



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA**

“Diseño de un Banco de Pruebas Eléctricas para Caracterizar Parámetros de
Trasformadores de Distribución en el Laboratorio de una Universidad de
Trujillo”

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

AUTORES:

Tuesta Vela, Brayan (ORCID: 0000-0003-2387-386X)

Sifuentes Arteaga, Segundo (ORCID: 0000-0001-6024-6502)

ASESOR:

Dr. Raúl R. Paredes Rosario (ORCID: 0000-0002-3032-3527)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE SISTEMAS ELECTROMECAÑICOS

Trujillo – Perú

2019

DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado a Dios y a mi Familia. A Dios por darme la salud y la fuerza para seguir luchando por mis metas. A mis Padres por darme la educación, los valores, la motivación para ser cada día mejor, y a pesar de los errores que haya cometido siempre estar ahí para apoyarme. A mis hermanitas por el gran cariño y aliento que siempre me han demostrado. Finalmente, a mis amigos y profesores que ayudaron a que este trabajo se realice de la mejor manera.

Brayan Tuesta Vela

Este proyecto lo dedico en especial a mis padres que siempre me han estado apoyando de manera incondicional, a mi hermana porque siempre ha estado a mi lado brindándome su apoyo, a mi esposa y a mi hijo que formaron parte de mis metas y planes futuros. A mis profesores que han sido guía durante los años académicos en la carrera universitaria y por sus aportes invaluable para la culminación de este proyecto.

Segundo Sifuentes Arteaga

AGRADECIMIENTO

Agradezco de todo corazón a Dios y a mi familia, en especial mis padres y hermanitas, por estar siempre a mi lado apoyándome para lograr mis objetivos y permitirme de alguna manera mejorar siempre como persona y como profesional. Si no fuera por mis Padres sencillamente otro sería el resultado, ya que la educación, valores y enseñanzas de vida inculcados durante esta etapa fueron factores determinantes. Agradezco a Dios, por poner pruebas en mi camino, que siempre me llevaron a una reflexión, esto me hizo cada vez más fuerte, y me sirvió para lograr objetivos aún más altos. También agradezco a los amigos y profesores que he conocido durante esta etapa, y que fueron de mucha ayuda para lograr este objetivo.

Brayan Tuesta Vela

Agradezco a Dios por darme salud y permitirme cumplir mi meta de culminar mi carrera de Ingeniería Mecánica Eléctrica. A mis padres Jessica y Santos por apoyarme constantemente y brindarme con su esfuerzo poder ingresar a la universidad, buscando darme un mejor futuro. A mi esposa Mary y a mi hijo Mayron por ser la inspiración suficiente para poder culminar con éxito este proyecto.

Segundo Sifuentes Arteaga

PÁGINA DE JURADO

 UCV <small>UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO</small>	ACTA DE APROBACIÓN DE LA TESIS	Código : F07-PP-PP-02.02 Versión : 10 Fecha : 10-06-2019 Página : 1 de 1
--	---------------------------------------	---

El Jurado encargado de evaluar la tesis presentada por don
 (a)..... *Tuesta Vila Bryan y Sifuentes Artraga Segundo*
 cuyo título es:
 *Diseño de un banco de pruebas eléctricas para*
 *caracterizar parámetros de transformadores de distribución*
 *en el laboratorio de una universidad de Trujillo.*

Reunido en la fecha, escuchó la sustentación y la resolución de preguntas por
 el estudiante, otorgándole el calificativo de: ..*15*...(número)
 *quince*.....(letras).

Trujillo (o Filial)..... *23*.....de *diciembre* del 20*19*



 PRESIDENTE

Ing. Maria Aimes Alvarado



 SECRETARIO

Ing. Victor Peláez Chávez



 VOCAL

Ing. Martin Sifuentes Inostroza

 Revisó	Vicerrectorado de Investigación / <i>U.V.A.C.</i> / Responsable del SES	 Aprobó
---	---	---

NOTA: Cualquier documento impreso diferente del original, y cualquier archivo electrónico que se encuentren fuera del Campus Virtual Trilce serán considerados como COPIA NO CONTROLADA.

DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD

Nosotros, Tuesta Vela, Brayan; con DNI 71539592, y Sifuentes Arteaga, Segundo, con DNI 70509868, a efectos de cumplir con las disposiciones vigentes consideradas en el Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Cesar Vallejo, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, declaramos bajo juramento que toda la documentación que acompaño es veraz y autentica.

Así mismo declaramos también bajo juramento que todos los datos e información que se presenta en la presente tesis son auténticos y veraces.

En tal sentido asumimos la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto en los documentos como de información aportada, por lo cual nos sometemos a lo dispuesto en las normas académicas de la Universidad Cesar Vallejo.

Trujillo, Julio 2019



Autor: Tuesta Vela/Brayan



Autor: Sifuentes Arteaga Segundo

ÍNDICE

Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento	iii
Página de jurado	iv
Declaratoria de autenticidad	v
Índice	vi
Resumen.....	xiv
Abstract.....	xvi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Realidad Problemática.....	1
1.2. Trabajos Previos.....	3
1.3. Teorías Relacionadas al Tema	6
1.3.1. Parámetros eléctricos.....	6
1.3.2. Ley de Faraday: voltaje inducido por un campo magnético variable	8
1.3.3. Potencias Activa, Reactiva y Aparente.....	8
1.3.4. Formas alternativas de las ecuaciones de potencia	9
1.3.5. Potencia Compleja.....	10
1.3.6. Relaciones entre ángulos de impedancia, corriente y potencia.....	10
1.3.7. Triángulo de potencia	10
1.3.8. Transformador	11
1.3.9. Transformador Ideal.....	11
1.3.10. Circuito equivalente del transformador real	12
1.3.11. Circuitos equivalentes aproximados.....	13
1.3.12. Clasificación del transformador.....	13
1.3.13. Pruebas Eléctricas de Rutina	14
1.3.14. Eficiencia y regulación de un transformador	21
1.4. Formulación Del Problema	22
1.5. Justificación del Estudio	23
1.6. Hipótesis	23
1.7. Objetivos	23
II. MÉTODO.....	24
2.1. Diseño de investigación	24
2.2. Variables, Operacionalización	24
2.3. Población y Muestra.....	26

2.4.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad	26
2.5.	Métodos de análisis de datos	28
2.6.	Aspectos éticos	28
2.7.	Procedimiento	29
2.7.1.	Flujograma de procedimientos.....	30
III.	RESULTADOS.....	31
3.1.	Recolectar especificaciones en función de la capacidad del laboratorio.	31
3.1.1.	Especificaciones en función de las características del laboratorio.....	31
3.2.	Diseñar distribución de equipos básicos.....	32
3.2.1.	Diagrama unifilar del banco de prueba eléctricas para transformadores.....	32
3.2.2.	Equipos básicos considerados para subestación de pruebas eléctricas.	33
3.3.	Dimensionar accesorios en media y baja tensión.	34
3.3.1.	Dimensionamiento y selección de cable trifásico en MT.....	34
3.3.2.	Cálculo de corriente para selección de alimentador principal.....	35
3.3.2.1.	Cable de potencia en MT (10KV)	35
3.3.2.2.	Cálculo de la Corriente Nominal del Sistema	35
3.3.2.3.	Factores de corrección del suelo.....	35
3.3.2.4.	Intensidad de diseño Id:.....	36
3.3.3.	Cálculo de la sección del conductor eléctrico.....	36
3.3.3.1.	Cálculo por capacidad de corriente.....	36
3.3.3.2.	Cálculo por caída de tensión	37
3.3.3.3.	Verificación del conductor por temperatura de operación	39
3.3.3.4.	Cálculo por efecto de cortocircuito.....	39
3.3.4.	Selección de terminales para cable N2XSY.....	40
3.3.5.	Cálculos mecánicos de la Subestación	40
3.3.5.1.	Determinación de los efectos electrodinámicos.....	41
3.3.6.	Cálculo de resonancia	42
3.3.7.	Cálculo por elevación de temperatura de la barra.....	43
3.3.7.1.	Incremento de tiempo de protección (Δt):.....	44
3.3.8.	Selección de transformadores y motores para pruebas eléctricas.	44
3.3.9.	Cálculo del sistema ventilación en subestación para banco de pruebas.....	47
3.3.9.1.	Calor recibido desde el medio ambiente:	48
3.3.9.2.	Cálculo del ventilador:.....	49
3.3.9.3.	Cálculo de potencia en eje del ventilador:.....	49
3.3.10.	Dimensionamiento del banco de condensadores.....	53

3.3.10.1.	Cálculo de potencia del banco de condensadores trifásico (Q_c).....	54
3.3.10.2.	Capacidad de condensador por fase, C_f	55
3.4.	Dimensionamiento y selección de dispositivos de maniobra y protección.....	56
3.4.1.	Interruptor de potencia 24 kV	56
3.4.2.	Seccionador tripolar de vacío.....	59
3.4.3.	Interruptor automático VL160N	59
3.4.4.	Sistema de puesta a tierra.....	60
3.4.4.1.	Cálculo de puesta a tierra:.....	60
3.5.	Selección de equipos de control y medición.	62
3.5.1.	Megóhmetro electrónico de alta tensión (10 kV).....	62
3.5.2.	Variac Trifásico (0 – 2kV)	63
3.5.3.	Ratiómetro (Medidor de relación de transformación DTR 8510)	65
3.5.4.	Micro ohmímetro digital portátil	65
3.5.5.	Analizador de redes trifásico portátil.....	66
3.6.	Diseño de procedimientos y protocolo de pruebas para transformadores.....	67
3.6.1.	Procedimientos para pruebas a transformador de distribución	67
3.6.1.1.	Prueba de aislamiento	67
3.6.1.2.	Prueba de relación de transformación y determinación del grupo de conexión	69
3.6.1.3.	Prueba de vacío.....	70
3.6.1.4.	Prueba de corto circuito	73
3.6.1.5.	Cálculo de la resistencia y reactancia de cortocircuito	74
3.6.1.6.	Tensión de cortocircuito (Lado de alta tensión)	75
3.6.1.7.	Tensión de corto circuito (Lado de baja tensión)	76
3.6.1.8.	Rendimiento en operación del transformador.....	76
3.6.1.9.	Índice de carga óptimo.....	77
3.6.1.10.	Rendimiento máximo del transformador	77
3.6.2.	Diseño de protocolo de pruebas para transformadores de distribución	77
3.7.	Análisis económico	79
3.7.1.	Inversiones	79
3.7.1.1.	Materiales.....	79
3.7.1.2.	Mano de obra.....	79
3.7.1.3.	Ingeniería de detalle	79
3.7.1.4.	Instrumentos de medida y control	80
3.7.1.5.	Insumos	80

3.7.1.6.	Gastos generales	80
3.7.2.	Beneficios.....	80
3.7.2.1.	Beneficios por servicio externo (pruebas de transformadores).....	80
3.7.2.2.	Ingreso por dictado de diplomados.....	80
3.7.3.	Costos operativos.....	81
3.7.4.	Costos de mantenimiento.....	81
3.7.5.	Beneficio neto:	81
3.8.	Análisis financiero	81
3.8.1.	Tiempo estimado de retorno de la inversión, PRI.....	81
IV.	DISCUSIÓN.....	82
V.	CONCLUSIONES	85
VI.	RECOMENDACIONES	86
VII.	REFERENCIAS	87
ANEXOS		89
Anexo 1:	Acta de aprobación de originalidad de tesis	89
Anexo 1:	Reporte Turnitin	90
Anexo 1:	Autorización de publicación de tesis en repositorio institucional UCV	91
Anexo 1:	Autorización de la versión final del trabajo de investigación	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Indicadores para el índice de absorción y el índice de polarización (Gaytan, 2016)	14
Tabla 2. Tensiones de prueba establecidos por ANSI-IEEE C57-12-90 de acuerdo al nivel de aislamiento (Gaytan, 2016).....	20
Tabla 3. Tiempos establecidos por las normas ANSI C57-72 para la prueba de potencial inducido (Gaytan, 2016).....	20
Tabla 4. Matriz de operacionalización de variables	25
Tabla 5. Ficha de registro de datos.	27
Tabla 6. Criterios para validación de instrumento.....	27
Tabla 7. Aspectos éticos	29
Tabla 9. Consideraciones básicas para dimensionamiento de conductor en M.T.	34
Tabla 10. Criterios técnicos operativos de la subestación.	34
Tabla 11. Parámetros eléctricos de cable N2XSY en M.T. (INDECO, 2019)	37
Tabla 12. Terminaciones QT-III Contráctiles en frío uso interior. (3M, 2019)	40
Tabla 13. Características de ventilador centrífugo para subestación.....	51
Tabla 14. Dimensiones de Ventilador Centrífugo CBX.....	51
Tabla 15. Características técnicas de motores de alta eficiencia. (WEG, 2019)	52
Tabla 16. Características técnicas de interruptor de potencia 24 kV, marca Heag (PROMELSA, 2016)	57
Tabla 17. Tabla para selección de seccionador de vacío. (SILE , 2013).....	59
Tabla 18. Especificaciones técnicas de Megóhmetro de alta tensión MI10KVe (MEGABRAS, 2018)	63
Tabla 19. Especificaciones técnicas de Variac Trifásico. (NEW LINE, 2019).....	64
Tabla 20. Especificaciones técnicas de analizador de redes.....	66
Tabla 21. Tabla de conexión de Ratiómetro y cálculo de relación de transformación. (AEMC, 2019).....	70
Tabla 22. Protocolo de pruebas eléctricas para transformadores de distribución	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Campo magnético en un conductor recto.....	7
Figura 2. Campo magnético en una espira.	7
Figura 3. Carga Inductiva	10
Figura 4. Carga Capacitiva	10
Figura 5. Triángulo de potencia.....	10
Figura 6. Transformador Elemental.....	11
Figura 7. Circuito equivalente del transformador real.....	12
Figura 8. Circuito del transformador aproximado al primario	13
Figura 9. Circuito del transformador aproximado al secundario.....	13
Figura 10. Resistencia de aislamiento entre bobinas (Almagro & Narváez, 2013).....	15
Figura 11. Polaridad Sustractiva.....	16
Figura 12. Polaridad Aditiva	16
Figura 13. Prueba de vacío en transformador monofásico (TECSUP, 2013).....	16
Figura 14. Prueba de vacío en transformador trifásico (TECSUP, 2013)	17
Figura 15. Prueba de cortocircuito	18
Figura 16. Prueba de cortocircuito en transformador trifásico	19
Figura 17. Prueba de tensión aplicada	20
Figura 18. Hoja de Excel para selección de conductor eléctrico.....	28
Figura 19. Flujograma de procedimientos para desarrollar objetivos específicos	30
Figura 21. Placa de Transformador Tipo Seco del CIT.....	31
Figura 22. Diagrama Unifilar del banco de pruebas eléctricas para transformadores.....	33
Figura 23. Caída de tensión máxima en cable N2YSY en 10kV	38
Figura 24. Barra de cobre para M.T. en 10 kV.....	42
Figura 25. Transformador Trifásico Tipo Seco (Promelsa, 2019)	45
Figura 26. Ventilador centrífugo tipo CBX (Sodeca, 2019)	50
Figura 27. Dimensiones de Ventilador CBX.....	51
Figura 28. Diagramas característicos de ventiladores para subestaciones. (Sodeca, 2019)	52
Figura 29. Sistema de ventilación forzada para el banco de pruebas eléctricas.....	53
Figura 30. Triangulo de potencias para el banco de pruebas eléctricas	54
Figura 31. Condensador Tubular Trifásico. (PROMELSA, 2019).....	55
Figura 32. Interruptor de potencia 24 kV (Marca Heag).....	56

Figura 33. Vista de montaje en poste de interruptor de potencia. (PROMELSA, 2016)	58
Figura 34. Vista de montaje en campo de interruptor de potencia. (HEAG, 2019)	58
Figura 35. Seccionador de vacío marca SILE. (SILE , 2013)	59
Figura 36. Interruptor automático VL160N 40kA 3 polos 750-1500A. (SIEMENS, 2019)	60
Figura 37. Dimensiones de varilla de cobre para SPT.	61
Figura 38. Dimensiones del sistema de puesta a tierra.	61
Figura 39. Megóhmetro electrónico de alta tensión Mi10KVe (MEGABRAS, 2018)	62
Figura 40. Variac Trifásico 500KVA 0 - 2kV (NEW LINE, 2019)	64
Figura 41. Medidor de relación de transformación - DTR 8510 (AEMC, 2019).....	65
Figura 42. Micro ohmímetro MPK204e (MEGABRAS, 2019)	65
Figura 43. Analizador de redes trifásico portátil.	66
Figura 44. Conexión de megóhmetro para prueba entre devanado de A.T. y Tierra	67
Figura 45. Conexión de megóhmetro para prueba entre devanado de B.T. y Tierra	68
Figura 46. Conexión de megóhmetro para prueba entre devanado de A.T. y B.T.....	68
Figura 47. Conexión de Ratiómetro para transformador monofásico	69
Figura 48. Conexión de Ratiómetro para transformador trifásico.....	69
Figura 49. Diagrama multifilar para prueba en vacío de transformador trifásico.	71
Figura 50. Conexión de instrumentos de medición para prueba en vacío.	71
Figura 51. Circuito equivalente de transformador para prueba de vacío.....	72
Figura 52. Diagrama fasorial de transformador.....	72
Figura 53. Conexión de instrumentos de medición para prueba de corto circuito.	73
Figura 54. Circuito equivalente de transformador en prueba de corto circuito.	73
Figura 55. Triángulo de potencias en prueba de corto circuito	74

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Corriente eléctrica.....	6
Ecuación 2. Voltaje.....	6
Ecuación 3. Resistencia	6
Ecuación 4. Ley de ohm	6
Ecuación 5. Potencia.....	7
Ecuación 6. Ley de Faraday	8
Ecuación 7. Ley de Faraday para N espiras.....	8
Ecuación 8. Potencia activa o real	8
Ecuación 9. Potencia Reactiva.....	8
Ecuación 10. Potencia Aparente	9
Ecuación 11. Voltaje en función de impedancia	9
Ecuación 12. Potencia Activa en términos de corriente e impedancia	9
Ecuación 13. Potencia Reactiva en términos de corriente e impedancia.....	9
Ecuación 14. Potencia Aparente en términos de corriente e impedancia	9
Ecuación 15. Impedancia (forma rectangular)	9
Ecuación 16. Potencia Activa en función de corriente y resistencia	9
Ecuación 17. Potencia Reactiva en función de corriente y reactancia	9
Ecuación 18. Potencia Compleja	10
Ecuación 19. Potencia compleja en función del voltaje y corriente conjugada	10
Ecuación 20. Relación de transformación	11
Ecuación 21. Relación de corrientes en un transformador	11
Ecuación 22. Potencia de entrada en transformador ideal.....	11
Ecuación 23. Potencia de salida en transformador ideal	11
Ecuación 24. Potencia de vacío	17
Ecuación 25. Pérdidas en el hierro	17
Ecuación 26. Pérdidas en el hierro de transformador trifásico.....	17
Ecuación 27. Pérdidas en el cobre	18
Ecuación 28. Impedancia de cortocircuito	18
Ecuación 29. Resistencia y Reactancia de cortocircuito	18
Ecuación 30. Factor de potencia de cortocircuito.....	18
Ecuación 31. Porcentaje de impedancia	19
Ecuación 32. Pérdidas en cobre de transformador trifásico	19
Ecuación 33. Factor de potencia de cortocircuito trifásico	19
Ecuación 34. Corriente de línea nominal	19
Ecuación 35. Caída de tensión en un transformador	21
Ecuación 36. Coeficiente de regulación	21
Ecuación 37. Coeficiente de regulación en función de resistencia y reactancia	21
Ecuación 38. Caída de tensión óhmica de cortocircuito.....	21
Ecuación 39. Caída de tensión inductiva de cortocircuito.....	22
Ecuación 40. Eficiencia de un transformador.....	22
Ecuación 41. Eficiencia de un transformador en función del índice de carga.....	22
Ecuación 42. Índice de carga.....	22
Ecuación 43. Índice de carga máximo.....	22

RESUMEN

El presente estudio tiene la finalidad de presentar una alternativa de solución a la problemática encontrada en la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, específicamente en el área de electricidad, de una Universidad en la ciudad de Trujillo, debido a que existe una escasez de equipos y materiales para la ejecución de pruebas. En esta oportunidad se realizó el diseño de un banco de pruebas eléctricas para caracterizar parámetros de transformadores de distribución, de esta manera conocer el estado en el que se encuentra el transformador y poder tomar decisiones acertadas con respecto a su funcionamiento.

En primer lugar, para realizar el diseño se ha recolectado los datos de máxima demanda y potencia instalada, con la que se cuenta en el Centro de Investigación Tecnológica de la universidad, teniendo un transformador de 320 KVA, fue necesario realizar el diseño para una instalación independiente donde se puedan probar transformadores de distribución de mayor potencia.

El banco de pruebas eléctricas tiene un sistema dimensionado para alimentar a un transformador de 500 KVA que servirá para ofrecer el servicio de mantenimiento y capacitación a las empresas del sector industrial, y un transformador de 50 KVA que servirá para que los alumnos de la universidad puedan realizar las pruebas de eficiencia y seguridad a los transformadores. Es decir, pruebas de aislamiento, relación de transformación, determinación del grupo de conexión, pruebas de vacío y cortocircuito, entre otros.

Se ha seleccionado un alimentador principal N2XSY 3 – 1 x 25 mm² 8.7/15 kV en media tensión, los aisladores portabarra clase A (DIN 48100) con capacidad para soportar 375 kgf, seccionador de vacío de 12 kV y corriente de corto circuito de 40 kA, interruptor de potencia HD4-12 In = 630 A Vn = 12 kV Icc = 20 kA, ventiladores centrífugos CBX-4747 con caudal máximo de 23500 m³/h, sistema de puesta a tierra con una resistencia de malla igual 11.23 Ω y los equipos de medición necesarios para realizar las pruebas a los transformadores, como el

analizador de redes multifunción, megóhmetro de alta tensión, ratiómetro, generador de tensión regulable, vatímetro, pinza amperimétrica, etcétera.

Para mejorar la eficiencia de la instalación se ha dimensionado un banco de condensadores, que nos servirá para analizar el comportamiento del sistema con la compensación del factor de potencia. También se ha realizado un protocolo de pruebas que sirva como guía al momento de ejecutar las pruebas a los transformadores.

Finalmente, en el análisis económico se indica que realizando una inversión de 122100 soles se podrá adquirir un beneficio neto de 121500 soles por año, teniendo un tiempo estimado de retorno de la inversión de 12 meses. Por lo tanto, es rentable invertir en el banco de pruebas eléctricas para transformadores de distribución.

Palabras clave: transformador trifásico, potencia activa, subestación de transformación, conexión a tierra.

ABSTRACT

The present study aims to present an alternative solution to the problems found in the School of Electrical Mechanical Engineering, specifically in the area of electricity, of a University in the city of Trujillo, because there is a shortage of equipment and materials for the execution of tests. In this opportunity, the design of an electrical test bank was carried out to characterize the parameters of the distribution transformers, in this way to know the state in which the transformer is and to be able to make sound decisions regarding its operation.

In the first place, to carry out the design, the data of maximum demand and installed power have been collected, which is counted in the Technology Research Center of the university, having a 320 KVA transformer, it was necessary to design for an independent installation where more powerful distribution transformers could be tested.

The electrical test bench has a system sized to feed a 500 KVA transformer that will serve to provide maintenance and training to companies in the industrial sector, and a transformer of 50 KVA that will serve for students at the university to perform efficiency and safety tests on transformers. That is, insulation tests, transformation ratio, determination of the connection group, vacuum and short circuit tests, among others.

A main feeder N2XSY 3 - 1 x 25 mm² 8.7 / 15 kV in medium voltage has been selected, class A busbar insulators (DIN 48100) with capacity to support 375 kgf, cut out of 12 kV and short-circuit current of 40 kA, power switch HD4-12 In = 630 A Vn = 12 kV Icc = 20 kA, centrifugal fans CBX-4747 with maximum flow of 23500 m³/h, earthing system with a mesh resistance equal to 11.23 Ω and the necessary measuring equipment to carry out tests on the transformers, such as the multifunction network analyzer, high voltage megometer, ratiometer, adjustable voltage generator, wattmeter, clamp meter, etc.

To improve the efficiency of the installation, a capacitor bank has been designed to analyze the behavior of the system with the compensation of the power factor and a test protocol has also been carried out to serve as a guide when executing the tests on the transformers.

Finally, in the economic analysis it is indicated that by making an investment of 122100 soles, a net profit of 121500 soles per year can be acquired, with an estimated return time of 12 months. Therefore, it is profitable to invest in the electrical test bench for distribution transformers.

Keywords: three-phase transformer, active power, transformation substation, ground connection.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad Problemática

A lo largo de la historia los seres humanos fuimos capaces de facilitar nuestro estilo de vida, gracias a los descubrimientos que fueron logrados a partir de experimentos en un laboratorio. Contar con material que nos permita darnos cuenta de los fenómenos de la naturaleza como es la electricidad, y cómo funcionan las tecnologías que ahora gobiernan las industrias es de suma importancia. El país y el mundo necesitan de profesionales cada vez más capacitados, por lo que es necesario que los alumnos tengan a su disposición material didáctico que los involucre aún más con la realidad.

Entonces una de las áreas que se involucra en la vida cotidiana, y permite la normal realización de actividades de las personas, son las máquinas eléctricas. Una máquina eléctrica es un equipo capaz de convertir energía mecánica en energía eléctrica, o viceversa (Chapman, 2012). Estos equipos pueden ser generadores, motores y transformadores, y como en el caso de los motores se encuentran en muchos equipos de uso doméstico como refrigeradores, lavadoras, ventiladores, aire acondicionado, etcétera.

Como consecuencia para que funcionen todos estos equipos domésticos y también industriales se ha implementado un sistema eléctrico que permita llevar la energía de corriente alterna desde plantas generadoras hasta la utilización, justamente el equipo que cumple un papel destacado en este sistema es el transformador, ya que este dispositivo nos permite elevar la tensión de tal manera que se minimicen pérdidas de energía en la transmisión y reducir la tensión a niveles en que los equipos eléctricos operan de manera segura. 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 alargar su tiempo de vida útil.

Si no existiera el transformador, no habría posibilidad de transmitir energía eléctrica como se hace hoy en día, esto habla de la importancia que tiene esta máquina en el sistema eléctrico, es por esto que se propone el diseño de un banco de pruebas eléctricas para caracterizar sus parámetros y predecir potenciales fallas. Si bien es cierto que presenta una alta eficiencia, es oportuno conocer su estado para tomar

decisiones acertadas. Con la implementación del laboratorio, deberían producirse dos tipos de efectos en el ámbito académico. Por un lado, se lograría un vínculo cercano con el mercado laboral, debido a que los alumnos saldrían más capacitados, de esta manera ellos no tendrían mayor problema para encontrar trabajo y las empresas tampoco tendrían problemas en encontrar profesionales. Por otro lado, la oferta de investigación y desarrollo, producción científica y de innovación en el país proveniente de la universidad, encontraría su óptimo social lo cual favorecería el crecimiento económico (SUNEDU, 2016, pág. 19).

Para tener una idea de cómo funciona una institución de educación superior de primer nivel tenemos al Instituto de Tecnología de Massachusetts (Estados Unidos) que es la mejor institución de ingeniería del mundo, debido a que tienen el objetivo de estimular las mentes más brillantes y prometedoras, haciendo de la tecnología la solución para los grandes problemas que ha afrontado la humanidad. La tecnología es el motor para el cambio más importante en el mundo moderno, es lo que afirma Jason Pontin (Director de MIT Technology Review). La confianza del MIT en la tecnología le ha llevado a participar en las grandes innovaciones del siglo XX, desarrollaron el primer experimento de la estación espacial internacional y vieron como nacía el movimiento hacker dentro de sus laboratorios en 1961, sin olvidar sus contribuciones en la invención del teléfono, internet, la robótica, la inteligencia artificial o en la descodificación del genoma humano (Vodafone, 2016).

En Latinoamérica la Universidad Nacional Autónoma de México cuenta con Laboratorio de Máquinas Eléctricas del Dpto. de Energía Eléctrica, en donde brinda el apoyo académico a profesores y a alumnos de la Facultad de Ingeniería para que se realicen las prácticas de laboratorio correspondientes a las asignaturas, de la carrera de Ingeniero Eléctrico, Electrónico, así como a carreras afines de esta Facultad. En este laboratorio se pueden realizar pruebas a transformadores, como también a motores de inducción.

Actualmente esta universidad cuenta con escasos módulos e instalaciones para realizar pruebas eléctricas, y demostrar la teoría en los cursos de máquinas eléctricas, sistemas

eléctricos de potencia, líneas de transmisión y automatización industrial. Por lo que representa una gran desventaja a la hora de competir en el mercado laboral.

1.2. Trabajos Previos

De acuerdo con la metodología para realizar las pruebas eléctricas de rutina y evaluación de resultados según las normas internacionales IEEE y ANSI, como también las normas mexicanas NMX-J-169-ANCE-2004, norma de seguridad de la STPS y del manual de procedimientos de CFE-SOM-3531, se encontró una tesis en la que el autor de acuerdo a su experiencia en el área de servicios de mantenimiento de subestaciones y transformadores, presenta diferentes pruebas eléctricas realizadas a equipos de una subestación de potencia, en la que se puede apreciar los parámetros obtenidos que fueron de mucha utilidad para tomar decisiones acertadas. Podemos mencionar algún ejemplo de cómo el autor indica los procedimientos y criterios de evaluación para realizar las pruebas eléctricas de rutina, de la página 29 a 30 se explica la prueba de potencial aplicado conocida también como prueba “HI POT” que consiste en comprobar que el material aislante utilizado en el transformador es el adecuado para soportar los esfuerzos eléctricos a la que estará sometido durante su operación. La metodología indica aplicar tensión al material aislante, esta tensión varía de acuerdo a la clase de aislamiento y lo indicado en la norma que para este caso fue utilizada la ANSI-IEEE C57-12-90. Los criterios de evaluación para determinar el estado del aislamiento están de acuerdo a la presencia de fallas como son el incremento brusco de la corriente, ruidos dentro del tanque que indica exceso de humedad y la presencia de humo que indica una falla a tierra o que el aislamiento sufre de esfuerzos térmicos. (Gaytan, 2016)

En la tesis que explicamos a continuación se estudió mediante ensayos los aceites dieléctricos de los transformadores, de acuerdo a esto en la escuela de ingeniería eléctrica se propuso algunos de estos ensayos para el laboratorio. Los resultados de los ensayos indican los parámetros del estado en el que se encuentra el aceite dieléctrico del transformador. Se seleccionó los siguientes ensayos: rigidez dieléctrica, número de neutralización, tensión interfacial, color, contenido del agua y gravedad.

Para saber el estado de un transformador, estos ensayos serán de mucha utilidad. Entonces con los resultados de los ensayos será más fácil la toma de decisiones en el mantenimiento (preventivo, correctivo, de monitoreo).

También se realizó un informe de los elementos aislantes que están en el transformador, también se describió la descomposición por el envejecimiento y los elementos de descomposición. Se describió las pruebas que se van a realizar (Pruebas eléctricas, Fisicoquímicos y Análisis de cromatografía). También se detalló el proceso y las medidas de seguridad que se deben tener en cuenta al realizar cada una de las pruebas mencionadas, para así tener mejores resultados. Se abordaron las normas de calidad que exige el cliente y que es de suma importancia para el laboratorio de pruebas de transformadores eléctricos. (Antillón & Magaña, 2015)

En la tesis de este autor se realizó el diseño y construcción de un banco de pruebas automatizado para transformadores de distribución. En esta tesis se describieron las bases de operatividad de los transformadores, las normas que aplican en estas pruebas, y los parámetros de caracterización del transformador. También se detalló la construcción del bastidor del equipo dimensionado, los equipos de maniobra y protección para el circuito de fuerza del banco de pruebas.

Se diseñó un software para el control a través del PLC, comunicación mediante el PMC 200 y MAGELIS HMISTU 655/855, también se muestra el procesamiento, la adquisición de datos, la programación del HMI y su visualización.

La común adquisición de transformadores de distribución, requiere la aceptación por parte de las empresas eléctricas dando la confianza de un funcionamiento correcto, de acuerdo a los resultados en las pruebas eléctricas.

Para ello se automatizó el proceso en las pruebas de los transformadores de distribución, así aumentando la fiabilidad en los resultados determinadas por las mediciones. Para ello se realizó una investigación de las tolerancias permitidas por la norma NTE INEN para variaciones entre los resultados de las pruebas y los valores indicados por los fabricantes. Los autores obtuvieron la construcción de un banco de pruebas eléctricas para transformadores trifásicos con capacidad de 400 KVA y monofásicos hasta 100 KVA, según la norma NTE INEN. (Donde un transformador pasará la prueba cuando la variación entre los resultados de las mediciones y las indicadas por el fabricante no superen las tolerancias admitidas en la norma NTE INEN). (Almagro & Narváez, 2013)

El siguiente autor realizó una tesis que trato el tema de mantenimiento de transformadores de distribución en media tensión. Se menciona la importancia de realizar el mantenimiento a los transformadores de distribución. En los suministros de energía eléctrica encontramos interruptores, pozos a tierra, conductores, generadores, transformadores, si bien es cierto que estos equipos presentan un alto grado de confiabilidad, no deja de ser importante el mantenimiento en el tiempo adecuado.

El mantenimiento del transformador se realizará dependiendo de sus factores de deterioro en el aislamiento, las actividades y pruebas de rutina que nos determina el estado del transformador, el significado de cada prueba de diagnóstico, cuando se debe realizar las pruebas de diagnóstico, y que medidas deben tomarse en caso que exista alguna anomalía en el transformador.

Se detalló el proceso de mantenimiento en un transformador, en especial el mantenimiento preventivo, en lo que se refiere a la metodología y las pruebas que se deben realizar para tener un diagnóstico. (Gargate, 2012)

En este último antecedente se diseñó el espacio requerido para el laboratorio de pruebas eléctricas de rutina dirigido a transformadores de distribución en base al estándar de calidad nacional NTE INEN. Primero se tuvo en claro el funcionamiento del equipo que se someterá a las pruebas, esto incluye cálculos, materiales y sus principios básicos, para tener una idea del objetivo. Luego se investigó los requisitos de la normativa nacional NTE INEN 2 con respecto a pruebas de rutina para transformadores de distribución hasta 500KVA. También se investigó normativas legales y otros requisitos con la finalidad de brindar calidad y satisfacción al cliente.

En función a las pruebas que se van a realizar, y de acuerdo a las normativas se dimensionó los equipos necesarios, optimizando los recursos económicos. En seguida, se dimensionó el espacio requerido de acuerdo a los niveles de voltaje que debe tener el banco de pruebas al momento de realizar los ensayos, así brindando y garantizando la seguridad del personal. También se diseñó las medidas de seguridad como las mallas a tierra, la jaula de protección y el sistema de protección teniendo en cuenta la distancia y facilidad de operación. Por último, se realizó el análisis económico determinando el gasto que se realizará para la implementación de este banco de pruebas, se determinó los beneficios que se obtendrían y el tiempo de retorno de la inversión. (Vásquez, 2013)

1.3. Teorías Relacionadas al Tema

1.3.1. Parámetros eléctricos

Los parámetros en una máquina eléctrica son indicadores que permiten caracterizar al dispositivo tales como potencia, voltaje, frecuencia, impedancia, etc. (Fraile Mora, 2003, pág. 170). Antes de comenzar con teoría de transformadores, mencionamos algunos conceptos básicos que serán de mucha utilidad.

Corriente eléctrica

Es el flujo alterno de electrones en un material conductor producido por una fuerza electromotriz. (Boylestad, Introducción al análisis de circuitos , 2004)

$$I = \frac{Q}{t}$$

I = ampere (A)

Q = coulombs (C)

t = segundos (s)

Ecuación 1. Corriente eléctrica

Voltaje

Es la diferencia de potencial que se genera entre la acumulación de electrones en la terminal negativa e iones positivos sobre la terminal positiva de una batería o fuente. Se presentará una diferencia de potencial de 1 volt (V) entre dos puntos si se utiliza 1 joule (J) de energía para mover 1 coulomb (C) de carga entre estos dos puntos. Es análogo a la presión en una instalación hidráulica.

$$V = \frac{W}{Q}$$

(volts)

Ecuación 2. Voltaje

Resistencia

El movimiento de electrones a través de cualquier material conductor encuentra una oposición que es análoga a la fricción mecánica. Debido a estos choques entre electrones y otros átomos del material, se produce una oposición al movimiento, que convierte la energía eléctrica en calor, se le llama resistencia. Su unidad de medición es el ohm, y se utiliza el símbolo Ω .

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

(ohms, Ω)

Ecuación 3. Resistencia

Ley de ohm

Es la relación que existe entre voltaje, corriente y resistencia. Esta indica que, con una resistencia constante, cuanto más elevado sea el voltaje, de igual manera aumentará la corriente.

$$I = \frac{E}{R}$$

(amperes, A)

Ecuación 4. Ley de ohm

Potencia

Se puede entender como la velocidad a la que se realiza un trabajo, o la cantidad de energía en Joules (J) por unidad de tiempo (s). La unidad de medición eléctrica de potencia es el watt.

$$P = \frac{W}{t}$$

Ecuación 5. Potencia

Campo magnético

El campo magnético es el medio por el cual se puede convertir la energía de una forma a otra en motores, generadores y transformadores. La corriente que pasa por un conductor eléctrico crea un campo magnético circular. Una corriente alterna que pasa por una bobina crea un flujo magnético oscilante que induce un voltaje. (Este es el principio de funcionamiento del transformador). (Chapman, 2012, pág. 6)

Campo magnético en un cable

Para poder apreciar la forma de un campo magnético en un cable, podemos pasar el cable a través de un papel y colocar partículas de hierro encima. Al circular una corriente por el cable podremos apreciar la forma que adopta el campo magnético.

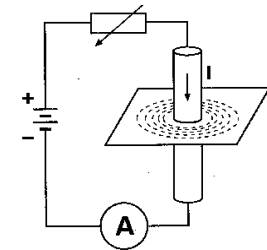


Figura 1. Campo magnético en un conductor recto.

Campo magnético en una espira

Para conseguir un campo magnético de mayor magnitud, ya que en un conductor recto se dispersa demasiado y por esto es muy débil, podemos formar una espira de tal manera que las líneas de fuerza se sumen. (Tecsup - PFR, 2013, pág. 3)

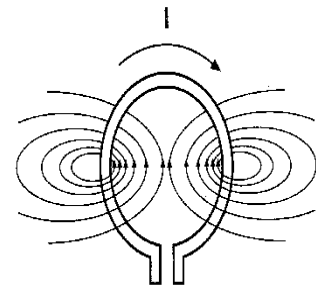


Figura 2. Campo magnético en una espira.

Flujo magnético (Φ)

El campo magnético se puede apreciar por las líneas de fuerza que se producen. A la cantidad de estas líneas se le denomina flujo magnético.

1.3.2. Ley de Faraday: voltaje inducido por un campo magnético variable

La ley de Faraday significa el principio de funcionamiento del transformador. Esta ley indica que, si un flujo magnético pasa por una espira de alambre conductor, se inducirá en ésta un voltaje directamente proporcional a la variación del flujo en el tiempo. Este principio se puede identificar con la siguiente ecuación:

$$e_{\text{ind}} = - \frac{d\phi}{dt}$$

Ecuación 6. Ley de Faraday

Para una bobina de N vueltas y un flujo que pasa por estas, el voltaje producido en la bobina es de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$e_{\text{ind}} = -N \frac{d\phi}{dt}$$

Ecuación 7. Ley de Faraday para N espiras.

Dónde:

- e_{ind} = voltaje inducido en el devanado.
- N = número de vueltas del devanado.
- Φ = flujo que atraviesa el devanado.

El signo negativo de las ecuaciones anteriores es de acuerdo con la ley de Lenz, que se interpreta como si los extremos del devanado estarían en cortocircuito, esto produciría un flujo opuesto al inicial. (Chapman, 2012, pág. 22)

1.3.3. Potencias Activa, Reactiva y Aparente

Potencia Activa (P): Es la potencia que realmente es aprovechada por la carga, es afectada por el desfase entre el voltaje y la corriente.

$$P = VI \cos \theta$$

Ecuación 8. Potencia activa o real

Las unidades para la potencia activa son los watts (W).

Potencia Reactiva (Q): Es la encargada de la formación y desvanecimiento del campo magnético en un inductor, o el campo eléctrico en un capacitor. Se puede calcular de la siguiente manera:

$$Q = VI \sin \theta$$

Ecuación 9. Potencia Reactiva

Para fines de cálculo, Q es positiva para cargas inductivas y negativa para cargas capacitivas. Tiene como unidad al volt-amper reactivo (VAR).

Potencia Aparente (S): Se puede interpretar como la potencia total que aparentemente se suministra a una carga, ya que esta es la suma de la potencia activa y reactiva. También se puede calcular multiplicando el voltaje por la corriente rms. Su unidad es el volt-amper (VA).

$$S = VI$$

Ecuación 10. Potencia Aparente

1.3.4. Formas alternativas de las ecuaciones de potencia

Se tiene las siguientes ecuaciones:

$$V = IZ$$

Ecuación 11. Voltaje en función de impedancia

Sustituyendo la ecuación 11 en las ecuaciones 12, 13 y 14 obtenemos la potencia real, reactiva y aparente en función de la corriente y la impedancia:

$$P = I^2Z \cos \theta$$

Ecuación 12. Potencia Activa en términos de corriente e impedancia

$$Q = I^2Z \sen \theta$$

Ecuación 13. Potencia Reactiva en términos de corriente e impedancia

$$S = I^2Z$$

Ecuación 14. Potencia Aparente en términos de corriente e impedancia

Donde $|Z|$ es el módulo de la impedancia de carga.

La impedancia también se puede expresar en su forma rectangular:

$$Z = R + jX = |Z| \cos \theta + j|Z| \sen \theta$$

Ecuación 15. Impedancia (forma rectangular)

De esta ecuación se sabe que $R = |Z| \cos \theta$ y $X = |Z| \sin \theta$; entonces la potencia activa y reactiva también puede ser calculada de la siguiente manera:

$$P = I^2R$$

Ecuación 16. Potencia Activa en función de corriente y resistencia

$$Q = I^2X$$

Ecuación 17. Potencia Reactiva en función de corriente y reactancia

1.3.5. Potencia Compleja

Esta forma puede ser muy útil para simplificar el desarrollo de los cálculos eléctricos, se puede representar de la siguiente manera:

$$\mathbf{S} = P + jQ$$

Ecuación 18. Potencia Compleja

La potencia aparente para fines de cálculo se puede desarrollar multiplicando el voltaje por la corriente conjugada.

$$\mathbf{S} = \mathbf{VI}^*$$

Ecuación 19. Potencia compleja en función del voltaje y corriente conjugada

Donde la conjugada indica cambiar el signo del ángulo de la corriente.

1.3.6. Relaciones entre ángulos de impedancia, corriente y potencia.

La teoría nos dice que una carga inductiva tiene un ángulo de impedancia positivo θ . Esta produce una corriente con ángulo negativo, por lo tanto, consume potencia activa y reactiva de la fuente.

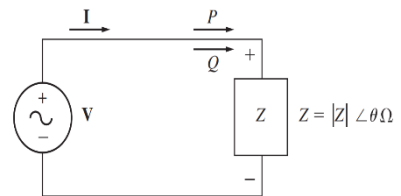


Figura 3. Carga Inductiva

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{Z}} = \frac{V \angle 0^\circ}{|Z| \angle \theta} = \frac{V}{|Z|} \angle -\theta$$

En cambio, una carga capacitiva tiene un ángulo de impedancia θ negativo. Esta produce una corriente con ángulo positivo, por lo tanto, consume potencia activa, mientras suministra potencia reactiva a la fuente.

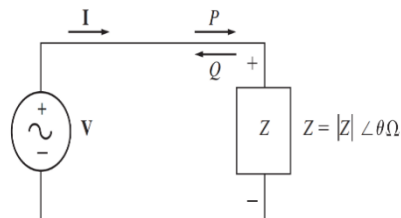


Figura 4. Carga Capacitiva

1.3.7. Triángulo de potencia

La potencia aparente, activa y reactiva pueden ser graficados formando un triángulo rectángulo. El ángulo θ es el de la impedancia, el cateto adyacente es la potencia activa, el cateto opuesto es la potencia reactiva, la hipotenusa es la potencia aparente suministrada a la carga y el $\cos \theta$ es conocido como el factor de potencia de la carga. (Chapman, 2012, pág. 40)

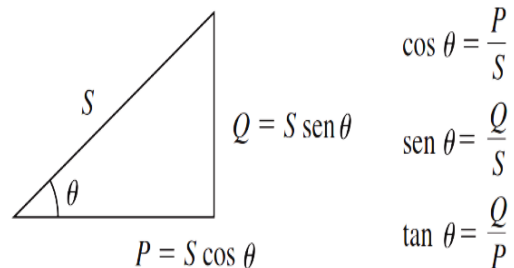


Figura 5. Triángulo de potencia

1.3.8. Transformador

Es un aparato estático con dos o más devanados, que por inducción electromagnética transforma un sistema de voltaje y corriente alternos, en otro sistema de voltaje y corriente generalmente de diferentes valores y en la misma frecuencia, con el fin de transmitir energía eléctrica. [IEV 421-01-01, modificado] (IEC 60076-1, 2000).

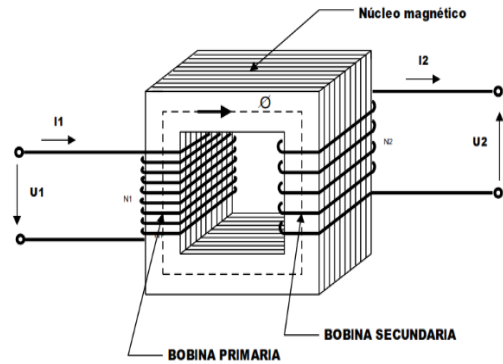


Figura 6. Transformador Elemental

1.3.9. Transformador Ideal

Un transformador ideal no presenta pérdidas. La relación entre el voltaje primario $v_P(t)$ y el voltaje secundario $v_S(t)$ es la siguiente:

$$\frac{v_P(t)}{v_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} = a$$

Ecuación 20. Relación de transformación

La relación de corrientes tanto del primario como del secundario del transformador es la siguiente:

$$\frac{i_P(t)}{i_S(t)} = \frac{1}{a}$$

Ecuación 21. Relación de corrientes en un transformador

La potencia de entrada se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$P_{\text{entr}} = V_P I_P \cos \theta_P$$

Ecuación 22. Potencia de entrada en transformador ideal

Donde θ_P es el ángulo formado entre el voltaje y la corriente del primario. La potencia de salida del transformador con que se energiza la carga se puede calcular con la ecuación 23.

$$P_{\text{sal}} = V_S I_S \cos \theta_S$$

Ecuación 23. Potencia de salida en transformador ideal

Donde θ_S es el ángulo formado entre el voltaje y la corriente del secundario. Debido a que se trata de un transformador ideal $\theta_P = \theta_S = \theta$.

1.3.10. Circuito equivalente del transformador real

Para construir el circuito equivalente de un transformador real debemos considerar las principales pérdidas de energía que afectan su comportamiento:

1. *Pérdidas en el cobre (I^2R)*. Se producen exclusivamente en las resistencias de los devanados primario y secundario. La energía se pierde en forma de calor y estas son directamente proporcional al cuadrado de la corriente.
2. *Pérdidas por corrientes parásitas*. También se conocen como pérdidas por corrientes de Foucault, son las que se presentan cuando un campo magnético variable atraviesa un material conductor, en este material se inducen corrientes que producen un campo magnético de sentido opuesto. En este caso las corrientes parásitas aparecen en el núcleo del transformador, por la resistencia del material del núcleo (acero al silicio) es que se pierde la energía en forma de calor. Debido a esto es que el núcleo del transformador se fabrica con placas que se encuentran pegadas, pero que están aisladas eléctricamente, con esto las corrientes de Foucault que se inducen se limitan en comparación si sería un bloque continuo.
3. *Pérdidas por histéresis*. Se producen debido a que el flujo en el material magnético cambia de dirección y valor de acuerdo a una frecuencia (Varía la densidad de flujo B y la intensidad de campo magnético H , formando el lazo de histéresis) Por cada ciclo el material absorbe energía y lo disipa en forma de calor. (Wildi, 2007, pág. 33)
4. *Flujo disperso*. Los flujos dispersos (φ_{DP} , φ_{DS}) que fugan del núcleo producen una autoinductancia en los devanados primarios y secundarios.

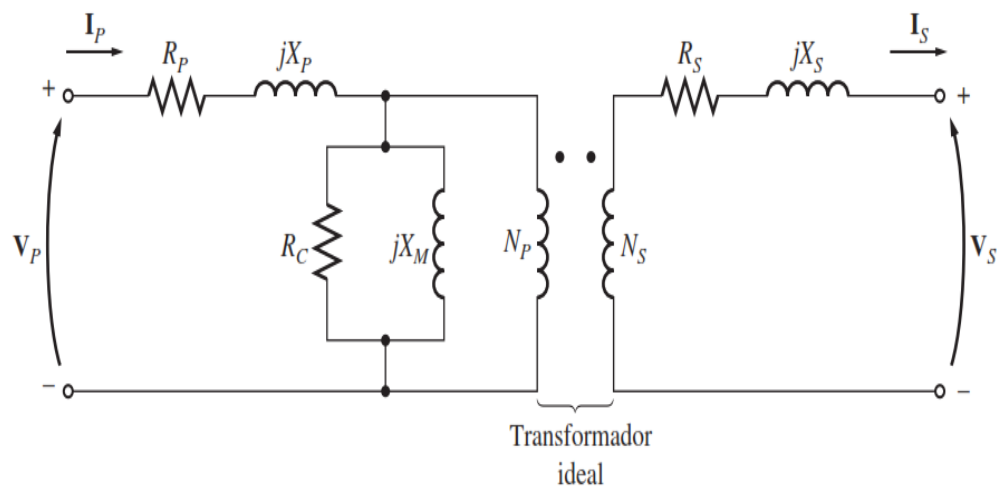


Figura 7. Circuito equivalente del transformador real

R_P, R_S = Resistencias del devanado primario y secundario, equivalentes a las pérdidas en el cobre.

X_M = Reactancia que representa la corriente de magnetización i_m , que es proporcional al voltaje aplicado al núcleo del transformador.

R_C = Resistencia que representa las pérdidas por corrientes parásitas y de histéresis proporcional al voltaje aplicado al núcleo del transformador.

X_P, X_S = Reactancias generadas por la inductancia de dispersión del primario y secundario.

1.3.11. Circuitos equivalentes aproximados

Para facilitar el cálculo, se ha simplificado el circuito equivalente.

Como resultado tenemos:

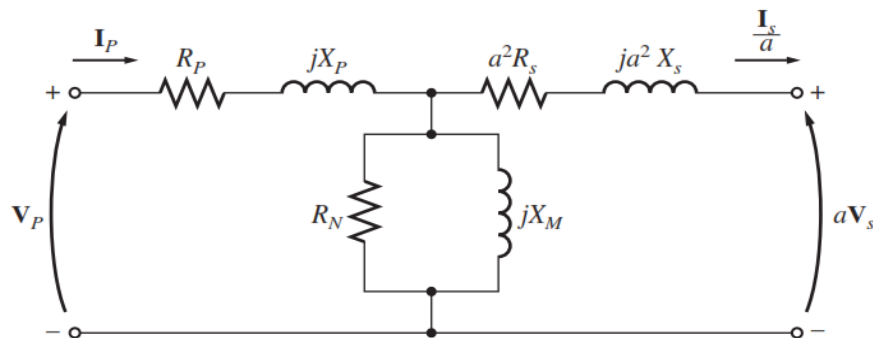


Figura 8. Circuito del transformador aproximado al primario

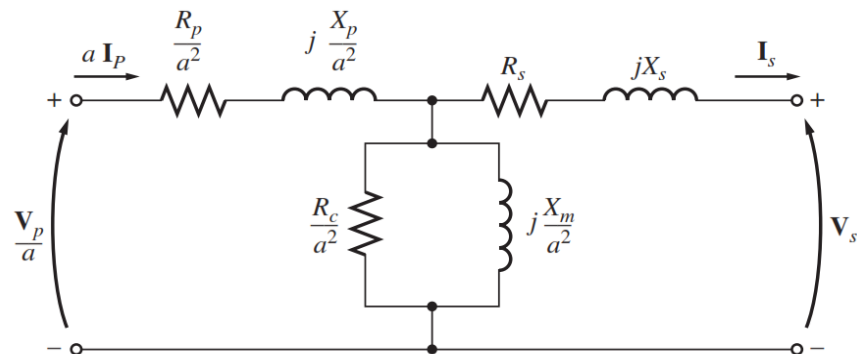


Figura 9. Circuito del transformador aproximado al secundario

1.3.12. Clasificación del transformador

Por operación:

- **Transformadores de distribución:** Con potencias de 5 hasta 5000 KVA, con nivel de tensión de hasta 36 kV.
- **Transformadores de potencia:** Por encima de los 5000 KVA.

Por número de líneas:

- **Monofásicos:** Trabajan con una línea y un neutro. Se pueden encontrar en transformadores de distribución y potencia.
- **Trifásicos:** Trabajan con tres líneas, y de acuerdo a su conexión pueden conectarse a neutro o tierra. Cuentan con 3 bobinas para cada lado de alta y baja tensión. Se pueden encontrar también en distribución como en potencia.

1.3.13. Pruebas Eléctricas de Rutina

Son las pruebas a las que se someten cada transformador fabricado para verificar que el producto cumple con los requerimientos establecidos. De acuerdo con los siguientes estándares NTP ITINTEC 370.002 e IEC 60076 establecen las siguientes pruebas como de rutina para transformadores de distribución:

Resistencia de aislamiento. - Tiene la finalidad de indicar el grado de humedad e impurezas que presenta el aislamiento del transformador. Se comprueba la adecuada conexión entre los devanados y tierra.

- **Instrumento de medición:** Megóhmetro.

Los indicadores que obtendremos de esta medición serán el índice de absorción (R_{60s}/R_{30s}) y el índice de polarización (R_{10min}/R_{1min}).

CONDICIONES	INDICE DE ABSORCION (60/30 segundos)	INDICE DE POLARIZACION (10/1 minutos)
PELIGRO	--	menos de 1
POBRE	menos de 1.1	menos de 1.5
DUDOSO	1.1 a 1.25	1.5 a 2
REGULAR	1.25 a 1.4	2 a 3
BUENO	1.4 a 1.6	3 a 4
EXCELENTE	arriba de 1.6	arriba de 4

Tabla 1. Indicadores para el índice de absorción y el índice de polarización (Gaytan, 2016)

Podemos realizar las siguientes conexiones para la prueba de resistencia de aislamiento:

- Entre bobinas de alta y baja tensión.

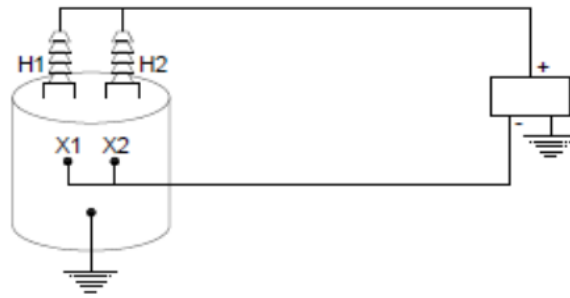


Figura 10. Resistencia de aislamiento entre bobinas (Almagro & Narváez, 2013)

- Entre bobina de alta y tierra.
- Entre bobina de baja y tierra.

Resistencia de los arrollamientos. - La medida de la resistencia es necesaria para:

- Cálculo de la componente de pérdidas.
- Cálculo de la temperatura de los arrollamientos (prueba de calentamiento).
- Comprobar que las conexiones internas de las bobinas no presenten discontinuidad.

Las mediciones se efectúan con un instrumento que genera una corriente dc en el circuito, indirectamente el instrumento calcula por ley de ohm la resistencia del devanado.

Relación de transformación y polaridad. - Define la relación del número de vueltas del bobinado primario y el número de vueltas del bobinado secundario. En tanto que el grupo de conexión, es el desfase que se tiene entre la tensión primaria y la tensión secundaria. (PROMELSA, 2016)

Para realizar esta prueba podemos utilizar el medidor de relación de vueltas (T.T.R.), este equipo funciona con el principio de dos transformadores con las mismas características, que funcionan en paralelo, la más mínima diferencia entre sus características, producirá una corriente circulante alta entre los dos. Un método común que también podemos realizar para conocer las marcas de polaridad es configurando el transformador como se muestra en la figura 11, se aplica una tensión conveniente y se anotan los valores proporcionados por los voltímetros. Si el voltaje V_x es igual a $V_1 - V_2$ tendremos una polaridad sustractiva, y por el contrario tenemos V_x igual a $V_1 + V_2$ tendremos una polaridad aditiva del transformador.

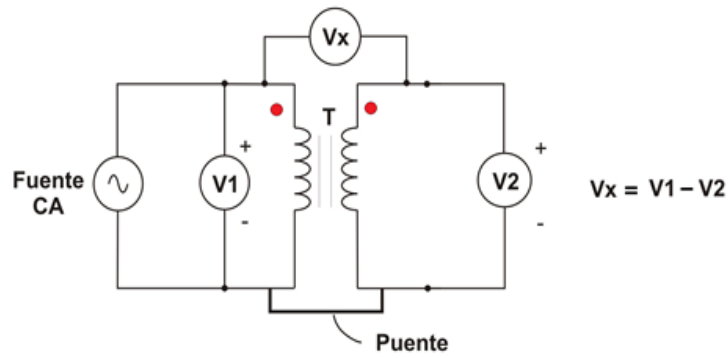


Figura 11. Polaridad Sustractiva

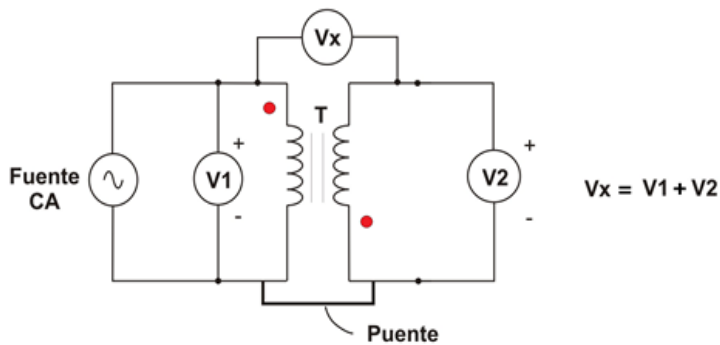


Figura 12. Polaridad Aditiva

Prueba de vacío. - Se realizan para medir las pérdidas en el núcleo y la corriente en vacío. Las pérdidas son la suma de pérdidas por histéresis y pérdidas por corriente de Foucault. Para realizar este ensayo dejamos abierto el lado del secundario y colocamos un voltímetro (V2), de igual manera en el primario (V1). También se instala un amperímetro y un vatímetro en el circuito primario. (TECSUP, 2013)

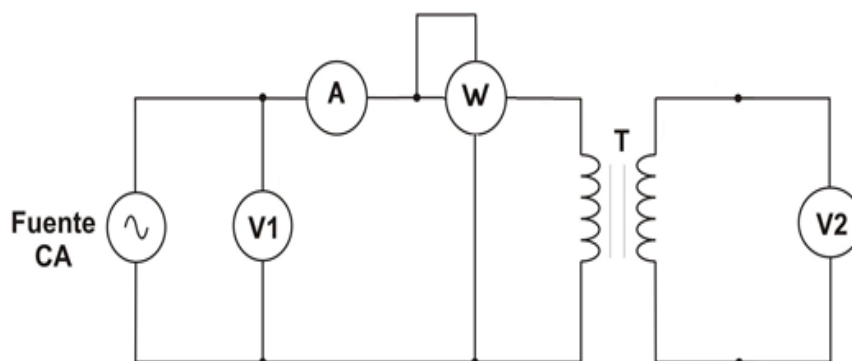


Figura 13. Prueba de vacío en transformador monofásico (TECSUP, 2013)

El amperímetro (A) nos mostrará la corriente de vacío I_0 .

El vatímetro mostrará la potencia de vacío (P_0), y se puede calcular con:

$$P_0 = U_1 I_0 \cos \varphi_0$$

Ecuación 24. Potencia de vacío

Debido a que la corriente de vacío es muy pequeña se puede decir que:

$$P_0 \cong P_{Fe}$$

Ecuación 25. Pérdidas en el hierro

Prueba de vacío en transformador trifásico

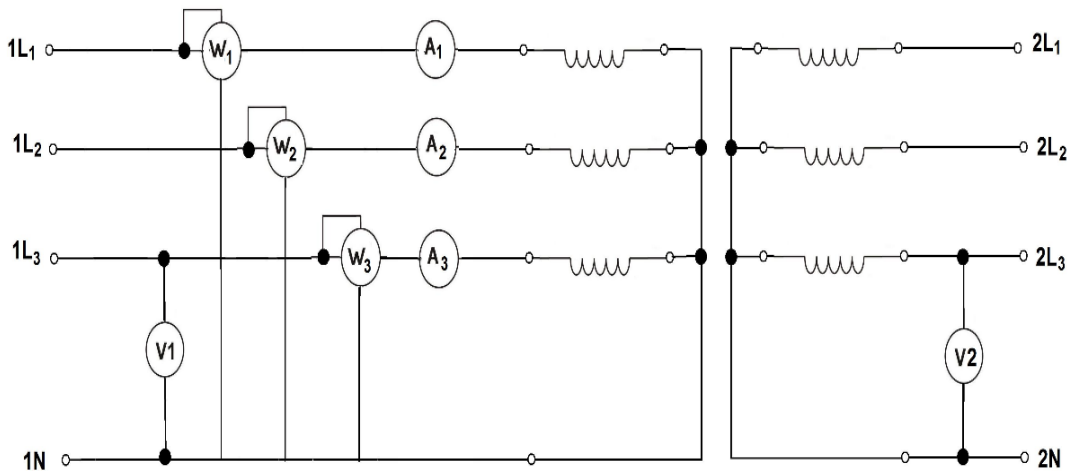


Figura 14. Prueba de vacío en transformador trifásico (TECSUP, 2013)

La suma de las lecturas de los tres vatímetros nos dará la potencia de pérdidas en el hierro del transformador.

$$P_{Fe} = W_1 + W_2 + W_3$$

Ecuación 26. Pérdidas en el hierro de transformador trifásico

Prueba de cortocircuito. - Se realizan para medir las pérdidas que se producen en el cobre y la tensión de cortocircuito, la medida se puede realizar haciendo circular la corriente nominal.

Para realizar esta prueba se cortocircuita el secundario y se coloca un amperímetro A2. En el lado primario del transformador se instala una fuente AC regulable. En el lado primario del transformador se instala un voltímetro que mida la tensión de cortocircuito, un amperímetro que mida la corriente nominal y un vatímetro que medirá las pérdidas en el cobre.

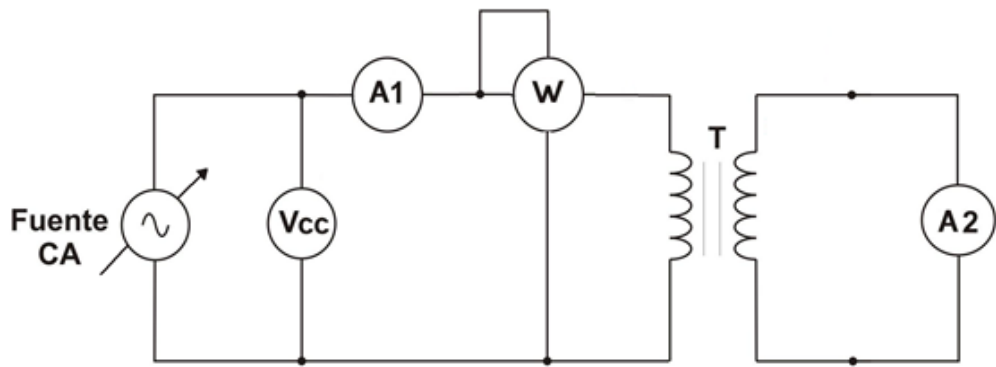


Figura 15. Prueba de cortocircuito

Con la fuente regulable aplicamos cero voltios y lentamente vamos aumentando la tensión en el primario, hasta que el amperímetro (A1) muestre la corriente nominal del transformador.

$$P_{Cu} = R_1 I_{1n}^2 + R_2 I_{2n}^2$$

Ecuación 27. Pérdidas en el cobre

Por ser la tensión aplicada muy reducida se cumple que:

$$P_{Cu}(\text{Perdidas en cobre}) \cong P_{CC}(\text{Potencia de cortocircuito})$$

$$P_{CC}(\text{Potencia de cortocircuito}) = \text{Lectura del vatímetro}$$

Para calcular la impedancia de cortocircuito utilizaremos la ley de Ohm:

$$Z_{CC} = \frac{U_{CC}}{I_{1n}}$$

Ecuación 28. Impedancia de cortocircuito

Ahora podemos calcular las componentes R_{CC} y X_{CC} de la siguiente manera:

$$R_{CC} = Z_{CC} \cdot \text{Cos} \varphi_{CC}$$

$$X_{CC} = Z_{CC} \cdot \text{Sen} \varphi_{CC}$$

Ecuación 29. Resistencia y Reactancia de cortocircuito

Para ello se debe conocer el factor de potencia:

$$\text{Cos} \varphi_{CC} = \frac{P_{CC}}{U_{CC} I_{1n}}$$

Ecuación 30. Factor de potencia de cortocircuito

El porcentaje de impedancia se puede calcular con la siguiente relación:

$$\%Z = \frac{\text{Voltaje Leído}}{\text{Voltaje Nominal}} \times 100$$

Ecuación 31. Porcentaje de impedancia

Prueba de cortocircuito en transformador trifásico. - De la misma manera que para el transformador monofásico, se tiene que cortocircuitar el secundario y mediante una fuente alterna regulable, se hace circular por el primario la intensidad nominal.

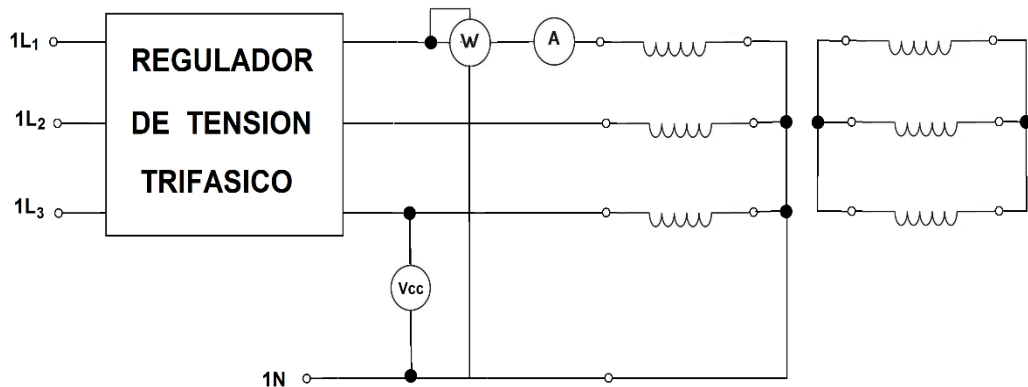


Figura 16. Prueba de cortocircuito en transformador trifásico

La lectura del vatímetro multiplicada por tres nos dará las pérdidas en el cobre.

$$P_{Cu} = 3 \cdot W$$

Ecuación 32. Pérdidas en cobre de transformador trifásico

Asimismo, el factor de potencia de cortocircuito será:

$$\cos \varphi_{CC} = \frac{P_{CC}}{\sqrt{3} \cdot U_{CC} I_{1L}}$$

Ecuación 33. Factor de potencia de cortocircuito trifásico

Dónde:

$$I_{1L} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1L}}$$

Ecuación 34. Corriente de línea nominal

Prueba de Tensión Aplicada. - Esta prueba determina la suficiencia de los aislamientos y distancias de cada devanado con respecto a masa, núcleo y tanque. Se efectúa aplicando tensión con una fuente externa a cada devanado con respecto al núcleo y tanque conectados a tierra durante 1 minuto.

- Indicios de falla: Incremento brusco de corriente, ruidos dentro del tanque, humo y burbujas.

CLASE DE AISLAMIENTO (KV)	TENSION DE PRUEBA (VALOR EFICAZ) KV	CLASE DE AISLAMIENTO KV	TENSION DE PRUEBA (VALOR EFICAZ) KV
1.2	10	161	325
2.5	15	196	395
5	19	215	430
8.7	26	230	460
15	34	315	630
18	40	345	690
25	50	375	750
34.5	70	400	800
46	95	430	860
69	140	460	920
92	185	490	980
115	230	520	1040
138	275	545	1090

Tabla 2. Tensiones de prueba establecidos por ANSI-IEEE C57-12-90 de acuerdo al nivel de aislamiento (Gaytan, 2016)

Para realizar la prueba podemos configurar al transformador de la siguiente manera:

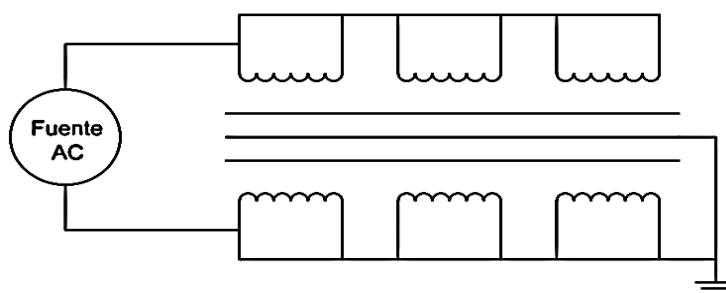


Figura 17. Prueba de tensión aplicada

Prueba de Tensión Inducida. - Verifica la suficiencia de los devanados entre todos los puntos donde se induce tensión: entre espiras, entre capas, entre derivaciones, entre salidas. Se aplica el doble de la tensión nominal durante 1 minuto. Para que el núcleo no se sature con el doble de la tensión inducida, se duplicará la frecuencia. Dependiendo la frecuencia que se aplique, tenemos la siguiente tabla con los tiempos de prueba.

FRECUENCIA (Hz)	DURACION DE LA PRUEBA (s)
120	60
180	40
240	30
360	20
400	18

Tabla 3. Tiempos establecidos por las normas ANSI C57-72 para la prueba de potencial inducido (Gaytan, 2016)

Rigidez dieléctrica del aceite. - La rigidez dieléctrica puede considerarse como la intensidad de perforación del campo eléctrico. Con esta prueba se desea conocer la tensión de ruptura que soporta la muestra de aceite, ya que para conocer este parámetro se aplica tensión desde una fuente regulable mediante dos electrodos a la muestra y se va elevando hasta que el interruptor seccione el circuito.

✓ **Instrumento de medición:** Probador de aceite.

Factores que condicionan los resultados:

- Distancia entre electrodos.
- Contenido de compuestos polares.
- Contenido de partículas sólidas en suspensión.
- Tiempo de uso del aceite en el transformador.

1.3.14. Eficiencia y regulación de un transformador

Caída de tensión en un transformador. - Debido a la existencia de resistencias y reactancias instaladas en serie a los devanados del transformador, cuando circule una corriente de carga por los devanados se producirá una reducción en la tensión. La caída de tensión será la diferencia algebraica entre la tensión rms del secundario en vacío (E_2) y la tensión que se produce con carga (U_2):

$$u = E_2 - U_2$$

Ecuación 35. Caída de tensión en un transformador

Es común expresar la caída de tensión en porcentaje referido a la tensión de vacío. Este valor se conoce como coeficiente de regulación. (ε)

$$\varepsilon = \frac{E_2 - U_2}{E_2} \times 100\%$$

Ecuación 36. Coeficiente de regulación

También se puede calcular con la siguiente ecuación: ($\cos\varphi$ es el f.p. de la carga)

$$\varepsilon = u_{R_{CC}} \cos\varphi + u_{X_{CC}} \operatorname{Sen}\varphi$$

Ecuación 37. Coeficiente de regulación en función de resistencia y reactancia

Dónde:

$$u_{R_{CC}} = \frac{R_{CC} \cdot I_1}{U_1} \times 100\%$$

Ecuación 38. Caída de tensión óhmica de cortocircuito

$$u_{X_{cc}} = \frac{X_{cc} \cdot I_1}{U_1} \times 100\%$$

Ecuación 39. Caída de tensión inductiva de cortocircuito

Rendimiento de un transformador

Podemos interpretar al rendimiento del transformador como la relación entre la potencia de salida por el secundario suministrada a la carga (P2) y la potencia absorbida de la red por el primario (P1):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 = \frac{P_2}{P_2 + P_{Fe} + P_{Cu}} \times 100$$

Ecuación 40. Eficiencia de un transformador

$$\eta = \frac{CU_2 I_{2n} \cos \theta}{CU_2 I_{2n} \cos \theta + P_{Fe} + C^2 P_{Cu}} \times 100$$

Ecuación 41. Eficiencia de un transformador en función del índice de carga

$$C = \frac{I_2}{I_{2n}} = \frac{I_1}{I_{1n}}$$

Ecuación 42. Índice de carga

$$C_{\max} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{Cu}}}$$

Ecuación 43. Índice de carga máximo

Dónde:

η = Rendimiento del transformador en %.

P1 = Potencia absorbida de la red por el primario.

P2 = Potencia activa cedida a la carga.

P_{Fe} = Perdidas en el hierro.

P_{Cu} = Perdidas en el cobre.

C = Índice de carga

C_{max} = Índice de carga donde se da la máxima eficiencia del transformador

1.4. Formulación Del Problema

¿Como el diseño de un banco de pruebas eléctricas influye en caracterizar parámetros de transformadores de distribución en el laboratorio de una Universidad en la ciudad de Trujillo?

1.5. Justificación del Estudio

El transformador es una máquina eléctrica estática que permite transmitir energía eléctrica de forma segura y eficiente, por lo que es muy importante identificar su comportamiento ante diferentes tipos de carga, indicadores de una posible falla, conocer sus pérdidas y eficiencia. En la actualidad esta Universidad en la ciudad de Trujillo, en la escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica no cuenta con un banco de pruebas eléctricas para transformadores de distribución donde los alumnos comprueben en la práctica lo aprendido en clase. Debido a lo planteado anteriormente la elaboración del estudio para la implementación de un banco de pruebas eléctricas para transformadores de distribución, es un primer paso para vincular aún más a los estudiantes con el mercado laboral y así también mejorar la calidad de nuestros profesionales.

1.6. Hipótesis

El diseño de un banco de pruebas eléctricas influye en caracterizar parámetros de transformadores de distribución en el laboratorio de una Universidad de Trujillo.

1.7. Objetivos

1.6.1. Objetivo General

Diseñar un banco de pruebas eléctricas para caracterizar parámetros de transformadores de distribución.

1.6.2. Objetivos Específicos

- Recolectar especificaciones en función de la capacidad del laboratorio.
- Diseñar distribución de equipos básicos.
- Dimensionar accesorios en media y baja tensión.
- Dimensionar dispositivos de maniobra y protección
- Seleccionar los equipos de control y medición.
- Elaborar procedimiento y protocolo de pruebas.
- Realizar análisis económico y financiero.

II. MÉTODO

2.1. Diseño de investigación

2.1.1. Tipo de Investigación:

De acuerdo al fin que se persigue, la investigación es aplicada debido a que se está usando las teorías de inducción electromagnética para encontrar pérdidas en el hierro (P_{FE}), pérdidas en el cobre (P_{CU}), resistencia (I_{cc}), reactancia (X_{cc}) e impedancia de corto circuito (Z_{cc}), polaridad, resistencia de los devanados y del aislamiento, eficiencia, etc.

Según (Hernández Sampieri, 2014), una investigación descriptiva busca especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice. Por ello la investigación y de acuerdo a su alcance, es de tipo descriptivo cuantitativo ya que los datos obtenidos al final de cada prueba son medibles, y se busca con estos datos caracterizar el estado del transformador.

2.1.2. Método:

El método es deductivo ya que se parte de un conocimiento general del comportamiento de los transformadores hacia algo específico que me permita caracterizar el dispositivo.

2.1.3. Diseño:

Según (Hernández Sampieri, 2014) el diseño no-experimental trasversal recolecta datos en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado. Por esto el diseño es no-experimental trasversal debido a que la investigación se realizará en un periodo de tiempo, el presupuesto para el presente proyecto saldrá con los costos de materiales y equipos de un mes determinado, por citar un ejemplo.

2.2. Variables, Operacionalización.

2.2.1. Dependiente: Parámetros de caracterización de transformadores.

- ✓ **Tipo:** Cuantitativa debido a que los datos obtenidos son medibles y a partir de estos se puede caracterizar al transformador, ya sea por el grado de desgaste de los devanados, el aceite dieléctrico, los aisladores, etcétera.

- ✓ **Definición Conceptual:** Los parámetros en una máquina eléctrica son indicadores que permiten caracterizar al dispositivo tales como potencia, voltaje, frecuencia, impedancia, etcétera. (Fraile Mora, 2003, pág. 170)
- ✓ **Definición Operacional:** Los parámetros nos permitirán determinar el estado y la eficiencia en un transformador, como también sus características antes de su aplicación.
- ✓ **Dimensiones:** Corriente y Voltaje Nominal, Impedancia, Resistencia y Reactancia de corto circuito, Perdidas en el cobre, Perdidas en el hierro, Potencia aparente, Resistencia del aislamiento, etcétera.
- ✓ **Indicadores:** Índice de polarización, Índice de absorción, aislamiento de los devanados, curva o variación de eficiencia de acuerdo al índice de carga, curva o variación de eficiencia de acuerdo al tipo de carga, indicadores de resistencia de los devanados, etcétera.
- ✓ **Escala de medición:** Es de razón debido a que las variables son cuantitativas y el cociente entre dos medidas de potencia para citar un ejemplo la de salida entre la entrada produce la medida de eficiencia.

MATRIZ DE OPERACIONALIZACION DE VARIABLES						
AUTORES	TUESTA VELA BRAYAN / SIFUENTES ARTEAGA SEGUNDO					
TITULO	DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS ELÉCTRICAS PARA CARACTERIZAR PARÁMETROS DE TRASFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN EN EL LABORATORIO DE UNA UNIVERSIDAD DE TRUJILLO					
Variable	Tipo	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición
Parámetros de caracterización de transformadores de distribución.	Dependiente	Los parámetros en una máquina eléctrica son indicadores que permiten caracterizar al dispositivo tales como potencia, voltaje, frecuencia, impedancia, etcétera. (Fraile Mora, 2003)	Los parámetros nos permitirán determinar el estado y la eficiencia en un transformador, como también sus características antes de su aplicación.	Corriente y Voltaje Nominal, Impedancia, Resistencia y Reactancia de corto circuito, Perdidas en el cobre, Perdidas en el hierro, Potencia aparente, Resistencia del aislamiento, etcétera.	Índice de polarización, Índice de absorción, aislamiento de los devanados, curva o variación de eficiencia de acuerdo al índice de carga, curva o variación de eficiencia de acuerdo al tipo de carga, indicadores de resistencia de los devanados, etcétera.	De razón

Tabla 4. Matriz de operacionalización de variables

2.3. Población y Muestra

- ✓ **Población:** Institutos y Universidades con la Carrera De Mecánica Eléctrica en la Ciudad de Trujillo- La Libertad.
- ✓ **Muestra:** Laboratorio de una Universidad en la ciudad de Trujillo (La Libertad).
- ✓ **Técnica de muestreo:** Para (Hernández Sampieri, 2014), el muestreo No Probabilístico, el procedimiento no es mecánico ni se basa en fórmulas de probabilidad, sino que depende del proceso de toma de decisiones de un investigador.

Por lo tanto, la técnica de muestreo es No Probabilístico por conveniencia, ya que por la muestra seleccionada se hace más accesible para la recolección de los datos.

2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad

- **Técnica:** Es análisis documental debido a que los datos serán obtenidos de fuentes de información, como las siguientes:
 - Libros de máquinas eléctricas, medidas eléctricas, mantenimiento y operación de transformadores, sistemas eléctricos de potencia, etcétera.
 - Normas de fabricación de transformadores de distribución.
 - Tesis y expedientes técnicos de trabajos similares.
 - Registro de medición de parámetros de caracterización de los transformadores de distribución.
 - Registro de pruebas eléctricas a transformadores de distribución con diferente índice de carga y tipo de carga.
 - Registro fotográfico de placas de transformadores de distribución.
 - Datos de funcionamiento y mantenimiento de transformadores.
 - Protocolo de pruebas eléctricas de rutina y guías de laboratorio.
- **Instrumentos:**
 - Ficha de registro de datos para las especificaciones de diseño como la demanda máxima, tensión de servicio, potencia contratada, etcétera.

UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO		FICHA DE REGISTRO DE DATOS	
Título del Proyecto		"DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS ELÉCTRICAS PARA CARACTERIZAR PARÁMETROS DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN EN EL LABORATORIO DE UNA UNIVERSIDAD DE TRUJILLO".	
Autores		<ul style="list-style-type: none"> • Tuesta Vela, Brayan • Sifuentes Arteaga, Segundo 	
Especificaciones de diseño			
Datos de ubicación			
Nº	Descripción		
1	Lugar		
2	Distrito		
3	Provincia		
4	Departamento		
Datos Arquitectónicos			
Nº	Descripción		
1	Área Total (m ²)		
2	Área Techada (m ²)		
3	Área No Techada (m ²)		
Datos de Instalación Eléctrica			

Tabla 5. Ficha de registro de datos.

- **Validez:**

Se ha diseñado la ficha de registro de datos, para las especificaciones de diseño del banco de pruebas eléctricas. El instrumento de recolección de datos tendrá que ser evaluado y validado por tres especialistas en el tema, con la finalidad de que esta contenga los criterios de pertinencia, relevancia y claridad.

UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO		FICHA DE REGISTRO DE DATOS							
Título del Proyecto		"DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS ELÉCTRICAS PARA CARACTERIZAR PARÁMETROS DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN EN EL LABORATORIO DE UNA UNIVERSIDAD DE TRUJILLO".							
Autores		<ul style="list-style-type: none"> • Tuesta Vela, Brayan • Sifuentes Arteaga, Segundo 							
Especificaciones de diseño		Pertinencia ¹		Relevancia ²		Claridad ³		Sugerencias	
Local del Laboratorio		SI	No	SI	No	SI	No		
Datos de ubicación									
Nº	Descripción								
1	Lugar								
2	Distrito								
3	Provincia								
4	Departamento								
Datos Arquitectónicos									
Nº	Descripción								
1	Área Total (m ²)								
2	Área Techada (m ²)								

Tabla 6. Criterios para validación de instrumento

2.5. Métodos de análisis de datos

Los datos serán procesados mediante fórmulas en Excel, con ayuda de plantillas se podrá facilitar y agilizar la labor de cálculo. Luego se utilizará tablas de fabricantes para seleccionar los materiales que más se adecuen al diseño. Para la elaboración de los planos se hará uso de AutoCAD y SolidWorks.

POR CAPACIDAD DE CORRIENTE			TABLA DE DATOS TECNICOS THW - 90 (AWG / MCM)									
SISTEMA:	MONOFÁSICO	1	CALIBRE CONDUCTOR	SECCION NOMINAL	NUMERO HILOS	DIAMETRO HILO	DIAMETRO CONDUCTOR	ESPESOR AISLAMIENTO	DIAMETRO EXTERIOR	PESO	AMPERAJE (*)	
											TRIFÁSICO	1.7321
			AWG/MCM	mm²		mm	mm	mm	mm	Kg/Km	A	A
POTENCIA	7.5	HP	14	2.1	7	0.60	1.75	0.8	3.4	28	35	25
	5595	Watt	12	3.3	7	0.76	2.20	0.8	3.8	40	40	30
U nominal	440	Volts	10	5.3	7	0.96	2.78	0.8	4.4	50	56	40
F.P.	0.8		8	8.4	7	1.20	3.61	1.1	5.9	98	80	56
n	0.85		6	13.3	7	1.53	4.60	1.5	7.6	161	107	75
I nominal	10.7961	Amperios	4	21.1	7	1.93	5.80	1.5	8.9	240	141	96
I diseño	13.4951	Amperios	2	33.6	7	2.44	7.31	1.5	10.4	363	192	130
I conductor	16.8689	Amperios	1/0	53.4	19	1.87	8.58	2	12.7	570	260	170
Cable THW 3 x 14 AWG (2.1mm²)			2/0	67.4	19	2.10	9.64	2	13.8	704	300	197
POR CAÍDA DE TENSIÓN			3/0	85.1	19	2.35	10.82	2	15	871	350	226
Kv (Monofásico)	0.0357		4/0	107.2	19	2.64	12.15	2.4	17.1	1109	406	260
Kv (Trifásico)	0.0309		250	126.7	37	2.06	13.25	2.4	18.2	1289	457	290
Resistividad (Ω.mm²/m)	0.0175		300	151.9	37	2.25	14.51	2.4	19.5	1527	505	321
CABLE DE SUBESTACIÓN - TABLERO			350	177.5	37	2.44	15.69	2.4	20.6	1769	569	350
Longitud (m)	250		500	253.1	37	2.91	18.73	2.8	24.5	2512	699	429
Calibre (mm²)	16		(*) NO MAS DE TRES CONDUCTORES POR DUCTO / TEMPERATURA AMBIENTE 30°C.									
U (tablero)	434.7875											
ΔU < 2%Un	8.8											
ΔU	5.2125											
			Descripción	Código	Costo/1m	Total						
			Cable NYY 1KV 3x1x16mm²	21511	S/. 13.30	S/. 3,325.00						

Figura 18. Hoja de Excel para selección de conductor eléctrico

2.6. Aspectos éticos

Originalidad	Toda la información que se muestra en la investigación, serán citadas con sus respectivas fuentes bibliográficas, con fin de mostrar el origen del contenido.
Compromiso	En la elaboración del diseño, se cumplen las actividades propuesta por los participantes.
Objetividad	La investigación será basada en conocimientos técnicos y experiencias

	técnicas como también se tomarán otros criterios en la investigación.
Respeto	Se respetará la participación y opiniones del compañero, con el fin de demostrar el trabajo en equipo. Se respetará las decisiones que tomen los participantes en el proyecto de investigación.
Conocimiento	La propuesta del diseño proporciona a que los alumnos puedan complementar los conocimientos teóricos en conocimientos prácticos.
Privacidad	Se respetará el anonimato de los colaboradores de la información en el proyecto de investigación.
Consentimiento	Las personas deben decidir por sí mismas si participan en el proyecto de investigación.
Responsabilidad	Es de proteger y brindar el bienestar de los colaboradores de información en el proyecto de investigación. Se cumplirá con los horarios y actividades acordadas durante el desarrollo del proyecto de investigación.

Tabla 7. Aspectos éticos

2.7. Procedimiento

En este apartado se indicará la secuencia de trabajo mediante un flujograma, en la que se podrá apreciar las acciones que se realizarán para cumplir con los objetivos propuestos.

2.7.1. Flujograma de procedimientos

Se refiere a la secuencia lógica a seguir para el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos, en los cuales se aplicará los conceptos, análisis y ecuaciones de ingeniería eléctrica, económica y financiera necesarios.

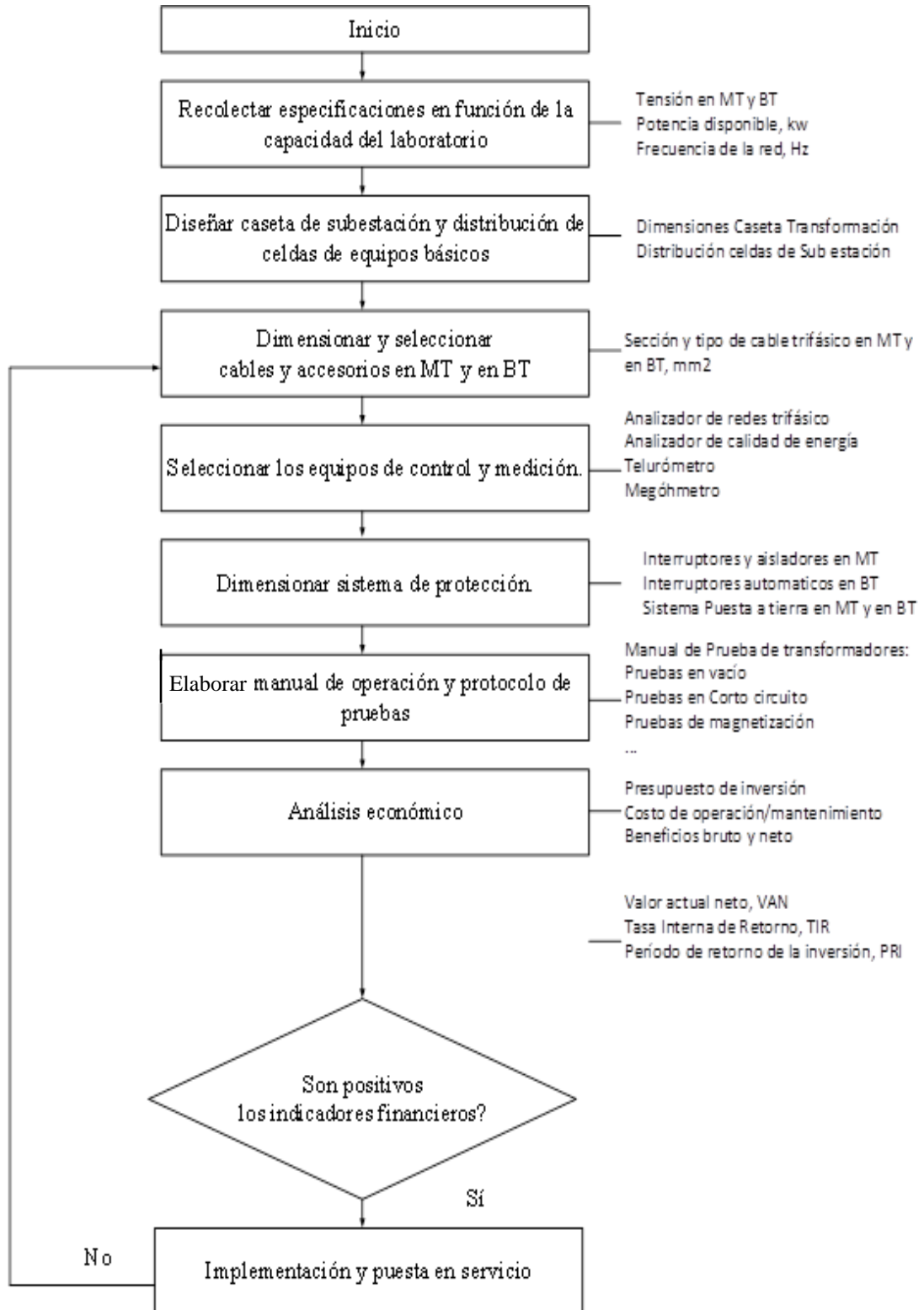


Figura 19. Flujograma de procedimientos para desarrollar objetivos específicos

III. RESULTADOS

3.1. Recolectar especificaciones en función de la capacidad del laboratorio.

3.1.1. Especificaciones en función de las características del laboratorio

Actualmente el Centro de Investigación Tecnológica de la universidad cuenta con un transformador tipo seco de 320 KVA, el cual es utilizado para abastecer de energía eléctrica las instalaciones. El promedio de máxima demanda de los 3 últimos meses es de 50.41 kW equivalente al 20% de la potencia total.

HP.T Electric

TRANSFORMADOR

MODELO	TTCP	PRIMARIO	SECUNDARIO
N° SERIE	3334	TENSION V	10000-22900 400-231
POTENCIA	320 KVA	CORRIENTE A	18.48 - 8.10 461.90
FASES	3Ø	NIVEL AISL INT (KV)	24/50/125 0.6/3
FRECUENCIA	60 Hz	NIVEL AISL EXT (KV)	36/70/170 1.1/8/10
GRUPO	Dyn5-Yyn6	CONEXION	DELTA-ESTRELLA ESTRELLA
T _{cc} % a 75 °C	3.93 - 4.00	BORNES	U - V - W 0-U-V-W
NORMA	IEC-76 (NITEC 370.002)	CONMUTADOR 1	
REFRIGERACION	ONAN	CAMBIO DE NIVEL DE TENSION	
ALTITUD	1000 msnm	POSICION	G. CONEXION TENSION
PESO PARTE ACTIVA	600 Kg.	1	Dyn5 10 000 V
PESO DEL ACEITE	590 Kg.	4	Yyn6 22 900 V
PESO TOTAL	1600 Kg.	CONMUTADOR 2	
FECHA DE FABRICAC.	2017	CAMBIO DE REGULACION DE TENSION	
TIPO DEL ACEITE	LUB TROIL	POSICION DEL CONMUTADOR	PRIMARIO (VOLTIOS) SECUNDARIO (VOLTIOS)
		1	10500-23766 400-231
		2	10250-23333 400-231
		3	10000-22900 400-231
		4	9750-22467 400-231
		5	9500-22034 400-231

DIAGRAMA DE CONEXIONES DEL TRANSFORMADOR

BOBINADO PRIMARIO (Y - Δ) BOBINADO SECUNDARIO Y

COMUNICADOR DE TENSION EN VACIO
(COMUNICAR CON EL EQUIPO FUERA DE SERV)

OFICINA Y PLANTA: Mz. "O-1" Lote. "14 - B" Parque Industrial Ancón - LIMA
TELEF: 734-9597 RPM # 945 053 446 / # 990 874 437 / # 994 400 283
Email: ventas@hpyelectric.com, hpyt@hpyelectric.com

Figura 20. Placa de Transformador Tipo Seco del CIT.

La subestación en la cual se instalará el banco de pruebas para transformadores será independiente de la subestación principal, de 320 KVA, que alimenta con energía eléctrica a las diferentes aulas y salas de laboratorio del CIT, tendrá su propio recibo de energía eléctrica y su propio pliego tarifario.

A continuación, se detallan los parámetros requeridos para el dimensionamiento del banco de pruebas eléctricas. Los siguientes parámetros fueron seleccionados de acuerdo a las características de la red en MT que abastece de energía al centro de investigación tecnológica.

- Tensión trifásica de la red MT: 10 kV
- Frecuencia de la red: 60 Hz
- Tensión trifásica en BT: 380 V
- Tensión monofásica en BT: 220 V
- Potencia Aparente Total: 550 KVA

La potencia aparente total fue seleccionada debido a que existe una gran cantidad de transformadores de distribución menores a 500 KVA, que podrán ser analizados en el banco de pruebas eléctricas para transformadores del CIT, tomamos como ejemplo el AMT HDS102 (S.E. HUACA DEL SOL 3MVA 33/10 KV) que pertenece a Hidrandina, este alimentador tiene 60 subestaciones menores a 500 KVA de 67 instaladas, con potencias que van desde los 15 hasta los 315 KVA.

Ahora detallaremos como se distribuirá la potencia para los servicios académicos e industriales que brindará la universidad:

Potencia de transformadores para servicio académico:

- Potencia aparente de transformador trifásico principal: 50 KVA
- Potencia aparente de transformadores trifásicos secundarios: 10 KVA

Potencia de transformadores para servicio industrial:

- Potencia aparente de transformador trifásico principal: 500 KVA
- Potencia aparente de transformadores trifásicos secundarios: 100 KVA

3.2. Diseñar distribución de equipos básicos

3.2.1. Diagrama unifilar del banco de prueba eléctricas para transformadores

A continuación, en la figura 22 se puede apreciar el diagrama unifilar diseñado para el banco de pruebas eléctricas de transformadores, en la que se especifica la capacidad de los dispositivos que se utilizarán en la instalación.

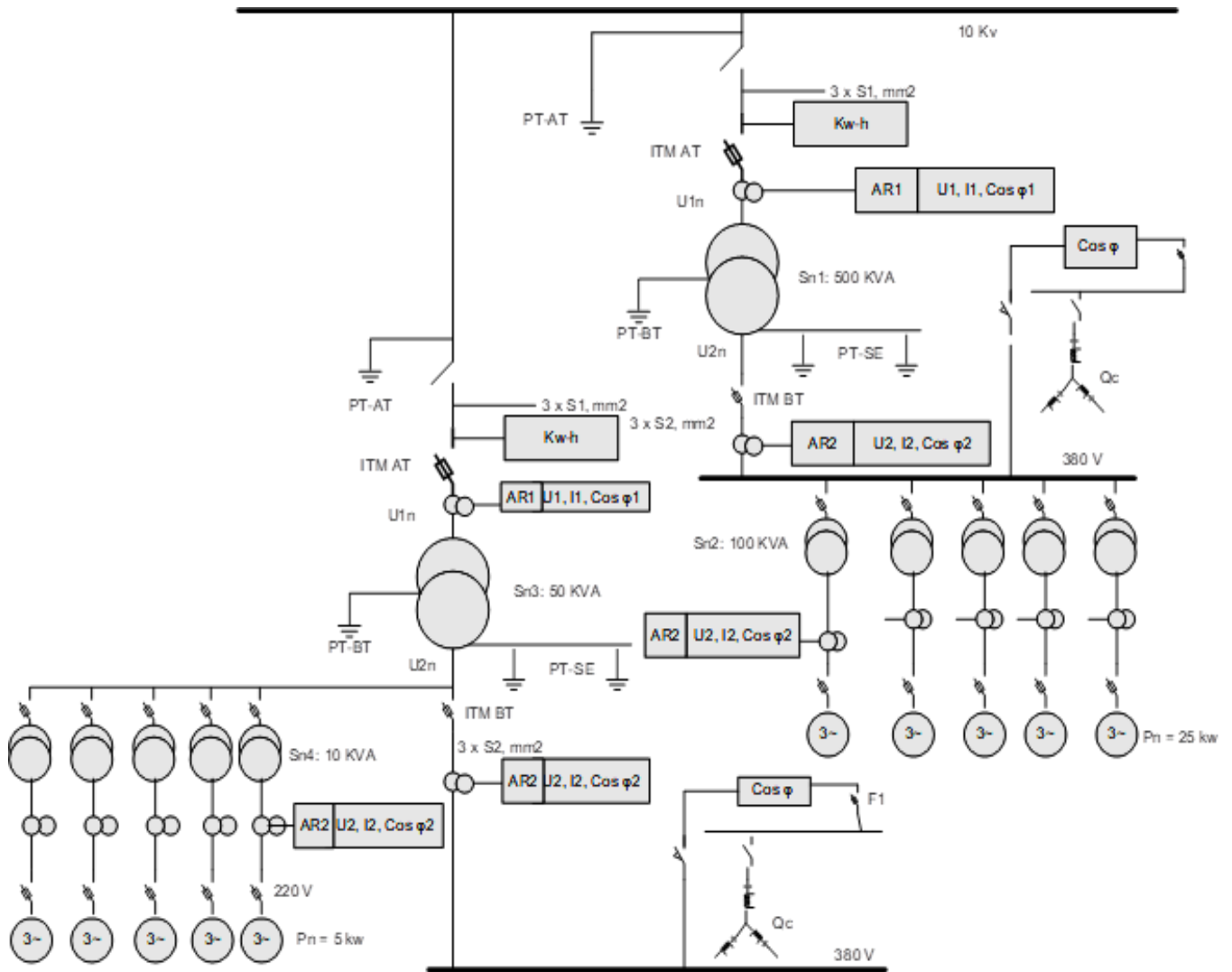


Figura 21. Diagrama Unifilar del banco de pruebas eléctricas para transformadores

3.2.2. Equipos básicos considerados para subestación de pruebas eléctricas.

Transformadores:

Para Servicio Académico:

- Transformador Trifásico Principal $S_n = 50 \text{ KVA}$, 10/0.38 kV
- 5 Transformadores Trifásicos $S_n = 10 \text{ KVA}$, 0.38/0.22 kV

Para Servicio Industrial:

- Transformador Trifásico Principal $S_n = 500 \text{ KVA}$, 10/0.38 kV
- 5 Transformadores Trifásicos $S_n = 100 \text{ KVA}$, 0.38/0.22 kV

Tableros eléctricos:

- Celda de distribución de Media Tensión.

Servicio interno, académico:

- Tablero de distribución general N°1
- Tablero de compensación del factor de potencia N°1
- Tablero de medición N° 1

Servicio externo, industrial:

- Tablero de distribución general N° 2
- Tablero de compensación del factor de potencia N° 2
- Tablero de medición N° 2

3.3. Dimensionar accesorios en media y baja tensión.**3.3.1. Dimensionamiento y selección de cable trifásico en MT**

El cálculo del Sistema de Utilización en M.T. 10 KV cumple con los siguientes requisitos y normas:

- Código Nacional de Electricidad
- Ley de Concesiones eléctricas N° 25844 y su Reglamento
- Resolución Directoral No. 018-2002- EM/DGE del 26/09/2002 del MEM

· Sistema de Distribución Primaria	Subterráneo
· Tensión de suministro y frecuencia	10KV, 60Hz
· Número de fases	Trifásico de 3 conductores
· Tensión de distribución secundaria	230 voltios

Tabla 8. Consideraciones básicas para dimensionamiento de conductor en M.T.

Caída máxima permisible de Tensión	3.5% según el Código Nacional de Electricidad
Factor de potencia	0.9 en atraso
Altitud	100 m.s.n.m.
Potencia de cortocircuito	130 MVA
Tiempo de apertura de protección	0.02 seg
Máxima Demanda	550 KVA
Opción Tarifaria	MT3
Modalidad de Facturación	Potencia Variable
Corrosión marina	Zona de corrosión marina fuerte (franja dentro de 3 Km. de la Costa)

Tabla 9. Criterios técnicos operativos de la subestación.

Cargas eléctricas a alimentar:

Un transformador de 500 KVA, 10/0.38 kV

Un transformador de 50 KVA, 10/0.38 kV

Potencia total de transformadores a alimentar: 550 KVA

3.3.2. Cálculo de corriente para selección de alimentador principal

Se toma como base de cálculo la potencia total instalada en la Subestación: 550 KVA, 10/0.38 KV.

3.3.2.1. Cable de potencia en MT (10KV)

Tipo	:	N2XSY
Tensión Nominal	:	8.7/15 KV
Número de ternas	:	1
Calibre	:	25 mm ²

3.3.2.2. Cálculo de la Corriente Nominal del Sistema

La corriente nominal está determinada por la siguiente expresión:

$$I_n = \frac{S_{n-T}}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{550,000VA}{\sqrt{3} * 10,000V} = 31.75 A$$

Dónde:

Sn-T	=	Potencia nominal	550 KVA
V	=	Tensión de la red	10 KV
In	=	Corriente nominal del Sistema, en MT	31.75 A
Fc	=	Factor de corrección	

3.3.2.3. Factores de corrección del suelo

Por profundidad del tendido, Fpt: 0.90

Por resistividad del terreno, Frt: 0.91

Por temperatura del terreno, Ftt: 0.92

$$F_c = 0.90 * 0.91 * 0.92 = 0.75348$$

3.3.2.4. Intensidad de diseño Id:

$$I_d = \frac{I_d}{f_c} = \frac{31.75}{0.7535} = 42.14 \text{ A}$$

3.3.3. Cálculo de la sección del conductor eléctrico

Considerando que la subestación de pruebas tendrá un alimentador en 10 KV, independiente, el cálculo de la sección de los cables de energía se efectuará para un circuito y el resultado será válido considerando que alimenta una Potencia de 550 KVA, correspondiente a la suma de los dos transformadores trifásicos.

Para determinar la sección adecuada del alimentador, en MT; se analiza en la siguiente secuencia

- Por capacidad de corriente
- Por caída de tensión
- Por cortocircuito.

3.3.3.1. Cálculo por capacidad de corriente

Se ha previsto instalar un circuito de 10 KV para la sub estación de 550 KVA, 10/0.38 KV en un circuito independiente.

Considerando que se tiene una intensidad de diseño de 42.14 A, se elige del catálogo de conductores en MT, se elige el cable de sección 25 mm², tripolar, 8.7/15 KV.

Entonces se tiene los siguientes datos de diseño:

Corriente nominal de diseño	= Id = 42.14 A
Cable de alimentación	= N2XSY, 8.7/15 KV = 3 – 1x25 mm ²
Resistencia a 90 °C	0.927 Ohm/Km
Reactancia	0.243 Ohm/Km
Longitud	0.13 Km
Potencia de Cortocircuito	130 MVA en 10 KV (Dato Hidrandina)
Duración del cortocircuito	0.02 seg.

El cable tipo N2XSY, 8.7/15 KV, 3 – 1x25 mm² tiene una capacidad de corriente de 167 A, según Tabla N° 11; enterrado; muy superior a la corriente nominal de 31.75 A, lo que determina que, por capacidad de corriente, el cable escogido es el adecuado.

Sección Nominal (mm ²)	Resistencia Conductor (Ohm/Km)		Capacidad Nominal μF/km	Reactancia Inductiva Ohm/Km a 60 Hz	Capacidad de Corriente (Amp)	
	a 20°C c.c.	a 90°C c.a.			Aire Libre 30°C	Enterrado Temp=25°C 0,9K-m/W
25	0,727	0,927	0,171	0,243	196	167
35	0,524	0,668	0,187	0,233	239	200
50	0,387	0,494	0,205	0,224	288	237
70	0,268	0,342	0,231	0,216	358	289
95	0,193	0,247	0,259	0,209	436	346
120	0,153	0,196	0,280	0,204	501	393
150	0,124	0,159	0,303	0,200	570	440
185	0,0991	0,128	0,330	0,198	655	498
240	0,0754	0,098	0,367	0,193	770	576
300	0,0601	0,079	0,401	0,189	880	649
400	0,0470	0,062	0,442	0,184	1020	739
500	0,0366	0,050	0,491	0,181	1167	834

Capacidad de corriente para 3 cables instalados con separación de un diámetro y en un solo plano.
Profundidad de instalación enterrada: 80 cm.

Tabla 10. Parámetros eléctricos de cable N2XSY en M.T. (INDECO, 2019)

3.3.3.2. Cálculo por caída de tensión

Se debe seleccionar el conductor eléctrico teniendo en cuenta que la caída de tensión máxima admisible es de 3.5% el voltaje nominal en media tensión.

Sección del conductor: 25 mm²

Coefficiente térmico de resistencia a 20 °C: 3.93×10^{-3}

Resistencia eléctrica a 90 °C: 0.927 Ohm/Km

Reactancia inductiva: 0.243 Ohm/Km

Temperatura estimada de operación: 70 °C

Temperatura inicial: 20 °C

Resistencia óhmica del conductor a 70°C:

$$R_t(\Omega) = R_0(1 + 0.00393 * \Delta t) = 0.727 * (1 + 0.00393 * 50) = 0.87\Omega$$

En la cual, $\Delta t = t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}} = 70 - 25 = 50 \text{ °C}$

R₀: resistencia óhmica del conductor a 20 °C

0.00393: Conductividad eléctrica del cobre, 1/°C

Impedancia del conductor, a 70 °C:

$$Z = \sqrt{R_t^2 + X_L^2} = \sqrt{0.87^2 + 0.243^2} = 0.903\Omega$$

Factor de potencia en conductor:

$$R/Z = 0.87/0.903 = 0.963$$

Angulo de desfase en conductor: $\arcs(0.963) = 15.63^\circ$

Seno del ángulo de desfase: $\text{sen}15.63 = 0.27$

Entonces la caída de tensión está expresada por:

$$\Delta V = 1.73 \times I_d \times L \times (R \cos\alpha + X \text{sen}\alpha).$$

Dónde:

ΔV = Caída de tensión

L = Longitud del cable = 0.13 Km

I_d = Corriente nominal corregida de diseño = 42.14 A

Reemplazando tenemos la caída de tensión máxima en conductor de MT:

$$\Delta V = \sqrt{3} * 42.14A * 0.130km * (0.87 * 0.963 + 0.243 * 0.27) \frac{\Omega}{km} = 8.57 V$$

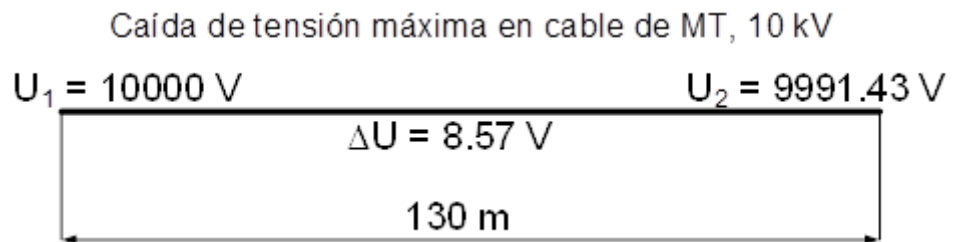


Figura 22. Caída de tensión máxima en cable N2YSY en 10kV

Caída máxima de tensión porcentual:

$$\Delta V(\%) = \frac{\Delta U}{U_n} = \frac{8.57 V}{10000V} * 100 = 0.0857 \%$$

La caída de tensión máxima admisible es de 3.5 % de la tensión nominal, es decir de 350 Volts, y el cable de 25 mm² de sección da una

máxima caída de tensión de 8.57 Voltios, muy inferior al máximo permisible, por lo que el cable escogido es el adecuado.

3.3.3.3. Verificación del conductor por temperatura de operación

Se calcula la temperatura real de operación, t_r y se compara con la máxima admisible, de 90°C, de acuerdo con la Tabla 11.

$$t_r = t_0 + (t_{m\acute{a}x} - t_0) * \left(\frac{I_{op}}{I_n}\right)^2$$

Reemplazando:

$$t_r = 30 + (90 - 30) * \left(\frac{42.14}{167}\right)^2 = 33.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Se tiene que la temperatura máxima de operación del cable es de solamente 33.8 °C, mucho menor que la temperatura máxima admisible, según fabricante, 90°C. En este caso, el cable cumple la condición de temperatura en modo holgado.

3.3.3.4. Cálculo por efecto de cortocircuito

Para el cable N2XSY, que es de cobre se tiene la fórmula:

$$I_{cc} = 13 * S * \sqrt{\frac{\Delta\varepsilon}{t}}$$

Dónde:

I_{cc}	=	Corriente de corto circuito	
S	=	Sección del conductor	= 25 mm ²
T	=	Duración del cortocircuito	= 0.02 seg
$\Delta\varepsilon$	=	Elevación de temperatura	= 150 °C para cobre

Deduciendo tenemos la expresión de cálculo de la sección transversal mínima para soportar el fenómeno de corto circuito:

$$S = \frac{I_{cc}}{13 * \sqrt{\frac{\Delta\varepsilon}{t}}}$$

Intensidad de corto circuito, I_{cc} :

$$I_{cc} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} * U_{1n}} = \frac{130'000,000VA}{\sqrt{3} * 10,000V} = 7,505.55A$$

Se determina, a continuación; la sección transversal necesaria del conductor, para resistir a un corto circuito, de 20 mili segundos de duración:

$$S = \frac{7,505.55A}{13 * \sqrt{\frac{150}{0.02}}} = 6.66\text{mm}^2$$

El cable seleccionado cumple al requerimiento de corto circuito. La sección del cable necesaria para soportar un corto circuito es de 6.67 mm², y el calibre seleccionado es de 25 mm².

3.3.4. Selección de terminales para cable N2XSY

Elegimos los terminales indicando el tipo de uso interior o exterior, este cable estará conectado a la barra en una celda de distribución, por lo tanto, es de uso interior.

NUMERO DEL KIT	AISLAMIENTO DEL CABLE		CHAQUETA DEL CABLE	CALIBRE DEL CONDUCTOR (AWG-MCM)			
	BIL	DIAMETRO EXT. pulg. (mm)	DIAMETRO EXT. pulg. (mm)	5 Kv	8 Kv	15 Kv	25 Kv
CABLE APANTALLADO (CINTA O HILOS DE COBRE SUAVES)							
7620-T-95	95 Kv	0.32-0.59 (8,2-15,0)	0.52-0.78 (13,3-19,9)	8-4	8-6	-	-
7621-T-95	95 Kv	0.44-0.89 (11,2-22,7)	0.65-1.05 (16,6-26,8)	2-3/0	4-2/0	-	-
7622-T-110	110 Kv	0.64-1.08 (16,3-27,4)	0.97-1.48 (24,6-37,7)	4/0-400	3/0-300	2-4/0 (35-120)	-
7624-T-110	110 Kv	0.83-1.53 (21,1-38,9)	1.12-1.87 (28,4-47,5)	500-750	350-700	4/0-500 (120-240)	-
7625-T-110	110 Kv	1.05-1.80 (26,7-45,7)	1.39-2.40 (35,2-61,0)	700-1500	600-1250	500-1000 (240-500)	-
7626-T-110	110 Kv	1.53-2.32 (38,9-58,9)	1.84-2.80 (46,8-71,1)	1750-2000	1500-2000	1250-2000 (500-1000)	-
7693-T-150	150 Kv	0.72-1.29 (18,3-32,8)	1.04-1.60 (26,4-40,6)	300-500	250-500	2/0-300 (70-150)	2-4/0 (35-120)
7695-T-150	150 Kv	1.05-1.80 (26,7-45,7)	1.39-2.40 (35,3-61,0)	700-1500	600-1250	500-1000 (240-500)	250-800 (150-400)
7696-T-150	150 Kv	1.53-2.32 (38,9-58,9)	1.84-2.80 (46,7-71,1)	1750-2000	1500-2000	1250-2000 (500-1000)	900-1750 (500-800)

100% NIVEL DE AISLAMIENTO

Tabla 11. Terminaciones QT-III Contráctiles en frío uso interior. (3M, 2019)

Entonces seleccionamos terminal tipo interior de clase 1, del tipo premoldeado contraíble en frío, para cable tripolar N2XSY 3 -1 x 25 mm², marca 3M, modelo QT-III 7622-T-110.

3.3.5. Cálculos mecánicos de la Subestación

Se analizan los esfuerzos electrodinámicos a que están exigidas las barras y aisladores de las Celdas de Media Tensión, 10 KV.

Información preliminar:

Potencia instalada	=	Pi	=	550 KVA
Potencia de cortocircuito máxima	=	Pcc	=	130 MVA
Corriente de cortocircuito	=	Icc	=	7.505 kA

3.3.5.1. Determinación de los efectos electrodinámicos.

Los efectos electrodinámicos se determinan por la corriente de choque de cortocircuito:

Corriente de choque, I_{ch}

$$I_{ch} = \sqrt{2} * 1.8 * I_{cc}$$

Reemplazando:

$$I_{ch} = \sqrt{2} * 1.8 * 7.505 = 19.105 \text{ kA}$$

Efectos electrodinámicos:

Las barras de cobre para los circuitos de Media Tensión son de 5 x 40 mm de sección.

La distancia entre soportes de aisladores es de $L = 1.00 \text{ m}$

Se tiene la expresión:

$$F(\text{kg}) = 2.04 * I_{ch}^2 * \frac{L}{d}$$

F = Fuerza en Kg sobre las barras.

I_{ch} = Corriente de choque = 19.105 kA

L = Longitud entre apoyos = 1.00 m

d = Separación entre barras = 25 cm

Entonces:

$$F(\text{kg}) = 2.04 * 19.105^2 * \frac{1}{25} = 29.784 \text{ kgf}$$

Para el presente caso, se utilizarán aisladores portabarra clase A (DIN 48100) que soportan 375 Kg-f de esfuerzo en la cabeza del aislador y que cumple ampliamente con los requerimientos solicitados.

Determinación de la flexión de trabajo (FT):

a). - Momento flector máximo (M_{f-max})

$$M_{f-max} = F * \frac{L}{8}$$

Reemplazando:

$$= 29.784 \text{ kgf} * \frac{100 \text{ cm}}{8} = 372.3 \text{ kgf} - \text{cm}$$

b). - Momento resistente en la barra (Wr)

$$W_r = \frac{h * b^2}{6}$$

Reemplazando:

$$W_r = \frac{0.5\text{cm} * 4^2\text{cm}^2}{6} = 1.334\text{cm}^3$$

Siendo:

$$h \text{ barra} = 5 \text{ mm} = 0.5 \text{ cm}$$

$$b = 40 \text{ mm} = 4 \text{ cm}$$

c). - Esfuerzo de flexión de trabajo (Eft)

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_r}$$
$$= \frac{372.3\text{kgf} - \text{cm}}{1.334\text{cm}^3} = 279.10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

El cobre soporta 1200 Kgf/cm², muy superior al requerimiento, y por lo tanto es satisfactorio.

Barra de cobre

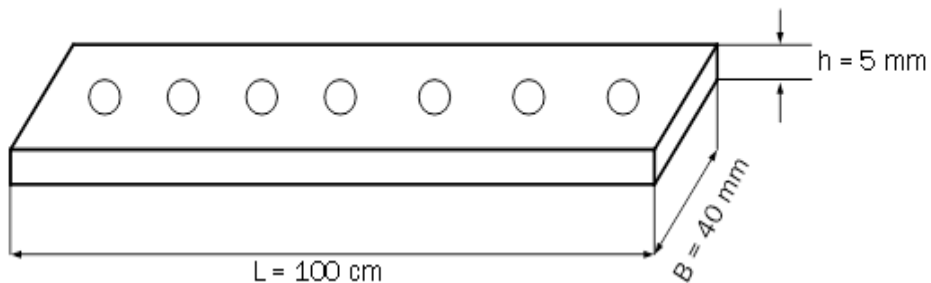


Figura 23. Barra de cobre para M.T. en 10 kV

3.3.6. Cálculo de resonancia

Si la frecuencia natural (fn) y la frecuencia en las barras se encuentran muy cerca del +/- 10% de la frecuencia de la red eléctrica o de un múltiplo natural de ella, se produce el fenómeno de resonancia.

Condición para evitar resonancia, Hz:

$$54 < f_n < 66, 108 < f_n < 132 \text{ Hz.}$$

Frecuencia natural de la barra:

$$F_n(\text{Hz}) = \frac{112 \left(\frac{EJ}{G}\right) * 0.5}{L^2}$$

L	=	Longitud de la barra entre apoyos	=	100 cm
E	=	Módulo de elasticidad	=	$1.25 \times (10)^6 \text{ Kg/cm}^2$
J	=	Momento de inercia	=	2.66 (cm)^4
G	=	Peso de la barra	=	0.0223 Kg/cm
Fn	=	frecuencia natural de oscilación de la barra.		

Cálculo del momento de inercia de la barra (J):

$$J(\text{cm}^4) = \frac{h * b^3}{12} = \frac{0.5 * 4^3}{12} = 2.66$$

Entonces:

$$F_n(\text{Hz}) = \frac{112 \left(\frac{EJ}{G}\right) * 0.5}{L^2}$$

Reemplazando y operando:

$$= \frac{112 * \left(\frac{1.25 * 10^6 * 2.66}{0.0223}\right) * 0.5}{100^2} = 136.15$$

Se encuentra fuera de los rangos <54, 66> y <108, 132>, entonces soporta los requerimientos.

3.3.7. Cálculo por elevación de temperatura de la barra

El incremento de temperatura de la barra está dado por:

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = \frac{k * I_{cc}^2 * (t + \Delta t)}{A^2}$$

K	=	Constante del cobre	=	0.0058
A	=	Sección de la barra	=	200 mm^2
I _{cc}	=	Corriente de cortocircuito	=	7505 A
t	=	Tiempo de apertura del dispositivo de protección	=	0.02 seg.

3.3.7.1. Incremento de tiempo de protección (Δt):

$$\Delta t(s) = \left(\frac{I_{ch}}{I_{cc}}\right)^2 * t_b$$

Ich = Corriente de choque = 19105 A

tb = Valor cortocircuito bipolar = 0.6

Entonces:

$$\Delta t(s) = \left(\frac{19105}{7505}\right)^2 * 0.6 = 3.88s$$

Resulta:

$$\Delta T = \frac{k * I_{cc}^2 * (t + \Delta t)}{A^2} = \frac{0.0058 * 7505^2 * (0.02 + 3.88)}{200^2} = 31.85^\circ C$$

Considerando que la temperatura de trabajo antes de la falla era de 60 °C, entonces la temperatura final al mitigarse la falla será:

Tfinal = 60 °C + 31.85 °C = 91.85 °C, mucho menor que los 200 °C que soporta el cobre (Norma VDE). Y por lo tanto se cumple el requerimiento.

3.3.8. Selección de transformadores y motores para pruebas eléctricas.

a) Transformador de distribución para pruebas industriales, 10/0.38 kV

- Potencia nominal : 500 KVA
- Tensión : 10 / 0.38 KV
- Corriente : 28.87 / 759.67 A
- Frecuencia : 60 Hz
- Regulación : +/- 2.5 %, +/- 5 % manual en vacío.
- Grupo de Conexión : Dyn5
- Numero de Fases : 3
- Numero de Terminales
 - Lado Primario : 3
 - Lado Secundario : 4
- Tensión de cortocircuito : 4.9 %
- Pérdida nominal en el cobre : 5.5 kW
- Pérdida nominal en el hierro : 2.95 kW
- Ejecución : Interior

- Tensión máxima de servicio : 17.5 KV
- Tensión de impulso : 95 KV p.
- Tensión de prueba 60 HZ, 1 min : 34 KV
- Montaje : Interior
- Altura sobre nivel del mar : 1000 msnm
- Sobre temperatura con carga continua arrollamiento: 65°C
- Temperatura de ambiente máxima : 40 °C
- Capacidad de sobrecarga : Según norma IEC-354
- Dimensiones: 2.5 m altura x 2.15 m de ancho x1.60 m de profundidad.



Figura 24. Transformador Trifásico Tipo Seco (Promelsa, 2019)

b) Transformador de distribución para ensayos académicos

- Tipo : Seco
- Potencia nominal : 50 KVA
- Tensión : 10 / 0.38 KV
- Corriente : 2.89 / 75.98 A
- Frecuencia : 60 Hz
- Regulación : +/- 2.5 %, +/- 5 % Manual en vacío
- Grupo de Conexión : Dyn5
- Numero de Fases : 3
- Numero de Terminales
 - Lado Primario : 3

- Lado Secundario : 4
- Tensión de cortocircuito : 4.9 %
- Pérdida nominal en el cobre : 2.95 kW
- Pérdida nominal en el hierro : 0.94 kW
- Ejecución : Interior
- Tensión máxima de servicio : 17.5 KV
- Tensión de impulso : 95 KV p.
- Tensión de prueba 60 HZ, 1 min. : 34 KV
- Montaje : Interior
- Altura sobre nivel del mar : 1000 msnm
- Sobre temperatura con carga continua arrollamiento: 65°C
- Temperatura de ambiente máxima : 40 °C
- Dimensiones: 2.5 m altura x 2.15 m de ancho x 1.60 m de profundidad.

:

c) Transformadores trifásicos para ensayos académicos

- Tensión de entrada : 380 V
- Tensión de salida : 220 V
- Potencia nominal : 10 KVA
- Frecuencia : 60 Hz
- Bornes de entrada : 3
- Bornes de salida : 3
- Número de transformadores : 5
- Montaje : Interior
- Altura sobre nivel del mar : 1000 msnm
- Sobre temperatura con carga continua arrollamiento: 65°C
- Temperatura de ambiente máxima : 40 °C
- Capacidad de sobrecarga : Según norma IEC-354
- Tensión de cortocircuito : 5.9 %
- Pérdida nominal en el cobre : 1.55 kW
- Pérdida nominal en el Hierro : 0.34 kW

d) Motores eléctricos trifásicos

Para realizar las pruebas con carga, se seleccionan 5 motores de 5 kW, 380 V y cinco de 25 kW cada uno.

Características de motores trifásicos para transformador de 50 KVA:

- Potencia nominal: 5 kW
- Factor de potencia: 0.85
- Tensión nominal: 380 V
- Intensidad nominal: 8.96 A
- Protección: IP5
- Frecuencia: 60 Hz
- Deslizamiento a plena carga: 2.2 %
- Numero de polos: 4
- Velocidad de rotación a plena carga: 1764 rpm

Características de motores trifásicos para transformador de 500 KVA:

- Potencia nominal: 25 kW
- Factor de potencia: 0.86
- Tensión nominal: 380 V
- Intensidad nominal: 44.68 A
- Protección: IP5
- Frecuencia: 60 Hz
- Deslizamiento a plena carga: 2 %
- Numero de polos: 4
- Velocidad de rotación a plena carga: 1764 rpm

3.3.9. Cálculo del sistema ventilación en subestación para banco de pruebas

Teniendo en cuenta que al momento de realizar las pruebas eléctricas se tendrá una perdida en forma de calor, se realiza el dimensionamiento del sistema de ventilación para la subestación.

Potencia nominal aparente de transformadores trifásicos: 550 KVA

Factor de potencia: 0.86

Potencia activa útil nominal:

$$P_{\max} = 550 * 0.86 = 473 \text{ kW}$$

Rendimiento del transformador: 97%

Potencia absorbida por transformador:

$$P_{\text{abs-max}} = \frac{P_{\text{máx}}}{\eta_{\text{máx}}} = \frac{473}{0.97} = 487.63 \text{ kW}$$

Pérdidas de potencia en transformador:

$$P_{\text{perdida-Transf}} = 487.63 - 473 = 14.63 \text{ kW}$$

Esta pérdida de potencia activa se convierte en calor y calienta el medio ambiente de la subestación, debiendo ser evacuada por el sistema de ventilación forzado.

Calor perdido en conductores:

$$Q_{\text{p-cond}} = (1 - \eta_{\text{cond}}) * P_{\text{máx}}$$

Reemplazando:

$$Q_{\text{p-cond}} = (1 - 0.985) * 487.63 = 7.31 \text{ kW}$$

Siendo 98.5% el rendimiento de diseño de los conductores.

3.3.9.1. Calor recibido desde el medio ambiente:

Se refiere al flujo térmico que se recibe durante las horas de sol en verano, por las paredes de la sub estación

$$Q_{\text{recib-}\infty} = h_{\infty \rightarrow p} * S_t * (t_{\infty} - t_{\text{int}}) = 4.06 \text{ kW}$$

S_t = superficie lateral de la subestación: $2 * 10 * 3.15 = 63 \text{ m}^2$

$h_{\infty \rightarrow p}$: Coeficiente de pérdida de calor por convección desde medio ambiente

a pared de subestación:

$$h_{\infty \rightarrow p}: 9.6 + 6.96 * \sqrt{U_{\infty}} = 9.6 + 6.96 * \sqrt{5.2} = 26 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 * \text{°C}}$$

$$Q_{\text{recib-}\infty} = 26 \frac{\text{W}}{\text{°C} * \text{m}^2} * 63 \text{ m}^2 * (34 - 30) \text{°C} * 10^{-3} = 6.552 \text{ kW}$$

Calor total a ser evacuado de sub estación:

$$Q_t = Q_{\text{p-tranf}} + Q_{\text{p-cond}} + Q_{\text{rec-}\infty} = 14.63 + 7.31 + 6.552 = 28.5 \text{ kW}$$

Se redondea, por seguridad, a $Q_t = 30 \text{ kW}$

Este es el flujo térmico de cálculo, con el cual se dimensionará el sistema de ventilación.

3.3.9.2. Cálculo del ventilador:

Balance de energía térmica en sub estación:

Calor total en sub estación = calor total evacuado por el aire de ventilación forzada.

$$30 \text{ kw} = \dot{m}_a * c_p * (t_{a2} - t_{a1}) =$$

T_{a2}: temperatura inicial del aire en subestación : 28 °C

T_{a1}: temperatura final del aire en sub estación : 32°C

C_p del aire húmedo, 30 °C y 75 % humedad relativa: 1.167 kJ/(kg*°C)

Flujo de aire necesario para ventilación de la sub estación de equipos críticos:

$$\dot{m}_a = \frac{30 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{1.183 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} * ^\circ\text{C}} * (32 - 28)} = 6.34 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Flujo volumétrico del aire para ventilar la subestación:

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_a}{\rho} = \frac{6.34 \text{ kg/s}}{1.183 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 5.36 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 19296 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Por seguridad, se redondea hasta V_n = 20,000 m³/h

De la Tabla 12, se elige ventilador CBX4747, con capacidad de 23,500 m³/h

Diferencia de presión total necesaria del aire de ventilación:

Será un sistema de baja presión. Δ_{pt} = 45 mm columna de agua = 450 Pascal

3.3.9.3. Cálculo de potencia en eje del ventilador:

$$P_{\text{eje-vent}}[\text{kw}] = \frac{\dot{V} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) * \Delta_{\text{pt}} \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)}{\eta_{\text{vent}} * 1000}$$

Siendo Δ_{pt} = diferencia total de presión, en Pascal

Reemplazando:

$$P_{\text{eje-vent}}[\text{kw}] = \frac{4.167 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) * 450 \left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right)}{0.67 * 1000} = 2.80 \text{ kW}$$

Potencia nominal del motor eléctrico:

Se considera un factor de servicio de 1.20

$$P_{n-ME}[\text{kW}] = \frac{P_{\text{eje-vent}}}{\eta_{\text{mec}}}$$

Reemplazando:

$$P_{n-ME}[\text{kW}] = \frac{2.8 * 1.20}{0.96} = 3.5 \text{ kW}$$

Con la potencia obtenida podremos seleccionar el motor eléctrico, antes describiremos brevemente las características del ventilador centrífugo CBX.

Ventilador:

- Cubierta de chapa de acero galvanizado.
- Turbina con álabes hacia delante.
- Rodamientos reforzados con amortiguadores de goma.

Motor:

- Motores de alta eficiencia IE3 con potencias a partir de 0.75 kW.
- Eje libre con rodajes de bolas y engrase frecuente en ambos lados.
- Temperatura máxima de aire a transportar: -20°C +80°C



Figura 25. Ventilador centrífugo tipo CBX (Sodeca, 2019)

A continuación, se muestra las características técnicas del ventilador centrífugo CBX:

Modelo	Velocidad máx. (r/min)	Equivalencia Pulgadas	Máx. Potencia instalada (kW)	Caudal máximo (m³/h)	Temperatura del aire (°C)		Peso aprox. (Kg)
					mín.	máx.	
CBX-1919	2500	7/7	1,1	3700	-20	+80	5,0
CBX-2525	1800	9/9	2,2	6200	-20	+80	9,0
CBX-2828	1700	10/10	3,0	7500	-20	+80	10,5
CBX-3333	1400	12/12	3,0	9500	-20	+80	15,5
CBX-3939	1000	15/15	4,0	14400	-20	+80	24,0
CBX-4747	800	18/18	5,5	23500	-20	+80	33,5

Tabla 12. Características de ventilador centrífugo para subestación.

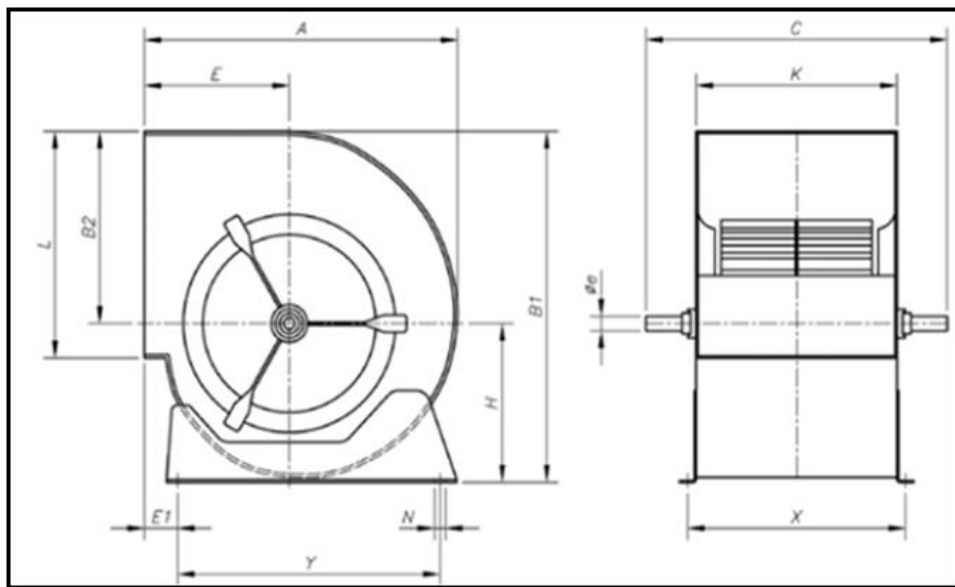


Figura 26. Dimensiones de Ventilador CBX

Modelo	Equiv. pulg.	A	B1	B2	C	E	E1	H	K	L	N	øe	X	Y
CBX-1919	7/7	316	333	189	360	152	64	144	230	208	9x13	20	258	225
CBX-2525	9/9	380	400	218	430	183	78	182	300	263	9x13	20	328	275
CBX-2828	10/10	422	450	246	470	202	73	204	326	292	9x17	20	355	315
CBX-3333	12/12	493	526	290	560	230	82	236	387	345	9x17	25	415	390
CBX-3939	15/15	579	621	348	650	265	92	273	473	404	9x17	25	500	455
CBX-4747	18/18	686	746	415	750	323	82	331	540	482	9x17	25	568	575

Tabla 13. Dimensiones de Ventilador Centrífugo CBX

Curvas Características:

Q = Caudal en m³/h, m³/s y cfm.

Pe = Presión estática en mmH₂O.

Pa = Presión en pulgadas columna de agua.

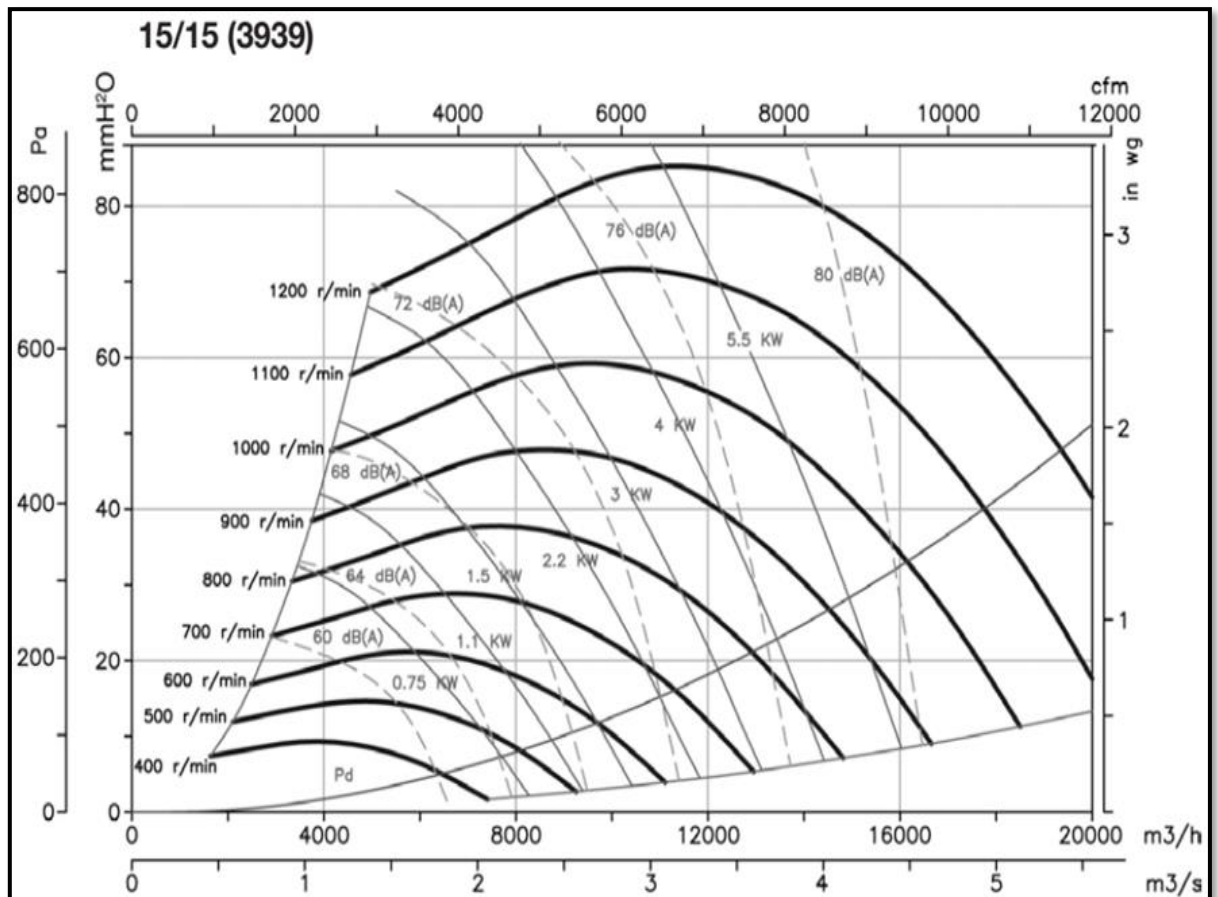


Figura 27. Diagramas característicos de ventiladores para subestaciones. (Sodeca, 2019)

Ahora seleccionamos motor de 7.5 HP, que sería instalado con transmisión por fajas trapecoidales. En la tabla 14 se muestra los datos técnicos del motor seleccionado.

W22 - IE2 High Efficiency - 60 Hz

Potencia		Carcasa	Par Nominal	Corriente con rotor trabado	Par con rotor trabado	Par Maximo	Momento de inercia	Tiempo		Peso	Nivel de ruido	220 V						In (A)	
								Caliente	Frio			% de potencia nominal			Factor de potencia				
												50	75	100	50	75	100		
kw	HP		(kgm)	IL/IN	Tl/Tn	Tb/Tn	J (kgm ²)			kg	dB (A)	rpm							
4.5	6	112 M	1.26	7.2	2.2	2.2	0.007	19	42	33.5	69	3480	86.8	88	88.5	0.76	0.85	0.89	15
5.5	7.5	112M	1.53	8.3	2.9	2.9	0.0081	12	26	40	69	3495	86.5	88.2	88.7	0.71	0.82	0.87	18.7

Tabla 14. Características técnicas de motores de alta eficiencia. (WEG, 2019)

La distribución de los ventiladores centrífugos en el banco de pruebas eléctricas para transformadores sería de la siguiente manera:

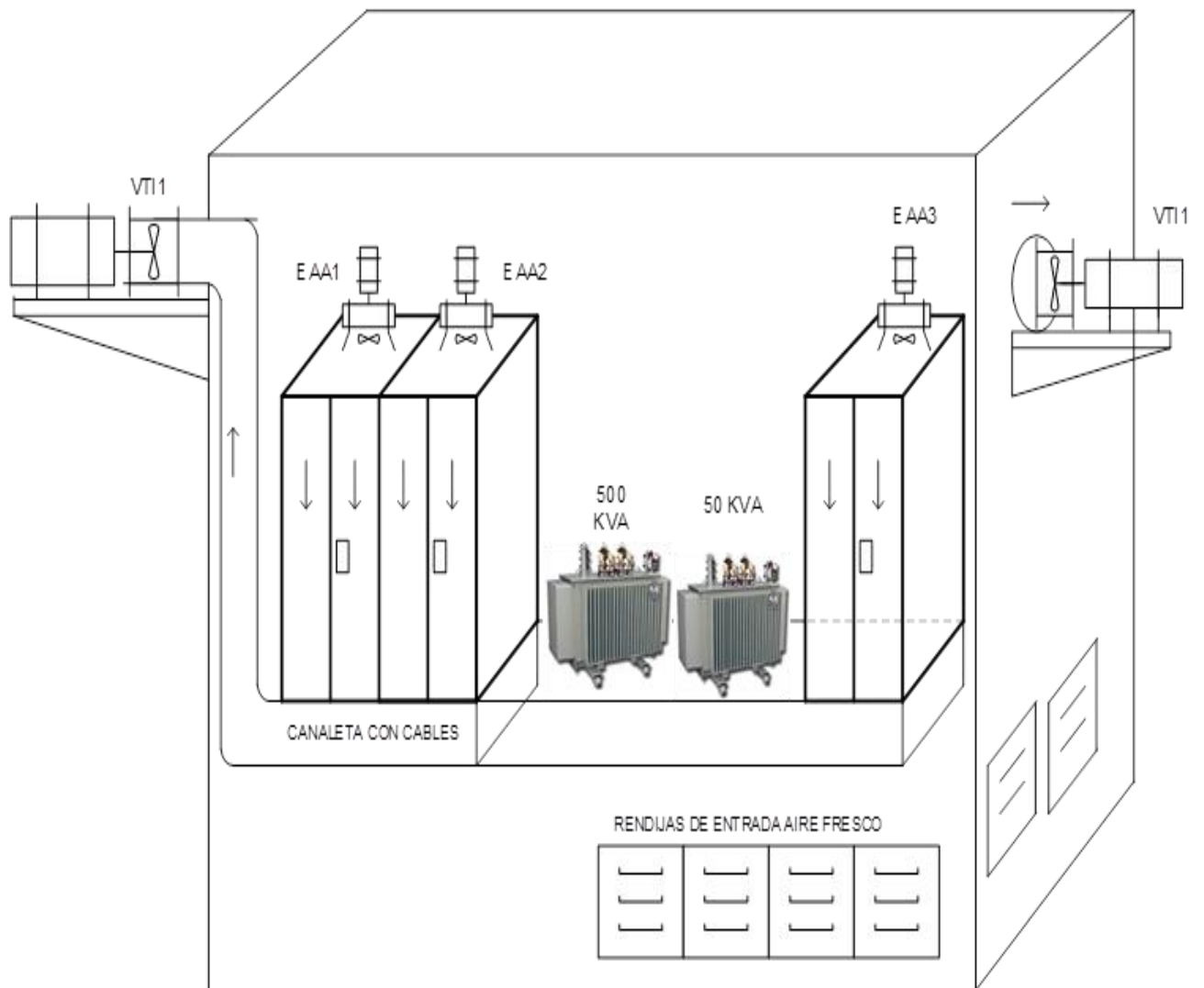


Figura 28. Sistema de ventilación forzada para el banco de pruebas eléctricas.

3.3.10. Dimensionamiento del banco de condensadores

Con el correcto dimensionamiento del banco de condensadores buscaremos aumentar el factor de potencia desde 0.82 hasta 0.99, para mejorar la eficiencia del sistema. Se hará el cálculo para valores nominales.

Factor de potencia corregido: $\cos\varphi_2 = 0.99$

Angulo de fase, después de la compensación individual:

$$\varphi_2 = \arccos 0.99 = 8.11^\circ$$

Potencia activa absorbida por transformador de 500 KVA:

Se mantiene constante = $0.82 \cdot 500 = 410 \text{ kW}$

Potencia reactiva absorbida por sistema, luego de la compensación:

$$Q_2 = P_{abs} * \tan\varphi_2$$

$$Q_2 = 410 \text{ kw} * \tan 8.11^\circ = 58.43 \text{ kvar}$$

Potencia aparente absorbida por sistema, luego de la compensación:

$$S_2 = \frac{P_{abs}}{\cos\varphi_2}$$

$$S_2 = \frac{410 \text{ kw}}{0.99} = 414.14 \text{ KVA}$$

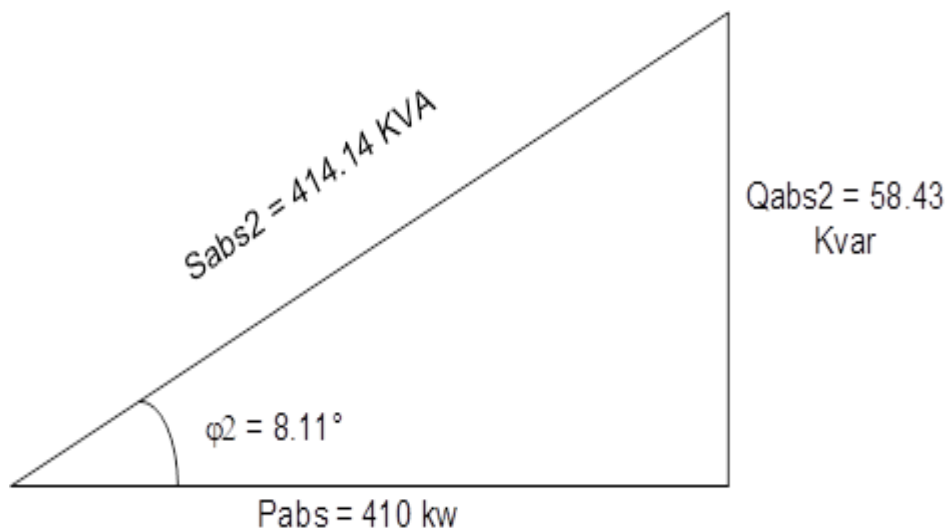


Figura 29. Triangulo de potencias para el banco de pruebas eléctricas

3.3.10.1. Cálculo de potencia del banco de condensadores trifásico (Q_c)

Obtenemos la potencia del banco de condensadores restando la potencia reactiva sin compensación del sistema menos la potencia reactiva compensada.

$$Q_c = Q_{abs1} - Q_{abs2}$$

En la cual:

Q_{abs1} = Potencia reactiva inductiva absorbida, sin compensación del factor de potencia, $Q_{abs1} = 410 * \tan 34.91^\circ = 286.18 \text{ kVAR}$, 34.91 es el ángulo de desfase inicial, para factor de potencia igual a 0.82

Q_{abs2} = Potencia reactiva inductiva absorbida con compensación individual del factor de potencia

Q_c = Potencia reactiva del banco de condensadores trifásicos, para compensación individual del factor de potencia

$$Q_c = 286.18 - 58.43 = 227.75 \text{ kVAR}$$

Potencia disponible: 25 kVAR

Número de condensadores: $227.5/25 = 9$

Potencia por fase del banco de condensadores:

$$Q_{c-f} = Q_c/3 = 25/3 = 8.34 \text{ kVAR} = 8340 \text{ VAR}$$

3.3.10.2. Capacidad de condensador por fase, C_f

Calculamos la capacidad del condensador por fase de la siguiente manera:

$$C_f = \frac{Q_{c-f}}{U_f^2 * 2\pi * f} * 10^{-3} (\mu\text{F})$$

En la cual:

Q_{c-f} = Potencia por fase del condensador.

U_f = Tensión de fase del condensador = $U_{\text{línea}}$ (Conexión en estrella) = 220 V

f = frecuencia de la red eléctrica = 60 Hz

$$C_f = \frac{8340 \text{ VAR}}{220^2 * 2\pi * 60} * 10^{-3} = 4.57 * 10^{-3} \text{ F} = 457 \mu\text{F}$$

De acuerdo a catálogo de condensadores trifásicos de la marca Promelsa, se elige:

Condensador código: POL46200SK

Potencia nominal reactiva: 25 kVAR

Características técnicas

- Tensión Nominal..... 230... 690V
- Frecuencia..... 50/60 Hz
- Dieléctrico..... Polipropileno
- Nivel de aislamiento.... 3/- kV
- Pérdidas dieléctricas..... < 0.2 W/kVAR
- Pérdidas totales..... < 0.4 W/kVAR
- Resistencia de descarga... Integradas
- Sobretenión máx..... 1.1 U_n
- Sobreintensidad máx..... 1.3 I_n
- Tolerancia de potencia..... - 5 / + 10 %
- Gama climática..... - 40 / D



Figura 30. Condensador Tubular Trifásico. (PROMELSA, 2019)

- Conexión..... Regleta
- Protección..... IP20 (con caperuza) IP54
- Normas..... IEC 60831, EN 60831

3.4. Dimensionamiento y selección de dispositivos de maniobra y protección

3.4.1. Interruptor de potencia 24 kV

Seleccionamos interruptor de potencia marca Heag, en base a la tensión y corriente nominal, la corriente de cortocircuito y la corriente de choque. Los interruptores de potencia que comúnmente encontramos en el mercado peruano son los de 630 A de corriente nominal, de acuerdo a ese criterio seleccionamos este interruptor, a continuación, indicaremos las características técnicas de este dispositivo de protección:

- Es utilizado para líneas áreas de media tensión, con medio de extinción de arco eléctrico en botellas de vacío.
- Interrupción automática tripolar accionado por relé de protección ubicado en tablero de control.
- Cuenta con transformadores de corriente para protección y medición 400/5A.
- Seccionador acoplado a interruptor como respaldo de visibilidad a la hora de distinguir la posición de abierto o cerrado de los contactos.
- Tablero de control con relé de protección con funciones de sobre corriente temporizadas e instantáneas.



Figura 31. Interruptor de potencia 24 kV (Marca Heag)

	Descripción	VALOR
	CARACTERISTICAS ELECTRICAS	
1	OPERACIÓN	
2	Tensión Nominal	24 KV
3	Corriente Nominal	630 A
4	Frecuencia Nominal	60 Hz
5	Aislamiento a tensión y frecuencia industrial (Húmedo)	50 KV
6	Aislamiento a tensión y frecuencia industrial (Seco)	65 KV
7	Tensión de impulso (KVpico)	125 KV
8	Corriente de cortocircuito a la apertura (breaking)	20 kA
9	Corriente de cortocircuito al cierre (making)	50 kA.
	RENDIMIENTO	
10	Ciclo de operación	O-0.3s-CO-180s-CO
11	Altitud máxima de operación	2000 msnm
12	Tiempo de cierre / apertura	40-100/20-80 mseg.
13	Cantidad de operaciones bajo condiciones a plena carga	10000
14	Cantidad de operaciones mecánicas	10000
15	Resistencia de contactos (uohm)	< 100 uohms
	MECANISMO DE OPERACIÓN	
16	Mando por resorte	Sí
	OTROS DATOS	
17	Transformadores de corriente de fases 400/5 A, para protección y medición clase 0.2.	Incluido
18	Transformador de corriente toroidal externo, para fallas homopolares a tierra de 50/1 A.	Incluido
19	Baterías recargables y sistema de respaldo.	Incluido
20	Transformador de SSAA, 22.9/0.22KV 500VA.	Incluido
21	Relé de protección con funciones de protección de sobre corriente de fases y tierra, curvas de operación de tiempo definido.	Incluido

Tabla 15. Características técnicas de interruptor de potencia 24 kV, marca Heag (PROMELSA, 2016)

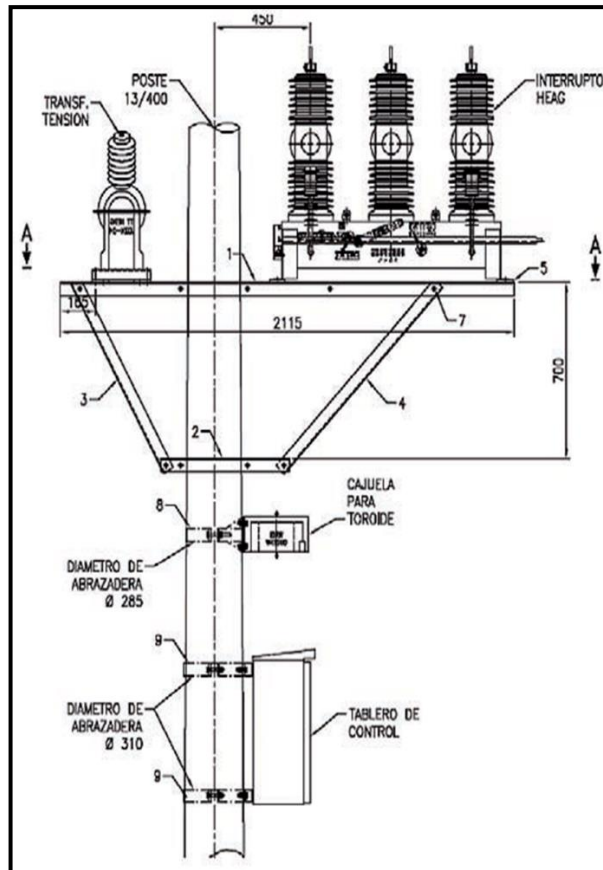


Figura 32. Vista de montaje en poste de interruptor de potencia. (PROMELSA, 2016)



Figura 33. Vista de montaje en campo de interruptor de potencia. (HEAG, 2019)

3.4.2. Seccionador tripolar de vacío

Seleccionamos interruptor tripolar de vacío para realizar maniobras de mantenimiento u operación. Con este dispositivo podremos aislar el circuito de forma visible.



Figura 34. Seccionador de vacío marca SILE. (SILE , 2013)

TIPO/TYPE	TENSION NOMINAL RATED VOLTAGE TENSION NOMINALE	NIVEL DE AISLAMIENTO LEVEL OF INSULATION NIVEAU D'INSOLATION		INTENSIDAD NOMINAL RATED CURRENT COURANT NOMINAL	INTENSIDAD TERMICA 1 Seg. THERMAL CURRENT 1 Sec. COURANT THERMIQUE 1 Sec.	INTENSIDAD DINAMICA DINAMIC CURRENT COURANT DYNAMIQUE	
	kV	ENTRE FASES ENTRE FASES Y MASAS BETWEEN PHASES AND BETWEEN PHASES AND MASS ENTRE PHASES ET ENTRE PHASES ET MASSES	EN DISTANCIA DE SECCIONAMIENTO IN ISOLATING DISTANCE A LA DISTANCE DE SECTIONEMENT	kV/kV	kV/kV	A	kÅ
SILE-12	12	28/75	32/85	400 630	16	40	
SILE-24	24	50/125	60/145	400 630	16	40	
SILE-36.1	36	70/145	80/165	400 630	16	40	
SILE-36	36	70/170	80/195	400 630	16	40	

Tabla 16. Tabla para selección de seccionador de vacío. (SILE , 2013)

Seleccionamos un Seccionador Tripolar de vacío marca SILE modelo SILE-12, In = 400 A, Un = 12kV Icc = 16kA Ich = 40kA

3.4.3. Interruptor automático VL160N

Para seleccionar el interruptor calculamos la corriente nominal en baja tensión.

Intensidad nominal en BT

$$I_{1n} = 500\,000 \text{ VA} / (1.732 \cdot 380 \text{ V}) = 760 \text{ A}$$

Se busca en catálogo correspondiente y se encuentra el inmediato superior, normalizado: 1000 A, trifásico, tres polos, 60 Hz

Intensidad de corto circuito, Icc:

$$I_{cc} = (100/X_{cc}) * I_{In} = 100/2.6 * 760 = 29,230.7 \text{ A} = 29.23 \text{ kA}$$

Con estos datos seleccionamos interruptor automático VL160N 40kA 3 polos 750-1500A con tornillo marca Siemens.



Figura 35. Interruptor automático VL160N 40kA 3 polos 750-1500A. (SIEMENS, 2019)

Interruptor automático VL160N con poder de corte estándar Icu = 55 kA, 415 VAC 3 polos, combinación de arranque disparador de sobreintensidad magnético In=100 A, intensidad nominal II=750...1500 A, protección de cortocircuito con conexión de tornillo sin disparador auxiliar sin interruptor auxiliar de alarma.

3.4.4. Sistema de puesta a tierra

Se calculará el sistema de puesta a tierra teniendo en cuenta el código nacional de electricidad. Consideramos datos referenciales para hacer el dimensionamiento, ya que no se realizó un estudio de resistividad del suelo para determinar este valor. Para obtener una resistencia menor a 20 Ω se vio conveniente instalar un sistema de puesta a tierra en forma de malla.

3.4.4.1. Cálculo de puesta a tierra:

Datos: $R \leq 20 \Omega$

Diámetro del electrodo: 20 mm → radio del electrodo, $r = 0.010 \text{ m}$

Longitud del electrodo: 2.5 m

Resistividad del suelo: 90 Ω-m

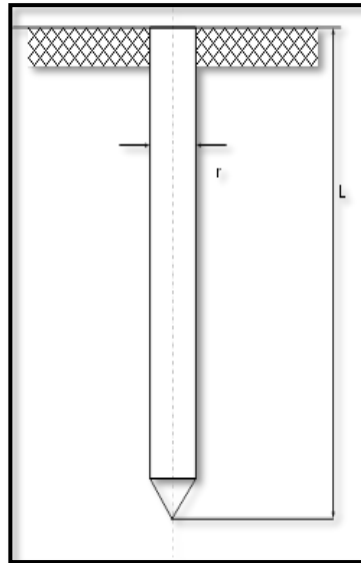


Figura 36. Dimensiones de varilla de cobre para SPT.

Resistencia a tierra:

$$R = \frac{\rho_e}{2\pi * L} * \text{Ln} \frac{2 * L}{a}$$

$$R = \frac{90}{2\pi * 2.5} * \text{Ln} \frac{2 * 2.5}{0.010} = 35.606\Omega$$

Entonces para disminuir esta resistencia, el sistema de puesta a tierra del banco de pruebas eléctricas para transformadores estará conformado por electrodos verticales que estarán conectados por conductores instalados horizontalmente formando una malla. Esta malla nos ayudara a dispersar mucho mejor la corriente de falla a comparación de un electrodo simple.

Utilizamos el método aproximado de Laurent y Nieman para calcular la resistencia de la malla.

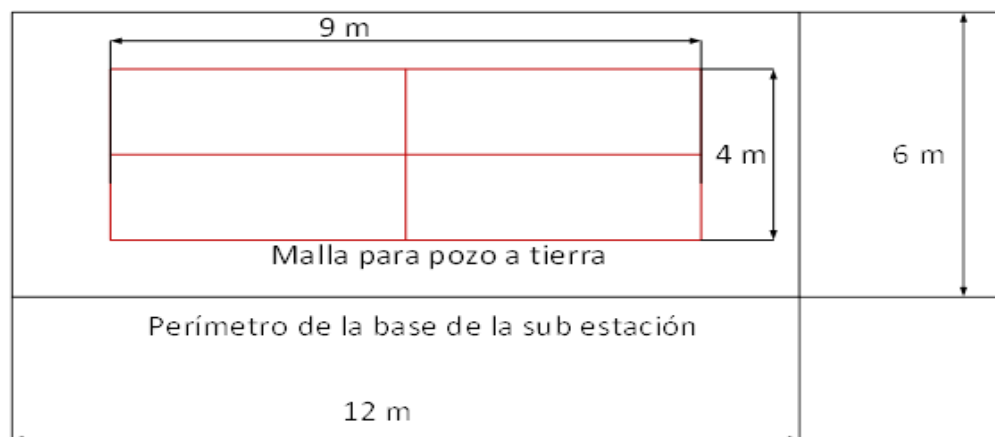


Figura 37. Dimensiones del sistema de puesta a tierra.

Con las dimensiones del SPT propuesto calcularemos la resistencia de la malla.

$$R = \frac{\rho_e}{4 * r} + \frac{\rho_e}{L}$$

- r: $(A/\pi)^{1/2}$ Radio medio de la malla (m) = 3.39
- R: Resistencia de la malla (Ohm)
- L: Longitud del conductor de la malla (m) = 26 m
- ρ : Resistividad equivalente del terreno (Ohm - m) = 100 Ω -m

Reemplazando en la ecuación de resistencia de la malla a tierra:

$$R = \frac{100}{4 * \sqrt{\frac{9 * 4}{\pi}}} + \frac{100}{26} = 11.23 \Omega$$

En la cual, radio medio de la malla:

$$r(m) = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{b * h}{\pi}}$$

b: base de la malla = 4 m

h: largo de la malla = 9 m

3.5. Selección de equipos de control y medición.

3.5.1. Megóhmetro electrónico de alta tensión (10 kV)

Seleccionamos megóhmetro electrónico de alta tensión MI-10KVe marca Megabras, para realizar la prueba de aislamiento a los transformadores de distribución, en esta prueba mediremos el nivel de aislamiento de los devanados. Este equipo cuenta con un alcance de medición de hasta $2T\Omega$ y 4 tensiones de prueba (1 kV, 2 kV, 5 kV y 10 kV).



Figura 38. Megóhmetro electrónico de alta tensión Mi10KVe (MEGABRAS, 2018)

Tensiones de prueba	1kV – 2kV – 5kV – 10kV
Alcance	200GΩ @ 1kVT.P. 400GΩ @ 2kVT.P. 1TΩ @ 5kVT.P. 2TΩ @ 10kVT.P.
Corriente de corto - circuito	1mA
Exactitud de las tensiones de prueba	± 2% del valor nominal @ R ≥ 10GΩ
Exactitud del megóhmetro	Clase 2 (± 2% de la deflexión a fondo de escala)
Resistencias internas limitadoras de corriente	1MΩ @ 1kVT.P. 2MΩ @ 2kVT.P. 5MΩ @ 5kVT.P. 10MΩ @ 10kVT.P.
Indicador analógico	Con escala de 98mm de longitud máxima, suspensión a cinta tensa y espejo.
Altura máxima	5000 m sobre el nivel del mar.
Seguridad	De acuerdo con IEC 61010-1
Alimentación	Batería recargable hermética de 12V – 7Ah
Cargador de batería	Se alimenta con cualquier tensión entre 110-127 o 220VAC indistintamente.
Rango de temperatura de operación	-5°C a 50°C
Rango de temperatura de almacenamiento	-25°C a 65°C
Humedad	95% RH (sin condensación)
Peso	Aprox. 9,5kg, incluyendo batería y accesorios.
Dimensiones	378 x 308 x 175 mm
Accesorios provistos	<ul style="list-style-type: none"> • Cables de medición – 1,80m (2) • Cable para GUARD – 1,80m • Cable para alimentación • Bolsa para transporte • Guía del usuario

Tabla 17. Especificaciones técnicas de Megóhmetro de alta tensión MII0KVe (MEGABRAS, 2018)

3.5.2. Variac Trifásico (0 – 2kV)

Para realizar las pruebas de vacío, corto circuito y tensión aplicada necesitaremos una fuente de tensión regulable a la frecuencia de trabajo del transformador, por lo tanto, necesitaremos un Variac Trifásico de la capacidad de cada transformador en prueba, teniendo la máxima potencia de 500 KVA, con un rango de tensión que puede ser de 0 a 2000 V, esto de acuerdo a la tensión necesaria para producir la corriente nominal cuando se tiene al transformador en prueba cortocircuitado.



Figura 39. Variac Trifásico 500KVA 0 - 2kV (NEW LINE, 2019)

Voltaje de entrada	120V, 220V, 380V, 440V.
Rango de Voltajes Secundarios	0 – 2000 V
Precisión de Voltaje para Variacs Estándar	1.3 V
Capacidad de carga al 100 %	En cualquier posición del rango de voltaje
Rigidez dieléctrica	>23 kV
Eficiencia promedio	99 %
Capacidad de sobrecarga	Hasta 500% (por 10s)
Distorsión Armónica	0%
Frecuencia	60 Hz
Temperatura de trabajo	0 – 35 °C
Tiempo de respuesta	<3 ms
Tiempo de vida	Superior a 25 años
Tipo de fabricación	Industrial
Ruido audible	9 Db a 1m
Ajuste de voltaje	<ul style="list-style-type: none"> • Operación manual vía manivela • Operación automática con botonera • Operación vía PC/PLC

Tabla 18. Especificaciones técnicas de Variac Trifásico. (NEW LINE, 2019)

3.5.3. Ratiómetro (Medidor de relación de transformación DTR 8510)

El presente instrumento de medición nos permitirá conocer la relación de transformación, polaridad, corriente de excitación, la diferencia respecto a la relación de transformación indicada en la placa de identificación en porcentaje, estos son parámetros útiles para diagnosticar y prevenir defectos que se pueden producir en transformadores de potencia, de tensión y de corriente. Además, durante cada prueba el DTR verifica automáticamente inversión de cables H/X, continuidad de los devanados y condiciones de cortocircuito.



Figura 40. Medidor de relación de transformación - Ratiómetro DTR 8510 (AEMC, 2019)

3.5.4. Micro ohmímetro digital portátil

Seleccionamos micro ohmímetro MPK204e portátil de hasta 200 A marca Megabras para medir la resistencia óhmica de los devanados del transformador de distribución. Este equipo nos permitirá medir resistencias muy bajas con corrientes de prueba desde 1 mA a 200 A, con un rango de medición de $0.1 \mu\Omega$ hasta 200Ω .



Figura 41. Micro ohmímetro MPK204e (MEGABRAS, 2019)

3.5.5. Analizador de redes trifásico portátil

Consideramos un analizador de calidad de energía portátil y práctico para medir valores eficaces (rms) de corriente y voltaje, potencia activa, reactiva y aparente, factor de potencia, con un rango bastante aceptable de medición, desde 0.1 a 1200 A en corriente, captura de datos con opción de programación, memoria SD y software de análisis y visualización de datos. En este caso será de mucha utilidad para medir las pérdidas de potencia en el hierro y el cobre del transformador.



Figura 42. Analizador de redes trifásico portátil.

Medidas de CORRIENTE	
Rango / Resol. / Prec.	20A -200A -1200A CA / 0.1A / 0.5%
Medidas de TENSION	
Rango	10.0V - 600.0V (fase-fase/fase-neutro)
Resolución / Precisión	0.1V / 0.5% + 0.5V
Medidas de POTENCIA	
Rango	0-9.999kW-99.99kW-999.9kW-9.999MW
Medidas de FACTOR DE POTENCIA	
Rango	0.00 - 1.00 / R: 0.01 / P: 0.04%
Otras ESPECIFICACIONES	
Angulo de fase	-180° + 180° / R: 0.1° / P: 1°
Frecuencia	45- 65Hz / R: 0.1Hz / P: 0.1Hz
Pinzas de corriente (X3)	de 48mm de diámetro interno
Alimentación	8 baterías 1.5V (AA) o red. a 220V/50Hz
Normas seguridad	CE / IEC-61010 / CAT.III 600V
Dimensiones instrumento	(LxAxF) 210 x 64 x 33 mm
Peso	950g. (con baterías) + 465g. pinzas (X3)

Tabla 19. Especificaciones técnicas de analizador de redes

3.6. Diseño de procedimientos y protocolo de pruebas para transformadores

3.6.1. Procedimientos para pruebas a transformador de distribución

Las siguientes indicaciones están en base a las normas ITINTEC NTP 370.002 e IEC 60076 y se tomarán en cuenta para realizar las pruebas de rutina a los transformadores de distribución en el banco de pruebas eléctricas del centro de investigación tecnológica de la universidad ubicada en Moche.

3.6.1.1. Prueba de aislamiento

Nos servirá para conocer la resistencia de aislamiento de los devanados con respecto a tierra o entre sí mismos, con esta medida podremos determinar la cantidad de humedad e impurezas que contienen los aislamientos del transformador. A continuación, se indica el diagrama y las conexiones que se deben realizar para esta prueba:

- Devanado de A.T. y tierra
- Devanado de B.T. y tierra
- Devanado de A.T. y Devanado de B.T.

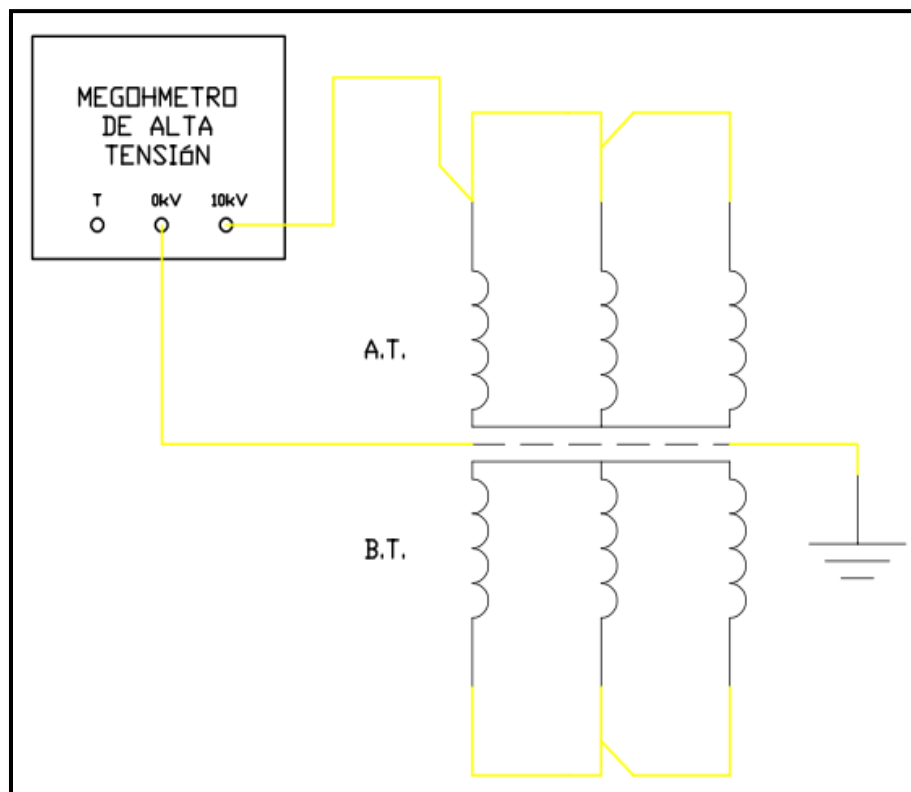


Figura 43. Conexión de megóhmetro para prueba entre devanado de A.T. y Tierra

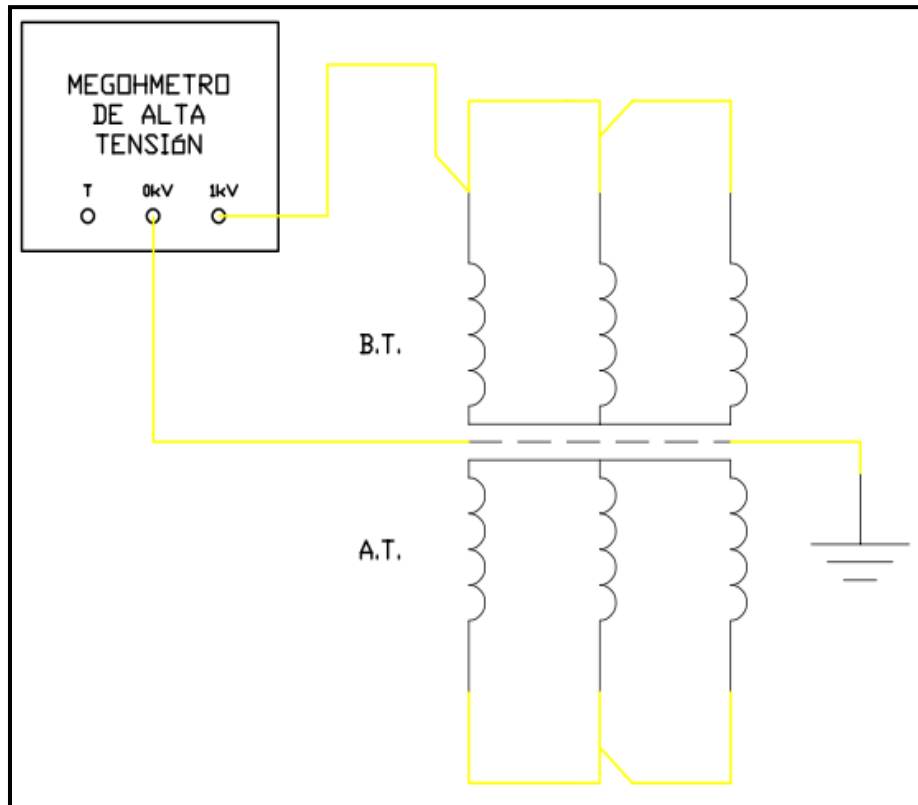


Figura 44. Conexión de megóhmetro para prueba entre devanado de B.T. y Tierra

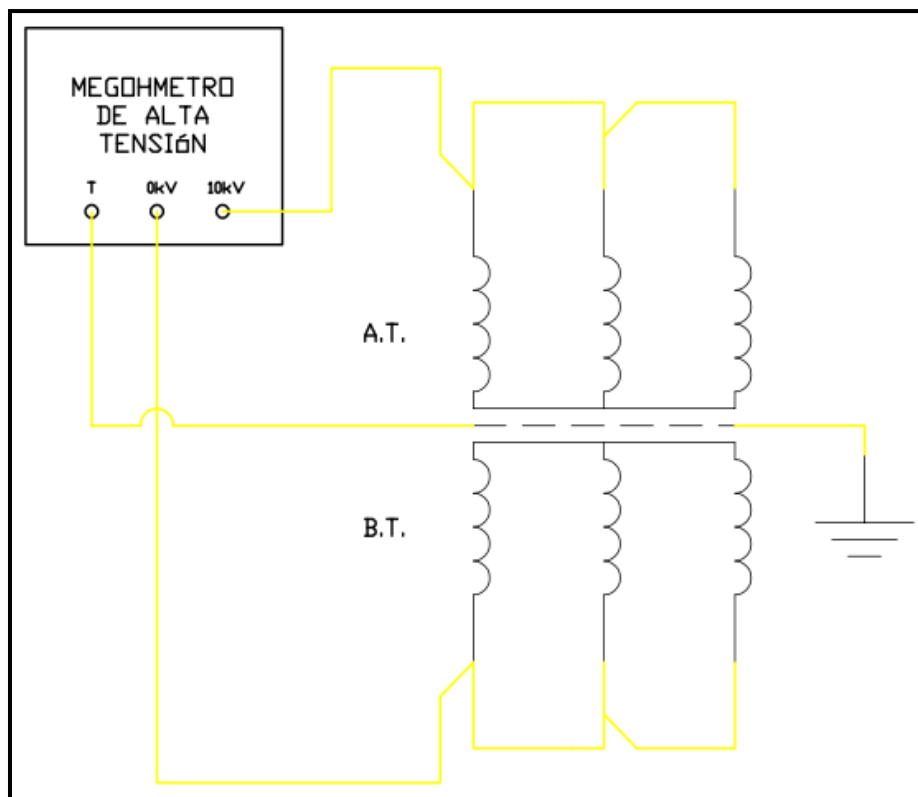


Figura 45. Conexión de megóhmetro para prueba entre devanado de A.T. y B.T.

3.6.1.2. Prueba de relación de transformación y determinación del grupo de conexión

Entonces con ayuda del Ratiómetro DTR 8510 podremos determinar la relación de transformación en base al grupo de conexión del transformador. En las siguientes imágenes podremos apreciar algunas conexiones para determinar la relación de transformación.

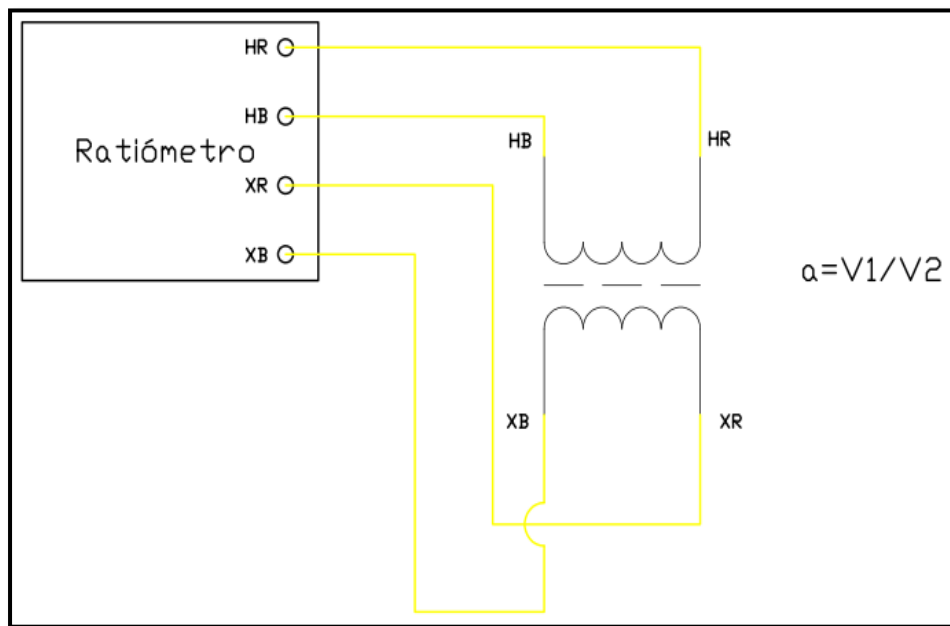


Figura 46. Conexión de Ratiómetro para transformador monofásico

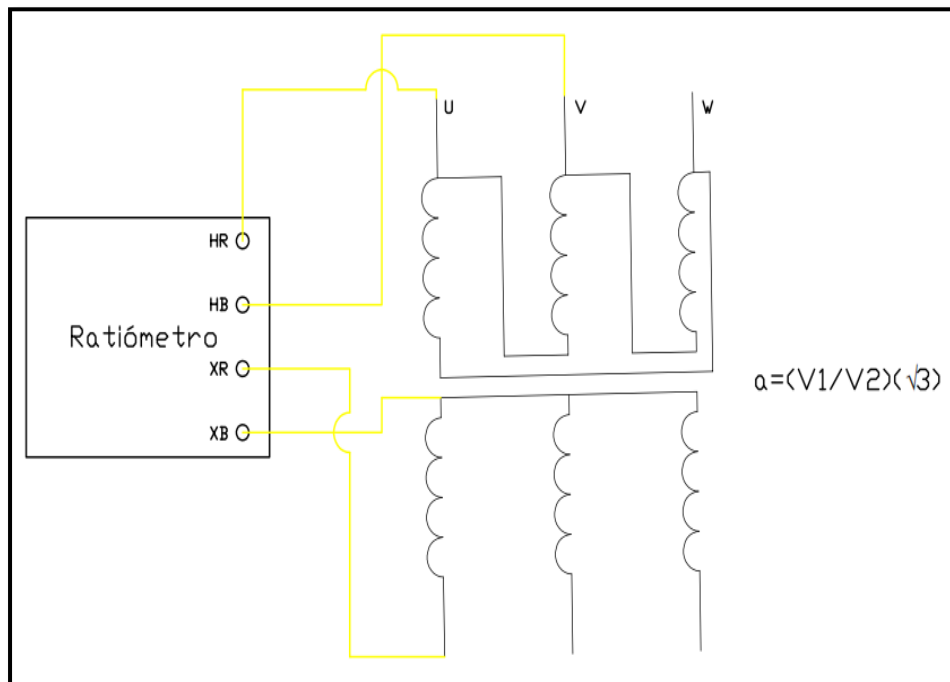


Figura 47. Conexión de Ratiómetro para transformador trifásico

N° de REF	- TRANSFORMADOR -		TIPO XFMR	FASE	BOBINADO ALTA TENSION	BOBINADO BAJA TENSION	RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN
	BOBINADO ALTA TENSION	BOBINADO BAJA TENSION					
1			1 Ø STD	1 Ø	H ₁ - H ₂	X ₁ - X ₂	$\frac{V_H}{V_X}$
2			Δ - Δ STD	A	H ₁ - H ₃ (A)	X ₁ - X ₃ (P)	$\frac{V_H}{V_X}$
				B	H ₂ - H ₁ (B)	X ₂ - X ₁ (P)	
				C	H ₃ - H ₂ (C)	X ₃ - X ₂ (C)	
3			Δ - Δ REV	A	H ₁ - H ₃ (A)	X ₁ - X ₃ (P)	$\frac{V_H}{V_X}$
				B	H ₂ - H ₁ (B)	X ₂ - X ₁ (P)	
				C	H ₃ - H ₂ (C)	X ₃ - X ₂ (C)	
4			Δ - Y STD	A	H ₁ - H ₃ (A)	X ₁ - X ₀ (P)	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$
				B	H ₂ - H ₁ (B)	X ₂ - X ₀ (P)	
				C	H ₃ - H ₂ (C)	X ₃ - X ₀ (C)	
5			Δ - Y REV	A	H ₁ - H ₃ (A)	X ₁ - X ₀ (P)	$\frac{V_H \cdot \sqrt{3}}{V_X}$
				B	H ₂ - H ₁ (B)	X ₂ - X ₀ (P)	
				C	H ₃ - H ₂ (C)	X ₃ - X ₀ (C)	
6			Y - Y STD	A	H ₁ - H ₀ (A)	X ₁ - X ₀ (P)	$\frac{V_H}{V_X}$
				B	H ₂ - H ₀ (B)	X ₂ - X ₀ (P)	
				C	H ₃ - H ₀ (C)	X ₃ - X ₀ (C)	
7			Y - Y REV	A	H ₁ - H ₀ (A)	X ₁ - X ₀ (P)	$\frac{V_H}{V_X}$
				B	H ₂ - H ₀ (B)	X ₂ - X ₀ (P)	
				C	H ₃ - H ₀ (C)	X ₃ - X ₀ (C)	
8			Y - Δ STD	A	H ₁ - H ₀ (A)	X ₁ - X ₂ (P)	$\frac{V_H}{V_X \cdot \sqrt{3}}$
				B	H ₂ - H ₀ (B)	X ₂ - X ₃ (P)	
				C	H ₃ - H ₀ (C)	X ₃ - X ₁ (C)	
9			Y - Δ REV	A	H ₁ - H ₀ (A)	X ₁ - X ₂ (P)	$\frac{V_H}{V_X \cdot \sqrt{3}}$
				B	H ₂ - H ₀ (B)	X ₂ - X ₃ (P)	
				C	H ₃ - H ₀ (C)	X ₃ - X ₁ (C)	

Tabla 20. Tabla de conexión de Ratiómetro y cálculo de relación de transformación. (AEMC, 2019)

3.6.1.3. Prueba de vacío

Se busca determinar las pérdidas en el hierro del transformador.

CONEXIÓN PARA PRUEBA EN VACÍO DE TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

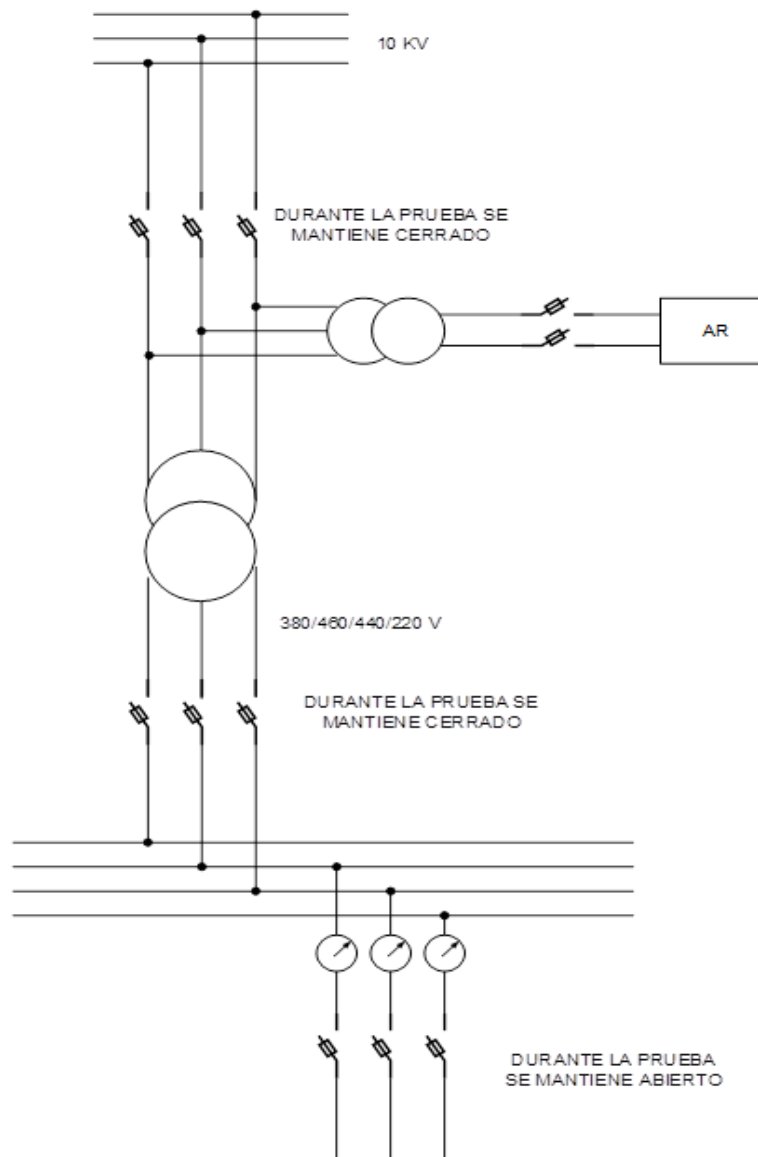


Figura 48. Diagrama multifilar para prueba en vacío de transformador trifásico.

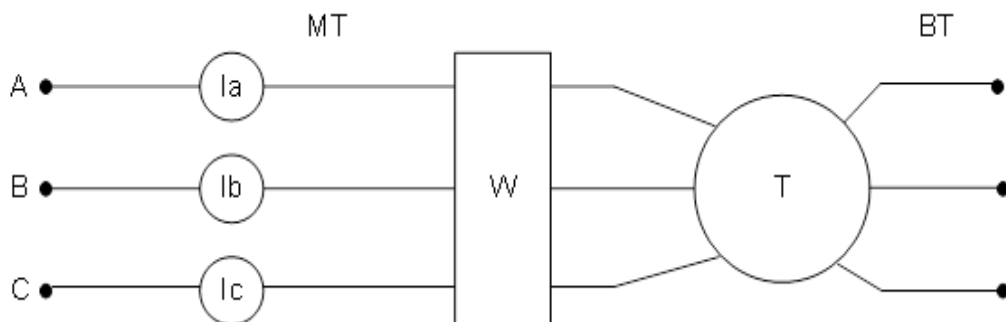


Figura 49. Conexión de instrumentos de medición para prueba en vacío.

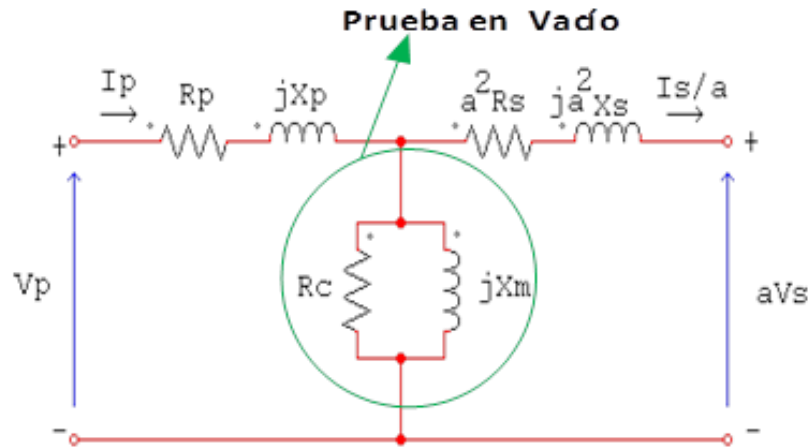


Figura 50. Circuito equivalente de transformador para prueba de vacío

Caracterización de parámetros del transformador:

Potencia en vacío

$$P = \frac{3 (V_0)^2}{R_{fe}} (w)$$

En el cual:

- V_0 : voltaje nominal en bobina primaria del transformador, V
- R_{fe} : Resistencia en vacío, Ω

Despejando, se obtiene el valor de la resistencia óhmica en vacío, midiendo el voltaje y la potencia en vacío

$$R_{fe} = \frac{3(V_0)^2}{P}$$

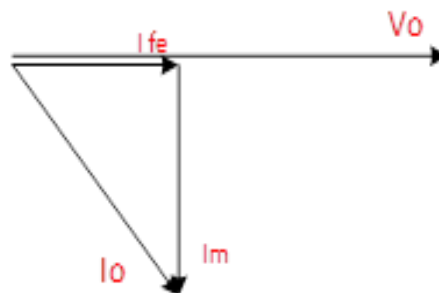


Figura 51. Diagrama fasorial de transformador

Intensidad en vacío:

$$I_{fe} = \frac{V_0}{R_{fe}}$$

Intensidad de magnetización, I_m :

$$I_m = \sqrt{(I_0)^2 - (I_{fe})^2}$$

Despejando, se obtiene la reactancia de magnetización

$$X_m = \frac{V_0}{I_m}$$

Para las pérdidas en vacío se tiene una tolerancia del +15% y para las pérdidas totales, es decir $P_{fe} + P_{cu}$ es de +10% según norma IEC60076.

3.6.1.4. Prueba de corto circuito

El ensayo de cortocircuito se realiza en el primario del transformador y en condiciones nominales.

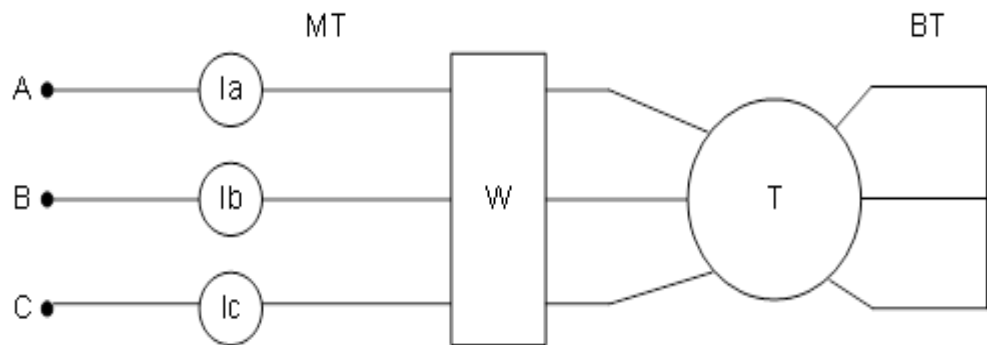


Figura 52. Conexión de instrumentos de medición para prueba de corto circuito.

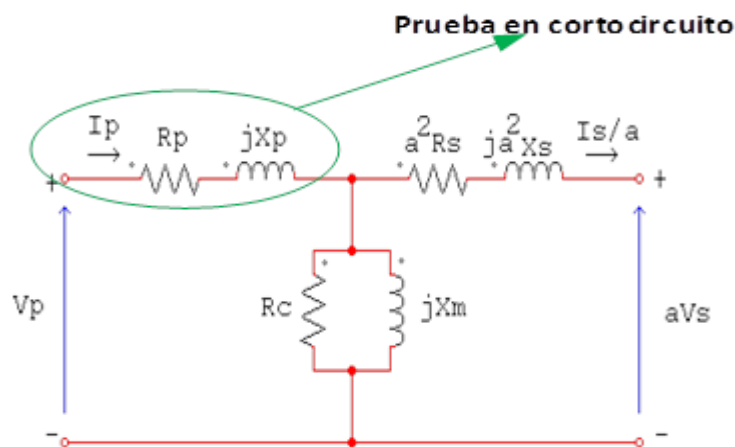


Figura 53. Circuito equivalente de transformador en prueba de corto circuito.

Intensidad de línea promedio, en corto circuito, I-línea

$$I_{\text{línea}} = \frac{I_{ccA} + I_{ccB} + I_{ccC}}{3}$$

Potencia perdida en corto circuito, P_{cc} (W)

$$P_{cc} = 3(I_{cc})^2 R_{cc}$$

Resistencia de corto circuito:

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{3(I_{cc})^2}$$

Impedancia de corto circuito, lado de bobina primaria

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}}$$

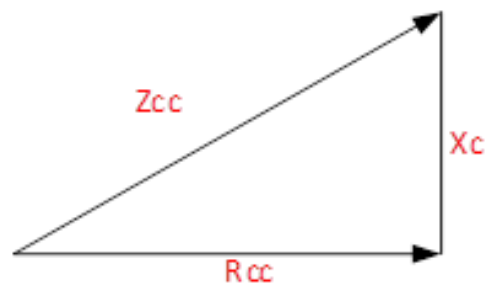


Figura 54. Triángulo de potencias en prueba de corto circuito

Inductancia de corto circuito:

$$X_{cc} = \sqrt{(Z_{cc})^2 - (R_{cc})^2}$$

3.6.1.5. Cálculo de la resistencia y reactancia de cortocircuito

De acuerdo con las siguientes ecuaciones obtendremos la resistencia y reactancia de corto circuito.

$$R_{cc} = R_1 + R'_2$$

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_{cc}}{2}$$

$$R_2 = \frac{R'_2}{a^2}$$

$$X_{cc} = X_1 + X'_2$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_{cc}}{2}$$

$$X_2 = \frac{X'_2}{a^2}$$

- a) Intensidad nominal referida al lado de alta tensión del transformador, I_{1n} (A)

$$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_{1n}}$$

- S_n : Potencia aparente nominal del transformador, VA
- U_{1n} : Tensión nominal, lado de alta tensión del transformador, V

- b) Potencia perdida en cortocircuito, P_{cc} (W)

$$P_{cc}(W) = 3 * R_{cc} * I_{cc}^2 \Rightarrow R_{cc}(\Omega) = \frac{P_{cc}}{3 * I_{cc}^2}$$

- R_{cc} : resistencia óhmica de corto circuito, Ω
- I_{cc} : Intensidad de corto circuito

- c) Reactancia de cortocircuito del transformador referida al lado de baja tensión (secundario).

$$x_{cc}(\Omega) = R_{cc} * \text{tg}(\varphi_{cc})$$

- d) Relación de transformación del transformador

$$r_t = \frac{U_{1n}}{U_{2n}}$$

- U_{1n} : Tensión el primario, lado alta tensión, V
- U_{2n} : Tensión del secundario, lado baja tensión, V

3.6.1.6. Tensión de cortocircuito (Lado de alta tensión)

Del ensayo de cortocircuito se obtiene la tensión de cortocircuito referida al lado de alta tensión:

$$U_{cc} = \frac{P_{cc}(W)}{\sqrt{3} * I_{cc}(A) * \cos(\varphi_{cc})} (V)$$

- P_{cc} (Potencia de cortocircuito), (W)
- I_{cc} : Intensidad del ensayo de corto circuito (A)

- $\cos \varphi_{cc}$: Factor de potencia en ensayo de corto circuito (-)

3.6.1.7. Tensión de corto circuito (Lado de baja tensión)

Con la relación de transformación, se calcula su valor referido al lado de baja tensión, es decir:

$$U''_{cc} = \frac{U_{cc}}{a} \text{ (V)}$$

Tensión relativa de corto circuito, lado de alta tensión:

$$\varepsilon_{cc} = \frac{U''_{cc}}{U_{2n}} * 100 \text{ (\%)}$$

Índice de carga del transformador

$$\alpha = \frac{I_2}{I_{2n}}$$

I_2 : Intensidad de operación, lado de baja tensión, A

I_{2n} : Intensidad nominal, lado de baja tensión del transformador, A

$$I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_{2n}}$$

Tensión relativa de corto circuito, lado de baja tensión, regulación:

$$\varepsilon_c = \alpha * \varepsilon_{cc} * \cos(\varphi_{cc} - \varphi_2), \Rightarrow \varphi_{cc} = \alpha \cos(\varphi_{cc})$$

$$\cos \varphi_2 \Rightarrow \varphi_2 = \alpha \cos \varphi_2$$

Se parte de la ecuación de regulación del transformador, ε_c

$$\varepsilon_c = \frac{U_{2n} - U_2}{U_{2n}} * 100 \Rightarrow U_2 = \left(1 - \frac{\varepsilon_c(\%)}{100}\right) * U_{2n}$$

3.6.1.8. Rendimiento en operación del transformador

Expresa el valor de la potencia activa útil aprovechable en relación a la potencia activa absorbida por el transformador.

$$\eta_{Tr-oper} = \frac{P_u}{P_u + P_{Fe} + P_{Cu-oper}}$$

Siendo P_u : Potencia útil del transformador

$$P_u(w) = \sqrt{3} * U_{2n} * I_2 * \cos \varphi_2 = \alpha_{oper} * S_n * I_2 * \cos \varphi_2$$

Reemplazando se obtiene la ecuación del transformador, en operación

$$\eta = \frac{\alpha * S_n * \cos \varphi_2}{\alpha * S_n * \cos \varphi_2 + P_{Fe} + \alpha^2 * P_{nCu}} * 100$$

3.6.1.9. Índice de carga óptimo

Se utiliza el índice de carga para obtener el rendimiento MÁXIMO del transformador. La fracción de carga para la que se produce el rendimiento máximo es aquella para la cual, las pérdidas en los bobinados (pérdidas por efecto Joule) se igualan a las pérdidas en el hierro:

$$P_{Fe} = \alpha^2 * P_{n-Cu}^2$$

Es decir:

$$\alpha_{opt} = \sqrt{\frac{P_{Fe}}{P_{n-Cu}}}$$

3.6.1.10. Rendimiento máximo del transformador

Este valor se obtiene cuando se utiliza el índice de carga óptimo, α_{opt} .

Podemos encontrar este valor con la siguiente ecuación:

$$\eta_{Máx} = \frac{\alpha_{opt} * S_n * \cos \varphi_2}{\alpha_{opt} * S_n * \cos \varphi_2 + P_{Fe} + \alpha_{opt}^2 * P_{nCu}} * 100$$

3.6.2. Diseño de protocolo de pruebas para transformadores de distribución

Se diseñó un protocolo de pruebas para transformadores de distribución, que podrán ser sometidos a las pruebas de rutina según la norma IEC 60076, entonces este protocolo servirá como modelo tanto para el servicio académico destinado hacia los alumnos y profesionales del área, como también para dar servicio de mantenimiento a las empresas del sector industrial.

PROTOCOLO DE PRUEBAS ELÉCTRICAS PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN					
DATOS INFORMATIVOS				PRACTICA N°	
DOCENTE RESPONSABLE			SUPERVISOR DE ÁREA		
N° PARTICIPANTES		DURACIÓN		FECHA	
DATOS DE PLACA DEL TRANSFORMADOR					
MARCA		POTENCIA		ACEITE	
MODELO		FASES		Tcc % a 75°C	
N° SERIE		VOLTAJE		REFRIGERACIÓN	
AÑO		CORRIENTE		PESO	
NORMA		CONEXIÓN		NIVEL AISL INT	
FRECUENCIA		ALTITUD		NIVEL AISL EXT	
PRUEBA DE AISLAMIENTO					
CONEXIÓN		VOLTAJE APLICADO (VDC)		RESISTENCIA (Ω)	
DEVANADO A.T. vs MASA		10000			
DEVANADO B.T. vs MASA		1000			
DEVANADO A.T. vs B.T.		10000			
PRUEBA DE VACÍO					
CORRIENTE			LECTURA POTENCIA ANALIZADOR DE REDES		
R	S	T	W1	W2	W3
VOLTAJE 1		VOLTAJE 2		PERDIDAS EN HIERRO	
PRUEBA DE CORTO CIRCUITO					
VOLTAJE		CORRIENTE			
LECTURA POTENCIA ANALIZADOR DE REDES		PERDIDAS EN COBRE		TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO	
		16 °C	75°C	16 °C	75°C
RESULTADOS					
PERDIDAS EN HIERRO		PERDIDAS EN COBRE		PERDIDAS TOTALES	
INSTRUMENTOS Y EPPS					
OBSERVACIONES					
CONCLUSIONES					

Tabla 21. Protocolo de pruebas eléctricas para transformadores de distribución

3.7. Análisis económico

3.7.1. Inversiones

A continuación, indicaremos la inversión necesaria para poder ejecutar el proyecto de banco de pruebas eléctricas para caracterizar parámetros de transformadores de distribución:

3.7.1.1. Materiales

Transformador trifásico 500 KVA	40,000
Transformador trifásico 50 KVA:	4,500
Celdas de transformación	750
Celda de compensación	350
Celda de llegada, en MT	500
Celda de distribución	500
Cable N2YSY 3 x 25 mm ² , 130 m	2,600
Cable THW 3 x 20 mm ² , 50 m	3,000
Sistema de puesta a tierra	3,500
Sistema de conexión a masa	4,200
Barras de media tensión	3,000
Barras de baja tensión	2,500
Caseta de transformación	7,500
Seccionador de vacío 10kV	2,500
Interruptor automático de caja moldeada en BT 2 piezas	2,000
Sub total 1:	77,400

3.7.1.2. Mano de obra

Obras civiles	2,700
Instalaciones eléctricas	8,100
Sub total 2:	10,800

3.7.1.3. Ingeniería de detalle

Preparación de planos obras civiles y eléctricas	2,500
Sub total 3:	2,500

3.7.1.4. Instrumentos de medida y control

Analizador de redes trifásico 2 piezas	6000
Sistema compensación del factor de potencia	15000
Sub total 4:	21,000

3.7.1.5. Insumos

Ferretería eléctrica	1,500
Insumos obras civiles	2,500
Sub total 5:	4,000

3.7.1.6. Gastos generales

Alimentación	3,200
Transporte	1,200
Seguros de vida y pensión	2,000
Sub total 6:	6,400

Total, inversiones: 77,400 + 10,800 + 2,500 + 21,000 + 4,000 + 6,400 = **122,100**

3.7.2. Beneficios

3.7.2.1. Beneficios por servicio externo (pruebas de transformadores)

Se estima dar servicio de análisis de transformadores trifásicos industriales B1: 2 veces por mes, a un valor unitario promedio de 4500 soles

$$(2 \text{ veces/mes}) * (12 \text{ meses/año}) * (4500 \text{ soles/vez}) = 108,000 \text{ soles}$$

3.7.2.2. Ingreso por dictado de diplomados

Se plantea dictar diplomados en auditoría eléctrica en una primera etapa y luego maestría en Energía.

Se estima dos veces por año, con 30 estudiantes por vez y a un costo de 3000 soles por cada uno. Se asume un 20 % del ingreso total como beneficio por implementar el sistema de análisis de transformadores

$$B2: 2 \text{ veces por año} * 30 \text{ estudiantes/vez} * 3000 \text{ soles/estudiante} * 0.20 = 36,000 \text{ soles/año}$$

Total, de beneficios económicos estimados: 108,000 + 36,000 = 144,000 soles/año

3.7.3. Costos operativos

Se considera contratar a un técnico electricista, a tiempo completo

1250 soles/mes *14 sueldos/año = 17500 soles

3.7.4. Costos de mantenimiento

Se estima 5,000 soles/año, debido a que no operará mucho tiempo al año.

3.7.5. Beneficio neto:

BN = Beneficio bruto – Costo de operación – Costo de mantenimiento

BN = 144,000 – 17,500 – 5,000 = 121,500 soles/año

3.8. Análisis financiero

En el siguiente episodio analizaremos el presente proyecto aplicando indicadores financieros.

3.8.1. Tiempo estimado de retorno de la inversión, PRI

El tiempo de retorno de la inversión es la relación entre el monto de inversiones, en soles, entre el beneficio neto económico, en soles/año, resultando el período en años:

$$PRI = \frac{I}{BN} = \frac{122,100 \text{ soles}}{121,500 \frac{\text{soles}}{\text{año}}} = 1.01 \text{ años} = 12.06 \text{ meses}$$

IV. DISCUSIÓN

a. Recolección de especificaciones en función de la capacidad del laboratorio

- Luego de observar el sistema eléctrico de potencia del Centro de Investigación Tecnológica, se procedió a recolectar información para determinar la capacidad del laboratorio. La industria liberteña utiliza energía eléctrica trifásica, la recibe en media tensión, en 10 o 22.9 kV, 60 Hz, luego la transforma en energía eléctrica trifásica en baja tensión, las más usuales, de 220 V en triángulo, 380 V en estrella, de 440 V en triángulo y de 460 V en triángulo, en algunos casos se encuentran tensiones de 500 V, pero son casos raros, sobre todo cuando se utiliza energía de 50 Hz.
- Las empresas medianas y grandes tienen en sus sub estaciones transformadores de 500 KVA a más, hasta de 1200 KVA, como son las empresas molineras y esparragueras, así como las pesqueras, pero no son la mayoría, representando un 30...35 % del total, el resto, la industria mediana y pequeña tiene subestaciones con transformadores de 50 hasta los 500 KVA, son las empresas metal mecánicas, de productos alimenticios, de bebidas gaseosas, que representan en conjunto, más de la mitad de esos equipos, por este motivo y porque en el CIT se tiene una subestación de 320 KVA, para su uso interno, se optó por elegir como potencia nominal un transformador de 500 KVA, para las pruebas de los transformadores de la industria mediana y pequeña de Trujillo.
- En cuanto al tipo de transformador, se analizó la posibilidad de utilizar un transformador en aceite o compacto seco. La variante en aceite se dejó de lado debido a su mayor demanda de mantenimiento continuo y atención operativa, requiere mayor espacio de instalación, en el caso del transformador seco, está fabricado con materiales muy resistentes que alargan su tiempo de vida útil, no es necesario el mantenimiento continuo, no existe el riesgo de fuga de aceite o incendio, no requiere mucho espacio para ser instalado, es resistente ante sobrecargas o cortocircuitos, por estas razones se dio por seleccionado este tipo de transformador.

b. Distribución de equipos básicos

- Al diseñar la distribución de equipos básicos se tuvo en cuenta la secuencia de transformación, medición, distribución primaria y secundaria, así como el fácil acceso para los dispositivos de medición.
- Esta distribución está en función a la recolección de datos obtenida del centro de investigación tecnológica de la universidad, ya que se sugirió la instalación de un nuevo sistema de utilización para el banco de pruebas eléctricas, con la finalidad de no perjudicar a la instalación actual y también debido a la falta de potencia para realizar estas pruebas.

c. Dimensionamiento de accesorios en media y baja tensión

- En el dimensionamiento de los cables y accesorios en MT y en BT, según las normas eléctricas peruanas, con el método de caída de tensión admisible, el cual señala $\leq 3.5\%$ de la tensión nominal, en el caso presente se tiene una caída máxima admisible de 2% y rendimiento del cable mayor a 98% , la temperatura de operación, se halla con la ecuación dada por los fabricantes de conductores.
- Se realizó también la selección de los aisladores portabarra, seccionador tripolar de vacío para visualizar los seccionamientos por mantenimiento, los terminales de uso interno para el conductor N2XSY, todo esto en función de la corriente de choque de 19.11 kA .

d. Dimensionamiento de dispositivos de maniobra y protección

- Cuando se dimensionaron los sistemas de protección se optó por los interruptores automáticos de caja moldeada, que cumplen el rol de protector contra sobretensiones (e intensidades) y contra fenómenos de corto circuito, es decir para su selección se tuvo, en el aspecto técnico; que determinar la intensidad nominal de operación, I_n , con la intensidad total de las cargas, y un factor de servicio de 1.20 , para el caso de la intensidad de corto circuito se consideró la reactancia de corto circuito del transformador en baja tensión, X_{cc} , y la intensidad nominal del mismo.

e. Selección de equipos de control y medición

- Al seleccionar los equipos de control y medición, se tuvo en consideración el rango de medida, el grado de precisión, $\leq 2\%$, temperatura de operación y precio de venta.
- Se consideró los instrumentos principales para realizar las pruebas de seguridad y eficiencia del transformador, estas corresponden a la medida de aislamiento, pérdidas en el cobre y hierro.

f. Procedimiento y protocolo de pruebas

- Se consideró los procedimientos establecidos en las normas ITINTEC NTP 370.002 e IEC 60076 para indicar como se realizarán las pruebas a los transformadores.
- Las conexiones y formulas están en función a los manuales de fabricantes seleccionados para los instrumentos de medición.

g. Análisis económico y financiero

- Para el análisis económico se tuvo en cuenta todos los gastos necesarios para el proyecto, dentro de ello están (los transformadores; celdas; conductores; caseta; interruptores), también se mencionó la mano de obra, los instrumentos de medición y control, insumos y otros gastos que nos da un total de S/122,100.00. esto es lo que se tiene que invertir para la construcción del laboratorio.
- Aquí se analizó los beneficios que se obtendría con el laboratorio, el beneficio por servicio externo de pruebas de transformadores trifásicos, ingresos por dictado de diplomado, también tomamos en cuenta los costos de operación y mantenimiento, la cual nos da un beneficio neto S/ 124,500.00 al año.
- También se determinó el tiempo de retorno de la inversión, el tiempo estimado es de 1.01 años, mencionando de esta manera la rentabilidad del banco de pruebas eléctricas para transformadores.

V. CONCLUSIONES

- De acuerdo con la recolección de datos realizada en el Centro de Investigación Tecnológica de la Universidad, y el porcentaje de transformadores de distribución con una potencia menor a 500 KVA correspondiente a clientes menores, se realizó el diseño de una instalación independiente a la que actualmente se encuentra funcionando.
- Se realizó el dimensionamiento de los componentes de la celda de distribución en media tensión, correspondiente a los transformadores de 500 y 50 KVA seleccionados para la ejecución de pruebas eléctricas. Esta contará con un seccionador tripolar de vacío, aisladores portabarra, interruptor de potencia y un alimentador principal N2XSY de 25 mm².
- Para evacuar el calor disipado por los transformadores se diseñó el sistema de ventilación forzada, que cuenta con 5 ventiladores CBX – 4747 con un caudal máximo de 23500 m³/h y un accionamiento por motor eléctrico IE2 de 7.5 HP. Este sistema de ventilación forzada podrá satisfacer las condiciones de enfriamiento, pues tiene una adecuada capacidad para mover el aire.
- El sistema de puesta tierra dimensionado para la instalación tiene una resistencia de malla igual a 11.23 Ω menor a los 25 Ω indicados por el Código Nacional de Electricidad para equipos en media tensión.
- Los procedimientos de caracterización de los parámetros de transformadores trifásicos incluidos en el manual, cumplen con los requerimientos para definir la capacidad y eficiencia de los transformadores de distribución.
- El presente estudio da a conocer en el análisis económico que realizando una inversión de 122100 soles se podrá adquirir un beneficio neto de 121500 soles por año, teniendo un tiempo estimado de retorno de la inversión de 12 meses. Por lo tanto, es rentable invertir en el banco de pruebas eléctricas para transformadores de distribución.

VI. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar el banco de pruebas eléctricas para caracterizar parámetros de transformadores diseñado en el presente estudio, por los beneficios académicos y económicos que presenta, en un plazo razonable, que puede ser de 6 a 8 meses, es decir, por etapas, se instalaría primero el sistema para la línea académica, luego de madurar su operación, se pasaría al sistema de servicio industrial.
- El Manual de aplicación de las pruebas de los transformadores debe ser claro en los procedimientos, y debe incluir normas de seguridad para cada proceso.
- Antes de implementar el sistema, debe prepararse la ingeniería civil para tener los planes finales de ejecución de obra, conteniendo el sistema de protección de masas de los equipos de la nueva subestación.
- Es necesario preparar un Plan de mantenimiento preventivo para asegurar una adecuada disponibilidad y confiabilidad de los equipos componentes del sistema de pruebas eléctricas.
- Se debe preparar un Plan de verificación de seguridad operacional para los instrumentos, así como para el personal que manipulará los mismos.
- Es necesario que los instrumentos de medida y protección sean calibrados anualmente, de acuerdo a las normas peruanas, por una empresa metrológica acreditada, esto para asegurar el grado de precisión de los equipos de medida.
- En el mediano plazo, se debe realizar un estudio de calidad de energía, para complementar el servicio académico e industrial, con el fin de optimizar la operación de los sistemas eléctricos y no se vean afectados por el incremento de la tasa de distorsión armónica en corriente y en tensión, debido a las cargas electrónicas que se utilizan cada vez más en la industria.


VII. REFERENCIAS

- 3M. (2019). QT-III Terminaciones Contráctiles en frío.
- AEMC. (2019). Medidores de relación de transformación . Obtenido de <https://www.aemc.com/userfiles/files/resources/datasheets/Product%20PDFs%20-%20Spanish/Motor-Transformer-Testers/2136-50-SP.pdf>
- Almagro, E., & Narváez, J. (2013). Diseño y Construcción de un banco de pruebas automatizado para transformadores de distribución . Quito, Ecuador : Escuela Politécnica Nacional.
- Antillón, F., & Magaña, O. (2015). Propuesta de diseño para el laboratorio de pruebas para transformadores de distribución y potencia, para la Escuela de Ingeniería Eléctrica. San Salvador, El Salvador: Universidad de El Salvador .
- Boylestad, R. L. (2004). Introducción al análisis de circuitos . Ciudad de México : Pearson Educación de México, S.A. de C.V.
- Boylestad, R. L. (2011). Introducción al análisis de circuitos . Ciudad de México : Pearson Educación de México, S.A. de C.V. .
- Chapman, S. J. (2012). Máquinas Eléctricas . Ciudad de México : McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.
- Fraile Mora, J. (2003). Máquinas Eléctricas. Madrid: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. A. U.
- Gargate, M. (2012). Mantenimiento de transformadores de distribución en media tensión . Lima, Perú : Universidad Nacional de Ingeniería .
- Gaytan, G. (2016). Mantanimiento preventivo a equipo primario de subestación eléctrica de potencia. Ciudad de México, México: Instituto Politécnico Nacional.
- HEAG. (2019). PROMELSA . Obtenido de PROMELSA : http://www.promelsa.com.pe/pdf/fitec_heag.pdf
- Hernández Sampieri, R. (2014). Metodo de la Investigacion. MEXICO: MCGRAW-HILL.
- IEC 60076-1. (2000). Power transformers - Part 1: General . Geneva, Switzerland : IEC Central Office .
- INDECO. (2019). Ficha Técnica - N2XSY.
- MEGABRAS. (2018). Mi10KVe. Megóhmetro Electrónico de Alta Tensión .
- MEGABRAS. (2019). Micro ohmímetro digital portátil hasta 200 A. Obtenido de <https://www.megabras.com/es/productos/microhmimetro/microhmimetro-MPK204e.php>
- NEW LINE. (2019). Ficha Técnica Variac Trifásico . Obtenido de <https://corpnewline.com/assets/ft-variacion-trifasico.pdf>

- Norma VDE. (s.f.). Federacion Alemana de Industrias Electrotécnicas, Electrónicas y de Tecnología de la Información. Eisenach, Alemania.
- PROMELSA. (5 de Abril de 2016). Pruebas Eléctricas - Transformadores de distribución. Lima , Lima, Perú.
- PROMELSA. (2019). Condensadores de potencia . Obtenido de <http://www.promelsa.com.pe/pdf/32102055.pdf>
- Promelsa. (2019). Transformadores . Lima.
- Rodríguez, R. (2018). Diseño y construcción de un banco de pruebas de transformadores eléctricos con fines docentes. Moa, Holguín, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
- SIEMENS. (2019). Automáticos y Diferenciales. Obtenido de <http://www.matmax.es/automaticos-y-diferenciales/productos/siemens/3v12710-1dk36-0aa0-interruptor-automatico-v1160n-40ka-3-polos-750-1500a-con-tornillo-0720582830>
- SILE . (2013). Seccionador de Vacío .
- Sodeca. (2019). Ventiladores Industriales . Lima.
- SUNEDU. (2016). Informe Bienal sobre la Realidad Universitaria Peruana. Lima: Impresión Arte Perú S.A.C.
- Tecsup - PFR. (2013). Máquinas Eléctricas I. Trujillo.
- TECSUP. (2013). Laboratorio de Máquinas Eléctricas I - Transformadores Monofásicos . Trujillo : TECSUP - TRUJILLO .
- TECSUP. (2013). Laboratorio de Máquinas Eléctricas I - Transformadores Trifásicos . Trujillo : TECSUP - TRUJILLO .
- Vásquez, L. (2013). Diseño de un laboratorio de pruebas eléctricas para transformadores de distribución de la empresa R.V.R. Transformadores. Quito.
- Vodafone. (5 de Junio de 2016). Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT): más de 150 años inventado el futuro de la humanidad. Newbury, Berkshire, Reino Unido.
- WEG. (2019). Selección de Motores Eléctricos . Obtenido de http://ecatalog.weg.net/TEC_CAT/tech_motor_sel_web.asp?cd_producto=30&CD_CATEGORIA_PRODUTO=5&cd_mercado=000L&cd_idioma_cat=ES&cd_empresa=110
- Wildi, T. (2007). Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia . México : Pearson Educación de México, S.A. de C.V.

ANEXOS

Anexo 1. Acta de aprobación de originalidad de tesis

 UCV UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO	ACTA DE APROBACIÓN DE ORIGINALIDAD DE TESIS	Código : F06-PP-PP-02-02 Versión : 10 Fecha : 10-06-2018 Página : 1 de 1
--	--	---

Yo, Maria Elisia Armas Alverado.....
 docente de la Facultad de Ingeniería..... y
 Escuela Profesional Ingeniería Eléctrica de la Universidad César Vallejo
 (precisar filial o sede), revisor (a) de la tesis titulada

" Diseño de un banco de pruebas eléctricas para caracterizar
parámetros de transformadores de distribución en el laboratorio
de una universidad de Trujillo....."

del (de la) estudiante Sifuentes Arango Segundo y Tuesta Vila Brayán
 constato que la investigación tiene un índice de
 similitud de 19.7% verificable en el reporte de originalidad del programa Turnitin.

El/la suscrito (a) analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las
 coincidencias detectadas no constituyen plagio. A mi leal saber y entender la
 tesis cumple con todas las normas para el uso de citas y referencias establecidas
 por la Universidad César Vallejo.

Lugar y fecha Trujillo - 2019.....

.....


Firma
 Nombres y apellidos del (de la) docente

DNI: 44073099

		
Revisó	Aprobó	

NOTA: Cuando el documento impreso diferente del original, y cualquier archivo electrónico que se encuentren fuera del campus Virtual Trilce serán considerados como COPIA NO CONTROLADA.

Anexo 2. Reporte Turnitin

Diseño de un Banco de Pruebas Eléctricas para Caracterizar
Parámetros de Transformadores de Distribución en el Laboratorio
de una Universidad de Trujillo


ORIGINALITY REPORT

19%	10%	0%	16%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	Submitted to Universidad Cesar Vallejo	6%
	Student Paper	
2	Submitted to Universidad Pontificia Bolivariana	1%
	Student Paper	

Anexo 3. Autorización de publicación de tesis en repositorio institucional UCV

	AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TESIS EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL UCV	Código : F09-PP-PR-02.02
		Versión : 10
		Fecha : 10-06-2019
		Página : 1 de 1

Yo Silvestre Arceaga Segundo, identificado con DNI N° 70509868 egresado de la Escuela Profesional de de la Universidad César Vallejo, autorizo (X) , No autorizo () la divulgación y comunicación, pública, de mi trabajo de investigación titulado "Diseño de un banco de pruebas electrónicos, para caracterizar, probar y transformar el distribuidor de laboratorio de una Universidad de Trujillo"; en el Repositorio Institucional de la UCV (<http://repositorio.ucv.edu.pe/>), según lo estipulado en el Decreto Legislativo 822, Ley sobre Derecho de Autor, Art. 23 y Art. 33

Fundamentación en caso de no autorización:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



FIRMA

DNI: 70509868

FECHA: 16 de diciembre del 2019.

	
Revisó: <u>[Signature]</u> Vicerrectorado de Investigación/ DIVAC / Rectoría	Aprobó: <u>[Signature]</u>

NOTA: Cualquier documento impreso diferente del original, y cualquier documento electrónico que se encuentren fuera del Campus Virtual Trilce serán considerados como COPIA NO CONTROLADA.



**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN DE TESIS
EN REPOSITORIO INSTITUCIONAL UCV**

Código : F08-PP-PR-02-02
Versión : 10
Fecha : 10-06-2019
Página : 1 de 1

Yo Turda Vela Bryan, identificado con DNI N° 71539592, egresado de la Escuela Profesional de de la Universidad César Vallejo, autorizo (X) , No autorizo () la divulgación y comunicación pública de mi trabajo de investigación titulado "Diseno de un banco de pruebas electricas para conectar y probar de transferencia de distribución en el laboratorio de una Universidad de Trujillo"; en el Repositorio Institucional de la UCV (<http://repositorio.ucv.edu.pe/>), según lo estipulado en el Decreto Legislativo 822, Ley sobre Derecho de Autor, Art. 23 y Art. 33

Fundamentación en caso de no autorización:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....


FIRMA

DNI: 71539592

FECHA: 16 de diciembre del 2019.

Revisó  Vicerrectorado de Investigación / IDEVAC /  /  /  Aprobó 

NOTA: Cualquier documento impreso diferente del original, y cualquier archivo electrónico que se encuentren fuera del Campus Virtual Trilce serán considerados como COPIA NO CONTRIBUADA.



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

AUTORIZACIÓN DE LA VERSIÓN FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTE POR EL PRESENTE EL VISTO BUENO QUE OTORGA EL ENCARGADO DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA A LA VERSIÓN FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN QUE PRESENTA:

Sifuentes Arteaga, Segundo

INFORME TÍTULADO:

Diseño de un Banco de Pruebas Eléctricas para Caracterizar Parámetros de Transformadores de Distribución en el Laboratorio de una Universidad de Trujillo

PARA OBTENER EL TÍTULO O GRADO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

SUSTENTADO EN FECHA: 23 DE DICIEMBRE DEL 2019

NOTA O MENCIÓN: QUINCE

DR. JORGE ANTONIO INCISO VÁSQUEZ
ENCARGADO DE INVESTIGACIÓN
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

AUTORIZACIÓN DE LA VERSIÓN FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

CONSTE POR EL PRESENTE EL VISTO BUENO QUE OTORGA EL ENCARGADO DE INVESTIGACIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA A LA VERSIÓN FINAL DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN QUE PRESENTA:

Tuesta Vela, Brayan

INFORME TÍTULADO:

Diseño de un Banco de Pruebas Eléctricas para Caracterizar Parámetros de Transformadores de Distribución en el Laboratorio de una Universidad de Trujillo

PARA OBTENER EL TÍTULO O GRADO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

SUSTENTADO EN FECHA: 23 DE DICIEMBRE DEL 2019

NOTA O MENCIÓN: QUINCE

DR. JORGE ANTONIO INCISO VÁSQUEZ
ENCARGADO DE INVESTIGACIÓN
INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA