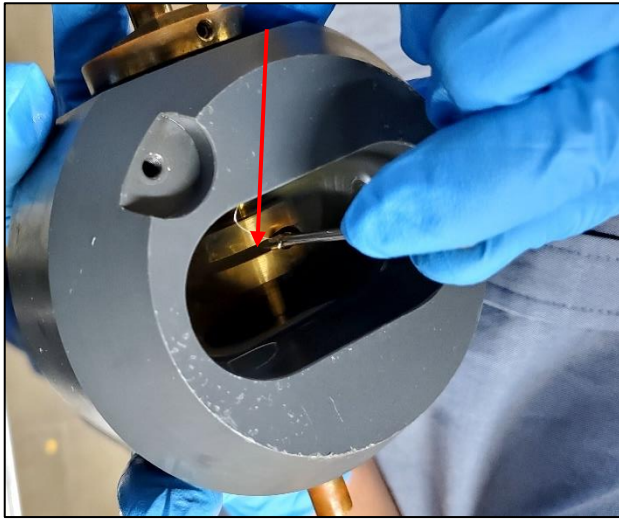


Paso 5: pasar a la posición C para ir drenando suavemente por las paredes de la celda para evitar que se formen burbujas de aire en la muestra

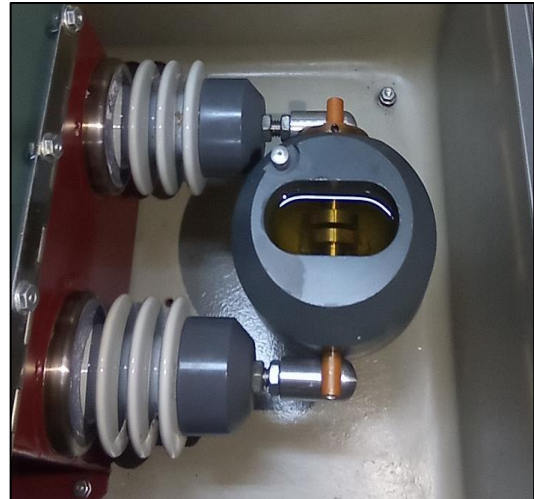


Paso 6: se repetirán los pasos 4 y 5 de tal manera por llenar la celda de prueba al punto donde el aceite cubra por completo los electrodos con aproximadamente 0.1 L de aceite, no se recomienda llenarla completamente

Paso 7: se deberá calibrar la distancia de los electrodos con el uso de la varilla localizada en la celda de prueba y asegurarse que la varilla quede ajustada entre los electrodos



Paso 8: luego de ser calibrada, es momento de colocarla dentro del equipo de prueba, dejarla reposar al menos unos 2 minutos antes de inyectar el voltaje y cerrar la tapa



Paso 9: se procede subir el switch en posición **ON** el equipo y ajustar una velocidad de subida a **3000V/s**

Paso 10: subir el switch a **START** para iniciar la inyección automática de voltaje

Paso 11: cuando ocurra la ruptura, el voltaje se apagará, la lampara de falla se iluminará y en la pantalla se indicará el voltaje de ruptura el cual será anotado

Paso 12: para retornar a cero, se baja el **SWITCH** de **START** a la posición **STOP & RESET**

Paso 13: dejar reposar la muestra al menos 1 minutos antes de iniciar la siguiente prueba

Paso 14: repetir los pasos del 8 al 13, de tal manera se obtengan 5 mediciones de ruptura

3.1.9. Resultados de la prueba de ruptura dieléctrica del aceite

Para determinar los resultados de acuerdo con la norma ASTM D877, se debe determinar que el rango de las 5 rupturas no sea mayor del 92% del valor medio, si el rango es aceptable, se reporta como el valor medio como el voltaje de ruptura. Si en caso contrario se supera el 92% del valor medio de las 5 rupturas, se debe repetir con el mismo de rupturas hasta obtener el resultado aceptable. Si los errores son demasiado grandes, se deberá investigar la causa.

N° Prueba	Tensión de Ruptura (kV)
1	37.9
2	35.0
3	33.0
4	36.4
5	38.2

Rango	5.2 kV
Promedio	36.1 kV
% Valor Promedio	14.4%
% Aceptable	92%

Tabla 14: Resultados de la medición de ruptura dieléctrica de aceite

Con una razón resultante menor del 0.1, el promedio de esta prueba de 36.1 kV se puede reportar como la tensión de ruptura del aceite para este transformador con un resultado aceptable según la recomendación de la norma que indica un nivel aceptable mayor de 30 kV.

3.2. Prueba de resistencia de aislamiento

El papel es el aislamiento solido que se utilizan en los transformadores, es conocido como papel Pressboard, un cartón prensado de muy alta calidad fabricado del 100% de pulpas de madera seleccionadas mediante el proceso Kraft. El aislamiento a partir de pura celulosa Kraft proporciona excelentes características de impregnación con el aceite dieléctrico, por lo tanto, tiene una buena estabilidad geométrica en aceite, es fácil de moldear, de alta densidad, uniforme, alta rigidez mecánica, buena flexibilidad, alta rigidez dieléctrica

(mayor que la del aceite dieléctrico mineral) y es, con mucho, el aislamiento sólido más económico para la refrigeración en aceite de transformadores. El Pressboard se fabrica en dos versiones, papel fino que envuelve los conductores y planchas gruesas de cartón o cilindros gruesos que aíslan los arrollamientos entre ellos. (Reis, 2009)

3.2.1. Composición del papel aislante

El papel aislante no es más que un material formado por fibras embutidas, estas fibras pueden ser de origen natural (celulosa, algodón, lino) o de origen sintético (nylon, nomex).

La celulosa para la producción de papel aislante se obtiene de la madera, esta contiene aproximadamente entre el 50% y 56% de celulosa Alpha (1200 unidades de glucosa en una cadena), entre el 15% y 25% de hemicelulosa (por debajo de las 200 cadenas en una cadena) y entre 27% y 29% de lignina, un cemento químico une entre si las fibras.

En el proceso de la fabricación de la celulosa, la hemicelulosa y lignina son parcialmente eliminados. La composición típica de Kraft es en torno a 75%-85% de celulosa, 10%-20% de hemicelulosa, 2%-6% de lignina y menos del 0.5% de compuestos inorgánicos. (Reis, 2009)

3.2.2. Diagnóstico de la resistencia de aislamiento del transformador

El aislamiento se degrada a lo largo del tiempo debido a las diferentes solicitudes de las cuales es sometido durante su vida útil normal. El aislamiento se diseñó para soportar dichas solicitudes durante una cantidad de años, considerada como la vida útil de ese aislamiento. Las solicitudes anormales pueden acelerar este proceso y acordar severamente la vida útil del aislamiento. Debido a estos es una buena práctica realizar pruebas regularmente para determinar si ocurre un envejecimiento acelerado y de ser posible, identificar si los efectos se pueden revertir. Esta prueba es la comúnmente denominada prueba de Megado, esta solicitada por las normas IEEE C57.12, IEC60076-1. El propósito de las pruebas de aislamiento del diagnóstico del aislamiento es:

- Detectar un envejecimiento acelerado
- Identificar la causa de dicho envejecimiento

- Identificar, de ser posible, las acciones más apropiadas para corregir la situación

Todo conductor eléctrico de una instalación ya sea de un motor, generador, cable, interruptor, transformador, está cubierto con algún tipo de aislamiento eléctrico. Mientras que el conductor es en sí mismo un buen conductor (en general de cobre o aluminio) de la corriente eléctrica que alimenta a los equipos eléctricos, el aislamiento debe resistir la corriente y mantenerla a lo largo del conductor.

Para una resistencia dada, a mayor voltaje, mayor corriente. De manera inversa, cuando menor es la resistencia de conductor, mayor será la corriente que circula con el mismo voltaje.

Por su parte, la medición de la resistencia de aislamiento no es destructiva en las condiciones de prueba normales. Se lleva a cabo aplicando una tensión continua de magnitud cercana a la tensión nominal y sus resultados pueden ser expresado en $k\Omega$, $M\Omega$, $G\Omega$, incluso hasta en $T\Omega$. Esta resistencia expresa la calidad del aislamiento entre dos elementos conductores.

3.2.3. Causas del fallo en el aislamiento

Se pueden clasificar en cinco grupos, siempre teniendo en cuenta que estas distintas causas se suman entre ellas en ausencia de medidas correctivas estas ocasionan una espira gradual de declinación de la calidad del aislamiento sólido.

Origen eléctrico: Relacionada principalmente con fenómenos de sobretensiones y caídas de tensión, generan condiciones anormales dentro del aislamiento, que puede conducir un agrietamiento o delaminación de este.

Origen mecánico: Los ciclos de puesta en marcha y paro, sobre todo si son frecuentes, los defectos de equilibrio de máquinas rotativas y todos los golpes directos contra los cables pueden provocar defectos.

Origen químico: La proximidad de productos químicos, de aceites, de vapores corrosivos y de modo general, el polvo puede afectar el rendimiento del aislamiento de los materiales.

Origen térmico: En ambientes o condiciones excesivamente calurosas o frías ocasionara sobre expansión o sobre contracción del aislamiento, que pueda generar grietas y fallas.

Origen ambiental: La contaminación ambiental abarca a varios agentes que van desde la humedad hasta el ataque de roedores que puedan ocasionar falla en el sistema eléctrico.

El aislamiento comienza a degradarse tan pronto como se pone en servicio. El aislamiento para una aplicación determinada se diseña para proporcionar un buen servicio durante muchos años, en condiciones normales de operación. Sin embargo, condiciones anormales pueden tener efectos dañinos, que si se deja sin atención aceleran la degradación y finalmente ocasionaran una falla en el aislamiento. Se considera que el aislamiento ha fallado si no evita de manera adecuada que la corriente eléctrica circule por trayectorias no deseadas. (Megger, 1992)

3.2.4. Principio de la medición del aislamiento

La medición de la resistencia se basa en la Ley de Ohm, al aplicar una tensión continua con un valor conocido e inferior a su tensión nominal y a continuación medir la corriente en circulación, es posible determinar fácilmente el valor de la resistencia. Por principio, la resistencia de aislamiento presenta un valor muy elevado, pero no infinito.

En teoría, un material aislante no debería de dejar conducir la corriente eléctrica. En la práctica, existe una pequeña corriente que circula por el material aislante que posee los siguientes componentes:

Corriente de carga capacitiva: Corriente que aparece como consecuencia de la carga del capacitor que intrínsecamente se forma por el aislamiento que separa las partes energizadas entre sí y entre las partes energizadas y la carcasa dentro del equipo eléctrico, esta corriente se incrementa a medida que se incrementa el voltaje DC de prueba. En función del tiempo decrece a medida que este transcurre, es decir, esta corriente posee altos valores iniciales muy altos que disminuyen a medida que transcurre el tiempo y el aislamiento se ha cargado al voltaje pleno.

Corriente de absorción o polarización: Corriente que aparece como consecuencia del proceso de polarización del material aislante (orientación de cargas en el sentido del campo eléctrico), este fenómeno disminuye a medida que culmina el desplazamiento interno de cargas.

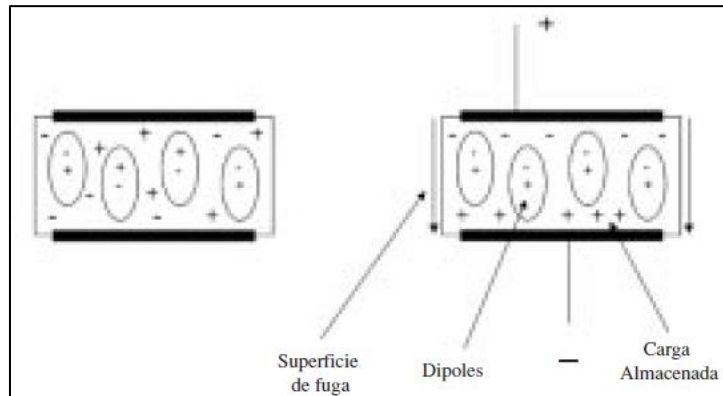


Figura 35: Alineación de moléculas polarizadas

Corriente de fuga superficial: Es aquella que aparece como consecuencia de la conducción existente en la superficie del aislamiento. Esta corriente circula por varios factores entre algunos como la contaminación y la humedad acumulada en la superficie del material a través del cual pasa el campo eléctrico.

Corriente de conducción o de fuga volumétrica: Es la corriente que fluye a través del volumen del material y es la corriente que se utiliza para evaluar las condiciones de aislamiento bajo prueba. Se requiere que la inyección de voltaje se realice por tiempo determinado para poder medir el valor de esta corriente.

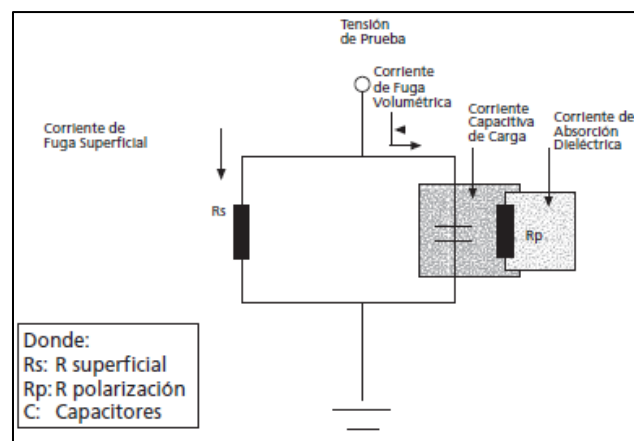


Figura 36: Corrientes ante un campo dieléctrico CD

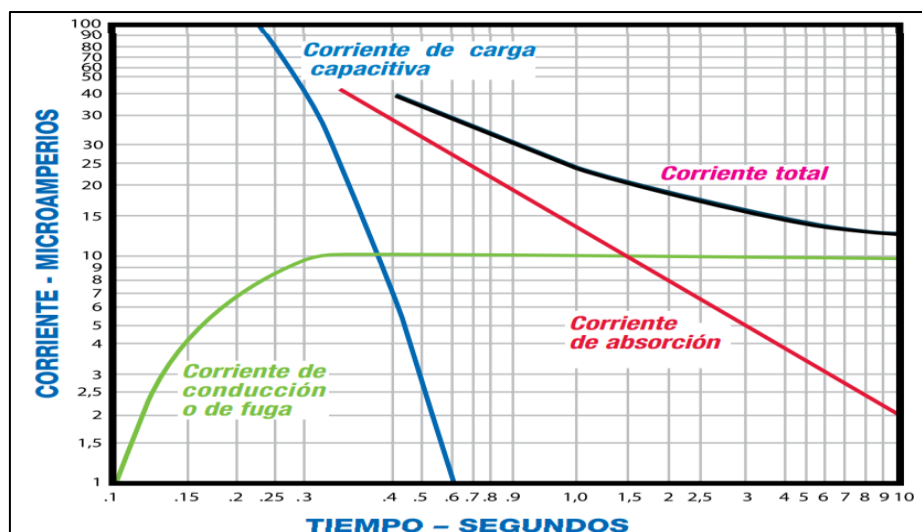


Figura 37: Componentes de la corriente de prueba

La corriente total es la suma de estas componentes (la corriente de fuga se muestra como una corriente). Esta es la corriente que se puede medir directamente con un micro amperímetro para un voltaje definido.

Según la figura 30, la corriente de carga desaparece relativamente rápido conforme se carga el equipo bajo prueba, las unidades grandes con más capacitancia tardaran más en cargarse. Para la corriente de absorción disminuye con una rapidez relativamente lenta, que depende de la naturaleza exacta del aislamiento. Con buen aislamiento, la corriente de conducción o de fuga debe subir a un valor estable que es constante para el voltaje aplicado, cualquier incremento de corriente de esta corriente con el tiempo es una advertencia de problema. (Megger, 1992)

3.2.5. Tipos de pruebas de resistencia de aislamiento

Para medir la resistencia de aislamiento o el nivel de aislamiento, los siguientes procedimientos son los más comunes en transformadores:

Prueba de corto tiempo o lectura puntual

Es una prueba rápida y sencilla que mide la resistencia de aislamiento de un transformador en un momento determinado. La prueba consiste en aplicar un voltaje CC a los devanados del transformador en un periodo generalmente de 1 minuto y medir la corriente resultante, a continuación, se calcula la resistencia de aislamiento mediante la Ley de Ohm. Los valores por obtener deben ser referidos a una temperatura de 20°C como referencia.

Los resultados de la prueba suelen expresarse en megaohmios ($M\Omega$). Los valores de resistencia de aislamiento aceptables para transformadores varían según su tensión nominal. Se puede guiar de la recomendación de la ANSI NETA 2015 en la tabla 100.5.

TABLE 100.5			
Transformer Insulation Resistance Maintenance Testing			
Transformer Coil Rating Type (Volts)	Minimum DC Test Voltage	Recommended Minimum Insulation Resistance (Megohms)	
		Liquid Filled	Dry
0 – 600	1000	100	500
601 – 5000	2500	1000	5000
Greater than 5000	5000	5000	25000

Figura 38: Valores recomendados de aislamiento por ANSI NETA MTS 2015

Métodos tiempo – resistencia

Estos métodos consisten en leer valores sucesivos de resistencia de aislamiento en determinados momentos. Presentan la ventaja de ser poco influenciados por la temperatura, lo cual permite aplicarlos con facilidad sin necesidad de corregir los resultados, bajo la condición de que el equipo que se está probando no soporte variaciones significativas de temperatura durante la prueba. (Megger, 1992)

En el caso de un aislante en buen estado, la corriente de fuga o corriente de conducción es débil y la medición es altamente influenciada por la corriente de carga capacitiva y de absorción dieléctrica. La medición de la resistencia de aislamiento aumentará durante el tiempo de aplicación de la tensión de prueba.

En el caso de un aislante en mal estado (deteriorado o húmedo), la corriente de fuga o corriente de conducción es muy fuerte, constante y sobrepasa la corriente de carga capacitiva y de absorción dieléctrica se mantienen durante el periodo de prueba.

Si se grafican las lecturas de resistencia a intervalos de tiempo desde el inicio de la prueba produce una curva creciente y uniforme para un aislamiento en buen estado, pero una gráfica plana para un aislamiento deteriorado.

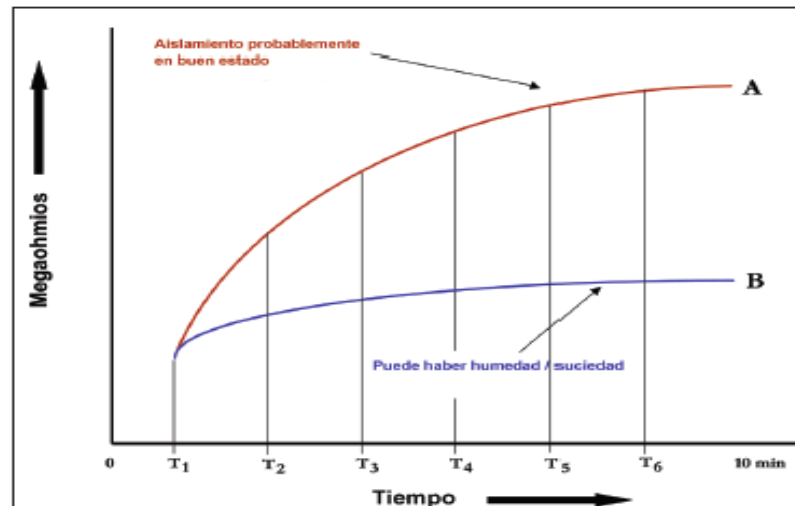


Figura 39: Grafica de prueba tiempo-resistencia

Los beneficios de las pruebas tiempo – resistencia son que es relativamente independiente de la temperatura y que puede dar información concluyente sin los registros de pruebas anteriores.

Prueba de absorción dieléctrica (DAR)

El resultado de esta prueba consiste en realizar el coeficiente del valor de resistencia de aislamiento tomada a los 60 segundos y el valor a los 30 segundos. La prueba mide la calidad del aislamiento, si se encuentra en buenas condiciones el valor del índice de absorción dieléctrica se incrementa a medida que transcurre el tiempo, ya que el valor de resistencia de aislamiento medido a los 60 segundos debe ser mayor que el medido a los 30 segundos.

$$DAR = \frac{\text{Resistencia medida a los 60 segundos}}{\text{Resistencia medida a los 30 segundos}} \quad (21)$$

Índice de Polarización

El resultado de esta prueba consiste en realizar el coeficiente del valor de resistencia de aislamiento tomada a los 10 minutos y el valor a 1 minuto. En esta medición se podrán obtener mejores resultados del comportamiento del aislamiento durante el tiempo de la prueba. En general, una relación baja indica poco cambio, consecuentemente un aislamiento pobre, mientras que una relación alta indica lo opuesto. Llevando a cabo la prueba lo que se debe cumplir es que el resultado de la relación sea mayor de 1, puesto que hay materiales que exhiben muy poca absorción dieléctrica.

$$IP = \frac{\text{Resistencia medida a los 10 minutos}}{\text{Resistencia medida al 1 minuto}} \quad (22)$$

Existe un cierto número de factores que afectan el valor de la resistencia de aislamiento, así pues, el valor de la corriente que circula cuando se aplica una tensión constante al circuito durante la prueba puede variar. Estos factores, por ejemplo: la temperatura o la humedad, pueden modificar la medición.

3.2.6. Efectos de la temperatura en la medición

Las variaciones de temperatura pueden tener un efecto crítico, la resistencia cae marcadamente con un incremento en la temperatura para el mismo equipo. Cada tipo de material aislante tiene un grado diferente de cambio de resistencia con la temperatura. Se han desarrollado tablas de factores de corrección para aislamientos sumergidos en aceite, tal el caso como el transformador. Las lecturas deberán ser corregidas a una temperatura base de 20°C bajo recomendaciones de la norma ANSI NETA MTS 2015.

Temp. °C de prueba	Factor de Corrección	Temp. °C de prueba	Factor de Corrección	Temp. °C de prueba	Factor de Corrección	Temp. °C de prueba	Factor de Corrección
0	0.2500	14	0.6596	27	1.6187	41	4.2566
1	0.2580	15	0.7067	28	1.7345	42	4.5610
2	0.2679	15.6	0.7400	29	1.8585	43	4.8871
3	0.3885	16	0.7573	30	1.9800	44	5.2365
4	0.3306	17	0.8114	31	2.1337	45	5.6000
5	0.3600	18	0.8694	32	2.2863	46	6.0121
6	0.3796	19	0.9316	33	2.4498	47	6.4420
7	0.4067	20	1.000	34	2.6249	48	6.9026
8	0.4358	21	1.0690	35	2.8000	49	7.3961
9	0.4670	22	1.1461	36	3.0137	50	7.8500
10	0.5000	23	1.2280	37	3.2292	51	8.4916
11	0.5361	24	1.3158	38	3.4601	52	9.0987
12	0.5745	25	1.4000	39	3.7007	53	9.7492
13	0.6156	26	1.5107	40	3.9500	54	10.4463

Tabla 15: Factores de corrección de resistencia de aislamiento a 20°C en transformadores

Se puede tomar como ejemplo que una medición resultó de $2.5\text{M}\Omega$ a una temperatura de 32°C , para corregir esta medición a 20°C se realiza la multiplicación del factor de corrección en este caso de $2.2863(\text{para } 32^\circ\text{C}) \times 2.5\text{M}\Omega$ es igual a $5.7157\text{M}\Omega$ corregidos a los 20°C .

3.2.7. Efectos de la humedad

El contenido de humedad tiene un efecto en la resistencia de aislamiento, pero no se puede cuantificar tan limpiamente como el de la temperatura debido a que los diferentes tipos de aislamiento absorberán la humedad a distintos grados, como lo hacen las distintas edades y condiciones del mismo tipo. Lo mejor que se puede decir es que la humedad es factor que no se debe pasar por alto cuando se evalúan los resultados. (Megger, 1992)

El incremento de humedad en el aire del entorno (ambiente) requiere de mayor atención conforme crecen los voltajes de pruebas porque pueden dar lugar a la ionización mucho más fácilmente. Esto no es necesariamente un problema siempre y cuando el porcentaje de humedad no exceda al menos de un 90%.

3.2.8. Conexiones para la prueba de aislamiento

Se debe poner en cortocircuito las terminales de cada devanado con al menos 1 metro de cable de cobre desnudo #12, verificar que el tanque del transformador este aterrizado y retirar la conexión de tierra al neutro de la terminal X2. Luego se debe involucrar las siguientes maniobras de conexión:

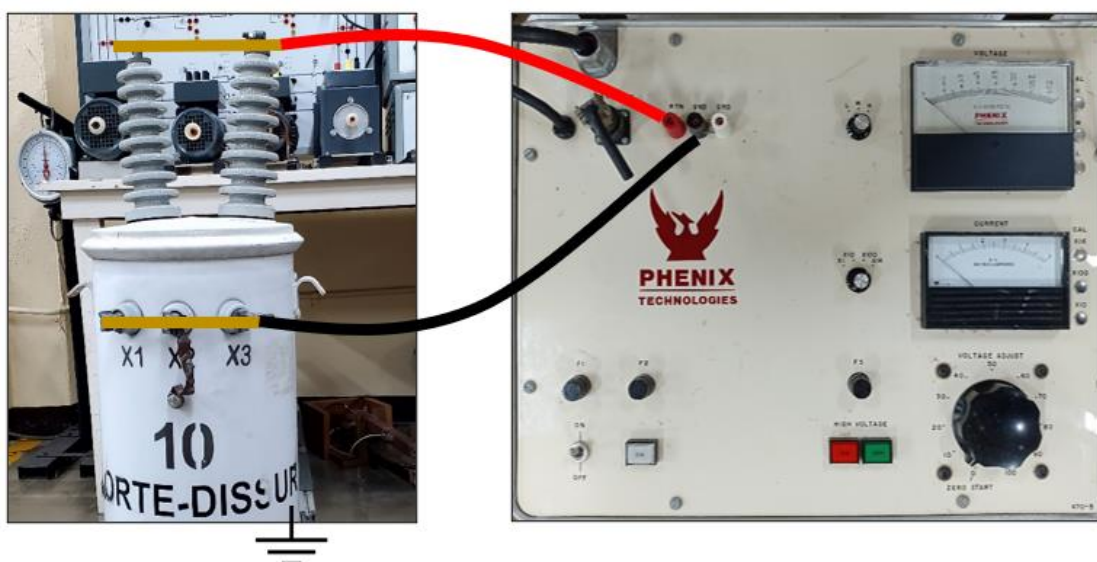


Figura 40: Conexión del devanado de alta tensión vs devanado de baja tensión

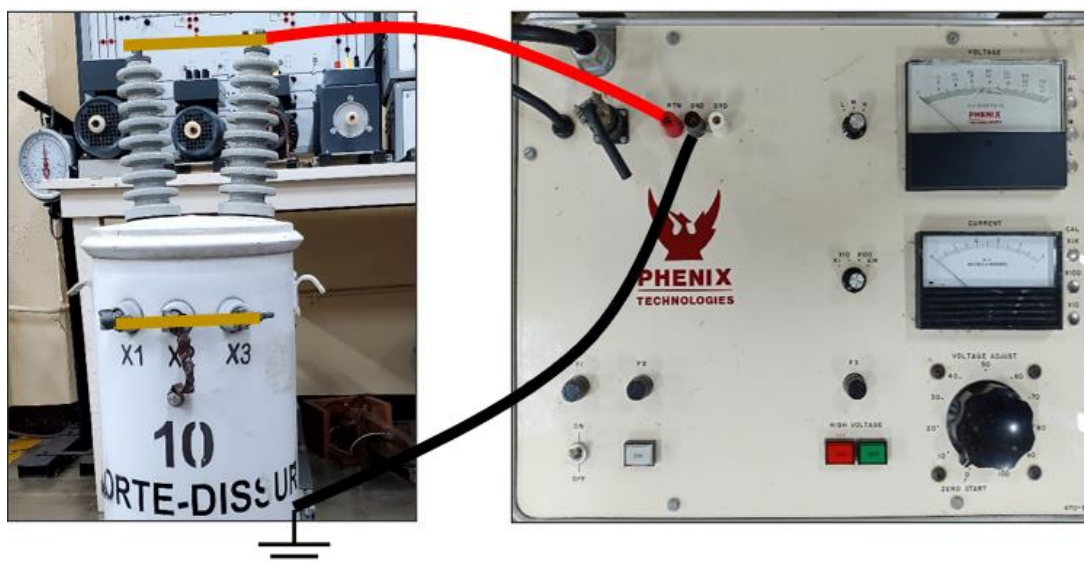


Figura 41: Conexión del devanado de alta tensión vs tanque

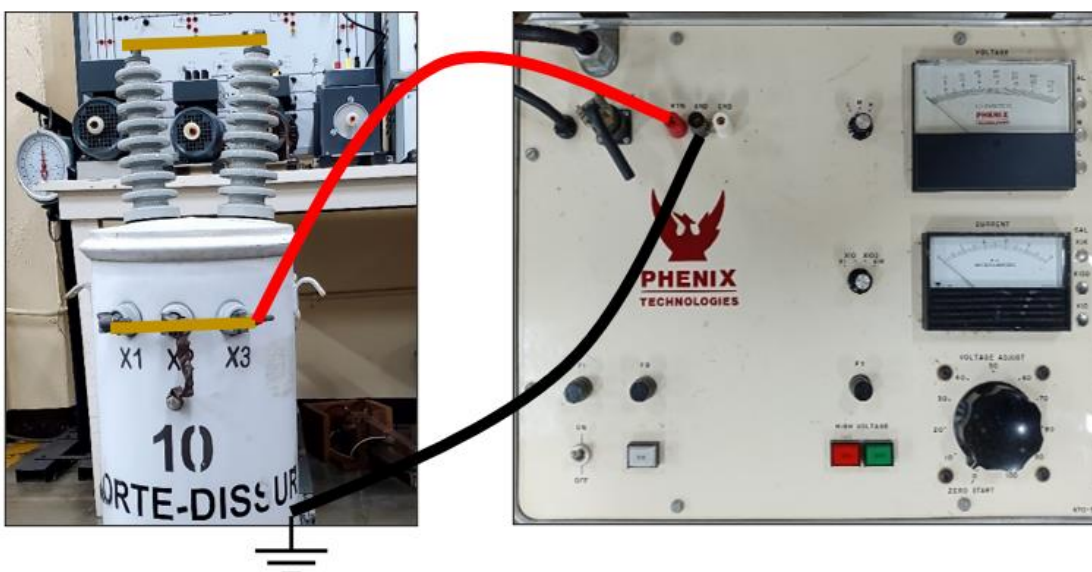


Figura 42: Conexión del devanado de baja tensión vs tanque

3.2.9. Procedimiento para la prueba de aislamiento

La medición de aislamiento consiste en verificar que cumpla con el mínimo de resistencia soportada durante la operación al que será sometido. Consiste en medir los devanados entre sí, y forma individual con respecto al tanque (o tierra) del transformador con una tensión DC cercano a la nominal del voltaje nominal del devanado. A continuación, se detallarán los pasos a seguir para ejecutar las pruebas de aislamiento con el equipo de prueba.

Paso 1: poner en cortocircuito las terminales de los devanados de alta tensión y baja tensión

Paso 2: realizar las conexiones correspondientes con el equipo de prueba según el diagrama de conexión para la medición de alta tensión vs baja tensión

Paso 3: encender el equipo de prueba bajo los procedimientos descritos en su manual de uso

Paso 4: colocar el selector que está al lado de la pantalla del voltímetro en la posición **L**, indica el rango de voltaje a inyectar

Paso 5: colocar el selector que está al lado de la pantalla del micro amperímetro en la posición **x1K**, indica un mayor rango de medición

Paso 6: asegurarse que la perilla de **VOLTAGE ADJUST** este en la posición **ZERO STAR**

Paso 7: encender el **HIGH VOLTAGE** en botón **ON**, se iluminará en color rojo

Paso 8: subir lentamente la perilla **VOLTAGE ADJUST** hasta llegar a una tensión de salida de 5kV, observar en la pantalla del voltímetro hasta llegar a los 5kV

Paso 9: mantener durante 1 minuto la inyección de voltaje con el objetivo que se polarice el aislamiento

Paso 10: observar la corriente medida en el micro amperímetro, si es necesario mover la posición de **x100**, **x10**, **x1**, para obtener una mejor lectura de la corriente

Paso 11: anotar los parámetros del voltaje inyectado, corriente medida en intervalos de 10 segundos, temperatura y humedad del ambiente

Paso 12: regrese a **ZERO START** la perilla de **VOLTAGE ADJUST**

Paso 13: apague la salida de alto voltaje en el botón **OFF**

Paso 14: continúe con la siguiente conexión para medir alta tensión vs tanque, aplicando una tensión de 5kV y repita los pasos del 7 al 13

Paso 15: continúe con la siguiente conexión para medir baja tensión vs tanque, aplicando una tensión de 0.5kV (500V) y repita los pasos del 7 al 13

Paso 16: normalizar el área de trabajo, es decir, apagar completamente el equipo de prueba y retirar los corto circuitos de las terminales del transformador

Paso 17: realizar el cálculo de la resistencia de aislamiento de acuerdo con la Ley de Ohm: $R = V / I$

3.3. Prueba de circuito abierto en un transformador monofásico

Esta prueba se realiza para conocer los parámetros sin carga del circuito equivalente de un transformador, da como resultado las pérdidas del hierro y los valores de corriente sin carga por lo que se puede determinar con cálculos simples de las lecturas que se obtengan en esta prueba. Se realiza para determinar las pérdidas en el núcleo o en el hierro y los parámetros del circuito equivalente del transformador en esta condición. (Kumar, 2021)

Como su propio nombre lo indica, los terminales del lado primario del transformador se mantienen abiertos y el voltaje de entrada se aplica en el lado secundario como conveniencia debido a que en el lado de bajo voltaje es que consume una corriente sin carga significativamente grande para una buena lectura, además que solo se requiere de un suministro de bajo voltaje que es más fácilmente disponible y sea seguro para realizar la prueba.

Las pérdidas sin carga (también conocidas como pérdidas de excitación, pérdidas del núcleo y pérdidas de hierro) son una parte muy pequeña de la potencia nominal del transformador, generalmente inferior al 1%. Sin embargo, estas pérdidas son esencialmente constantes a lo largo de la vida útil del transformador (no varían con la carga) y, por lo tanto, generalmente representan gastos operativos, especialmente si los costos de energía son altos. Por lo tanto, las mediciones precisas son esenciales para evaluar con precisión el rendimiento del transformador individual.

3.3.1. Principio de la medición en circuito abierto del transformador

La prueba de circuito abierto se lleva a cabo conectando en el lado de baja tensión (LV) el suministro de la fuente de CA a través del equipo de prueba o una fuente independiente de la cual, con la ayuda de los instrumentos como amperímetro, voltímetro y vatímetro se podrá leer las lecturas durante la prueba. Los terminales del lado de alta tensión (HV) se dejan abiertos por

la que no se deben tocar debido a que esto causaría una descarga eléctrica grave. (Kumar, 2021)

El voltímetro del lado de baja tensión (LV) lee el voltaje aplicado al transformador, el amperímetro lee la corriente sin carga, el vatímetro lee la potencia de entrada y la fuente de alimentación proporciona el voltaje aplicado. La disposición de conexión se presenta en la siguiente figura:

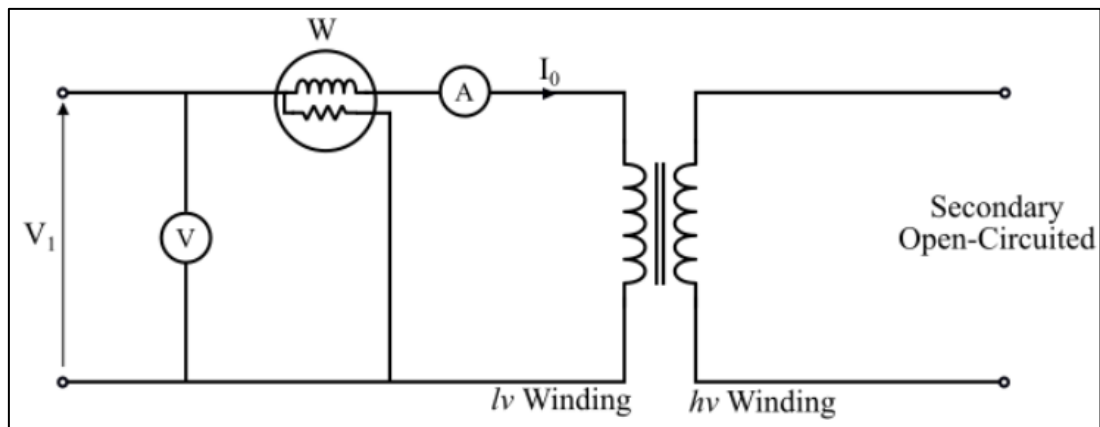


Figura 43: Disposición para prueba de circuito abierto

Como el transformador está sin carga, es decir, el devanado primario está en circuito abierto, por lo que una corriente muy pequeña I_0 (llamada corriente sin carga) fluye en el devanado de baja tensión. Por lo tanto, la lectura del amperímetro muestra la corriente sin carga I_0 del transformador. La pérdida total de potencia en el transformador sin carga se debe a la pérdida en el núcleo y a una pérdida I^2R muy pequeña en la resistencia del devanado de baja tensión. (Teja, 2024)

Dado que el devanado primario está abierto, es decir, $I_2 = 0$, no hay pérdida de I^2R en el devanado primario. Además, la corriente sin carga I_0 es muy pequeña (alrededor de menos del 10% de la corriente nominal), por lo tanto, se puede despreciar la pérdida del devanado primario sin carga.

El transformador funciona a voltaje nominal a frecuencia nominal en el lado de bajo voltaje, por lo que las pérdidas máximas serán el flujo en el núcleo. Por lo tanto, la lectura del vatímetro muestra únicamente las pérdidas del núcleo o del hierro, donde prácticamente esta prueba da las pérdidas del núcleo o pérdidas del hierro (P_i) en el transformador. (Kumar, 2021)

Además, las pérdidas del núcleo consisten en pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parasitas, que dependen del flujo magnético en el núcleo. Dado que V_1 se aplica a través del devanado de baja tensión, el flujo magnético producido por el tendrán un valor nominal, por lo que se producirán pérdidas normales en el hierro. Estas pérdidas en el hierro o en el núcleo son las mismas en todas las cargas, es decir, son pérdidas constantes y siempre presentes en el transformador.

Importante: la prueba de circuito abierto siempre se realiza en el lado de baja tensión del transformador, porque si se realiza en el lado de alto voltaje, la corriente sin carga I_0 sería inconvenientemente pequeña y el voltaje aplicado sería inconvenientemente grande. (Teja, 2024)

3.3.2. Parámetros para determinar el circuito equivalente en circuito abierto

La lectura de los instrumentos que están conectados al circuito de esta prueba son las siguientes:

Lectura del amperímetro = corriente sin carga (I_0)

Lectura del voltímetro = voltaje nominal del lado secundario (V_1)

Lectura de vatímetro = pérdidas del hierro (P_i)

A partir de estas lecturas, los parámetros del circuito sin carga se pueden determinar de la siguiente manera:

Las pérdidas de hierro o núcleo del transformador son

$$P_i = V_1 I_0 \cos \varphi \quad (23)$$

El factor de potencia sin carga es

$$\cos \varphi = \frac{P_i}{V_1 I_0} \quad (24)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{P_i}{V_1 I_0} \quad (25)$$

La componente de pérdida del núcleo de la corriente sin carga

$$I_C = I_0 \cos \varphi_0 \quad (26)$$

La componente magnetizante de la corriente sin carga es

$$I_m = I_0 \sin \varphi_0 \quad (27)$$

La resistencia de la pérdida del núcleo es

$$R_0 = \frac{V_1}{I_0} \quad (28)$$

La reactancia magnetizante es

$$X_0 = \frac{V_1}{I_m} \quad (29)$$

El circuito equivalente obtenido mediante la prueba de cortocircuito se muestra a continuación:

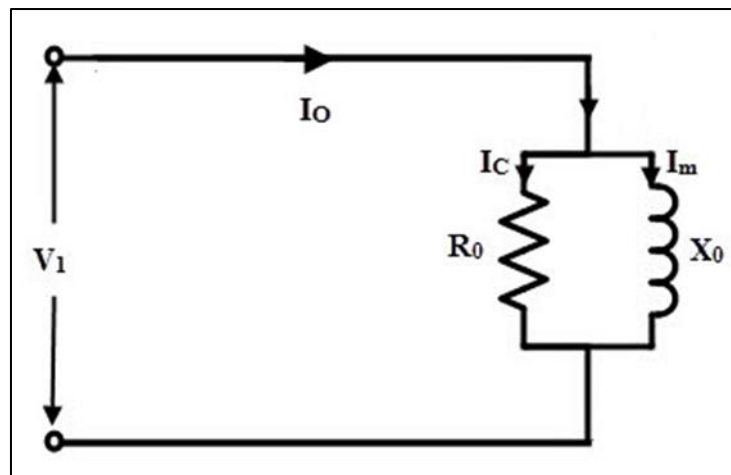


Figura 44: Circuito equivalente de la prueba de circuito abierto

3.3.3. Referencias según la norma IEEE C57.12.90-2015

General

Las pérdidas sin carga son pérdidas que inciden en la excitación del transformador. Pérdidas sin carga incluyen pérdidas debido a la magnetización del núcleo, pérdidas dieléctricas en el aislamiento, pérdida del conductor en el devanado debido a la corriente de excitación.

Las pérdidas en vacío consisten principalmente en la pérdida en el núcleo del transformador, que es una función de la magnitud, frecuencia, la temperatura y son especialmente sensibles a las diferencias en la forma de onda de la tensión de prueba lo que puede variar notablemente.

Además, hay otros factores que afectan las pérdidas de vacío y a la corriente de excitación de un transformador: el diseño de acero del núcleo, la configuración del núcleo, la geometría de las juntas del núcleo y la densidad del núcleo.

Prueba de pérdida en vacío

El objetivo es medir las pérdidas en vacío con una tensión de excitación y una frecuencia determinada. La determinación de esta medición se basará en una tensión sinusoidal, a menos que el funcionamiento del transformador implique una forma de onda diferente. El método del voltímetro de tensión media es el método más exacto para corregir las pérdidas en vacío a una base de onda senoidal y es el recomendado. Este método emplea dos voltímetros conectados en paralelo: uno es de respuesta real rms (V) y el otro es de respuesta media avg (AV). La lectura de ambos voltímetros se emplea para corregir las pérdidas en vacío.

Diagrama de conexión

La determinación de las pérdidas en vacío de un transformador monofásico se realiza utilizando el siguiente esquema de conexión representado.

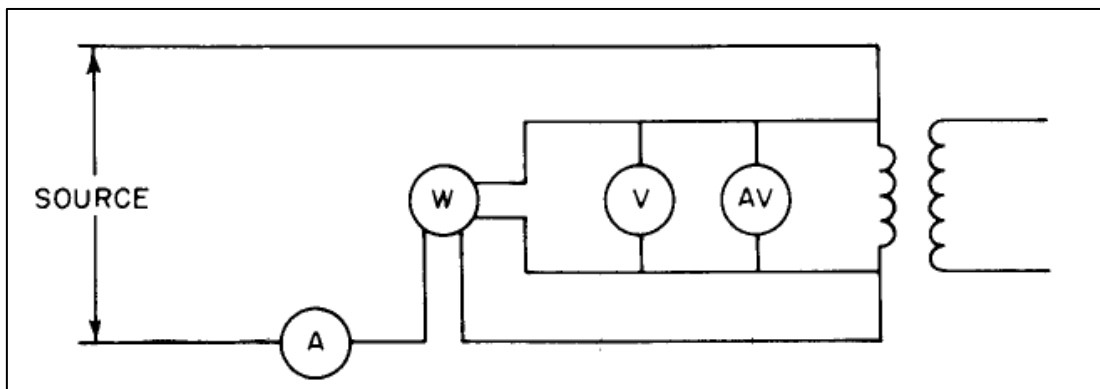


Figura 45: Disposición para la prueba de circuito abierto según IEEE

Las características de funcionamiento y rendimiento de un transformador se basan en la tensión y frecuencia nominal, a menos que se especifique lo contrario. Por lo tanto, la medición de pérdidas en vacío se realiza con la tensión nominal en las terminales del transformador, utilizando una fuente de tensión a una frecuencia igual a la frecuencia nominal del transformador bajo prueba.

Corrección por factor de forma de las pérdidas en vacío

El componente de corrientes parasitas de la pérdida sin carga varían con el valor rms de tensión y es sustancialmente independiente de la forma de onda

de tensión. Las pérdidas sin carga del transformador corregidas a una onda sinusoidal deben ser determinadas a partir de la siguiente ecuación:

$$P_c(T_m) = \frac{P_m}{P_1 + kP_2} \quad (30)$$

$$k = \frac{E_r}{E_a} \quad (31)$$

T_m es la temperatura del aceite aislante al momento de la prueba ($^{\circ}\text{C}$)

$P_c(T_m)$ son las pérdidas sin carga, corregidas según la forma de onda, a temperatura T_m

P_m se miden las pérdidas sin carga a temperatura T_m

P_1 es la pérdida de histéresis por unidad

P_2 es la pérdida por corrientes parásitas por unidad

E_r es el voltaje de prueba medido por el voltímetro real rms

E_a es el voltaje de prueba medido por el voltímetro promedio avg

Si están disponibles, se deben utilizar los valores reales por unidad de histéresis y pérdidas por corrientes parásitas. Si los valores reales no están disponibles, se sugieren que las dos componentes de pérdidas se supongan de igual valor y que cada uno de ellos se les asignara un valor de 0.5 por unidad.

El componente de pérdida por histéresis es función de la densidad de flujo máxima en el núcleo y es prácticamente independiente de la forma de onda del flujo. La densidad de flujo máxima corresponde al valor medio del semiciclo de la forma de onda de voltaje (no el valor rms). Por lo tanto, si el voltaje de prueba se ajusta para que sea el mismo como el valor promedio de la onda sinusoidal deseada del voltaje, el componente de pérdida de histéresis será igual a el valor de onda sinusoidal deseado.

El componente de pérdida por corrientes parásitas de la pérdida del núcleo varía aproximadamente con el cuadrado del valor rms del flujo central. Cuando

el voltaje de prueba se mantiene al voltaje nominal con el voltímetro de voltaje promedio, el voltaje real rms de la tensión de prueba generalmente no es igual al valor nominal. La pérdida por corrientes parásitas en este caso será estar relacionado con la pérdida correcta por corrientes parásitas a tensión nominal mediante un factor k dado en la Ecuación (8.2). Esto sólo es correcto para ondas de voltaje con razonablemente baja distorsión. Sin embargo, si la onda de voltaje está tan distorsionada que el valor de k es mayor que un cierto límite valor establecido por el estándar, las lecturas promedio del voltímetro no serán correctas y la onda de voltaje será entonces considerado no apto para su uso.

Corrección de temperatura de las perdidas sin carga

Se requiere una temperatura de referencia de 20°C al indicar las perdidas sin carga, ya que pueden variar según el núcleo.

La disminución de perdidas sin carga por aumento de la temperatura es el resultado de varios mecanismos actuando juntos como los cambios de resistividad del acero del núcleo, cambios en la tensión mecánica de la estructura del núcleo y las variaciones en los gradientes de temperatura en el núcleo hacen que las perdidas sin carga cambien con la temperatura. Debido a que estos factores varían de un diseño a otro y entre transformadores del mismo diseño, no es practico especificar una formula exacta para tener en cuenta la variación de temperatura durante todo el proceso de funcionamiento de los transformadores

Sin embargo, las variaciones ordinarias de temperatura encontradas al realizar la prueba de perdida sin carga no afectaran materialmente las mediciones y no es necesario realizar ninguna corrección por temperatura, siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

- a) la temperatura del aceite aislante este dentro de $\pm 10\%$ de la temperatura de referencia de 20°C
- b) la diferencia entre las temperaturas del aceite aislante en la parte superior e inferior no excedan de 5°C

Si es necesario realizar la prueba con temperatura fuera de los rangos especificados, la siguiente formula se puede utilizar para corregir las perdidas sin carga a la temperatura de referencia:

$$P_c(T_r) = P_c(T_m)(1 + (T_m - T_r)K_T) \quad (32)$$

$P_c(T_r)$ son las perdidas sin carga, corregidas a la temperatura de referencia T_r (20°C)

$P_c(T_m)$ son las perdidas sin carga, corregidas según la forma de onda a temperatura T_m

K_T es un cambio por unidad derivado empíricamente en la perdida sin carga por °C

Si el valor real de K_T no está disponible, se debe utilizar un valor de 0.00065 por unidad de cambio por grados Celsius. Este valor es típico de núcleos construidos con acero al silicio y es satisfactorio como corrección de perdidas sin carga cuando el transformador no se puede probar dentro de la temperatura de referencia.

3.3.4. Referencias de límites en la medición de perdidas en vacío

Según la norma IEEE C57.12.00-2015 en su sección 9.3, especifica que las perdidas representadas de un transformador están sujetas a las siguientes tolerancias: las perdidas sin carga especificadas en más del 10%, y las pérdidas totales de un transformador no excederá las pérdidas totales especificadas en más del 6%.

Estos valores son extraídos de acuerdo con un reporte de prueba de transformadores de distribución de la Empresa Nacional de Transmisión Eléctrica ENATREL del cual establece los parámetros límites establecidos para transformadores de distribución nuevos, los cuales se pueden tomar de referencia al momento de evaluar las perdidas.

Potencia (kVA)	Perdidas sin carga
10	40.00
15	60.00
25	100.00
37.5	131.25
50	150.00
75	225.00
100	300.00
167	501.00
333	532.80

Tabla 16: Valores especificados de perdidas sin carga por ENATREL

3.3.5. Procedimientos para la prueba de vacío

A continuación, se presentan la serie de paso para realizar la prueba de vacío en un transformador monofásico de distribución con la maleta de prueba Phenix TTS 2.5

Paso 1: preparar el equipo de prueba según sus indicaciones en el manual del equipo

Paso 2: realizar la siguiente conexión en el transformador con los cables de prueba del equipo

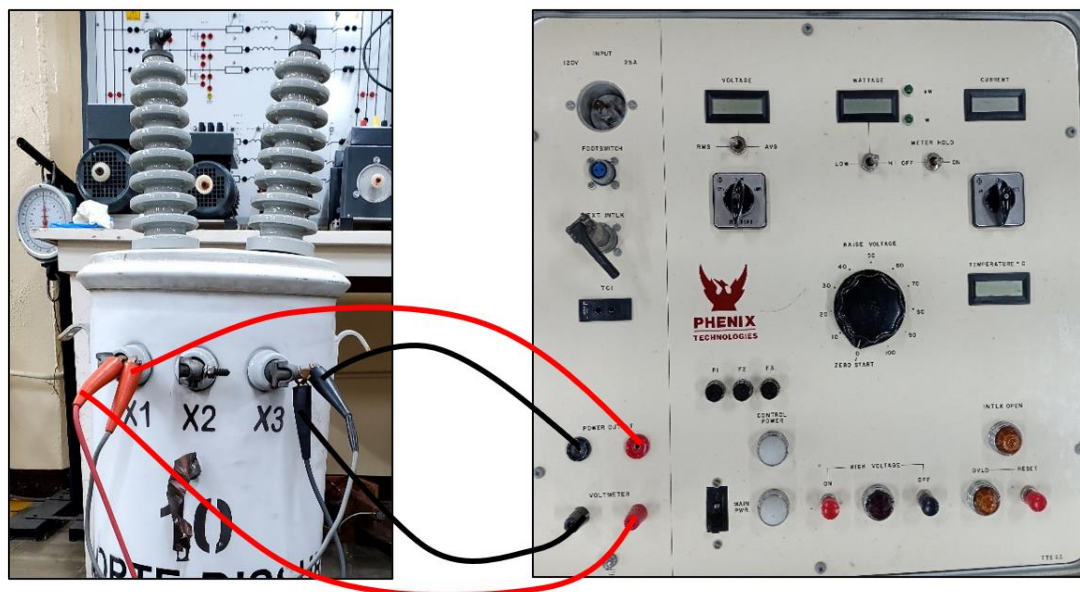


Figura 46: Conexión de la prueba de circuito abierto

Los cables provistos por el equipo vienen en dos pares, un par con capucha color negro y otro par con capucha color rojo, uno de ellos inyecta la tensión de prueba y el otro realiza la medición por el lado de baja tensión mientras que el lado de alta tensión se deja abierto

Paso 3: una vez hecha la conexión de prueba, se procede a encender el equipo en la posición **ON** de **MAIN PWR**

Paso 4: se ajusta el selector de tensión en la posición de **500V**, de acuerdo con la tensión secundaria del transformador bajo prueba en este caso es de 240V

Paso 5: se ajusta el selector en corriente en la posición de **2A** o **20A**

Paso 6: verificar que la perilla de **RAISE VOLTAGE**, este en la posición de **ZERO START**

Paso 7: se debe mantener cerrado el **FOOTSWITCH**, se coloca en el suelo y con un pie se mantiene presionado para activar la fuente de prueba

Paso 8: al mantener cerrado el **FOOTSWITCH**, se procede a activar la fuente **HIGH VOLTAGE** presionando el botón **ON**

Paso 9: se procede a inyectar voltaje moviendo la perilla de **RAISE VOLTAGE** en sentido horario hasta alcanzar la tensión nominal del lado secundario, en este caso 240V

Paso 10: al alcanzar la tensión nominal, se procede a anotar las mediciones de corriente, potencia, voltaje en RMS y AVG, colocando la palanca de **METER HOLD** en **ON**

Paso 11: al anotar todas las mediciones se procede llevar a la posición **ZERO START** la perilla de **RAISE VOLTAGE** en sentido antihorario

Paso 12: apagar la fuente de voltaje **HIGH VOLTAGE** con el botón **OFF** y ya se puede dejar de presionar el **FOOTSWITCH**

Paso 13: normalizar el área de trabajo para la siguiente prueba

Paso 14: Normalizar el área de trabajo y realizar los cálculos con los datos de prueba obtenidos para los parámetros descritos anteriormente

3.4. Prueba de corto circuito en un transformador monofásico

Esta prueba se realiza para encontrar parámetros de la rama en serie del circuito equivalente del transformador como la pérdida de cobre (P_{Cu}), la impedancia equivalente (Z_{01} o Z_{02}), la resistencia total (R_{01} o R_{02}) y la reactancia de fuga total (X_{01} o X_{02}). En esta prueba, normalmente el devanado de baja tensión se cortocircuita con un cable grueso.

La prueba se realiza cortocircuitando el lado de alta tensión debido que se debe aplicar la corriente nominal y la corriente nominal del lado de alta es mucho menor que la del lado de baja, por lo tanto, la corriente nominal se logra más fácilmente en el lado de alta en comparación del lado de baja. (Kumar, 2021)

3.4.1. Principio en la medición en cortocircuito del transformador

En la prueba de cortocircuito, el devanado secundario se conecta a la fuente de alimentación variable de corriente alterna a frecuencia nominal, como el devanado está en cortocircuito, el transformador consume una corriente grande debido a muy pequeña resistencia del devanado. La siguiente figura muestra el diagrama de conexión para la prueba, un voltímetro, un amperímetro y un vatímetro están conectados al lado secundario del transformador. (Teja, 2024)

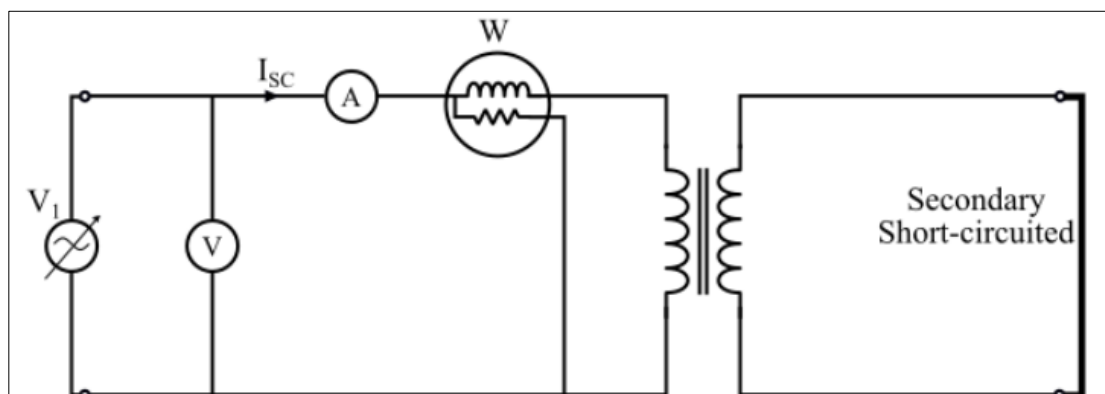


Figura 47: Disposición de conexión para la prueba de cortocircuito

Se debe suministrar un voltaje reducido desde la fuente de tensión variable, este se debe ir aumentando gradualmente hasta que se observe fluir la corriente nominal del lado de alta con ayuda del amperímetro. Cuando la corriente nominal de carga completa fluye en el devanado primario, entonces el devanado secundario también tiene corriente de carga completa por la acción del transformador.

En tales condiciones, la lectura del amperímetro será la corriente nominal a plena carga, la lectura del voltímetro es el valor de voltaje aplicado al devanado primario cuando las corrientes de carga fluyen en los devanados primario y secundario. El vatímetro prácticamente indicara las pérdidas de cobre a plena carga. (Teja, 2024)

Como el voltaje aplicado es bajo, aproximadamente del 5 al 10% del voltaje primario nominal, el flujo magnético producido por él también es muy bajo, siendo que las pérdidas del hierro son proporcionales al flujo magnético, las pérdidas del hierro son tan pequeñas que pueden despreciarse. Sin embargo, los devanados transportan corrientes nominales a plena carga y no se toma salida en condiciones de cortocircuito, por lo tanto, toda la potencia de entrada al transformador se utiliza para suministrar las pérdidas de cobre a plena carga.

Una corriente tan alta puede provocar un sobrecalentamiento y también quemar el transformador. Por lo tanto, para limitar la corriente alta, el devanado secundario debe energizarse con un voltaje bajo, que sea suficiente para producir la corriente nominal en el primario del transformador. (Kumar, 2021)

Se realiza en el lado alta tension por la siguiente razón: la prueba se realiza aplicando corriente nominal y la corriente nominal del lado alta tension es mucho menor que la del lado baja tension. Por lo tanto, la corriente nominal se logra fácilmente en el lado alta tension (debido al bajo valor de corriente) en comparación con el lado baja tension.

3.4.2. Parámetros para determinar el circuito equivalente en cortocircuito

Las lecturas de los instrumentos que están conectados en el circuito de la prueba son las siguientes:

Lectura del amperímetro = corriente primaria a plena carga (I_{1CC})

Lectura del voltímetro = tensión de cortocircuito (V_{1CC})

Lectura del vatímetro = perdidas a plena carga (P_{CU-CC})

A partir de estas lecturas, los parámetros del circuito en cortocircuito se pueden determinar de la siguiente manera:

Perdidas del cobre a plena carga en el transformador

$$P_{CU-CC} = V_{1CC} I_{1CC} \cos \varphi \quad (33)$$

Factor de potencia de cortocircuito

$$\cos \varphi = \frac{P_{CU-CC}}{V_{1CC} I_{1CC}} \quad (34)$$

$$\varphi = \cos^{-1} \frac{P_{CU-CC}}{V_{1CC} I_{1CC}} \quad (35)$$

Resistencia total del transformador referida al lado primario

$$R_{01} = \frac{P_{CU-CC}}{I_{1CC}^2} \quad (36)$$

Impedancia total del transformador referida al primario

$$Z_{01} = \frac{V_{1CC}}{I_{1CC}} \quad (37)$$

Reactancia total del transformador referida al lado primario

$$X_{01} = \sqrt{Z_{01}^2 - R_{01}^2} \quad (38)$$

El circuito equivalente obtenido mediante la prueba de cortocircuito se muestra a continuación:

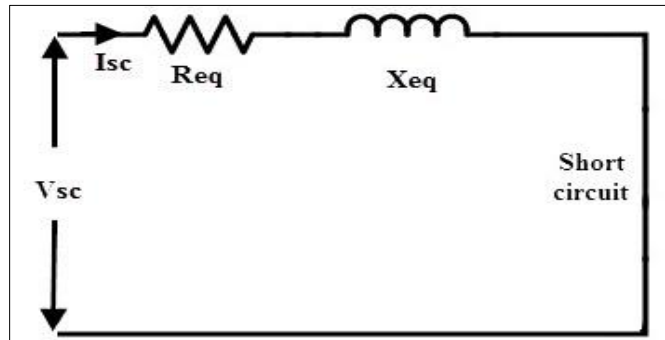


Figura 48: Circuito equivalente de la prueba de cortocircuito

Cabe señal que, antes de calcular los parámetros, debe saber en qué lado (alta o baja tensión) se registran los parámetros. Si la prueba se realiza cortocircuitando el lado de alta tensión los parámetros son referidos al lado de alta tensión como R_{01} , X_{01} y Z_{01} , en caso contrario los parámetros son referidos al lado de baja tensión como R_{02} , X_{02} y Z_{02} .

3.4.3. Referencias según la norma IEEE C57.12.90-2015

General

Las pérdidas de carga en un transformador son pérdidas incidentes a una carga específica, incluyen las pérdidas por I^2R en los devanados debido a la corriente de carga y pérdidas debido a las corrientes parásitas inducidas por el flujo de fuga en los devanados, juntas del núcleo, paredes del tanque. Se miden las pérdidas de carga aplicado un cortocircuito a través del devanado de alta tensión o del devanado de baja tensión y aplicando suficiente voltaje a través del otro devanado para causar que una corriente específica fluya.

El voltaje de impedancia de un transformador es el voltaje requerido para hacer circular la corriente nominal a través de uno de los devanados cuando el otro devanado está en cortocircuito. El voltaje de impedancia generalmente se expresa por unidad o en porcentaje del voltaje nominal del devanado a través del cual se aplica y mide el voltaje.

El voltaje de impedancia comprende un componente resistivo y un componente reactivo, el componente resistivo llamado caída de resistencia está en fase con la corriente y corresponde a las pérdidas de carga. El componente reactivo llamado caída de reactancia está en una cuadratura con la corriente y corresponde a la conexión del flujo de fuga de los devanados. Siendo el voltaje de impedancia la suma fasorial de las dos componentes.

El voltaje de impedancia se mide durante la prueba de pérdida de carga midiendo el voltaje requerido para hacer circular la corriente nominal los devanados, el voltaje medido es el voltaje e impedancia a la temperatura de prueba y la pérdida de potencia disipada dentro del transformador es igual a las pérdidas de carga a la temperatura de prueba y a carga nominal. La tensión de impedancia y las pérdidas de carga se corrigen a una temperatura de referencia utilizando las fórmulas que se describirán más adelante.

Factores que afectan los valores de pérdidas de carga y voltaje de impedancia

Se deben a los cambios en las magnitudes de carga, corrientes, vínculos de flujos de fuga asociados, así como cambios del flujo por pérdidas parasitas. Estos factores se describen en:

Diseño: los factores relacionados con el diseño incluyen el material del conductor, las dimensiones del conductor, el diseño del devanado, la disposición y selección de materiales estructurales.

Proceso: los factores relacionados con el proceso que afectan los calores de pérdida de carga y el voltaje de impedancia son las dimensiones, tolerancia de los materiales conductores, las dimensiones finales de los devanados terminados, conjunto de fases, partes metálicas expuestas a flujos de fuga y variaciones en las propiedades del conductor y otras partes metálicas.

Temperatura: los valores de pérdida de carga también son en función de la temperatura, el componente I^2R de las pérdidas de carga aumentan por el factor de la temperatura, mientras que el componente de pérdida dispersa disminuye por la temperatura. Procedimientos para corregir las pérdidas de carga y voltaje de impedancia a la temperatura de referencia estándar se describirán más adelante.

Mediciones: en un factor de potencia bajo, como los que se pueden encontrar al medir las pérdidas de carga y el voltaje de impedancia de un transformador, la selección juiciosa del método de medición y los componentes del sistema de prueba es esencial para resultados de prueba precisos y repetibles.

Consideraciones para medir las pérdidas de carga

Independientemente del método de prueba seleccionado, se deben cumplir los siguientes requisitos preparatorios para obtener resultados de prueba precisos.

- a) Para determinar la temperatura de los devanados con suficiente precisión, se deben cumplir las siguientes condiciones, excepto lo establecido en la NOTA descrita.
 1. La temperatura del líquido aislante se ha estabilizado y la diferencia entre las temperaturas superior e inferior no superen los 5°C.

2. La temperatura de los devanados se debe tomar inmediatamente antes y después de la prueba, el promedio se debe tomar como la temperatura real.
3. La diferencia de temperatura de los devanados antes y después de la prueba no debe superar los 5°C.

NOTA: Para transformadores de distribución y de montaje en pedestal de hasta 2,500kVA puede no ser práctico esperar el equilibrio térmico, el método utilizado para determinar la temperatura del devanado debe tener en consideración la falta de equilibrio térmico y el efecto del calentamiento de los conductores del devanado por la corriente de prueba. El método utilizado puede verificarse realizando una medición repetida de las pérdidas de carga y el voltaje de impedancia en un momento posterior cuando se cumplan las condiciones 1, 2 y 3.

- b) Los conductores utilizados para cortocircuitar el devanado deben tener un área de sección transversal igual o mayor que los cables correspondientes del transformador.
- c) La frecuencia de la fuente de prueba utilizada para medir las pérdidas de carga y el voltaje de impedancia deben estar dentro de $\pm 0.5\%$ del valor nominal.
- d) El valor máximo de corrección de las pérdidas de carga medidas debido al error de ángulo de fase del sistema de prueba es limitado a $\pm 5\%$ de las pérdidas medidas. Si se requiere una corrección superior al 5%, se deben mejorar los métodos de prueba y/o aparatos de prueba para lograr una determinación adecuada de las pérdidas de carga.

Método vatímetro-voltímetro-amperímetro

Las conexiones y equipos necesarios para determinar las pérdidas de carga y la tensión de impedancia de un transformador monofásico se muestran en la figura 42.

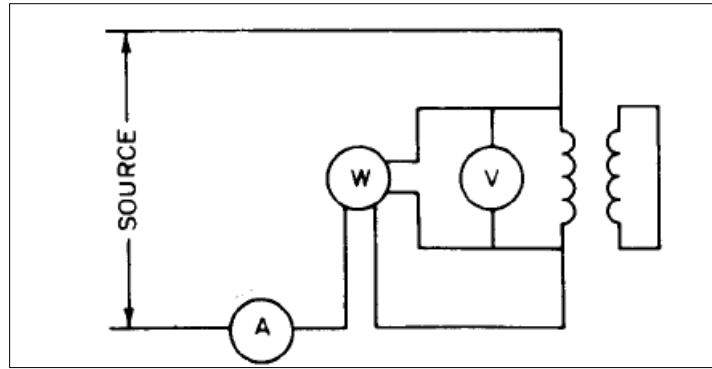


Figura 49: Diagrama de conexión para la prueba de cortocircuito

Procedimiento de prueba en un transformador monofásico

Las pruebas de pérdida de carga y tensión de impedancia se llevan a cabo utilizando las conexiones y equipos que se muestran en la figura 42. Con un devanado en cortocircuito, se aplica una tensión de magnitud suficiente a la frecuencia nominal al otro devanado y se ajusta para que circule la corriente nominal en el devanado excitado. Se toman lecturas simultáneas del vatímetro, voltímetro y amperímetro.

Cálculo de pérdidas de carga y voltaje de impedancia a partir de los datos de prueba

Las mediciones de pérdidas de carga y voltaje de impedancia varían con la temperatura y en general deben corregirse a una temperatura de referencia. Además, los valores de medición de pérdida de carga deben corregirse para tener en cuenta el error de ángulo de fase en medición.

Corrección de la medición de pérdida de carga debido a errores de ángulo de fase de medición

El error de pérdida de carga puede estar relacionado con la magnitud, como errores en la relación de transformación del instrumento y en la calibración del medidor.

La corrección de la medición de pérdida de carga debido a errores de ángulo de fase en los vatímetros, el circuito de medición y el circuito de medición de corriente se aplicará de acuerdo con la tabla xx utilizando la siguiente fórmula de corrección:

$$P_c = P_m - V_m A_m (-\phi W_d - \phi V_d + \phi C_d) \quad (39)$$

Donde:

P_c es la lectura del vatímetro, corregida por el error de ángulo de fase (W)

P_m es la lectura real de del vatímetro (W)

V_m es la lectura del voltímetro como elemento de voltaje del vatímetro (V)

A_m es la lectura del amperímetro como elemento de corriente del vatímetro (A)

ϕW_d es el error de angulo de fase del vatímetro cuando corresponda (rad)

ϕV_d es el error de angulo de fase del transformador de voltaje (rad)

ϕC_d es el error de angulo de fase del transformador de corriente (rad)

Factor de potencia de perdida de carga aparente	Comentarios
$FP \leq 0.03$	Aplicar corrección de error de ángulo de fase
$0.03 < FP \leq 0.10$	Aplicar corrección de error de ángulo de fase si $ - \phi W_d - \phi V_d + \phi C_d > 290 \mu\text{rad}$ (1 min)
$FP > 0.10$	Aplicar corrección de error de ángulo de fase si $ - \phi W_d - \phi V_d + \phi C_d > 870 \mu\text{rad}$ (3 min)

Tabla 17: Requisitos para la corrección de errores de ángulo de fase por IEEE

En general, los errores de ángulo de fase de los transformadores de medida son una función de la carga y la excitación. Del mismo modo, los errores de ángulo de fase del vatímetro son una función de la escala que se utiliza y del factor de potencia del circuito. Por lo tanto, los errores de ángulo de fase de la instrumentación utilizados en la fórmula de corrección deben ser específicos para las condiciones de prueba involucradas. Solo los transformadores de medida que cumplen con la clase de medición 0.3 o superior son aceptables para las mediciones.

El uso de la ecuación (40) está limitado a condiciones de factor de potencia aparente inferior a 0.20 y el error de ángulo de fase total del sistema a 20 min. Si se requieren correcciones con factor de potencia aparente o error de fas del sistema fuera de este rango, se aplica la siguiente formulas exactas.

$$\varphi_a = \cos^{-1} \left(\frac{P_m}{V_m A_m} \right) \quad (40)$$

$$P_c = V_m A_m \cos(\varphi_a - \varphi W_d - \varphi V_d + \varphi C_d) \quad (41)$$

Luego, la pérdida de carga del transformador a la temperatura medida T_m se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$P(T_m) = \sum_{i=1}^3 R_v R_a P_{ci} \quad (42)$$

Donde

$P(T_m)$ es la pérdida de carga del transformador corregidas por el ángulo de fase a temperatura medida T_m

P_{ci} es la lectura corregida de vatímetro (W)

R_v es la verdadera relación de voltaje del circuito de medición de voltaje

R_a es la verdadera relación de corriente del circuito de medición de corriente

Corrección de temperatura de las pérdidas de carga

Tanto las pérdidas I^2R como las pérdidas parasitas de un transformador varían con la temperatura. Las pérdidas I^2R de un transformador $P_r(T_m)$ se calculan a partir de las mediciones de resistencia óhmica (corregidas a la temperatura T_m a la que se realizó la medición de las pérdidas de carga y el voltaje de impedancia) y la corriente que se utilizó en la medición de impedancia. Estas pérdidas restadas de los vatios de pérdida de carga medidos $P(T_m)$ dan las pérdidas parasitas $P_s(T_m)$ del transformador a la temperatura a la que se realizó la prueba, se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_s(T_m) = P(T_m) - P_r(T_m) \quad (43)$$

Donde

$P_s(T_m)$ son las pérdidas por dispersión calculadas a temperatura medida T_m (W)

$P(T_m)$ son las pérdidas de carga del transformador corregidas por el error de ángulo de fase a temperatura T_m (W)

$P_r(T_m)$ es la pérdida calculada I^2R a temperatura medida T_m (W)

El componente de las pérdidas de carga aumenta con la temperatura, el componente de perdidas por disposición disminuye con la temperatura. Por lo tanto, cuando es deseable convertir las pérdidas de carga de la temperatura a la que se miden T_m a otra temperatura T , los dos componentes de las pérdidas de carga se corrigen por separado, como se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$P_r(T) = P_r(T_m) \left(\frac{T_k + T}{T_k + T_m} \right) \quad (44)$$

$$P_s(T) = P_s(T_m) \left(\frac{T_k + T_m}{T_k + T} \right) \quad (45)$$

Y luego, se muestra como la siguiente ecuación:

$$P(T) = P_r(T) + P_s(T) \quad (46)$$

Donde

$P_r(T)$ es la perdida calculada I^2R (W) a temperatura corregida T (°C)

$P_s(T)$ es la perdida parasita (W) a temperatura corregida T (°C)

$P(T)$ es la perdida de carga del transformador a temperatura corregida T (°C)

T_k es 234.5°C para cobre o 225°C para aluminio

NOTA: La temperatura de 225°C se aplica para el aluminio como conductor eléctrico puro, T_k puede ser tan alta como 230°C para el aluminio aleado. Cuando se utilizan bobinados de cobre y aluminio en el mismo transformador, se debe aplicar un valor de T_k de 229°C para la corrección de las perdidas parasitas.

3.1.4. Prueba de impedancia de un transformador monofásico

De acuerdo con la norma IEEE C57.152-2013 en su sección 7.2.12.4.1 menciona el cálculo del porcentaje del transformador, el cual se realiza con la prueba de cortocircuito.

Uno de los devanados del transformador (generalmente el devanado de baja tensión) está en cortocircuito con conductor de baja impedancia y se aplica voltaje a la frecuencia nominal al otro devanado. El voltaje se ajusta para hacer circular una corriente del orden del 0.5% al 1.0% de la corriente en los devanados o de 2A a 10A. Se debe tener cuidado de limitar la corriente de

prueba para que no cause que la forma de onda del voltaje se distorsione debido a una sobrecarga de la fuente de alimentación. Se puede utilizar un osciloscopio para observar la forma de onda del voltaje durante la prueba. El voltaje puede ser extremadamente pequeño en comparación con el voltaje nominal del devanado. A continuación, la disposición de conexiones de prueba:

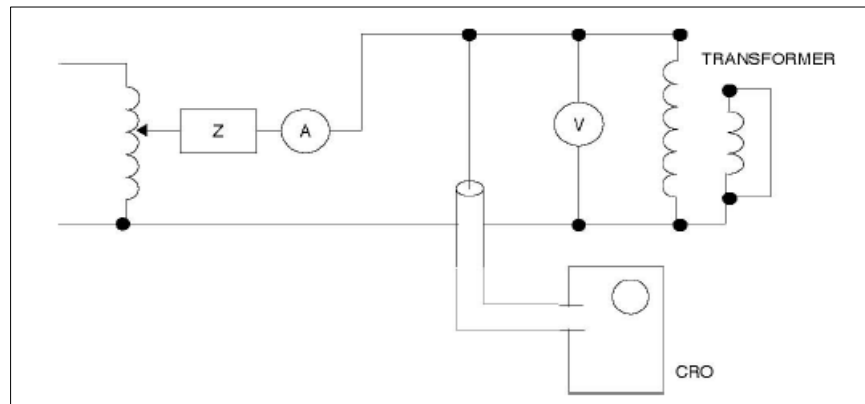


Figura 50: Prueba de impedancia de cortocircuito en un transformador monofásico

Para mediciones precisas, el voltímetro debe conectarse directamente a los terminales del transformador para evitar la caída de tensión en los cables que transportan la corriente. Los rangos de medidores deben elegirse de modo que sus lecturas estén a lo superior de su escala completa. Las lecturas de corriente y voltaje deben leerse simultáneamente.

El porcentaje de impedancia %Z de un transformador monofásico puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$\%Z = \left(\frac{1}{10} \right) \left(\frac{E_m}{I_m} \right) \left(\frac{kVA_r}{(kV_r)^2} \right) \quad (47)$$

Donde

E_m es el voltaje de prueba medido (V)

I_m es la corriente de prueba medida (A)

kVA_r es la potencia del transformador en kilovolt-amperes (kVA)

kV_r es la tensión del devanado energizado (kV)

Un cambio en el porcentaje de impedancia mayor del 3% con respecto al valor de placa del transformador puede indicar posible movimiento del devanado.

3.1.5. Referencias de límites en la medición de pérdidas de cortocircuito

Según la norma IEEE C57.12.00-2015 en su sección 9.3 especifica que las pérdidas representadas de un transformador están sujetas a las siguientes tolerancias: las pérdidas sin carga especificadas en más del 10%, y las pérdidas totales de un transformador no excederá las pérdidas totales especificadas en más del 6%.

Estos valores son extraídos de acuerdo con un reporte de prueba de transformadores de distribución de la Empresa Nacional de Transmisión Eléctrica ENATREL del cual establece los parámetros límites establecidos para transformadores de distribución nuevos, los cuales se pueden tomar de referencia al momento de evaluar las pérdidas.

Potencia (kVA)	Pérdidas en cortocircuito
10	150.00 W
15	225.00 W
25	375.00 W
37.5	450.00 W
50	500.00 W
75	750.00 W
100	1,000.00 W
167	1,670.00 W
333	3,330.00 W

Tabla 18: Valores especificados de pérdidas con carga por ENATREL

3.1.6. Procedimientos para la prueba de cortocircuito

A continuación, se presentan la serie de pasos para realizar la prueba de cortocircuito en un transformador monofásico de distribución con la maleta Phenix TTS 2.5

Paso 1: preparar el equipo de prueba según sus indicaciones en el manual del equipo

Paso 2: realizar la siguiente conexión en el transformador con los cables de prueba del equipo.

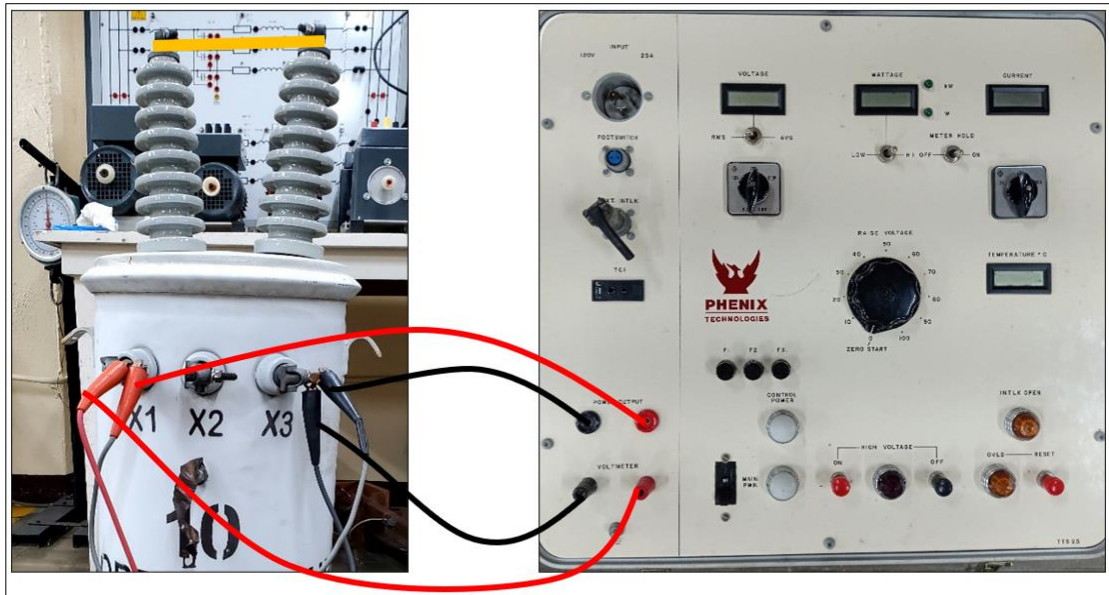


Figura 51: Conexión para la prueba de cortocircuito

Los cables provistos por el equipo vienen en dos pares, un par con capucha color negro y otro par con capucha color rojo, uno de ellos inyecta la tensión de prueba y el otro realiza la medición por el lado de baja tensión mientras que el lado de alta tensión se cortocircuita

Paso 3: una vez hecha la conexión de prueba, se procede a encender el equipo en la posición **ON** de **MAIN PWR**

Paso 4: se ajusta el selector de tensión en la posición de 500V

Paso 5: se ajusta el selector de corriente en la posición de **2A**, de acuerdo con la corriente del lado primario del transformador bajo prueba, en este caso es de 0.69A

Paso 6: verificar que la perilla de **RAISE VOLTAGE**, este en la posición de **ZERO START**

Paso 7: se debe mantener cerrado el **FOOTSWITCH**, se coloca en el suelo y con un pie se mantiene presionado para activar la fuente de prueba

Paso 8: al mantener cerrado el **FOOTSWITCH**, se procede a activar la fuente **HIGH VOLTAGE** presionando el botón **ON**

Paso 9: se procede a inyectar voltaje muy pero muy despacio girando la perilla de **RAISE VOLTAGE** en sentido horario observando en el amperímetro hasta alcanzar la corriente nominal del lado primario, en este caso 0.69A

Paso 10: al alcanzar la corriente nominal del lado primario, se procede a anotar las mediciones de corriente, potencia, voltaje en RMS y AVG, colocando la palanca de **METER HOLD** en **ON**. Esto se debe realizar lo más pronto posible para evitar sobrecalentamiento en el transformador debido a que se encuentra en cortocircuito.

Paso 11: al anotar las mediciones se procede llevar a la posición **ZERO START** la perilla de **RAISE VOLTAGE** en sentido antihorario

Paso 12: apagar la fuente de voltaje **HIGH VOLTAGE** con el botón **OFF** y ya se puede dejar de presionar el **FOOTSWITCH**.

Paso 13: Normalizar el área de trabajo y realizar los cálculos con los datos de prueba obtenidos para los parámetros descritos anteriormente

Capítulo 4: Propuesta del diseño del área funcional del laboratorio de pruebas para transformadores de distribución

4.1. Introducción

Es un sistema compuesto por elementos como conductores, dispositivos y equipos, diseñado para distribuir electricidad de manera segura y eficiente en diversos entornos, ya sean residenciales, comerciales o industriales. Su función principal es proporcionar energía para una variedad de dispositivos eléctricos, desde iluminación hasta electrodomésticos y maquinaria.

Los elementos que tiene como, por ejemplo; tomacorrientes de acuerdo con la capacidad que se requiere, asilamientos correctos de cada uno de los elementos y el cumplimiento de ciertas normas eléctricas para evitar accidentes o incidentes dentro de una instalación.

La electrificación de un laboratorio es un sistema diseñado para proporcionar energía de manera segura y confiable en un entorno de laboratorio, donde se realizan actividades científicas y experimentales. Esta instalación debe adaptarse a las necesidades específicas del laboratorio, incluyendo suministrar energía estable a equipos sensibles, tener circuitos dedicados para dispositivos especializados, garantizar la protección contra sobrecargas y cortocircuitos, y proporcionar iluminación adecuada. En resumen, la instalación eléctrica del laboratorio se diseña para asegurar la seguridad, confiabilidad y funcionalidad de los equipos y experimentos realizados en ese entorno.

Para que un laboratorio tenga un diseño que permita cumplir con los requisitos específicos de seguridad y funcionamiento, asegurando la integridad de los equipos, la protección de las personas y la eficiencia en el desarrollo de actividades científicas y experimentales debe de tener o plantearse los conceptos descritos en este apartado.

4.2. Ubicación física del laboratorio

Es un aspecto crítico que influye en la eficiencia operativa, la seguridad y la calidad de las pruebas realizadas. Desde un enfoque general de ingeniería eléctrica, la selección de la ubicación adecuada implica consideraciones tanto técnicas como logísticas.

Primeramente, se busca una ubicación que cumpla con requisitos de espacio suficiente para albergar los equipos de prueba, los transformadores bajo análisis y las instalaciones auxiliares necesarias. Esto incluye áreas de almacenamiento, zonas de trabajo y espacio para maniobras seguras de equipos pesados.

Además, se debe considerar la infraestructura eléctrica disponible en la ubicación, asegurándose de que haya suficiente capacidad de suministro de energía eléctrica para alimentar los equipos de prueba y mantener las condiciones de seguridad necesarias durante las operaciones.

Otro aspecto importante es la accesibilidad del laboratorio, tanto para el personal interno como para los clientes y proveedores externos. La proximidad a vías de transporte principales y la disponibilidad de estacionamiento pueden facilitar el acceso y la logística de envío y recepción de equipos.

En cuanto a la seguridad, se busca una ubicación que minimice los riesgos potenciales, como la exposición a condiciones climáticas extremas, la proximidad a fuentes de calor o sustancias peligrosas, y la posibilidad de interferencias electromagnéticas que puedan afectar las mediciones.

La ubicación física del laboratorio para pruebas a transformadores eléctricos debe ser cuidadosamente evaluada y seleccionada para garantizar un entorno de trabajo seguro, eficiente y adecuado para la realización de pruebas precisas y confiables.

El lugar que presta las condiciones para poder ubicar el laboratorio es en la parte noroeste de la universidad Nacional de Ingeniería Simón Bolívar ubicado en la capital Managua. Ya que presta con el área adecuada y está cerca de la pista principal.



Figura 52: Ubicación del laboratorio, tomada de Google Earth

4.3. Áreas del laboratorio

El laboratorio tiene una superficie de 48.57M x 57.61M con un área cuadrada total de 2798.1 metros cuadrados y está estructurado con columnas de cemento armado que miden 0,3 metros de ancho por 0,3 metros de alto. Para el diseño existirá diferentes zonas de trabajo para las diferentes pruebas con un área destinada a la colocación del transformador en plataforma, se encuentra elevada 0,3 metros sobre el nivel del suelo. En total, hay 8 áreas de trabajo en el laboratorio los cuales explicaremos a continuación:

Área de almacén: Es una instalación clave en cualquier infraestructura eléctrica, diseñada específicamente para el almacenamiento seguro y eficiente de estos dispositivos. Con un área de 5.58M por 14.84M, el diseño y organización de este espacio debe maximizar la seguridad, accesibilidad y protección de los transformadores almacenados. Este enfoque asegura que los transformadores estén siempre en condiciones óptimas para su despliegue, contribuyendo así a la fiabilidad y continuidad del suministro eléctrico.

Bodega de equipos y herramientas: Con un área de 5.58M por 5.75M, este espacio proporciona un entorno seguro y organizado para almacenar una amplia gama de herramientas y equipos, asegurando su disponibilidad y buen estado cuando se necesiten. La bodega debe estar diseñada para proteger los

equipos contra robos, daños y condiciones ambientales adversas, incluyendo la instalación de sistemas de seguridad como cerraduras de alta calidad, cámaras de vigilancia y control climático.

El almacenamiento organizado es crucial para la eficiencia operativa. La bodega debe contar con estanterías robustas y un sistema de etiquetado claro, permitiendo una fácil identificación y acceso a las herramientas y equipos. Las áreas de almacenamiento deben estar bien iluminadas para facilitar el movimiento seguro de los artículos. Además, la bodega debe estar equipada con espacios específicos para diferentes tipos de herramientas, incluyendo áreas para herramientas eléctricas, manuales y equipos de medición, lo que optimiza el flujo de trabajo y reduce el tiempo de búsqueda de los elementos necesarios.

Área para pruebas de aceites dieléctrico a transformadores: Es esencial para la evaluación y mantenimiento de equipos eléctricos, asegurando que los aceites utilizados en transformadores y otros dispositivos cumplen con los estándares de calidad y rendimiento. Con un área de 6.7M por 5.75M, este espacio debe estar diseñado para proporcionar un entorno seguro y controlado para realizar pruebas precisas y fiables. Las instalaciones deben incluir sistemas de ventilación adecuados, superficies resistentes a químicos, enseres para realizar limpieza en caso de derrame del aceite, equipos de protección para el personal y de una fosa recolectora de aceite en caso de un derrame mayor del aceite, garantizando la confiabilidad durante la prueba.

Área para pruebas de corto circuito y vacío: Para evaluar el rendimiento y la integridad de estos dispositivos antes de su instalación o durante su mantenimiento. Con un área de 9.1M por 5.75 metros, este espacio debe estar diseñado para proporcionar un entorno seguro y controlado, permitiendo la realización de pruebas precisas y fiables. Las instalaciones deben incluir equipos de prueba específicos, sistemas de protección para el personal y medidas de seguridad adecuadas para manejar altos voltajes y corrientes como lo es tener señalizaciones lumínicas y sonoras para informar o alejar al personal ajeno de la actividad que se están realizando estas pruebas, mantener un buen sistema de puesta a tierra, asegurando un entorno seguro durante las pruebas.

La gestión y documentación de las pruebas es fundamental para asegurar la fiabilidad y el rendimiento de los transformadores monofásicos. Un sistema de gestión de datos permite registrar los resultados de las pruebas, monitorear el rendimiento a lo largo del tiempo y programar mantenimientos preventivos. El área de prueba debe también incluir instalaciones para la calibración regular de los equipos de prueba, asegurando la precisión y repetibilidad de los resultados. Este enfoque integral no solo garantiza que los transformadores cumplen con los estándares de calidad y seguridad, sino que también contribuye a la prolongación de su vida útil y a la fiabilidad del suministro eléctrico.

Área de oficina: Con un área de 5.41M por 4.97M, es esencial para la gestión administrativa y operativa del laboratorio. Este espacio proporciona un entorno adecuado para la recepción, registro y organización de documentos, informes de pruebas y registros de mantenimiento. Además, facilita la comunicación entre el personal técnico y administrativo, asegurando un flujo de información eficiente y preciso. Equipado con escritorios, almacenamiento de archivos y equipos de oficina, esta área garantiza que toda la documentación relevante esté accesible y bien organizada, contribuyendo a la eficacia y la calidad del trabajo en el laboratorio.

Área para Inspección de Transformadores y Pruebas de Aislamiento: con un área de 18M por 5.58M respectivamente. Este espacio debe estar diseñado para realizar inspecciones visuales y mecánicas detalladas, permitiendo identificar y corregir cualquier defecto físico o estructural en los transformadores. Las instalaciones deben incluir herramientas, equipos de inspección específicos, como lupas, medidores de resistencia y termómetros que permitan una evaluación exhaustiva y precisa.

La organización del área de prueba es crucial para la eficiencia y seguridad durante la evaluación de los transformadores. Los equipos de medición deben estar calibrados y dispuestos de manera accesible. Además, es esencial contar con sistemas de protección y seguridad, un buen sistema de puesta a tierra, barreras de aislamiento, para garantizar la seguridad del personal durante las pruebas.

Área de comedor y baños: El área de baños de 6.78M por 5.41M, es esencial para asegurar el bienestar y la comodidad del personal. Este espacio debe estar diseñado para proporcionar instalaciones sanitarias adecuadas, incluyendo inodoros, lavamanos y duchas, que cumplan con las normas de higiene y seguridad. La disposición debe permitir un fácil acceso y flujo, minimizando el tiempo de espera y mejorando la eficiencia operativa. Además, es importante contar con sistemas de ventilación adecuados y limpieza regular para mantener un ambiente higiénico y agradable para todos los empleados.

El área de comedor con un tamaño de 6.45M por 5.41M, es crucial para ofrecer un espacio cómodo y funcional donde el personal pueda descansar y disfrutar de sus comidas. Este espacio debe estar equipado con mesas y sillas suficientes para acomodar a varios empleados al mismo tiempo, así como con electrodomésticos básicos como microondas, refrigeradores y dispensadores de agua. La disposición debe fomentar un ambiente relajado y social, permitiendo al personal relajarse y recargar energías durante sus pausas. Además, mantener una buena iluminación y ventilación es esencial para crear un entorno agradable y saludable.

Este diseño fue creado en el programa AutoCAD y con medidas ideales para cada área tomando en cuenta el tamaño de cada equipo para las tres pruebas descritas en este documento junto con el área de baños, comedor y oficina.

4.4. Diseño de iluminación

Parte de un proceso integral que abarca tanto la creación de un entorno físico adecuado como la implementación de sistemas de iluminación y equipamiento especializados. Este diseño comienza con un análisis detallado de los requerimientos específicos, identificando los tipos de transformadores a probar y las normativas aplicables, por ejemplo, IEEE C57.12.90-2015, ASTM D-877, entre otras.

A partir de esto, se planifica la distribución del espacio, asegurando áreas adecuadas para equipos de prueba, seguridad y almacenamiento, así como sistemas de ventilación y control de temperatura necesarios para el correcto funcionamiento de los equipos y la comodidad del personal.

La selección y disposición de equipos es fundamental, incluido los equipos para prueba de vacío y cortocircuito, prueba de rigidez dieléctrica, prueba de aislamiento, medidores de potencia, sistemas de análisis de aislamiento. La infraestructura eléctrica del laboratorio debe diseñarse para soportar altos voltajes y corrientes, garantizando una alimentación estable y segura. Esto implica la instalación de transformadores de prueba, tableros de control y protección, y sistemas de puesta a tierra robustos. La implementación de medidas de seguridad es crucial, con barreras físicas, sistemas de emergencia y protocolos estrictos para el manejo de alta tensión, además de la capacitación del personal en procedimientos de seguridad.

El diseño de iluminación es un aspecto clave, ya que, si tenemos una iluminación adecuada, eficiente y que cumpla con normativas como el CIEN (Código de Instalaciones Eléctricas en Nicaragua), NEC (National Electric Code) y literaturas eléctricas como “Instalaciones eléctricas 2da edición” de N. Bratus y E. Campero, ofrecen calidad para los trabajos que se desarrollen en el laboratorio. También contamos con software avanzado como DIALux y Relux, se simula y optimiza la distribución de luminarias para garantizar una iluminación uniforme y confortable, minimizando el consumo energético. La integración de sistemas de control y monitoreo automatizados permite gestionar y registrar las pruebas de manera precisa y eficiente. Todo esto se realiza en cumplimiento con las regulaciones y estándares nacionales e internacionales, asegurando un entorno de trabajo seguro, eficiente y conforme a las normativas vigentes, lo que permite obtener resultados de pruebas precisos y fiables.

Según el libro de (INSTALACIONES ELÉCTRICAS CONCEPTOS BÁSICOS Y DISEÑO, 2000), los niveles de iluminación recomendados son: para oficinas, 300-500 lux; laboratorios, 500-1000 lux; hospitales, 300-1000 lux; viviendas, 100-500 lux; y hospedaje, 100-300 lux. Estos valores garantizan un ambiente confortable y seguro, optimizando tanto la funcionalidad como la eficiencia energética. Para más detalles, puedes consultar el texto de Bratus o normativas como la UNE-EN 12464-1.

4.4.1. Iluminación Interna

Debe proporcionar una iluminación óptima y uniforme para asegurar la precisión y seguridad en las pruebas. Se recomienda un nivel de iluminación entre 500 y 1000 lux, especialmente en áreas donde se realizan trabajos de alta precisión y seguridad. La iluminación debe cumplir con normativas como la UNE-EN 12464-1, utilizando tecnologías eficientes y controladas por software especializado como DIALux para simular y optimizar la distribución de luminarias. Estas medidas garantizan un entorno de trabajo seguro, cómodo y energéticamente eficiente.

Para este diseño se tomaron en cuenta el programa antes mencionado y para crear un plano completo se utilizó AutoCAD dando como resultado el diseño que se encuentra en Anexos.

4.4.2. Iluminación externa

Debe asegurar tanto la seguridad como la funcionalidad, siguiendo normativas como la CIE 115, UNE-EN 12464-2 y la IES RP-33-14. Es fundamental proporcionar entre 50 y 200 lux en áreas de circulación, estacionamiento y zonas de carga, garantizando una iluminación uniforme y reduciendo los deslumbramientos. El uso de luminarias LED con control automático mediante sensores de movimiento y fotocélulas optimiza el consumo energético y disminuye el impacto ambiental, asegurando una iluminación adecuada durante todas las condiciones operativas.

Para mejorar la seguridad y eficiencia, la instalación debe considerar factores como la distribución de luz y la resistencia a condiciones climáticas adversas. Implementar sistemas de control avanzados permite ajustar la intensidad de la iluminación según la actividad y la presencia, reduciendo costos operativos. La combinación de estos elementos asegura un entorno seguro y eficiente, cumpliendo con las mejores prácticas internacionales y proporcionando un entorno de trabajo adecuado. Para más información, consulte las normativas mencionadas y textos especializados en diseño de iluminación exterior.

4.5. Selección de luminaria exterior e interior

Para este diseño de luminaria de interiores se utilizaron dos tipos para poder cumplir con los estándares de iluminación necesarios para un buen control en dicho laboratorio.

Luminaria LED panel de 3F Filippi

Es un tipo de iluminación LED diseñado para proporcionar una luz uniforme y de alta calidad en una variedad de entornos, incluyendo oficinas, escuelas, hospitales y otros espacios comerciales y residenciales.

Posee características como eficiencias energéticas, proporcionando más luz por watios consumido. Distribuye uniformemente la luz reduciendo sombras y deslumbramiento, larga vida útil, entre otras.

Este modelo será utilizado en las áreas de almacén, bodegas de equipos, áreas para aceite dieléctrico, prueba de cortocircuito, oficina, comedores, baños y pasillo principal; Con un total de 94 luminarias conectadas a 120V.

Luminaria LED panel 3F Filippi 37W

Es una solución de iluminación eficiente y moderna, ideal para oficinas, escuelas y espacios comerciales. Proporciona aproximadamente 3700-4600 lúmenes de luz uniforme con una alta eficiencia luminosa de alrededor de 100-125 lúmenes por vatio. Disponible en temperaturas de color como 3000K (blanco cálido) y 4000K (blanco neutro), esta luminaria garantiza una reproducción cromática fiel ($CRI \geq 80$) y una larga vida útil de hasta 50,000 horas. Su diseño delgado y versátil permite una fácil instalación empotrable, en superficie o suspendida, ofreciendo una iluminación de calidad con un consumo energético reducido.

Esta selección se basa en el tipo de área a iluminar dentro del laboratorio ya que será un área grande con varios propósitos y se requiere la mayor visibilidad posible; Siendo de esta manera 58 luminarias a usarse en el área de prueba de aislamiento e inspección de transformadores conectadas a 120V.

Para el diseño de luminaria en exteriores se utilizaron el tipo cobra LED.

Luminarias LED tipo cobra de 100W

Son una solución de iluminación eficiente y duradera, comúnmente utilizada en aplicaciones de alumbrado público y vial. Estas luminarias están diseñadas para reemplazar las tradicionales luces de sodio de alta presión (HPS) y las luces de halogenuros metálicos, ofreciendo varias ventajas significativas en términos de eficiencia energética, durabilidad y calidad de la iluminación.

Siendo esta una opción superior para el alumbrado público y otras aplicaciones exteriores, combinando eficiencia energética, durabilidad y una excelente calidad de iluminación.

4.6. Diseño de circuito de fuerza

Se busca garantizar la seguridad, la eficiencia y la precisión en la medición de parámetros críticos. Un aspecto crucial es la selección y dimensionamiento adecuado de componentes como transformadores de potencia, interruptores de potencia y dispositivos de protección, que deben cumplir con normativas y estándares internacionales para asegurar la integridad del equipo y del personal. Además, se prioriza la modularidad y la flexibilidad del diseño para adaptarse a distintas capacidades de prueba y requerimientos específicos de los transformadores bajo estudio.

El diseño del circuito de fuerza también considera la instrumentación necesaria para la adquisición de datos en tiempo real y el control preciso de las condiciones de prueba, lo que implica la integración de sistemas de medición de corriente, voltaje, potencia y factor de potencia, así como sistemas de control automatizado para la manipulación segura de cargas y la generación de condiciones de prueba variadas. La redundancia y la capacidad de recuperación ante fallos son elementos esenciales para mantener la continuidad de las pruebas y la integridad de los datos.

Por último, la eficiencia energética y la gestión de la calidad de la energía son consideraciones clave en el diseño, buscando minimizar pérdidas y distorsiones que puedan afectar la precisión de las mediciones. Esto implica la implementación de técnicas de filtrado, regulación de voltaje y control de armónicos, así como la adopción de prácticas de diseño que optimicen la distribución y el uso de la energía eléctrica en el laboratorio. En resumen, el diseño de circuitos de fuerza para laboratorios de pruebas de transformadores

requiere un enfoque integral que combine criterios de seguridad, precisión, eficiencia y calidad de energía para garantizar resultados confiables y reproducibles en las pruebas realizadas.

Para el plano a diseñar de fuerza se tomaron en cuenta todos los equipos a usarse dentro del edificio dando como resultado el diseño que se encuentra en anexos.

Para el diseño de fuerza se seleccionó los siguientes tomacorrientes 120/240V en la siguiente tabla:

Área de Laboratorio	TOMACORRIENTE 120V	CKTO EN PANEL	TOMACORRIENTE 240V	CKTO EN PANEL
ALMACEN	6	PG-16	1	PG-26,28
BODEGA	3	PG-11	1	PG-17,19
PRUEBA DE ACEITE	4	PG-12	1	PG-18,20
PRUEBA DE C.C Y VACIO	6	PG-13	1	PG-21,23
OFICINA	4	PG-14	1	PG-22,24
COMEDOR	4	PG-15	1	PG-25,27
BAÑOS	N/A	N/A	N/A	N/A
PRUEBA DE AISLAMIENTO	0	N/A	2	PG-29,31 PG 30,32

Figura 53: Detalle de tomacorrientes a instalar por área

4.6.1. Cálculo de caída de voltaje

Es un fenómeno crítico que debe ser comprendido y controlado con precisión. Esta caída de tensión, también conocida como pérdida de voltaje, ocurre debido a la resistencia inherente de los componentes del circuito eléctrico a través del cual fluye la corriente. Es esencial entender que esta pérdida puede afectar la precisión de las mediciones y la eficiencia del transformador bajo prueba.

Desde la perspectiva de la ingeniería eléctrica, el concepto de caída de tensión se relaciona directamente con la ley de Ohm, que establece que la diferencia de potencial en un circuito es proporcional a la corriente que fluye a través de él y a la resistencia del circuito. En el contexto de un laboratorio de pruebas de transformadores, se busca minimizar esta caída de tensión para asegurar mediciones precisas y eficiencia energética. Esto puede lograrse mediante la selección cuidadosa de los materiales conductores y el diseño óptimo de los circuitos de prueba, así como mediante la calibración adecuada de los equipos de medición para compensar cualquier pérdida de voltaje.

4.6.2. Cálculo del alimentador

Se refiere al proceso de determinar las características y dimensiones óptimas de los conductores eléctricos que transportan la energía desde la fuente de alimentación hasta los puntos de consumo, como edificios, industrias u otras instalaciones. Este cálculo es esencial para garantizar un suministro confiable de energía eléctrica y para cumplir con los estándares de seguridad y eficiencia energética.

En este proceso, se tienen en cuenta varios factores, como la carga eléctrica total, la distancia de transporte, la caída de tensión permisible, la corriente de cortocircuito y las condiciones ambientales. La carga eléctrica total se determina mediante el análisis de la demanda de potencia de los equipos y dispositivos conectados al sistema. La distancia de transporte influye en la pérdida de energía a lo largo del alimentador, mientras que la caída de tensión permisible establece el límite aceptable de pérdida de voltaje en el sistema.

Además, se consideran las condiciones de cortocircuito para dimensionar adecuadamente la capacidad de los conductores y proteger el sistema contra fallas eléctricas. Esto implica calcular la corriente de cortocircuito máxima que puede fluir a través del alimentador y seleccionar conductores con una capacidad de corriente adecuada para soportar estas condiciones extremas sin daños.

El cálculo del alimentador es un proceso fundamental en el diseño de sistemas eléctricos, ya que asegura la entrega eficiente y segura de energía eléctrica a los puntos de consumo, minimizando pérdidas y garantizando la confiabilidad del suministro eléctrico.

Para la selección del centro de carga para este laboratorio, será un panel general de 40 espacios 2 fases de General Electric. Los paneles General Electric Monofásicos están diseñados para cumplir con los estándares de seguridad eléctrica y están disponibles en una variedad de tamaños y capacidades para adaptarse a las necesidades específicas de una instalación. Pueden incluir características como disyuntores, interruptores de circuito, medidores de energía y otros componentes necesarios para garantizar un suministro eléctrico seguro y confiable.

4.7. Cálculo del transformador

La selección de un banco de transformadores para un laboratorio de pruebas de transformadores monofásicos implica la elección cuidadosa de los transformadores adecuados que cumplirán con los requisitos específicos de las pruebas planificadas. Este proceso considera una variedad de factores técnicos y operativos para garantizar la precisión y la seguridad de las mediciones realizadas.

Desde un enfoque técnico, se evalúan las características de los transformadores, como la capacidad nominal, la relación de transformación, la impedancia, la precisión de la medición y la tolerancia a las sobrecargas. La capacidad nominal del banco de transformadores debe ser suficiente para manejar las cargas máximas esperadas durante las pruebas, mientras que la relación de transformación y la impedancia deben ajustarse para proporcionar los niveles de tensión y corriente requeridos con precisión.

Además, se consideran aspectos operativos como la facilidad de instalación, mantenimiento y seguridad. Es importante seleccionar transformadores que cumplan con las normativas y estándares de seguridad eléctrica aplicables, así como que estén diseñados para resistir condiciones adversas y garantizar una operación confiable y duradera en el entorno del laboratorio.

La selección de un banco de transformadores para un laboratorio de pruebas de transformadores monofásicos implica un análisis integral de las características técnicas y operativas de los transformadores disponibles, con el objetivo de garantizar la precisión, la seguridad y la confiabilidad de las mediciones realizadas durante las pruebas.

4.7.1. Censo de carga

Es un proceso crucial en el diseño de sistemas eléctricos, que consiste en identificar, cuantificar y categorizar todas las cargas eléctricas en una instalación. Este análisis incluye listar dispositivos y equipos, registrar su potencia, evaluar condiciones de operación y calcular la demanda total estimada. El censo de carga asegura un dimensionamiento adecuado de componentes eléctricos, mejora la seguridad, optimiza la eficiencia energética y garantiza el cumplimiento de normativas.

En este caso se realizó un censo de carga para este laboratorio; el cual presentaremos a continuación:

CENSO DE CARGA - LABORATORIO PARA PRUEBA DE TRANSFORMADORES UNI										
Equipos a Instalar			Carga Monofásica				Carga Trifásica			
Cant	Descripción	Hilos	Vn (V)	In (A)	P (kW)	Total (kW)	Vn (V)	In (A)	P (kW)	Total (kW)
94	Luminaria LED Panel 3F Filippi 28w	2	120	0,23	0,028	2,63				
58	Luminaria LED Panel 3F Filippi 37w	2	120	0,31	0,037	2,15				
2	Luminaria LED RLF EATON	2	120	0,85	0,102	0,20				
4	Televisor 19pulg.	2	120	0,65	0,078	0,31				
1	Refrigerador sin escarcha 19 pies cúbicos	2	120	3,60	0,43	0,43				
5	Laptop 16,5"	2	120	0,54	0,065	0,33				
3	Impresora Multi. HP LaserJet Enterprise M528dn	2	120	4,93	0,591	1,77				
1	Aire Acondicionado Carrier 40GRQB48C	2	240	20	4,8	4,80				
3	Aire Acondicionado LG LMU24CHV	2	240	10	2,4	7,20				
2	Aire Acondicionado LG LMU30CHV	2	240	15	3,6	7,20				
2	Aire Acondicionado Carrier 38GXM280703MV	2	240	50	12	24,00				
1	Phenix Technologies 470-5	2	120	2	0,24	0,24				
1	Phenix Technologies LD60	2	120	5	0,60	0,60				
1	Phoenix Technologies TTS2.5	2	120	25	3	3,00				
Potencia Total a Instalar			kW Monofásicos Instalados				kW Trifásicos Instalados			
			Factor de Demanda				Factor de Demanda			
			kW Monofásicos Máximos				kW Trifásicos Máximos			
			Factor de Carga				Factor de Carga			
			kW Monofásicos Promedio				kW Trifásicos Promedio			
			Factor de Potencia				Factor de Potencia			
			kVA Monofásicos Promedio				kVA Trifásicos Promedio			

Figura 54: Censo de carga del laboratorio

En este caso hay que entender los tres tipos de factores tomados en cuenta para la obtención de los KW máximos, los KW promedio y los KVA promedios, los cuales describiremos a continuación:

El factor de demanda es una relación que compara la demanda máxima real de electricidad de una instalación con la carga total instalada. Este factor se utiliza para dimensionar adecuadamente los sistemas eléctricos, ya que refleja que no todas las cargas instaladas operarán simultáneamente a plena capacidad.

El factor de demanda para el diseño de este laboratorio se seleccionó al 70% de su capacidad, ósea a un 0.7 por el tipo de construcción a diseñar.

FACTORES DE DEMANDA MAS USUALES					
CARGAS DE SERVICIOS HABITACIONALES	FD	CARGAS COMERCIALES:	FD	CARGAS COMERCIALES:	FD
* Asilos y casas de salud.	45%	* Tiendas y abarrotes.	65%	* Imprentas.	50%
* Asociaciones civiles.	40%	* Agencias de publicidad.	40%	* Juguetes.	55%
* Casas de huéspedes.	45%	* Alfombras y tapetes.	65%	* Papelerías.	50%
* Servicio de edificio residencial.	40%	* Almacenes de ropa y bonetería	65%	* Mercados y bodegas.	50%
* Estacionamiento o pensiones.	40%	* Artículos fotográficos.	55%	* Molinos de nixtamal.	70%
* Hospicios y casas de cuna.	40%	* Bancos.	50%	* Panaderías.	40%
* Iglesias y templos.	45%	* Baños públicos.	50%	* Peluquerías, salas de belleza.	40%
* Servicio residencial sin aire acondicionado	40%	* Boticas, farmacias y droguerías.	50%	* Restaurantes.	60%
* Servicio residencial con aire acondicionado	55%	* Cafeterías.	55%	* Teatros y cines.	50%
EQUIPOS DE FUERZA:	FD	* Camiserías.	65%	* Zapaterías.	60%
* Hornos de acero de inducción.	100%	* Centros comerciales, tiendas de descuento.	65%		
* Soldadoras de arco y resistencia.	60%	* Colegios.	40%		
* Motores para: bombas, compresores, elevadores, máquinas, herramientas, ventiladores.	60%	* Dependencias de gobierno.	50%		
* Motores para: operaciones semi continuas en fábricas y plantas de proceso	70%	* Embajadas, consulados.	40%		
* Motores para: operaciones continuas tales como fábricas textiles	80%	* Gasolineras.	45%		

Figura 55: Factores de demanda para diferentes locales

El factor de carga es la relación entre la demanda promedio de electricidad de una instalación y la demanda máxima posible. Este factor se utiliza para evaluar la eficiencia del uso de la energía en el sistema eléctrico, indicando cuánto se utiliza en promedio en comparación con la capacidad máxima instalada. Para el factor de carga al tratarse de un diseño para laboratorio se seleccionó un factor de 0.7 ya que entra como área comercial y laboratorio.

Factores de Demanda y de Cargas Típicas	
Instalación Típica	FC
Residencias sin Aire/Acondicionado	60%
Residencias con Aire/Acondicionado	70%
Apartamentos	50%
Hospitales	65%
Escuelas	80%
Bancos y Financieras	80%
Iglesias	70%
Hoteles	60%
Oficinas	80%
Tiendas, Librerías, etc	60%
Supermercados	75%

Figura 56: Factores de carga

El factor de potencia es la relación entre la potencia real (kW) utilizada en una instalación y la potencia aparente (kVA) suministrada. Este factor indica la eficiencia con la que se utiliza la energía eléctrica, reflejando la proporción de energía que se convierte en trabajo útil frente a la energía total suministrada. Un factor de potencia alto significa un uso eficiente de la electricidad.

Como se está trabajando bajo los parámetros de la distribuidora Dissnorte Dissur, el factor de potencia a utilizarse será de 0.9 para estos cálculos.

4.7.2. Cuadro de Carga

Es un documento técnico esencial en el diseño y análisis de instalaciones eléctricas, utilizado para la planificación y distribución de la energía en un sistema eléctrico. Este cuadro proporciona una representación detallada de todas las cargas eléctricas conectadas a un sistema, tales como iluminación, tomacorrientes, equipos electromecánicos, y sistemas de climatización, entre otros.

El cuadro de carga se organiza en forma de tabla y generalmente incluye información sobre el tipo de carga, la potencia nominal, el factor de potencia,

la corriente demandada, y el tiempo de operación de cada carga. Además, permite calcular la demanda total del sistema y establecer la capacidad adecuada de los componentes eléctricos, como transformadores, conductores, y dispositivos de protección.

La importancia del cuadro de carga radica en su capacidad para garantizar que el sistema eléctrico esté correctamente dimensionado, evitando sobrecargas y garantizando un funcionamiento seguro y eficiente. También es una herramienta clave en la evaluación del consumo energético, facilitando la toma de decisiones para optimizar el uso de la energía y cumplir con las normativas vigentes.

Para este proyecto se realizó un cuadro de carga el cual se encuentra referenciado en los anexos.

4.7.3. Diagrama unifilar

Es una representación gráfica simplificada de un sistema eléctrico, utilizada para mostrar la distribución y conexión de la energía eléctrica en un edificio, planta industrial, o cualquier otra instalación. A diferencia de otros tipos de diagramas eléctricos, el diagrama unifilar utiliza líneas simples para representar conductores y conexiones, lo que facilita la visualización de la estructura general del sistema.

El diagrama unifilar incluye componentes clave como transformadores, generadores, interruptores, paneles de distribución, disyuntores, y otros dispositivos eléctricos. Cada uno de estos elementos se representa con un símbolo estándar, y las conexiones entre ellos se muestran con líneas que representan los conductores eléctricos. Además, se indican detalles esenciales como el voltaje, la corriente y la capacidad de cada componente, lo que permite evaluar el diseño del sistema de manera rápida y efectiva.

La función principal de un diagrama unifilar es proporcionar una visión clara y concisa del sistema eléctrico, facilitando la planificación, el análisis y el mantenimiento de la instalación. Es una herramienta crucial en el diseño y construcción de sistemas eléctricos, ya que permite a los ingenieros, técnicos y electricistas comprender la distribución de la energía y asegurarse de que el sistema esté correctamente dimensionado y protegido.

Para entender mejor este concepto se representó la conexión utilizada para todo este sistema el cual está disponible en anexos.

4.7.4. Selección del transformador

Conociendo los kW máximo del censo de carga que es de 38.40kW se procede a convertirse a kVA multiplicandolos los kW Máximos por el factor de potencia de 0.9 dando un resultado de 42.7kVA, también se tomará en cuenta el alumbrado público para los alrededores de las instalaciones del local.

Cada una de estas luminarias será LED tipo cobra de 100W con fotoceldas para un total de 14 luminarias con un consumo de 1kVA. Dando como resultado la capacidad total de la carga de 43.7kVA para la selección del transformador para el laboratorio que será de 75kVA funcionando este transformador a un 58.29% de su capacidad.

Se toma en cuenta la capacidad del transformador de 75 kVA ya que, al seleccionar un transformador inferior a este, ósea de 50kVA, la cargabilidad del mismo sería de de un 87,4% dejando muy comprometido para la carga; Por otro lado, al seleccionar el transformador de 75kVA se estaría dejando con la capacidad necesario para conectar a futuro más cargas y anexos.

Núm Clientes	Coef. Simult.	kW máximo por Cliente		kVA máximo por Cliente (cos phi = 0,9)	
		0,1	38,40	0,1	42,7
		G	H	G	H
1	1	0,1	38,4	0,1	42,7
14	0,67	0,9	361,0	1,0	401,1

1 CONSUMIDOR
14 LUMINARIA

Figura 57: Selección del número de carga de laboratorio y luminarias

Consumo de Alumbrado Público (KVA)	1,0
Consumo del Transformador (KVA)	42,7
Consumo Total (KVA)	43,7
Potencia del Transformador (KVA)	75
Cargabilidad del Transformador	58,29%

Figura 58: Cargabilidad de la selección del transformador vs. carga

4.8. Puesta a tierra

Es un aspecto crucial en cualquier instalación eléctrica, y más aún en un laboratorio de prueba de transformadores, donde la seguridad y la precisión de las mediciones son fundamentales. En Nicaragua, como en muchos otros países, las normas de puesta a tierra están diseñadas para proteger tanto al

personal como a los equipos. Para un laboratorio de prueba de transformadores, la puesta a tierra debe ser meticulosamente diseñada y ejecutada para garantizar un entorno de prueba seguro y fiable.

La principal función de un sistema de puesta a tierra es proporcionar un camino de baja impedancia para las corrientes de falla hacia la tierra, minimizando así el riesgo de descargas eléctricas y daños a los equipos. En un laboratorio de prueba de transformadores, donde se manejan altos voltajes y corrientes, un sistema de puesta a tierra adecuado es vital para evitar posibles accidentes eléctricos y para garantizar la integridad de las mediciones de prueba.

4.8.1. Parámetros y normativas

En Nicaragua, la puesta a tierra debe cumplir con las normativas establecidas por el Instituto Nicaragüense de Energía (INE) y las normas internacionales como las de la IEC (International Electrotechnical Commission). A continuación, se detallan los parámetros más relevantes:

1. Resistencia de Puesta a Tierra: La resistencia total del sistema de puesta a tierra debe ser lo más baja posible. Para instalaciones de alta seguridad como un laboratorio de prueba de transformadores, la resistencia de puesta a tierra generalmente debe estar por debajo de 5 ohmios. Sin embargo, es recomendable lograr valores inferiores a 1 ohmio para asegurar una protección óptima.
2. Conductores de Tierra: Los conductores utilizados para la puesta a tierra deben ser de cobre, debido a su alta conductividad y durabilidad. La sección transversal del conductor de tierra depende de la corriente de falla esperada, pero comúnmente se usan conductores con una sección de al menos 35 mm² para asegurarse de que puedan manejar cualquier corriente de falla sin sobrecalentarse.
3. Electrodo de Tierra: Los electrodos de tierra, que pueden ser varillas de cobre revestido de acero, placas de tierra o anillos de tierra, deben ser instalados de manera que aseguren un contacto efectivo con el suelo. La longitud y el número de estos electrodos se determinan en función de la resistividad del suelo. En suelos de alta resistividad, puede

ser necesario usar múltiples electrodos interconectados para alcanzar la resistencia de puesta a tierra deseada.

4.8.2. Consideración del sistema de puesta a tierra

Debe considerar varios aspectos clave:

1. Configuración del Sistema: Un diseño típico incluye un anillo de tierra alrededor del edificio del laboratorio, con conexiones a todas las estructuras metálicas y carcasas de equipos dentro del laboratorio. Este anillo de tierra debe estar interconectado con electrodos de tierra adicionales situados estratégicamente para reducir la resistencia total.
2. Puntos de Conexión: Todos los equipos de prueba y transformadores deben estar conectados al sistema de puesta a tierra mediante conductores de tierra de baja impedancia. Es fundamental que estas conexiones sean lo más cortas y directas posible para minimizar las inductancias y resistencias adicionales.
3. Mediciones y Verificación: Antes de poner en servicio el laboratorio, se deben realizar mediciones exhaustivas de la resistencia de puesta a tierra utilizando instrumentos adecuados, como un telurómetro. Estas mediciones deben repetirse periódicamente para asegurar que el sistema de puesta a tierra mantiene su eficacia a lo largo del tiempo.

4.8.3. Consideraciones de seguridad

Para garantizar la seguridad en el laboratorio, además del sistema de puesta a tierra, se deben implementar otros dispositivos de protección como interruptores de circuito por falla a tierra (GFCI) y protectores contra sobretensiones. Un sistema de puesta a tierra bien diseñado no solo protege al personal y los equipos, sino que también asegura la precisión y confiabilidad de las pruebas realizadas en los transformadores.

Conclusiones

Se puede concluir que, con la ayuda de diferentes fuentes de información, conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, manuales de fabricantes y conceptos adquiridos en la experiencia práctica para la elaboración de este presente trabajo monográfico, se han logrado cumplir los objetivos propuestos para la elaboración de las 4 guías para realizar pruebas eléctricas en transformadores de distribución monofásicos con los equipos de prueba marca Phenix Technologies existentes en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad Nacional de Ingeniería – Recinto Universitario Simón Bolívar, pudiendo ser de gran ayuda para el desarrollo de los conocimientos teórico-práctico de los estudiantes al ser aplicadas como clase práctica en diferentes clases del plan de estudio de la carrera de ingeniería eléctrica.

Las guías fueron experimentadas propiamente por los autores las cuales con la ayuda del préstamo de un transformador monofásico de 10kVA con tensión primaria de 14.4/24.9kV y tensión secundaria 120/240V, marca Ecuatran, se logró ingresar a las instalaciones de la UNI de tal manera el desarrollo de las pruebas fuera más práctico y apegado con la realidad al momento de ejecutar pruebas, cabe resaltar, que los procedimientos de conexión pueden ser los mismo para cualquier potencia de un transformador monofásico y que las interpretaciones de los resultados deben cumplir con normativas aplicadas.

Así mismo se mencionan procedimientos de seguridad que deben ser cumplidos para reducir y evitar lo más posible cualquier accidente que pueda ocurrir en el transcurso del desarrollo de las pruebas. También se establecen manuales de los equipos de prueba, los cuales se basan para poder conocer cada función del panel de control, instalación y precauciones de uso para que los usuarios se familiaricen con los equipos de prueba. De igual manera se detallan ciertos hallazgos encontrados en cada uno de los equipos.

Para finalizar hemos planteado un espacio funcional de un laboratorio de pruebas, dejando consideraciones que se puedan seguir en un futuro si la UNI pudiera ofrecer este tipo de servicio al público industrial de manera independiente.

Recomendaciones

Para futuros trabajos que puedan ampliar el presente tema, se pueden tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Actualizar los equipos de pruebas.
2. Adquirir equipos de pruebas con funciones de la medición resistencia óhmica de los devanados y relación de transformación.
3. Incluir otras pruebas eléctricas y sus guías como resistencia óhmica de los devanados y relación de transformación.
4. Incluir una guía para la inspección del estado del transformador y sus accesorios.
5. Incluir una guía para el diagnóstico del transformador por medio del análisis del aceite mineral.
6. Realizar guías de para pruebas de rigidez dieléctrica del aceite y resistencia de aislamiento en reguladores de media tensión.

Bibliografía

- Acevedo, A. (2007). *Manual de pruebas a transformadores de distribución*. Scribd. Recuperado 9 de septiembre de 2023, de <https://es.scribd.com/document/336239860/Pruebas-a-Transformadores>
- ACHS. (s. f.). *Prevención de riesgos eléctricos*. Academia. Recuperado 19 de septiembre de 2023, de https://www.academia.edu/36526690/MANUAL_DE_RIESGO_ELECTRICO
- S
- Alexander, R. (2017). *Distribution Transformer Handbook 5th Ed*. Scribd. Recuperado 18 de marzo de 2023, de <https://es.scribd.com/document/732113171/BOOK-GE-distribution-transformer-handbook-5th-addition-OKOKOK>
- Avelino, P. (2008). *Transformadores de distribución: teoría, calculo, construcción y pruebas*. Scribd. Recuperado 5 de septiembre de 2023, de <https://es.scribd.com/document/533477118/Transformadores-de-Distribucion>
- Chapman, S. J. (2011). *Maquinas eléctricas 5ta edición*. Academia. Recuperado 3 de septiembre de 2023, de https://www.academia.edu/31619602/Maquinas_El%C3%A9ctricas_Chapman_5ta_edici%C3%B3n
- Fundación Endesa. (s. f.). *Historia de la electricidad*. Endesa. Recuperado 12 de octubre de 2023, de <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educacion/recursos/historia-de-la-electricidad>
- Gill, P. (2009). *Electrical power equipment maintenance and testing*. PDF COFFEE. Recuperado 19 de marzo de 2024, de <https://pdfcoffee.com/electrical-power-equipment-maintenance-and-testing-2nd-edition-pdf-free.html>

- Gonzales, V. (2010). *Perdidas en transformadores*. Cita Energía. Recuperado 15 de junio de 2023, de http://www.citeenergia.com.pe/wp-content/uploads/2010/12/Ing.-Victor-Gonzales-Zamora_compressed-7.pdf
- IEEE. (2015). *IEEE C57.12.90 2015 - Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers*. Scribd. Recuperado 10 de enero de 2024, de <https://es.scribd.com/document/459723415/IEEE-Std-C57-12-90-2015-Revision-de-IEEE-Std-C57-12-90-2010-Codigo-de-prueba-IEEE-Standard-para-distribucion-sumergida-en-liquido-Powe-pdf>
- ISASTUR. (2010). *Manual de seguridad*. Isastur. Recuperado 7 de octubre de 2023, de https://www.isastur.com/external/seguridad/data/es/1/1_5_3_1.htm
- Kumar, M. (2021). *Open Circuit and Short Circuit Test of Transformer*. Tutorialspoint. Recuperado 9 de mayo de 2024, de <https://www.tutorialspoint.com/open-circuit-and-short-circuit-test-of-transformer>
- MEGGER. (2002). *Guía para pruebas de diagnóstico de aislamiento*. PDF COFFEE. Recuperado 7 de julio de 2024, de https://www.artec-ingenieria.com/pdf/Guias_Tecnicas_Megger/Castellano/5kVTestingBook_AG_sp_V01%20-%202.pdf
- MEGGER. (2011). *La guía de Megger sobre las pruebas de ruptura dieléctrica de aceites de aislamiento*. MEGGER. Recuperado 20 de mayo de 2024, de https://www.artec-ingenieria.com/pdf/Guias_Tecnicas_Megger/Castellano/Guidetoinsulatingoil--2007-839_TG_esla_V04.pdf
- Mora, J. F. (2003). *Maquinas eléctricas 5ta edición*. Academia. Recuperado 3 de julio de 2023, de

https://www.academia.edu/34821120/Maquinas_Electricas_5ta_Edicion_Jesus_Fraile_Mora

M.T.M.S.S. (2018). *Manual sobre riesgo eléctrico en obras de construcción*. Linea Prevención. Recuperado 27 de julio de 2023, de <https://www.lineaprevencion.com/uploads/lineaprevencion/contenidos/files/arch5dfa2190286a5.pdf>

Phenix Technologies. (2000). *Phenix Technologies current products*. Doble.

Recuperado 18 de noviembre de 2022, de

<https://www.doble.com/support/downloads/phenix-technologies-downloads/>

Reis, P. (2009). *Análisis del envejecimiento del aceite de un transformador mediante espectroscopía dieléctrica medida en baja frecuencia*. Universidad Carlos 3 de Madrid. Recuperado 6 de abril de 2024, de <https://e-archivo.uc3m.es/entities/publication/d6a98aca-11d2-40d0-9e4c-5b604eae26a4>

Renovatec. (2013). *Riesgo eléctrico y formación de trabajadores*. Renovatec.

Recuperado 27 de agosto de 2023, de <https://www.renovetec.com/riesgo-electrico-y-formacion-de-trabajadores.pdf>

RETIE. (2013). *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas*. Retie. Recuperado 24 de agosto de 2023, de <https://docplayer.es/12748589-Reglamento-tecnico-de-instalaciones-electricas-retie-2013.html>

Robledo, F. (2008). *Riesgos eléctricos y mecánicos*. Latecnicalf. Recuperado 6 de septiembre de 2023, de <https://www.latecnicalf.com.ar/descargas/material/higieneyseguridad/Riesgos%20El%C3%A9ctricos%20y%20Mec%C3%A1nicos%20-%20Fernando%20Henao%20Robledo.pdf>

S.D Mayers. (2005). *Libro guía para el mantenimiento del transformador*. Scribd.

Recuperado 17 de mayo de 2024, de

[https://es.scribd.com/document/572876348/Libro-Guia-Para-El-](https://es.scribd.com/document/572876348/Libro-Guia-Para-El-Mantenimiento-Del-Transformador)

[Mantenimiento-Del-Transformador](https://es.scribd.com/document/572876348/Libro-Guia-Para-El-Mantenimiento-Del-Transformador)

Teja, R. (2024). *Open Circuit and Short Circuit Test on Transformer*. ElectronicsHub.

Recuperado 6 de marzo de 2024, de [https://www.electronicshub.org/open-](https://www.electronicshub.org/open-circuit-and-short-circuit-test-on-transformer/)

[circuit-and-short-circuit-test-on-transformer/](https://www.electronicshub.org/open-circuit-and-short-circuit-test-on-transformer/)

Zamora, A. (2016). *Estudio y análisis de métodos prácticos aplicados para la*

prevención de accidentes eléctricos en trabajos ejecutados en plantas

industriales. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Recuperado 10

de septiembre de 2023, de <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/6634>

Anexos

Manual de equipos

Guías de laboratorio

Formato hoja de pruebas

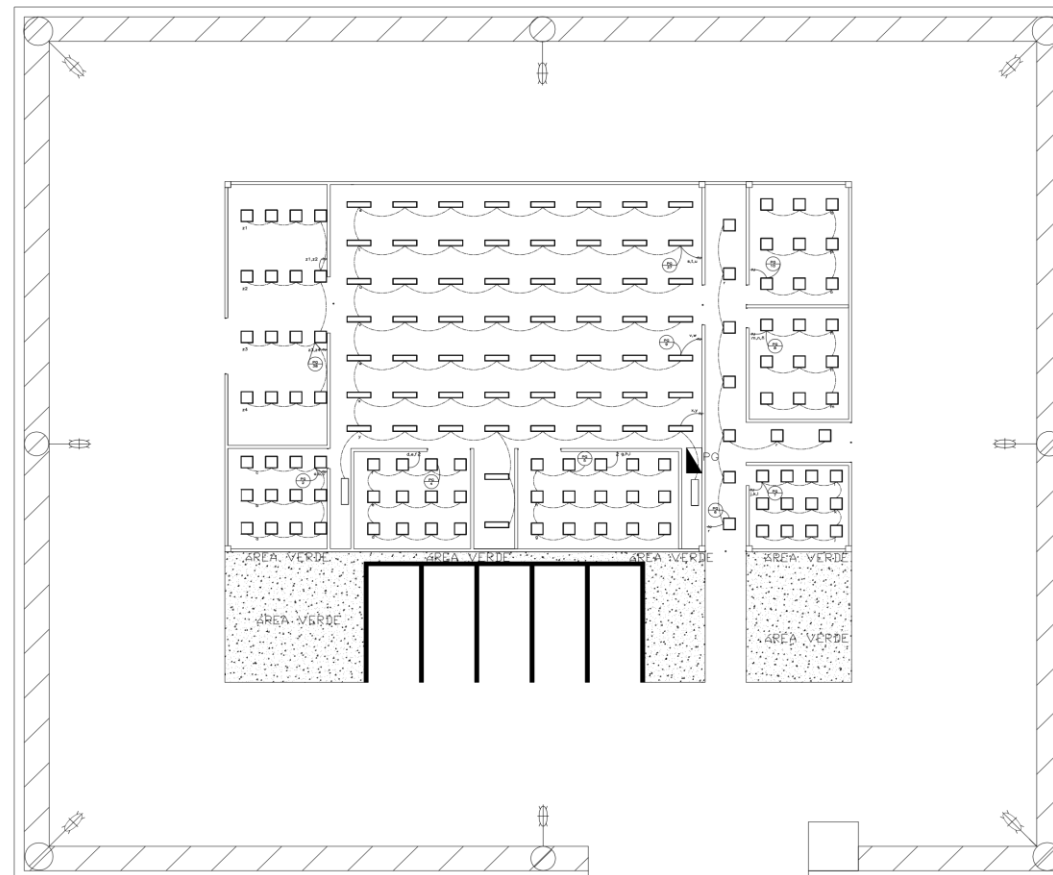
Registro fotográfico

Planos propuestos para áreas del laboratorio

UNI

— 3 —

-Se diseñó tanto la parte arquitectónica, como la parte eléctrica del edificio, así como la parte de iluminación como el de fuerzas (toma corrientes).



POSTE CUARNADO DE CONCRETO EXISTENTE
 POSTE CUARNADO DE CONCRETO A INSTALAR
 POSTES DE ALUMINIO EXISTENTE
 POSTE DE ALUMINIO A INSTALAR
 POSTE DE CONCRETO EXISTENTE
 POSTE DE CONCRETO A INSTALAR
 POSTE DE CONCRETO HORMIGONADO EXISTENTE
 POSTE DE CONCRETO HORMIGONADO A INSTALAR
 RETENA SENCILLA EXISTENTE
 RETENA SENCILLA A INSTALAR
 RETENA A COMPRESION EXISTENTE
 RETENA A COMPRESION A INSTALAR
 RETENA DOBLE EXISTENTE
 RETENA DOBLE A INSTALAR
 RETENA ALTA EXISTENTE
 RETENA ALTA A INSTALAR
 TRANSFORMADOR EXISTENTE
 TRANSFORMADOR A INSTALAR
 INTERRUPTOR
 LUMINARIA TIPO CORBA
 LUMINARIA LED PANEL 3'X7' FUORI TESS
 LUMINARIA LED PANEL 3'X7' FUORI TESS
 LINEA SECUNDARIA PARA ALUMINIO Y TOMAS
 LINEA PRIMARIA EXISTENTE
 LINEA SECUNDARIA EXISTENTE
 LINEA PRIMARIA A INSTALAR
 LINEA SECUNDARIA A INSTALAR
 MEZCLOR PRIMARIA
 RECLUDOR EXISTENTE
 CERRO EXISTENTE
 PANEL, GENERAL.

1.- DISEÑO ELABORADO CONFORME A MANUAL DE NORMAS DE CONSTRUCCIÓN DE REDES DE PROYECTO TIPO PARA LAMT EN NIVEL DE VOLTAJE 7.6/13.2 Y BAJA TENSIÓN.

FECHA APROBADO:
FECHA DE RECEPCION:

L-PRIMARIA: Conductor 1/0 ACSR	Km: 0.280	TIPO: Aéreo
L-NEUTRO: Conductor 1/0 ACSR	Km: 00	TIPO: Aéreo
L-SECUNDARIA: Triplex 1/0 AMG	Km: 00	TIPO: Aéreo
L-SECUNDARIA: Triplex # 6 AMG	Km: 00	TIPO: Aéreo

BANCOS: 1	KVA: 1X75KVA
CAPACIDAD TOTAL KVA: 75	BENEFICIARIOS: 1

NOMBRE:	LABORATORIOS UNI
---------	------------------

UNIVERSITY OF CALIFORNIA, BERKELEY

UTILIZACIÓN:	PRIVADO
--------------	---------

DIRECCIÓN: UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, MANAGUA.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA	
DISEÑADOR:	FECHA:

ESTUDIANTES UNI	ESCALA:	INDICADA
A REVISAR:	FECHA:	MARZO/2025

HOJA No. 1	DE 00
------------	-------

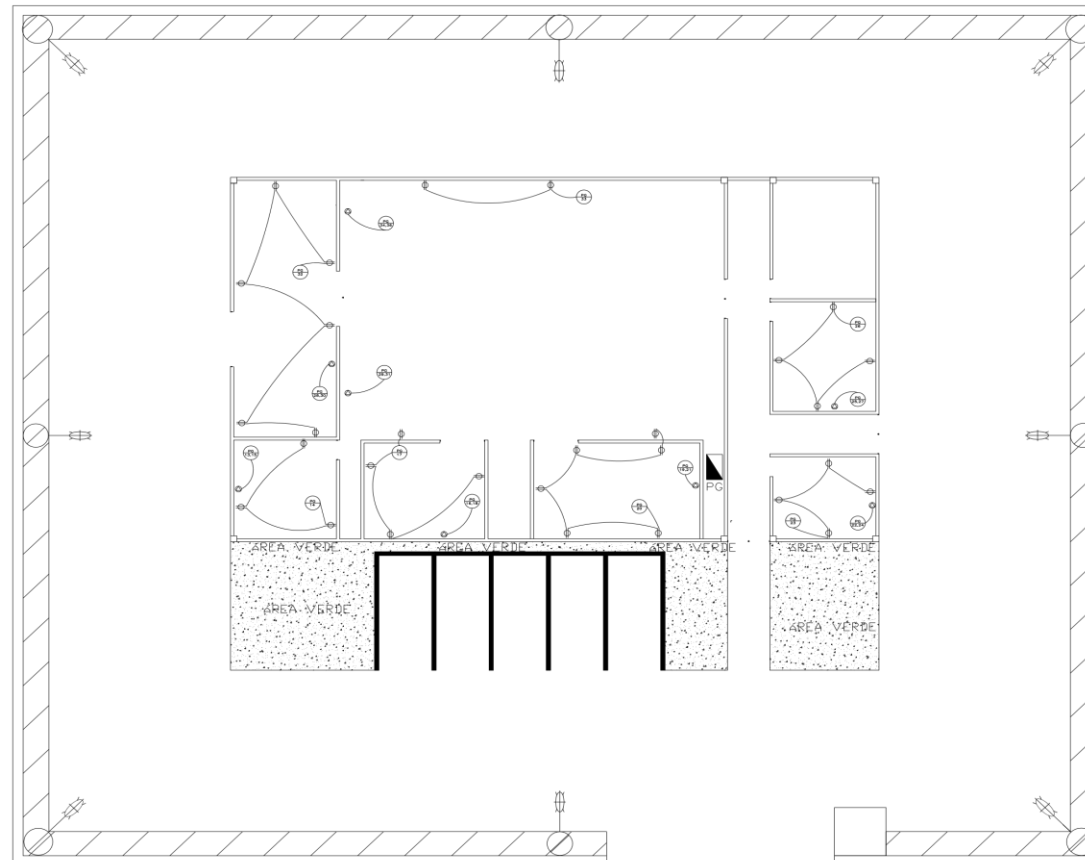
No.	02	DE	03
-----	-----------	----	-----------

Diseño de plano de baja tensión de iluminación del laboratorio.

UNI

1

-Se diseñó tanto la parte arquitectónica, como la parte eléctrica del edificio, así como la parte de iluminación como el de fuerzas (toma corrientes).



EL SITIO

 POSTE CUADRADO DE CONCRETO EXISTENTE
 POSTE CUADRADO DE CONCRETO A INSTALAR
 POSTE DE MADERA EXISTENTE
 POSTE DE MADERA A INSTALAR
 POSTE DOBLE EXISTENTE
 POSTE DOBLE A INSTALAR
 POSTE DE CONCRETO HORIZONTAL EXISTENTE
 POSTE DE CONCRETO HORIZONTAL A INSTALAR
 INTENSIDAD SENCILLA EXISTENTE
 INTENSIDAD SENCILLA A INSTALAR
 INTENSIDAD A COMPRESION EXISTENTE
 INTENSIDAD A COMPRESION A INSTALAR
 POSTE DOBLE EXISTENTE
 POSTE DOBLE A INSTALAR
 TOMACORRIENTE 240V
 TOMACORRIENTE 120V
 TRANSFORMADOR EXISTENTE
 TRANSFORMADOR A INSTALAR
 INTERRUPTOR
 LAMPARA
 LAMPARA LEE PANEL 3/8" FLUORO 28W
 LAMPARA LEE PANEL 3/8" FLUORO 17W
 LÁMPARA SECUNDARIA PARA LAMPARAS TOMBAS
 LÍNEA PRIMARIA EXISTENTE
 LÍNEA SECUNDARIA PARA TOMACORRIENTES
 LÍNEA SECUNDARIA A INSTALAR
 LÍNEA SECUNDARIA A INSTALAR
 MEDICIÓN PRIMARIA EXISTENTE
 MEDICIÓN PRIMARIA A INSTALAR
 CERCO EXISTENTE
 PANEL GENERAL

1.- DISEÑO ELABORADO CONFORME A
MANUAL DE NORMAS DE CONSTRUCCIÓN DE
REDES DE PROYECTO TIPO PARA LAMT EN
NIVEL DE VOLTAJE 7.6/13.2 Y BAJA TENSIÓN.

FECHA APROBADO:
FECHA DE RECEPCIÓN DE OBRA:

L-PRIMARIA: Conductor 1/0 ACSR	Km: 0.280	TIPO: Aéreo
L-NEUTRO: Conductor 1/0 ACSR	Km: 00	TIPO: Aéreo
L-SECUNDARIA: Triplex 1/0 AWG	Km: 00	TIPO: Aéreo
L-SECUNDARIA: Triplex # 6 AWG	Km: 00	TIPO: Aéreo
KM TOTAL DEL PROYECTO: 00		

BANCOS: 1	kVA: 1X75KVA
-----------	--------------

CAPACIDAD TOTAL KVA: 75	BENEFICIARIOS: 1
PLANO DE FUERZA	

NOMBRE: _____

DUERO:	UNI
--------	-----

UTILIZACIÓN:	CONSUMO
--------------	---------

PRIVADO
DIRECCIÓN: UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, MANAGUA.

Downloaded from <http://ajph.org/> on November 10, 2014

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

ESTUDIANTE	UNIVERSIDAD	ESCALA:	INDICADA
A. BARRERA	UNIVERSIDAD	ESCALA:	INDICADA

A REVISED	FECHA: MAR/20/2025
HOJA No. 1	DE: 02

03

03

Diseño de plano de baja tensión de tomacorrientes (circuitos de fuerza).



DISEÑO DE LABORATORIO-PLANO BT UNIFILAR

UNI

ESCALA 1:1

NOTAS GENERALES

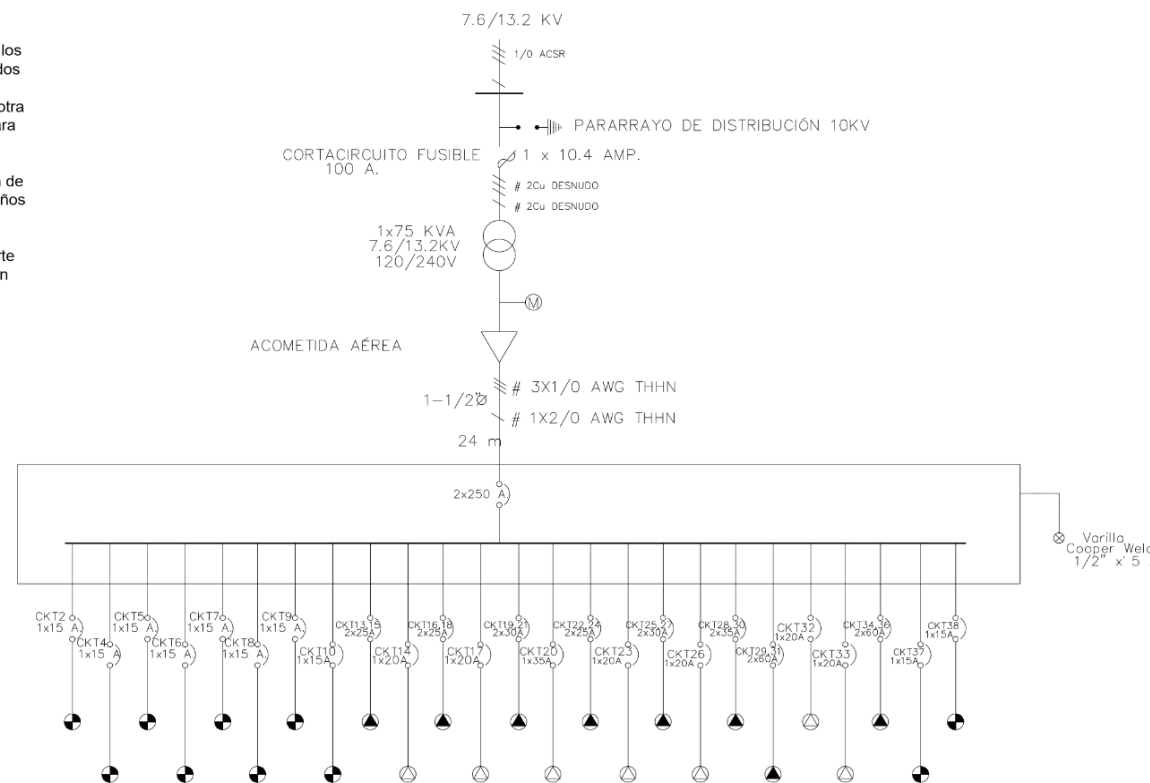
Descripción Del Proyecto:

-Este proyecto consiste en el diseño de una laboratorio para la realización de distintas pruebas a transformadores monofásicos de distribución.

-Este diseño contará con áreas para almacenaje de los transformadores, resguardo de equipos especializados para la realización de las diferentes pruebas, área diseñadas para medir el nivel del aceite dieléctrico, otra para prueba de corto circuito y vacío y una última para medir el aislamiento.

-Contará con un espacio diseñado para la recepción de personal, documentos y un área de comedor con baños incluidos.

-Se diseñó tanto la parte arquitectónica, como la parte eléctrica del edificio, así como la parte de iluminación como el de fuerzas (toma corrientes).



GEODÉSICO

EL SITIO



SIMBOLOGIA

- DISPOSITIVO DE MEDICIÓN SECUNDARIA
- PARARRAYO DE DISTRIBUCIÓN 10 KV
- VARILLA DE PUESTA A TIERRA COOPER WELD
- ACOMETIDA TIPO ASCA AÉREA
- BOTONERA PARA CONTROL DEL MOTOR
- TRANSFORMADOR MONOFÁSICO
- CUCHILLA FUSIBLE 100 A. (FUSIBLE DE 4 A.)
- INTERRUPTOR TERMOMAGNETICO DE UNO O DOS POLOS
- LUMINARIAS
- TOMA 120V
- TOMA 240V

NOTAS GENERALES

- 1.- DISEÑO ELABORADO CONFORME A MANUAL DE NORMAS DE CONSTRUCCIÓN DE REDES DE PROYECTO TIPO PARA LIMIT EN NIVEL DE VOLTAJE 7.6/13.2 Y BAJA TENSION.

DATOS DE LA GESTION

FECHA APROBADO:
FECHA DE RECEPCION DE OBRA:

DATOS DE LA CONSTRUCCION

1.- PRIMARIA: Conductor 1/0 ACSR km: 0.280 TIPO: Aereo
L-NEUTRO: Conductor 1/0 ACSR km: 00 TIPO: Aereo
L-SECUNDARIA: Típica 1/0 AWG km: 00 TIPO: Aereo
L-SECUNDARIA: Típica # 0 AWG km: 00 TIPO: Aereo
KM TOTAL DEL PROYECTO: 00

BANOS: 1 VAL: 1X750V

CAPACIDAD TOTAL MIN: 75 BENEFICIARIOS: 1

PLANO ARQUITECTÓNICO

NOMBRE: LABORATORIOS UNI

DURIO: UNI

UTILIZACIÓN: PRIMARIO

DIRECCIÓN: UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA, MANAGUA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

ESTUDIANTE: UNI ESCALA: NORDA

A REVISAR: FECHA: AGOSTO/2004

HOJA No. 1 DE 04

Diseño de plano de diagrama unifilar general del laboratorio.