

**ACTUALIZACIÓN DEL TABLERO DE MANDO PARA ENSAYOS APLICADOS A
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN PARA LA EMPRESA
CONSTRUCCIONES Y MONTAJES ELECTRODITAMA.**

JHON JAIRO TRISTANCHO PINEDA

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
DUITAMA
2016**

**ACTUALIZACIÓN DEL TABLERO DE MANDO PARA ENSAYOS APLICADOS A
TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN PARA LA EMPRESA
CONSTRUCCIONES Y MONTAJES ELECTRODUTAMA.**

JHON JAIRO TRISTANCHO PINEDA

Práctica Empresarial para Optar por el Título de Ingeniero Electromecánico

Director: Edgar Efrén Tibaduiza Rincón
Ingeniero Electromecánico

**UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL DUITAMA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA
DUITAMA
2016**

Nota de Aceptación

Firma del Presidente del Jurado

Jurado 1

Jurado 2

Duitama, 2016

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de un proyecto de grado es la cúspide del proceso de formación que inicia desde el preescolar; es de vital importancia para mí agradecer en primera medida a mi familia que me impulsó y fue mi primera escuela.

En segunda medida quiero agradecer a cada una de las personas que permitieron y aportaron un grano de arena para que se pudiera llegar a este punto; a mi grupo de compañeros de estudio, al personal técnico y administrativo de Construcciones y Montajes Electroductama Ltda. en cabeza del ingeniero Oscar González y el gerente de la empresa Luis González.

Por último quiero agradecer a la formación impartida por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia que me abrió las puertas permitiendo capacitarme en una de las mejores escuelas del país.

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	8
LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE ANEXOS	10
INTRODUCCIÓN	12
CAPÍTULO 1. PRUEBAS ELÉCTRICAS A LOS TRANSFORMADORES	14
1.1 PRUEBAS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE FABRICACIÓN DEL TRANSFORMADOR	14
1.1.1 Resistencia de aislamiento	14
1.1.2 Rigidez dieléctrica del aceite	14
1.1.3 Relación de transformación y polaridad.....	15
1.1.4 Resistencia óhmica de los devanados.....	15
1.1.5 Potencial aplicado.....	15
1.1.6 Potencial inducido.....	15
1.2 PRUEBAS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DEL SERVICIO	15
1.2.1 Pérdidas nominales en vacío.....	15
1.2.2 Pérdidas Nominales en el Cobre	16
1.3 PRUEBAS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE OPERACIÓN DEL TRANSFORMADOR	17
1.3.1 Hermeticidad.....	17
1.4 RENDIMIENTO DE UN TRANSFORMADOR	17
CAPÍTULO 2. SOPORTE LEGAL	18
2.1 ENTES REGULADORES	18
2.2 NORMATIVIDAD COLOMBIANA A ENSAYOS APLICADOS A TRANSFORMADORES REPARADOS	18
2.2.1 Generalidades	18
2.2.2. Pruebas para determinar la calidad del transformador de distribución	20
2.2.3 Pruebas para determinar la calidad del servicio del transformador de distribución	21
2.3 NORMATIVIDAD INTERNACIONAL A TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN.....	23
CAPÍTULO 3. MARCO REFERENCIAL.....	24
3.1 PARTES DEL CAMPO DE PRUEBAS	24
3.1.1 Grupo motor generador	24
3.1.2 Variadores de tensión.....	24
3.1.3 Transformadores	25

3.1.4 Tablero de mando.....	25
3.2 FUNCIONAMIENTO DEL TABLERO DE MANDO	26
3.2.1 Señalización	26
3.2.2 Medición	27
3.2.3 Mando.....	28
3.3 ENSAYO DE TENSIÓN APLICADA.....	29
3.4 ENSAYO DE TENSIÓN INDUCIDA	33
3.5 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO	35
3.6 ENSAYO DE VACÍO	37
CAPÍTULO 4. ESTADO INICIAL DE CAMPO DE PRUEBAS DE C.M.E.....	38
4.1 PLANTA FÍSICA.....	38
4.2 ELEMENTOS DEL CAMPO DE PRUEBA.....	39
4.3 ESTADO ACTUAL DEL CAMPO PARA EJECUCIÓN DE PRUEBAS	42
4.4 ETAPAS PARA LA EJECUCIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS	43
CAPÍTULO 5. MANTENIMIENTO DEL CAMPO DE PRUEBAS DE C.M.E	45
5.1 PUESTA EN SERVICIO DE PRUEBAS	45
5.2 PUESTA EN SERVICIO DE CIRCUITO DE PROTECCIÓN DE SOBRE CORRIENTE	45
5.3 CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO DE EQUIPOS DE MEDIDA	46
5.4 CONSTRUCCIÓN DE PLANOS.....	47
5.5 MANTENIMIENTO DE CIRCUITO DE SEÑALIZACIÓN	48
5.6 APLICACIÓN NORMATIVIDAD	48
5.6.1 Código de colores para conductores	48
5.6.2 Evaluación del nivel de riesgo	49
5.6.3 Límites de aproximación	53
5.6.4 Ductos.....	53
5.6.5 Cableado	54
5.6.6 Tableros de control	54
5.7 SELECCIÓN DE EQUIPOS Y COMPONENTES PARA CADA ENSAYO	57
5.7.1 Ensayo de pérdidas en vacío y cortocircuito.....	57
5.7.2 Cálculo de impedancia, admitancia y resistencia estándar de un transformador	61
5.7.3 Ensayo de tensión inducida	64
CAPÍTULO 6. AUTOMATIZACIÓN DE CABLEADO MANUAL.....	68
6.1 CIRCUITO DE POTENCIA.....	68
6.2 CIRCUITO DE CONTROL.....	71
6.2.1 Prueba de tensión aplicada:	71
6.2.2 Prueba de tensión inducida:	72

6.2.3 Medida de pérdidas en vacío y corrientes de excitación; pérdidas en el cobre y tensión de cortocircuito:	73
6.3 CIRCUITO DE SEÑALIZACIÓN	74
6.4 MANUAL DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS DE C.M.E	75
CAPÍTULO 7. MEJORAS A FUTURO	76
7.1 PROTECCIÓN DE ENTRADAS A ANALIZADOR DE POTENCIA.....	76
7.2 USO DE TRANSFORMADORES DE TENSIÓN	77
7.3 CIRCUITO DE CONTROL MEDIANTE LENGUAJE LADDER	77
7.3.1 Número de entradas y salidas del PLC	77
7.3.2 Simulación y circuito de control	78
7.4 COTIZACIÓN DE ELEMENTOS	79
7.4.1 Selección de PLC	79
7.4.2 Fuente de alimentación de E/S.....	80
7.4.3 Contactores auxiliares	80
7.5 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN	81
7.6 MEJORAS A FUTURO	82
CONCLUSIONES	84
RECOMENDACIONES	85
ANEXOS	86
BIBLIOGRAFÍA.....	117

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Normas colombianas para ensayos a transformadores	19
Tabla 2. Clasificación de campos de prueba, descripción de equipos mínimos requeridos y ensayos mínimos realizables en el campo de prueba.....	20
Tabla 3. Interrelaciones entre los niveles de aislamiento dieléctrico para transformadores sumergidos en aceite con NBA 350 kV y menores.....	20
Tabla 4. Transformadores reparados parcial o totalmente, monofásicos sumergidos en aceite serie 15 / 1,2 kV	22
Tabla 5. Transformadores reparados parcial o totalmente, trifásicos sumergidos en aceite serie 15 / 1,2 kV	22
Tabla 6. Norma técnica internacional a transformadores de distribución.....	23
Tabla 7. Grupo motor generador.....	24
Tabla 8. Regulador de tensión	25
Tabla 9. Transformadores.....	25
Tabla 10. Inventario equipos campo de pruebas C.M.E.	41
Tabla 11. Inventario equipos campo de pruebas C.M.E. (Continuación)	42
Tabla 12. Plan de automatización del campo de pruebas de C.M.E.....	44
Tabla 13. Precisión equipos de medida campo de pruebas	47
Tabla 14. Código de colores para conductores c.a.....	49
Tabla 15. Matriz para análisis de riesgos.....	50
Tabla 16. Consecuencias – Matriz para análisis de riesgo	51
Tabla 17. Probabilidad de que ocurra un riesgo	52
Tabla 18. Distancias de seguridad.....	53
Tabla 19. Datos prueba en cortocircuito y vacío para transformador trifásico de 1250 kVA	62
Tabla 20. Parámetros de transformador de 1250 kVA.....	62
Tabla 21. Datos prueba en cortocircuito y vacío para transformador monofásico de 167,5 kVA	63
Tabla 22. Parámetros de transformador de 1250 kVA.....	63
Tabla 23. Contactores utilizados para automatización.....	69
Tabla 24. Entradas PLC.....	78
Tabla 25. Entradas PLC.....	78
Tabla 26. Cotización PLCs	79
Tabla 27 Fuentes fijas de 24 VDC	80
Tabla 28. Contactores auxiliares.....	80
Tabla 26. Cotización PLCs	88
Tabla 27 Fuentes fijas de 24 VDC	89
Tabla 28. Contactores auxiliares.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Circuito ensayo circuito abierto	16
Figura 2. Circuito ensayo cortocircuito	16
Figura 3. Tablero de mando.....	26
Figura 4. Circuito de Señalización	26
Figura 5. Ensayo tensión aplicada transformador monofásico	30
Figura 6. Flujograma proceso tensión aplicada	31
Figura 7. Ensayo tensión aplicada transformador trifásico	32
Figura 8. Voltaje durante prueba de tensión aplicada.....	32
Figura 9. Ensayo de tensión inducida a transformador monofásico.....	33
Figura 10. Ensayo de tensión inducida a transformador trifásico	33
Figura 11. Ensayo de tensión inducida	34
Figura 12. Voltaje durante prueba de tensión inducida.....	35
Figura 13. Circuito prueba de cortocircuito	35
Figura 14. Ensayo de cortocircuito y circuito abierto.....	36
Figura 15. Ensayo de vacío	37
Figura 16. Campo de Pruebas de Construcciones y Montajes Electroductama	38
Figura 17. Tablero de mando de campo de pruebas C.M.E.	39
Figura 18. Tablero de control campo de pruebas C.M.E.	40
Figura 19. Transformador intermedio campo de pruebas C.M.E.	40
Figura 20. Protección de sobre corriente	46
Figura 21. Cambio de circuito de señalización.....	48
Figura 22. Límites de aproximación	53
Figura 23. Cableado de potencia campo de pruebas C.M.E.	54
Figura 24. Tablero de control 1	55
Figura 25. Tablero de control adicional.....	56
Figura 26. Diagrama unifilar prueba cortocircuito y vacío transformadores monofásicos.....	57
Figura 27. Diagrama unifilar prueba cortocircuito y vacío transformadores monofásicos.....	59
Figura 28. Ensayo de tensión inducida a transformador trifásico	65
Figura 29. Ensayo de tensión inducida a transformador monofásico.....	66
Figura 30. Diagrama unifilar antes de automatización	69
Figura 31. Diagrama unifilar – Uso de contactores para evitar el cableado manual	70
Figura 32. Protección circuito de señalización	74
Figura 33. Protección de entradas de analizador digital de potencia.....	76
Figura 34. Alimentación de pulsadores y bobinas de salida	81
Figura 35. Circuito de potencia PLC	82

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Construcción de planos existentes C.M.E.	86
Anexo B. Certificado de Calibración Equipo Patrón CPC 100 – OMICRON	87
Anexo C. Propuesta de Diseño de Automatización del Banco	88
Anexo D. Manual de Uso de Campo de Pruebas C.M.E – SGI	93
Anexo E. Calculo de Equipos para Pruebas	105

RESUMÉN

Esta tesis presenta el diseño e implementación parcial del proyecto de automatización del banco de pruebas eléctricos a transformadores de distribución de la empresa Construcciones y Montajes Electroductama “C.M.E.” Ltda. Asimismo presenta recomendaciones de mejora a futuro y la comprobación de la selección de los equipos utilizados.

Los primeros capítulos definen el concepto y el modelo matemático de un transformador incluyendo el soporte técnico y legal colombiano o internacional dependiendo del caso de las pruebas eléctricas realizadas a los transformadores, teniendo en cuenta los documentos divulgados por los entes reguladores.

Además se presenta la construcción de planos del banco incluyendo los circuitos de potencia, señalización y control y la comprobación técnica de que los equipos utilizados soporten las cargas requeridas para cada una de las pruebas. Al final del libro se añade un espacio para evidenciar el diseño de un sistema que disminuya el cableado mediante PLC.

INTRODUCCIÓN

El transformador de distribución es el encargado de transformar la tensión a un nivel apto para la alimentación de diferentes máquinas, siendo en Colombia las tensiones más comunes en baja tensión 120, 220 y 214 V, sin embargo al estar distribuido por toda la red su posibilidad de falla por descarga atmosférica, sobretensión o daño externo es muy grande, a partir de este ideal diferentes empresas basan sus estándares de calidad en el mantenimiento predictivo a transformadores periódicamente donde su modo de control cuantitativo está dado por los resultados de las pruebas aplicadas a los mismos tal como se vio en a nivel local en la tesis desarrollada en 2010 por Fausto Camargo y Carlos Moreno (CAMARGO TORRES, Fausto Vicente & MORENO LEMUS, Carlos Julio, 2010).

Durante su fabricación, el transformador es diseñado siguiendo estrictos procesos para asegurar cumplir los estándares de calidad requeridos dando así un ciclo de vida útil aproximado entre 25 y 35 años. Industrialmente hablando, el desarrollo de las pruebas eléctricas a transformadores reparados se presenta como una marca de calidad para los procesos de reparación de transformadores; “Construcciones y Montajes Electroductama se define como una sociedad limitada orientada al sector eléctrico enfocándose en la reparación y mantenimiento de transformadores, el montaje y mantenimiento de subestaciones y mantenimiento en sitio de transformadores de potencia” (FLECHAS, Diana, 2015), estando certificada con el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico “CIDET” mediante los estándares 9001:2008, 14001:2004 y 18001:2007.

Debido al crecimiento de los requerimientos técnicos y las ventajas de la innovación nace la necesidad de implementar un proceso más tecnificado y automatizado para los ensayos ejecutados a transformadores, disminuyendo de esta manera los posibles errores humanos y aumentando la eficiencia de los procesos, por ello se plantea la necesidad del uso de un tablero de mando para ensayos que originalmente pueda aplicar los ensayos de tensión aplicada, tensión inducida, prueba de vacío y de cortocircuito a los transformadores que después de haber pasado por un proceso completo de mantenimiento requieran certificar su buen funcionamiento, para ello se predisponen para el caso de transformadores de distribución de dos transformadores elevadores de relaciones de transformación distinta, así como de un motor-generador que permita variar la frecuencia de la red para la ejecución de la prueba de tensión inducida, incluyendo dentro de este proceso la actualización de planos eléctricos, selección de elementos requeridos y estandarización de los procesos evitando fallas durante el desarrollo de cualquiera

de las pruebas, sin dejar de lado las protecciones que deben detener cualquier proceso en caso de presentarse sobre corrientes.

Durante el desarrollo de este proyecto se obtiene un banco que permite realizar las pruebas a los transformadores de una manera más sencilla disminuyendo el tiempo requerido anteriormente en conexión, reduciendo la posibilidad de errores por parte del usuario de acuerdo a los procedimientos nacionales e internacionales.

Desde el punto de vista académico generará una base práctica para la aplicación de los conocimientos adquiridos durante el desarrollo del programa académico de ingeniería electromecánica asimismo permitirá dar la oportunidad a que continúe siendo un problema de estudio a futuro que tenga como ente solucionador a los estudiantes de ingeniería electromecánica

Legalmente el capítulo 10.6 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE especifica que “En todas las instalaciones eléctricas, incluyendo las construidas con anterioridad a la entrada en vigencia del RETIE (mayo 1° de 2005), el propietario o tenedor de la instalación eléctrica debe verificar que ésta no presente alto riesgo o peligro inminente para la salud o la vida de las personas, animales o el medio ambiente” (RETIE, 2005) por lo que a pesar de que el tablero de control y el banco de pruebas haya sido diseñado en la década del 90 esto no lo exime de cumplir la norma actual vigente. Este proceso de actualización incluye la señalización de conductores, la equipotencialidad de las puestas a tierra y todos aquellos numerales que no fueron tenidos en cuenta en un principio.

CAPÍTULO 1. PRUEBAS ELÉCTRICAS A LOS TRANSFORMADORES

Las pruebas eléctricas son indicadores que comprueban las condiciones de reparación o fabricación del mismo, sin embargo no existe una manera de garantizar que el transformador funcione durante una cantidad de tiempo específica. Las pruebas eléctricas realizadas en fábrica se clasifican en “pruebas que nos determinan la calidad de fabricación del transformador, las pruebas que nos indican la calidad del servicio y las pruebas para verificar la calidad de operación del transformador”(PÉREZ, Pedro A., 2001).

En los siguientes subcapítulos se dan a conocer los diferentes tipos de pruebas realizables a transformadores para determinar la calidad de fabricación, para determinar la calidad del servicio y para determinar la calidad de operación del transformador.

1.1 PRUEBAS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE FABRICACIÓN DEL TRANSFORMADOR

Sirven para determinar la calidad de fabricación del transformador y verificar su funcionamiento en condiciones normales de operación o de falla como es el caso de descargas atmosféricas.

1.1.1 Resistencia de aislamiento La prueba de medición de resistencia de aislamiento utiliza un mega ohmímetro con el fin de inyectar una tensión en DC para así determinar el nivel de aislamiento que existe entre dos elementos. La prueba de resistencia de aislamiento se hace:

- Entre el devanado de AT y BT
- Entre el devanado de AT y tierra
- Entre el devanado de BT y Tierra

1.1.2 Rigidez dieléctrica del aceite Esta prueba da un indicador de la calidad del aceite como medio aislante, esta prueba se realiza mediante el uso de un chispómetro que consta de un transformador de tensión, un regulador de tensión, un voltímetro indicador, un interruptor y la copa estándar patrón de la prueba que es donde se alojan los electrodos(Cabra, 2004).

1.1.3 Relación de transformación y polaridad La medición de la relación sirve para determinar la relación del número de espiras presentes en el devanado primario y el secundario, además de comprobar que el intercambiador de taps funcione correctamente. La polaridad determina el desplazamiento angular en grados entre el vector de tensión línea a neutro en AT en comparación con el mismo vector en BT.

1.1.4 Resistencia óhmica de los devanados La resistencia de cada uno de los devanados permite determinar el estado de cada uno de los devanados; en el caso de transformadores trifásicos se compara el valor entre los 3 devanados tanto de AT como de BT con el fin de encontrar inconsistencias. Su principal objetivo es verificar que el transformador esté bien conectado y que además de ello no se presenten cortos entre espiras.

1.1.5 Potencial aplicado El principal objetivo de la prueba de potencial aplicado es la de verificar el buen estado del aislamiento del transformador, para ello aplica una tensión que depende del nivel de aislamiento del transformador durante un tiempo determinado. El principal indicador de un transformador en falla durante este proceso es un aumento muy grande de la corriente en la fuente sobre la que se está alimentando al transformador.

1.1.6 Potencial inducido Se considera como una prueba de complemento de la prueba de potencial aplicado ya que determina el aislamiento en las bobinas, para ello utiliza un grupo motor generador que le induce una tensión a una frecuencia mayor a la nominal del transformador.

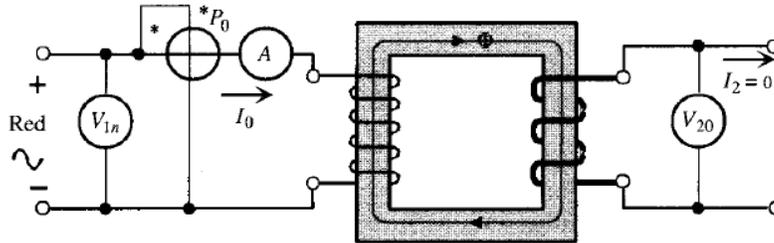
1.2 PRUEBAS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DEL SERVICIO

Permiten determinar la calidad del transformador y sus características en funcionamiento.

1.2.1 Pérdidas nominales en vacío Las pérdidas en vacío permiten determinar la impedancia de la rama del núcleo además de un valor en vatios. Para ejecutar esta prueba se aplica la tensión nominal por el lado de b. Las pérdidas en el cobre mediante esta conexión son casi nulas por el pequeño valor de la corriente. Al hacer una conexión como la mostrada en la figura 1 se obtiene el valor de la potencia perdida en el núcleo, este valor influye directamente sobre el rendimiento del transformador.

$$P_O = I_o V_{ln} \cos(\varphi_o) = P_{fe} \text{ (Ec. 1)}$$

Figura 1. Circuito ensayo circuito abierto

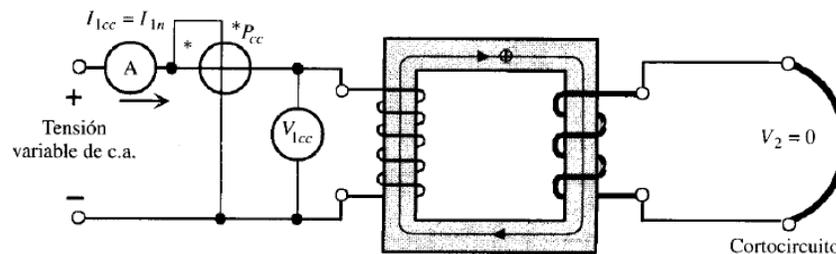


Fuente: Maquinas Eléctricas, MORA

Las pérdidas nominales son halladas al inyectar en cada una de las fuentes las tensiones o corrientes nominales de acuerdo a lo que se desea; en caso de que no se alcance el valor necesario para ejecutar una prueba se deben extrapolar los datos obtenidos.

1.2.2 Pérdidas Nominales en el Cobre Así como las pérdidas por circuito abierto permiten determinar potencia disipada en el núcleo el ensayo en cortocircuito permite determinar las pérdidas del cobre de cada uno de los devanados. Para determinar las pérdidas del transformador en su devanado se inyecta corriente en uno de los devanados hasta alcanzar su corriente nominal, usualmente se aplica esta prueba al devanado de alta tensión debido a que su corriente nominal es más pequeña. Es un indicador que permite verificar que se utilice alambre del calibre correspondiente. La figura 2 muestra el diagrama de conexión de la prueba junto con todos los elementos de medición.

Figura 2. Circuito ensayo cortocircuito



Fuente: Maquinas Eléctricas, MORA

$$P_{cc} = I_{ln} V_{cc} \cos(\varphi_{cc}) \text{ (Ec. 2)}$$

1.3 PRUEBAS PARA DETERMINAR LA CALIDAD DE OPERACIÓN DEL TRANSFORMADOR

1.3.1 Hermeticidad La humedad deteriora las propiedades aislantes del dieléctrico o de la fibra, es por ello que se hace un proceso de secado, sin embargo en caso de que el transformador no se encuentre correctamente sellado puede entrar humedad del ambiente; para comprobar que el transformador este totalmente sellado se introduce por el orificio de la válvula de sobrepresión un colchón de Nitrógeno, a través de un manómetro se verifica que el cambio de la presión no cambie con el paso del tiempo, en caso de que el resultado sea negativo se hace necesario desencubar y cambiar empaquetadura.

1.4 RENDIMIENTO DE UN TRANSFORMADOR

El rendimiento de cualquier maquina se da por la relación entre la potencia que lo alimenta y la potencia de salida; un transformador no es la excepción como ya se comprobó con los ensayos en cortocircuito y vacío, recapitulando las pérdidas que se presentan en un transformador como lo dice Chapman(Chapman, 2000) son:

- Pérdidas en el cobre
- Perdidas por histéresis
- Perdidas por Corrientes parasitas

La eficiencia de un transformador puede darse por la expresión de la ecuación 3.

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{OUT} + P_{perdidas}} * 100\%$$
$$\eta = \frac{V_S I_S \cos\theta}{P_{CU} + P_{nucleo} + V_S I_S \cos\theta} * 100\% \text{ (Ec. 3)}$$

Donde las pérdidas halladas anteriormente influyen directamente sobre el rendimiento del transformador.

CAPÍTULO 2. SOPORTE LEGAL

La reparación de transformadores está basada en las normas técnicas colombianas en primera pedida y después en las normas internacionales. Durante el desarrollo de este capítulo se encontrarán los diferentes entes reguladores para la ejecución de pruebas eléctricas a transformadores, sus procedimientos y valores objetivo donde se incluyen apartes de las normas mayormente relacionadas con el desarrollo del presente proyecto incluyendo los datos límites para la ejecución de las mismas.

2.1 ENTES REGULADORES

En Colombia el ente encargado de los estándares de pruebas, mantenimientos y protocolos aplicados a transformadores es el ICONTEC (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación) que es una organización privada y esta responsabilizada de la normalización y la metrología en todo el país, a su vez hace parte de otros grupos internacionales como lo son ISO (International Organization for Standardization) o IEC (International Electrotechnical Commision).

A nivel internacional la normatividad a tratar es un poco más amplia, sin embargo existen estándares que se consideran universales o de algunos países específicos; a continuación se determinarán las normas IEC, IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), ANSI (Instituto Nacional Estadounidense de Estándares) y ASTM (Asociación Internacional para el Ensayo y Materiales)

2.2 NORMATIVIDAD COLOMBIANA A ENSAYOS APLICADOS A TRANSFORMADORES REPARADOS

2.2.1 Generalidades Las Normas Técnicas Colombianas tienen un aparte referido a los campos de pruebas, los ensayos realizados a transformadores reparados y sus valores de calificación; estas normas se encuentran referidas a continuación en la tabla 2 referida a normas colombianas para ensayos a transformadores.

Un laboratorio de pruebas tiene como responsabilidad realizar sus actividades de ensayo y calibración de modo que cumplan con la norma NTC 17025 y se satisfagan las necesidades de los clientes, autoridades reglamentarias u organizaciones que otorgan reconocimiento (ICONTEC, 2005, p. 17025).

La norma NTC 2743 indica que “Todo campo de prueba ya sea de un fabricante, un reparador o un reconstructor de transformadores, clasificado dentro de alguna de las categorías definidas en la Clasificación de campos de prueba, descripción de equipos mínimos requeridos y ensayos mínimos realizables en el campo de prueba., debe cumplir todos los requisitos contemplados en esta norma” y “Todo transformador fabricado, reparado, reconstruido y clasificado por categorías de serie de tensión y potencia, debe ser ensayado en el campo de prueba correspondiente de acuerdo con la Clasificación de campos de prueba, descripción de equipos mínimos requeridos y ensayos mínimos realizables en el campo de prueba.”(ICONTEC, 1997b).

Tabla 1. Normas colombianas para ensayos a transformadores

NORMA	TEMÁTICA
NTC 317	Electrotecnia. Transformadores de Potencia y Distribución. Terminología
NTC 380	Transformadores Eléctricos. Ensayos Eléctricos. Generalidades
NTC 818	Transformadores. Transformadores Monofásicos. Autor refrigerado y Sumergido en Líquido. Corriente sin Carga, Pérdidas y Tensión de Cortocircuito.
NTC 819	Transformadores. Transformadores Trifásicos. Autor refrigerado y Sumergido en Líquido. Corriente sin Carga, Pérdidas y Tensión de Cortocircuito.
NTC 837	Transformadores. Ensayo del Dieléctrico
NTC 1057	Electrotecnia. Transformadores. Valores Nominales de las Potencias Aparentes
NTC 1954	Electrotecnia. Transformadores Reconstruidos y Reparados. Requisitos
NTC 2743	Electrotecnia. Campos de Prueba para Transformadores. Requisitos Mínimos y Clasificación

Fuente: El Autor

De acuerdo a la tabla 3 para ensayos a transformadores de distribución se debe contar con un laboratorio tipo IV. De la misma manera, los transformadores de corriente TCs y transformadores de potencial TPs deben tener una precisión de por lo menos el 0,5 %, dato que debe ser corroborado con la tabla 3 referido a la verificación de estado de los elementos de medida. El laboratorio de pruebas de C.M.E. cumple con la normatividad de ensayos a realizarse a transformadores con potencia menor a 1250 kVA siendo ellos los ensayos de tensión aplicada, tensión inducida y pérdidas en cortocircuito y vacío.

Tabla 2. Clasificación de campos de prueba, descripción de equipos mínimos requeridos y ensayos mínimos realizables en el campo de prueba.

ENSAYO Y CARACTERÍSTICAS		CAT IV - POT \leq 1 250 kVA y/o U \leq 15 kV
Exactitud	Relación de Transformación	0,1
	Pérdidas	0,5
	Tensión Aplicada o Inducida	3
	Resistencia de Devanados	2
	Transformadores de Corriente	$15 \geq U$ 0,3 $15 < U$ 0,5
	Transformadores de Tensión	$15 \geq U$ 0,3 $15 < U$ 0,5

Fuente: NTC 2743

2.2.2. Pruebas para determinar la calidad del transformador de distribución

Con el fin de verificar el aislamiento de la bobina bajo ensayo a tierra y contra otros devanados se aplica un ensayo de tensión aplicada y con el objeto de verificar el aislamiento a lo largo de todo el devanado bajo ensayo y entre fases se aplica un ensayo de sobretensión inducida (ICONTEC, 1998a).

Tabla 3. Interrelaciones entre los niveles de aislamiento dieléctrico para transformadores sumergidos en aceite con NBA 350 kV y menores

Aplicación	Tensión nominal del sistema, Us kV eficaces	Nivel de tensión de aislamiento para baja frecuencia, kV eficaces	Niveles de aislamiento de impulso	
			Onda completa	Onda recortada
			kV cresta	kV cresta
Distribución	$\leq 1,2$	10	30	30
	2,5	15	45	45
	4,4; 5,0	19	60	60
	7,2; 8,7	26	75	75
	11,4; 13,2; 13,8; 15	34	95	95

Fuente: NTC 836

Como lo indica el numeral 5.1 de la NTC 837 (ICONTEC, 1997a, p. 837) "la prueba de tensión aplicada deber realizarse con una fuente de tensión alterna monofásica con una forma de onda tan próxima a la sinusoidal y de frecuencia no menor que el 80% de la frecuencia nominal; este ensayo se inicia con una tensión no mayor que 1/3 de la tensión de ensayo dado en la tabla en el campo de aislamiento de baja frecuencia y se aumenta hasta alcanzar el valor apropiado donde se aplica sucesivamente durante 60 s para luego reducirla rápidamente a menos de la tercera

parte de su valor completo antes de desconectarla”. Debido a que los intercambiadores de taps de los transformadores de distribución no presentan un cambio en su relación mayor al 5 % el ensayo se aplica en su posición nominal.

De la misma manera la prueba de tensión inducida de acuerdo a la norma NTC 837(ICONTEC, 1997a, p. 837) “consiste en aplicar a los terminales de baja o de alta tensión del transformador bajo ensayo una tensión alterna de forma tan próxima a la sinusoidal como sea posible y una frecuencia incrementada sobre la nominal en un valor apropiado a un nivel de tensión determinado por la tabla 5”. Al igual que el ensayo a tensión aplicada debe iniciarse a una tensión no mayor que un tercio del valor de ensayo, aumentándola tan rápidamente como lo permita el instrumento de medida. Al final del ensayo, la tensión debe reducirse rápidamente a menos de un tercio del valor de ensayo antes de efectuar la desconexión.

La duración del ensayo será de 60 s para cualquier frecuencia de ensayo menor o igual al doble de la frecuencia nominal. Cuando la frecuencia de ensayo excede al doble de la frecuencia nominal, la duración del ensayo en segundos será ciento veinte veces el cociente de dividir la frecuencia nominal por la frecuencia de ensayo o bien 15 s, escogiendo siempre la que resulte mayor.

2.2.3 Pruebas para determinar la calidad del servicio del transformador de distribución El procedimiento para determinar la calidad del servicio del transformador se encuentra presente en la norma NTC 818(ICONTEC, 1995a, p. 818) y NTC 819(ICONTEC, 1995b, p. 819) para transformadores monofásicos y trifásicos respectivamente nuevos de acuerdo al numeral 6.1.2 del presente documento; sin embargo la norma NTC 1954 amplía estos resultados para transformadores reparados. Los transformadores reparados antes de 1996 deben regirse de las tablas 4 y 5, mientras que los transformadores reparados después de ese año deben basarse en los valores obtenidos de las siguientes formulas:

$$P_o \text{ (a } 85 \text{ }^\circ\text{C)} = (P_o \text{ original}) + 14 \% \text{ (Ec.4)}$$

$$P_c \text{ (a } 85 \text{ }^\circ\text{C)} = P_c \text{ (original)} + 7,5 \% \text{ (Ec.5)}$$

$$I_o = I_o \text{ (original)} + 25 \% \text{ (Ec.6)}$$

$$U_z = U_z \text{ (original)} \pm 15 \% \text{ (Ec.7)}$$

Para facilitar la labor de ejecución de pruebas en campo las tablas 4 y 5 también contienen la información referente a los transformadores construidos después de 1996.

Tabla 4. Transformadores reparados parcial o totalmente, monofásicos sumergidos en aceite serie 15 / 1,2 kV

Potencia nominal kVA	Antes de 1996				Después de 1996			
	Po (W)	Pc (W)	Io (% In)	Uz (%)	Po (W)	Pc (W)	Io (% In)	Uz (%)
5	40	110	3,5	3,15	34	97	3,1	±3,45
10	69	165	3,3	3,15	57	151	3,1	±3,45
15	98	225	3,3	3,15	80	210	3,0	±3,45
25	144	345	2,8	3,15	114	312	2,5	±3,45
37,5	190	490	2,8	3,15	154	435	2,5	±3,45
50	230	620	2,8	3,15	182	548	2,4	±3,45
75	293	890	2,1	3,15	239	763	2,1	±3,45
100	379	1 165	2,1	3,15	296	968	2,0	±3,45
167,5	483	1 660	2,1	3,15	428	1467	1,9	±3,45

Fuente: NTC 1954

Tabla 5. Transformadores reparados parcial o totalmente, trifásicos sumergidos en aceite serie 15 / 1,2 kV

Potencia nominal kVA	Antes de 1996				Después de 1996			
	Po (W)	Pc (W)	Io (% In)	Uz (%)	Po (W)	Pc (W)	Io (% In)	Uz (%)
15	110	385	5,9	3,3	91	333	5,5	±3,5
30	185	620	4,7	3,3	154	554	4,5	±3,5
45	245	860	4,7	3,3	205	763	4,4	±3,5
75	355	1 330	4	3,8	302	1172	3,8	±4,0
112,5	490	1 920	3,7	3,8	416	1656	3,3	±4,0
150	600	2 500	3,5	4,4	513	2107	3,0	±4,6
225	815	3 680	2,9	4,4	701	3107	2,6	±4,6
300	975	4 860	2,7	5	872	3843	2,5	±5,2
400	1 190	6 000	2,3	5	1060	5085	2,4	±5,2
500	1 395	7 500	2,3	5,5	1243	6214	2,1	±5,8
630	1 630	9 000	2,3	5,5	1465	7676	2,0	±5,8
750	1 780	11 000	2,3	5,5	1653	9009	2,0	±5,8
800	1 930	11 500	2,3	5,5	1733	9568	2,0	±5,8
1 000	2 265	14 000	2,3	5,5	2029	11933	2,0	±5,8
1 250	2 645	16 800	1,7	6,6	2383	14513	1,9	±6,9

Fuente: NTC 1954

Cada uno de los datos obtenidos debe diligenciarse en el formato de protocolo de pruebas dado por la norma NTC 1358. “A todo transformador reconstruido o reparado deben efectuársele los ensayos de rutina descritos en la NTC 380, teniendo en cuenta que los ensayos de aislamiento deben efectuarse con un nivel de tensión del 75 % para los transformadores reparados parcialmente y del 100 % para los reparados totalmente y reconstruidos”(ICONTEC, 1996).

2.3 NORMATIVIDAD INTERNACIONAL A TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Análoga a la tabla 1 acerca de la normatividad colombiana a transformadores de distribución, la tabla 6 enuncia las normas de diferentes países aplicados al mismo tema, lo que soporta el desarrollo de los procesos desarrollados dentro de la reparación de los transformadores.

Tabla 6. Norma técnica internacional a transformadores de distribución

ENTE	NORMA	DESCRIPCIÓN
IEC (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION)	IEC 60076-1 – Ed. 2.1 (2000-04):	“Power transformers – Part 1: General”
	IEC 60076-2 – Ed. 2.0 (1993-04):	“Power transformers – Part 2: Temperature rise
	IEC 60076-3 – Ed. 2.0 (2000-03):	“Power transformers – Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air”
	IEC 60076-7 – Ed. 1.0 (2005-12):	“Power transformers – Part 7: Loading guide for oilimmersed power transformers”
IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)	Norma Técnica IEEE Std C57.13-1993 (Revisión de norma IEEE Std C57.13- 1978)	IEEE Standard Requirements for Instrument Transformers
	IEEE Std C57.12.00-1993	IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers
	IEEE Std C57.12.90-1993	IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power and Regulating Transformers and IEEE Guide for Short-Circuit Testing of Distribution and Power Transformers
	IEEE Std 100-1992	The New IEEE Standards Dictionary of Electrical and Electronics Terms

Fuente: El Autor

CAPÍTULO 3. MARCO REFERENCIAL

El campo de pruebas de CME es un banco de constituido por un circuito de control concentrado en un tablero de mando que contienen los diferentes accionamientos necesarios para la ejecución de las pruebas junto con un circuito de medición y otro de señalización visual y por otro lado la parte de potencia que es controlada por el banco y contiene a los transformadores, variacs y el grupo motor-generador. El campo de pruebas puede realizar las siguientes pruebas:

- Tensión Aplicada
- Tensión Inducida
- Ensayo de Cortocircuito
- Ensayo de Circuito Abierto

A continuación se enuncian las diferentes partes del campo de pruebas así como las pruebas que se pueden ejecutar dentro del mismo y el procedimiento necesario para realizarlas.

3.1 PARTES DEL CAMPO DE PRUEBAS

A continuación se describen cada uno de los elementos presentes en él de acuerdo al manual técnico presente en el proceso técnico (BURBANO, José, 2006b)

3.1.1 Grupo motor generador Con el objetivo de hacer la prueba de tensión inducida se utiliza un grupo motor generador de las siguientes características:

Tabla 7. Grupo motor generador

Máquina	CARACTERÍSTICAS					
	Fases	Potencia (kW)	Un	In	Frecuencia	Marca
Motor	3	16	220/120		60	PILLER
Generador	3		220/120	60	409	

Fuente: SGI Electroditama

3.1.2 Variadores de tensión El campo de pruebas puede realizar ensayos a transformadores tanto trifásicos como monofásicos es por ello que se tienen dos reguladores dependiendo el caso, ese cambio de conexión se hace manualmente, la tabla 8 indica las características de cada uno de los elementos utilizados.

Tabla 8. Regulador de tensión

Características	Regulador trifásico	Regulador monofásico
Potencia nominal (kVA)	50	3.3
Rango de tensión	10-220	0-220 v
Corriente máxima	134	15
Fases	3	1
Tipo de accionamiento	Servomotor	Manual
Marca		Yamabishi electric

Fuente: SGI Electroduitama

El regulador monofásico se encuentra al lado del tablero de mando y su modo de operación es manual, el regulador trifásico se encuentra operado mediante un servomotor y su control se ubica en el tablero de mando, sin embargo el control para evitar descarrilamientos se hace visualmente.

3.1.3 Transformadores Existen tres transformadores utilizados para ejecutar cada una de las pruebas, uno elevador y otro intermedio; la tabla 9 muestra las características técnicas de cada uno de ellos. Adicional a ellos hay que contar con los elementos necesarios para la conexión.

Los transformadores tienen como particularidad que fueron fabricados en las instalaciones de C.M.E.

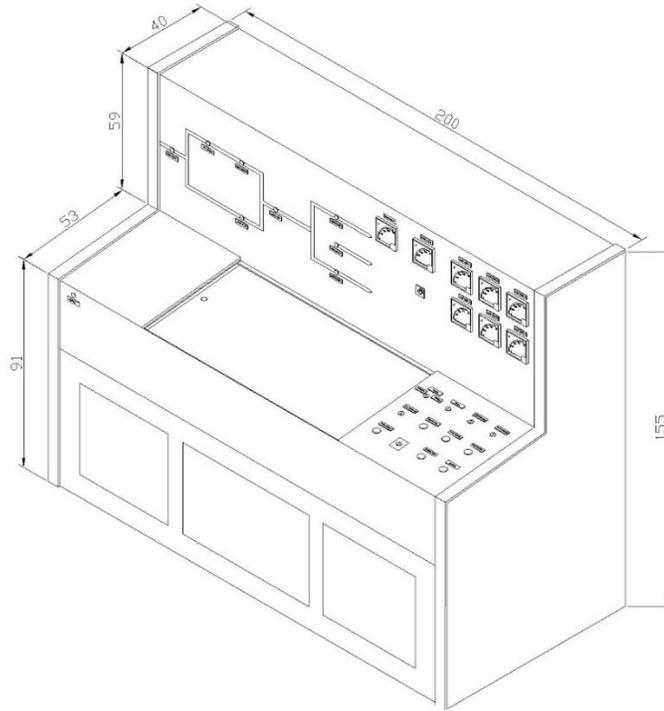
Tabla 9. Transformadores

Características	Transformador intermedio, elevador monofásico	Transformador intermedio, elevador trifásico	Transformador elevador para tensión aplicada
Potencia (kVA)	5	30	30
Tensión AT/BT (V)	440/214	440/214	74000/220
Corriente AT/BT (A)	11,36/22,72	98.41/202.34	0.42/136.36
Fases	1	3	1
Marca	Propia Fabricación	Propia fabricación	Propia Fabricación

Fuente: SGI Electroduitama

3.1.4 Tablero de mando El tablero de mando es la interfaz utilizada por la persona que ejecuta las diferentes pruebas, en él se encuentra todo del circuito de control, el circuito de señalización y el circuito de medición de cada una de las variables.

Figura 3. Tablero de mando

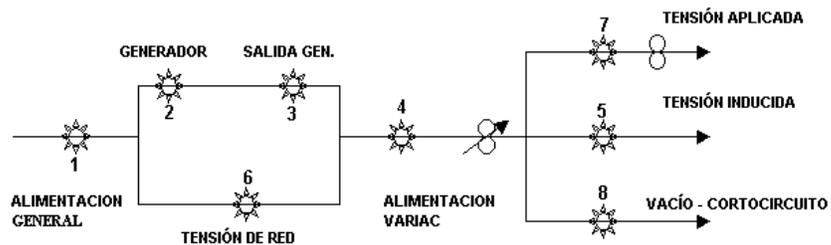


Fuente: SGI Electroditama (Ver Anexo A)

3.2 FUNCIONAMIENTO DEL TABLERO DE MANDO

3.2.1 Señalización En la figura 4 que aparece a continuación, se visualiza con un mímico y por medio de señales luminosas el avance en la energización de los equipos así:

Figura 4. Circuito de Señalización



Fuente: SGI Electroditama

1 – Esta señal aparece marcada en el tablero como “*Alimentación general*”. Se activa al conectarse la acometida general del laboratorio de pruebas.

2 – Esta luz piloto se encenderá cuando se energiza el motor del grupo motor-generador empleado para prueba de tensión inducida. En el tablero está marcada como “*Alimentación Generador*”.

3 - Este piloto se encenderá cuando se energice la salida del generador para iniciar la prueba de tensión inducida. Cabe anotar que genera a 220 voltios y 420 Hz y con esta señal alimenta el variac que a su vez alimentará al transformador intermedio elevador. En el tablero se encuentra marcado como “*Salida generador*”.

4 – Este piloto se encenderá cuando se dé alimentación a alguno de los reguladores de voltaje (Variacs). Se encuentra marcado en el tablero como “*Alimentación variac*”.

5 – Este piloto se encenderá cuando se energicen las puntas de prueba para tensión inducida. En el tablero se encuentra marcado como “*Tensión inducida*”.

6 – Este piloto se encenderá cuando no se utilice el grupo motor-generador, sino alimentación directa de la red.

7 – Este piloto se encenderá cuando se dé salida al transformador elevador de tensión aplicada y únicamente cuando se vaya a realizar esta prueba. Se encuentra marcado, en el tablero, como “*Tensión aplicada*”.

8 – Este piloto se encenderá cuando se vayan a realizar las pruebas para medición de pérdidas en vacío o de pérdidas con carga (cortocircuito). En el tablero se encuentra marcado como “*Corto circuito, Prueba de vacío*”.

3.2.2 Medición A la derecha del área descrita, se encuentra una serie de instrumentos de medida y selectores que se emplean para el monitoreo grueso de las señales de tensión y de corriente utilizadas en las diferentes pruebas; estos instrumentos y accesorios de monitoreo se identificarán con una letra y un número que indicarán si es un voltímetro, o un selector, así:

V1 – Voltímetro digital Fluke 81760111. Este voltímetro mide la tensión que se está aplicando al transformador elevador, de tensión aplicada, por el lado de baja tensión. La tensión leída en este, debe multiplicarse por la relación del transformador de tensión aplicada (327.27) para obtener la tensión que se está

aplicando al transformador bajo prueba durante el ensayo de tensión aplicada. En el tablero se encuentra identificado como “*Tensión aplicada*”.

V2 – Voltímetro clase 1.5, rango 0 a 300 voltios. Este voltímetro indica el nivel de tensión presente en la línea de alimentación. En el tablero se identifica con el nombre de “*Tensión de línea*”.

V3, V4, V5 – Voltímetros clase 1.5, rango de medida 0 a 600 voltios. Estos voltímetros indican el nivel de tensión a la salida de los reguladores de voltaje (variacs). En el tablero se encuentran identificados como “**Salida variac L1**”, “**Salida variac L2**”, y “**Salida variac L3**”, respectivamente.

S1 – Selector de cuatro posiciones marcadas como **0, RS, ST, RT**. Este selector permite seleccionar las líneas de donde se tomará la tensión leída en **V2**.

3.2.3 Mando En la parte horizontal del pupitre de mando se encuentra de izquierda a derecha, un alojamiento para todos los instrumentos empleados en la medición de los parámetros eléctricos del transformador bajo prueba, a continuación se encuentra la descripción de funciones de cada uno de ellos:

I1: Este es un selector. Da la entrada general de la red, girado a la izquierda apaga la alimentación general. Girado a la derecha en posición vertical da entrada a la alimentación de la red. En el tablero se encuentra identificado como “*General*”

I2: Este selector se encuentra identificado en el tablero como “*Alimentación generador*”. Da entrada para energizar y arrancar el grupo motor-generador para la prueba de tensión inducida. Girado a la izquierda apaga el grupo, girado a la derecha en posición vertical arranca el grupo motor-generador.

I3: Este interruptor se encuentra identificado en el tablero como “*Salida generador*”. Girado a la izquierda, está apagado. Girado a la derecha, en posición vertical, da la salida de tensión del generador al variac N° 1.

I4: Este interruptor, se encuentra identificado en el tablero como “*Alimentación Variac*”, Girado a la izquierda, está apagado. Girado a la derecha en posición vertical energiza al regulador de voltaje o variac.

I5: Este interruptor da la entrada de alimentación directamente desde la red al variac. En el tablero se encuentra identificado como “*Alimentación de red*”.

H1: Es un pulsador que controla la salida al transformador de tensión aplicada y debe permanecer oprimido mientras se desarrolla la prueba, si se suelta se suspende la misma; se encuentra identificado como “Tensión aplicada”.

H2: Este es un pulsador. Controla la salida del variac al transformador bajo prueba, durante el ensayo de tensión inducida. Debe permanecer oprimido durante el desarrollo de la prueba. Si se suelta, se suspende la misma. En el tablero se encuentra identificado como “*Tensión inducida*”.

H3: Este pulsador sirve para incrementar o disminuir la tensión que se está aplicando con el variac. En el tablero se encuentra identificado como “*Variac*”.

H4: Este pulsador da entrada a los transformadores de medida que a su vez dan señal al analizador digital de potencia, los cuales son empleados para la medida de pérdidas sin carga, corrientes de excitación, pérdidas con carga (en el cobre) y tensión de cortocircuito. El interruptor debe permanecer oprimido mientras se toman las lecturas de los instrumentos. El interruptor se encuentra identificado en el tablero como “*Instrumentos de medida Cortocircuito – Prueba de vacío*”.

M1: Este es un selector que permite elegir el sentido de variación del regulador de voltaje N°1. Donde Cuando está en el número 1 (izquierda) el regulador aumenta tensión, cuando está en la posición 3 (derecha) disminuye la tensión, esto es a medida que se pulsa el “**H3**”. En la posición “0”, está neutro.

E1, E2: Estos dos interruptores son de emergencia, al ser pulsados, desconectan todo el campo de prueba. Se operan cuando se presente cualquier inconveniente durante el desarrollo de las pruebas. Es indiferente cuál de los dos se acciona, el resultado es el mismo: desconexión total del campo de prueba.

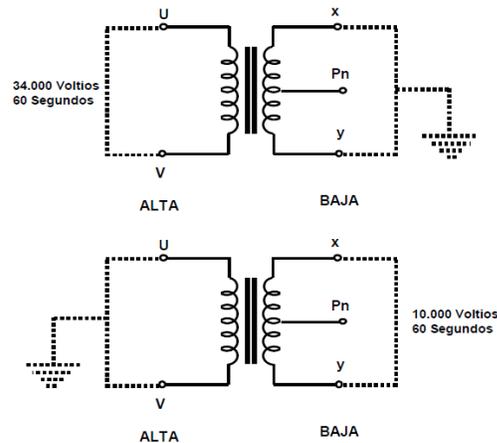
3.3 ENSAYO DE TENSIÓN APLICADA

El ensayo de tensión aplicada es un ensayo que permite determinar el estado del aislamiento entre devanados, aislamiento entre devanados y tierra y aislamiento entre salidas (partes vivas) y tierra (BURBANO, José, 2006a). Es una prueba calificada entre pasa o no pasa, las condiciones que indican una falla son:

- Ruido interno o descargas dentro del transformador.
- Aumentos o disminuciones bruscas de la corriente
- Flameos, descargas internas o por los aisladores hacia la cuba

Para ejecutar la prueba ya sea para transformadores monofásicos o trifásicos se siguen las figuras 6 y 8 con la particularidad de que tanto los devanados de alta tensión como los de baja son cortocircuitos para aplicarle sobre uno de ellos un potencial determinado mientras el otro está cortocircuitado y puesto a tierra.

Figura 5. Ensayo tensión aplicada transformador monofásico



Fuente: SGI Electroductama

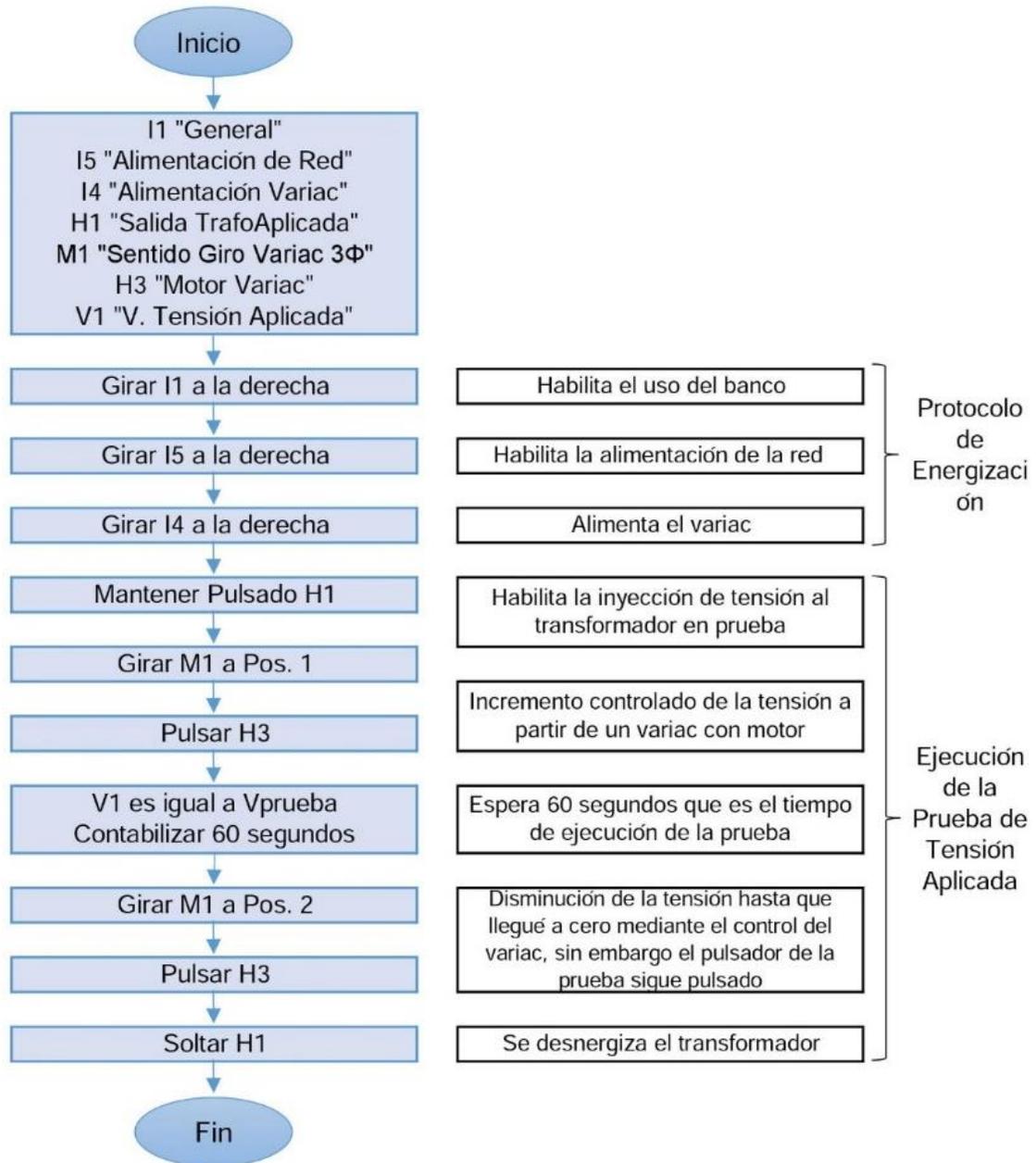
El procedimiento para ejecutar la prueba visto como un diagrama de proceso consta en aplicar una tensión de 10000 V por el lado de baja tensión o 34000 V por el lado de alta tensión, para ello se cortocircuita el lado opuesto al que se aplicará la tensión de prueba con la tierra, luego se incrementa la tensión progresivamente hasta alcanzar la tensión deseada, luego se espera un tiempo de 60 segundos y se verifica que durante este periodo de tiempo no se presente ninguna anomalía para luego volver a disminuir la tensión progresivamente hasta llegar a cero.

La figura 6 muestra el flujograma de proceso requerido para ejecutar la prueba de tensión aplicada, sin embargo es necesario recordar que se utiliza el transformador elevador de la tabla 4 de relación 72000/220, y como la medición se hace en el lado de BT del transformador es posible observar que para obtener los valores de 34000 y 10000 V, nuestra medición hecha con el V1 debe ser igual a:

$$V_{V1} = \frac{220}{74000} * 34000 = 101 \text{ V (Ec. 8)}$$

$$V_{V2} = \frac{220}{74000} * 10000 = 30 \text{ V (Ec. 9)}$$

Figura 6. Flujograma proceso tensión aplicada

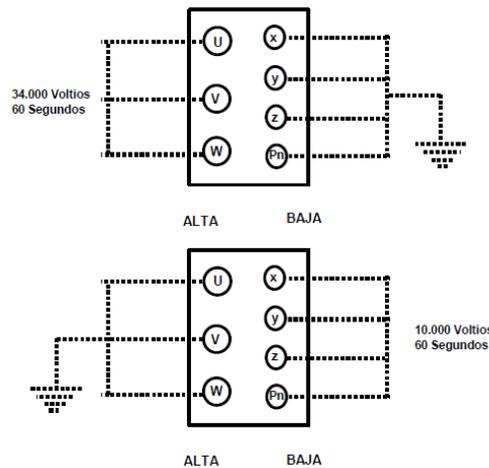


Fuente: El Autor

Así mismo el pulsador de tensión aplicada cumple la función de energizar con el voltaje de prueba al transformador; este voltaje inicia desde cero hasta que alcanza

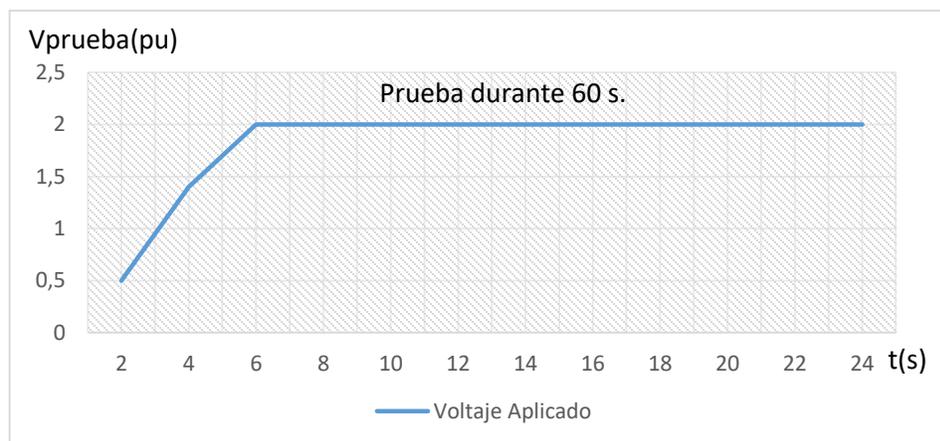
el valor de prueba donde se mantiene por un período de tiempo para luego descender otra vez a cero, durante todo este tiempo se debe mantener pulsado para evitar que el fluido eléctrico que circula por la bobina pase a cero en un período de tiempo muy corto; este proceso del cambio del voltaje se puede mejor mostrado en la figura 7. En caso de que durante el desarrollo de la prueba se produzca una falla debe terminarse la prueba con el mismo protocolo de desenergización antes dado; la única manera de se corte el flujo de energía abruptamente sobre el transformador en prueba es una falla en el servicio de distribución de energía.

Figura 7. Ensayo tensión aplicada transformador trifásico



Fuente: SGI Electroditama

Figura 8. Voltaje durante prueba de tensión aplicada

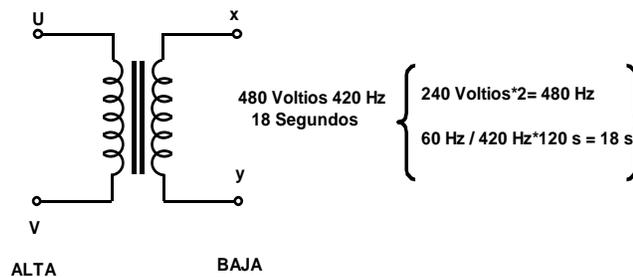


Fuente: El Autor

3.4 ENSAYO DE TENSIÓN INDUCIDA

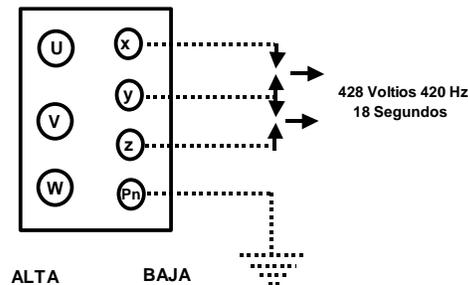
El objetivo de esta prueba es verificar el estado del aislamiento entre espiras, entre capas y entre fases. Consiste en aplicar a los terminales de baja tensión una tensión alterna igual a no menos del doble de la tensión nominal de trabajo a una frecuencia mayor a la nominal en un tiempo determinado para evitar que la corriente de excitación sea excesiva. Las figuras 9 y 10 indican el montaje a hacerse para transformadores monofásicos y trifásicos

Figura 9. Ensayo de tensión inducida a transformador monofásico



Fuente: SGI Electroduitama

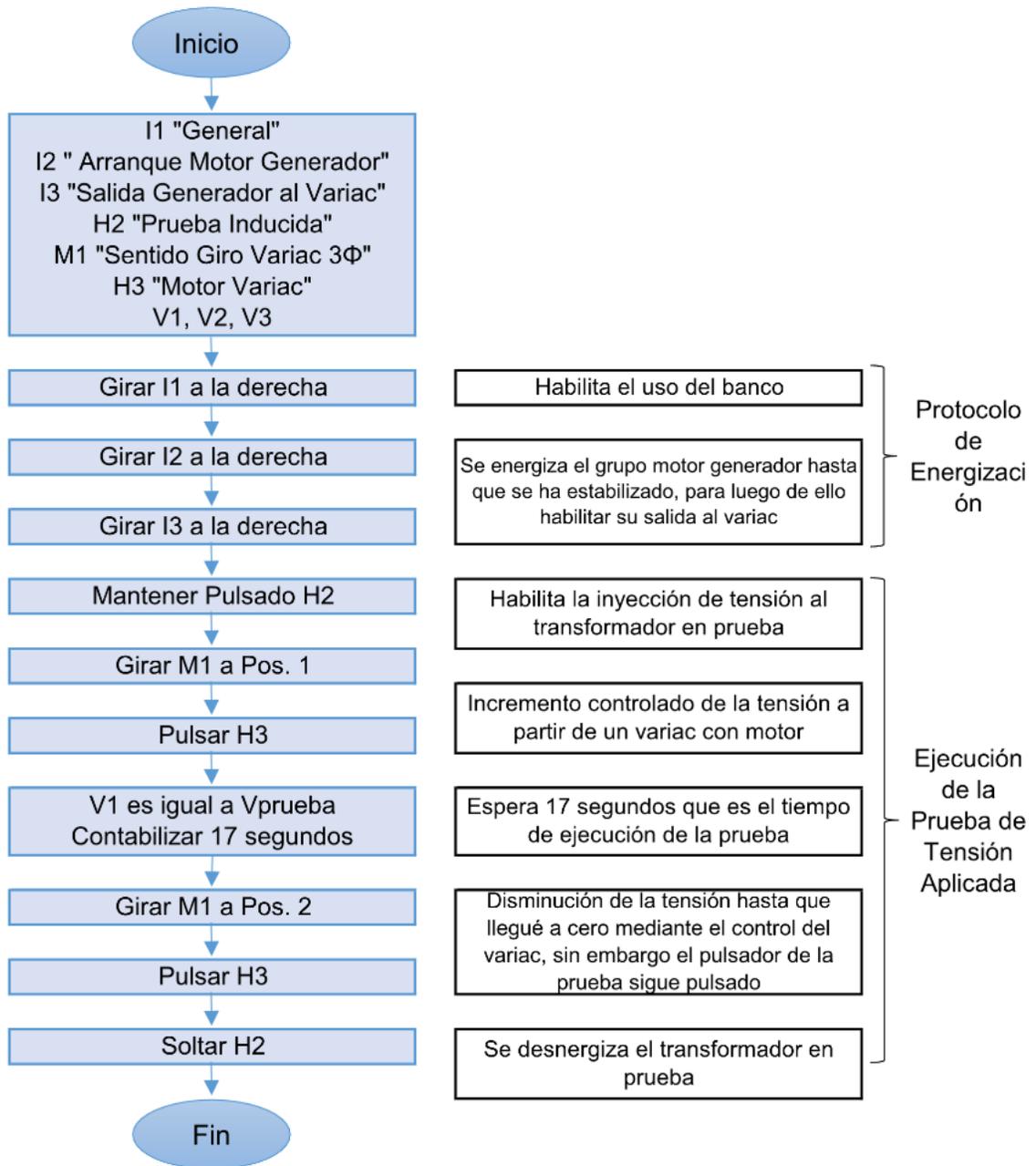
Figura 10. Ensayo de tensión inducida a transformador trifásico



Fuente: SGI Electroduitama

La figura 10 indica la relación que debe tenerse entre el tiempo y la frecuencia dada por la fuente, que para el caso de C.M.E. es un grupo motor generador descrito en la tabla 3 a frecuencia de 420 Hz, por lo que la prueba tardará 17 segundos. En principio la prueba de tensión inducida es idéntica a la prueba de vacío con la diferencia de frecuencia presente; debido a que obtener el nivel de tensión para ejecutar la prueba por AT a una frecuencia de por lo menos dos veces la nominal es demasiado engorroso la prueba se aplica por el devanado de BT.

Figura 11. Ensayo de tensión inducida

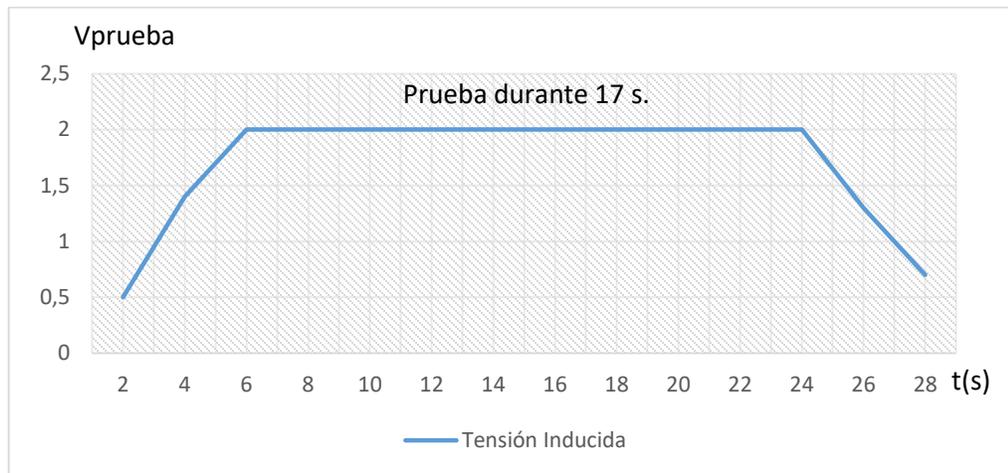


Fuente: El Autor

Las fallas en la prueba de tensión inducida se deben a mal aislamiento entre los devanados de AT y BT; al igual que en la prueba de tensión aplicada cuando se

presenta una falla se incrementa la corriente súbitamente (medida mediante amperímetros analógicos) además de presentarse un zumbido.

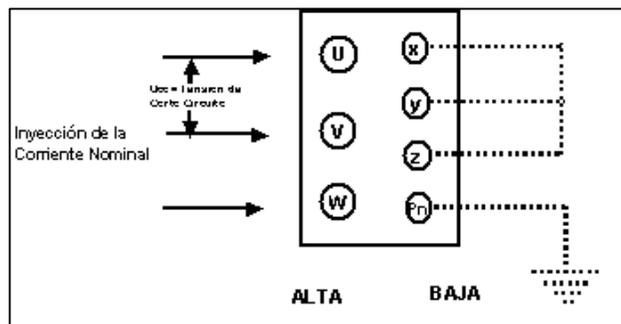
Figura 12. Voltaje durante prueba de tensión inducida



Fuente: El Autor

3.5 ENSAYO DE CORTOCIRCUITO

Figura 13. Circuito prueba de cortocircuito

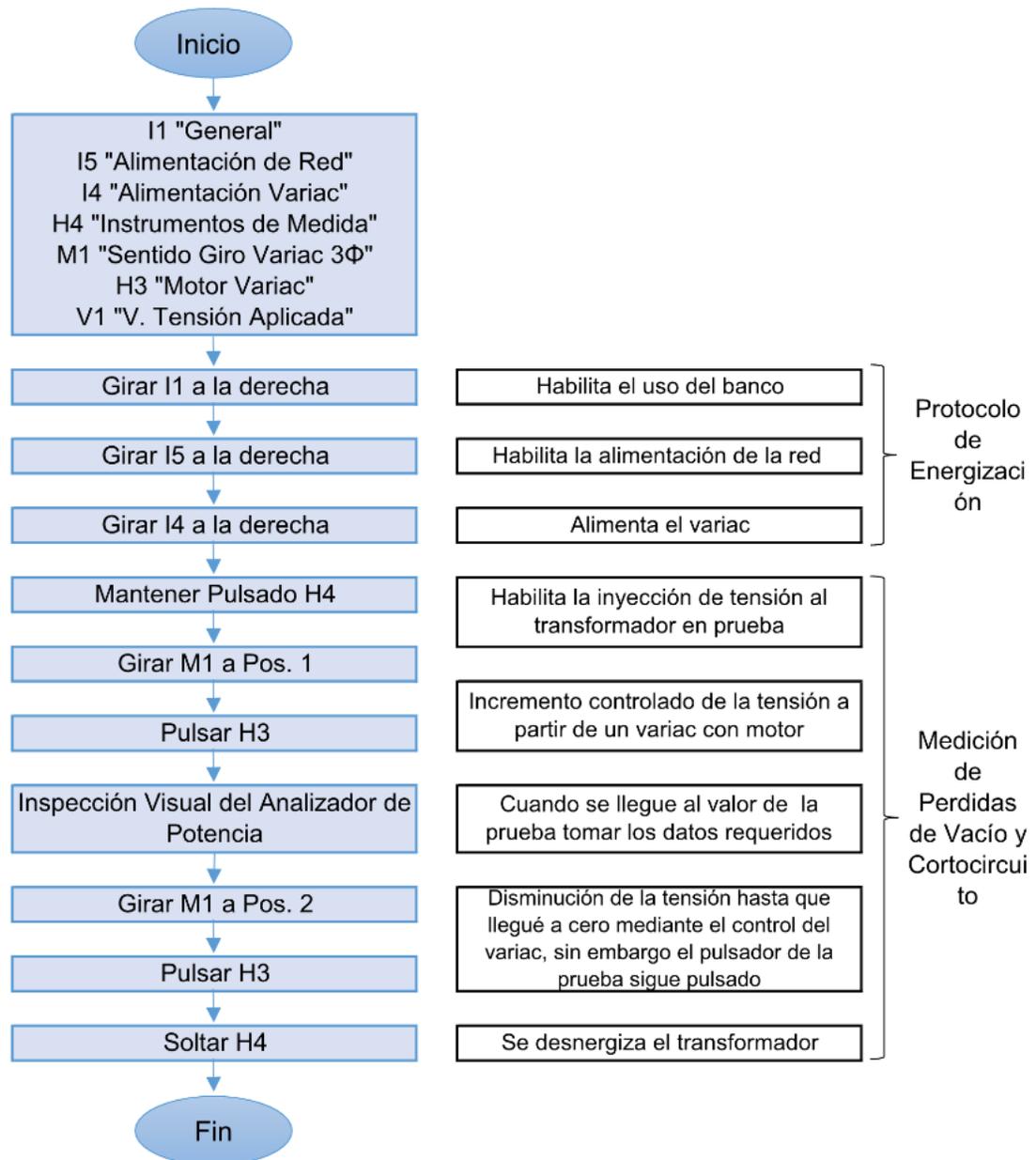


Fuente: SGI Electroductama

El ensayo de cortocircuito se realiza cortocircuitando el devanado de baja tensión e inyectando corriente por el devanado de alta tensión hasta conseguir su valor nominal, en caso de que los elementos no lo permitan puede aplicarse por lo menos un 25% de la carga (BURBANO, José, 2006). El ensayo de cortocircuito arroja el

Voltaje de cortocircuito y las pérdidas del cobre, estos datos son adquiridos por visualización mediante el uso de un Analizador de Potencia. La figura 13 indica los esquemas de conexión para realizar los ensayos.

Figura 14. Ensayo de cortocircuito y circuito abierto



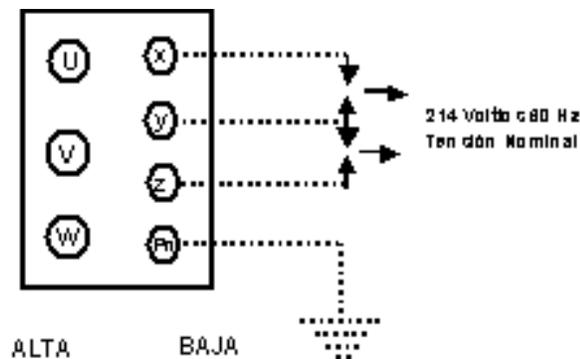
Fuente: SGI Electroditama

La figura 14 indica el modo de operación del banco de pruebas para el ensayo de cortocircuito, sin embargo como en el caso del ensayo en vacío se utiliza un principio de funcionamiento idéntico, se usa el mismo pulsador. Esta prueba es instantánea puesto que solamente necesita determinar valores de medición, sin embargo permite determinar si existe un cortocircuito dentro del transformador cuando su corriente es muy elevada o tiene como resultado un circuito abierto cuando se presenta alguna falla en las espiras del devanado.

3.6 ENSAYO DE VACÍO

El ensayo en vacío tiene como fin determinar las pérdidas en el núcleo lo que nos da una idea del tiempo de vida útil o si es posible o no realizar reparaciones a un transformador, su funcionamiento consiste en aumentar la tensión hasta que alcance su valor nominal mientras que por el otro lado el circuito se deja abierto. Respecto a su control desde el campo de pruebas se opera como lo muestra la figura 15. La figura 16 indica la conexión de la prueba para un transformador trifásico.

Figura 15. Ensayo de vacío



Fuente: SGI Electroditama

El ensayo de vacío se hace alimentando a la tensión nominal del transformador por el devanado de baja tensión debido a que se hace más sencillo obtener este nivel de tensión. En caso de que no se pueda alimentar el transformador a la tensión nominal sino solo a un porcentaje del mismo se debe hacer una extrapolación.

CAPÍTULO 4. ESTADO INICIAL DE CAMPO DE PRUEBAS DE C.M.E.

C.M.E. es una empresa con más de 25 años de servicio en el sector eléctrico; de acuerdo al CIDET la empresa está capacitada para hacer mantenimiento a transformadores de hasta 30 MVA, en lo que respecta a transformadores de distribución la empresa ha ejecutado contratos con las empresas energéticas de Boyacá, Casanare, Meta, Tolima y Norte de Santander durante el desarrollo de sus labores. El capítulo 4 muestra una introducción al estado inicial del campo de pruebas antes de ejecutar las labores de mejora indicando los problemas que pueden ocasionar a futuro.

4.1 PLANTA FÍSICA

El campo de pruebas está ubicado en la sede principal de C.M.E. y fue diseñado con el objetivo de realizar pruebas eléctricas a los transformadores de distribución con el fin de determinar el estado en operación de los transformadores; fue instalado en la década de 1990 para luego ser trasladado a su actual ubicación. El mismo permite realizar los ensayos de tensión aplicada, tensión inducida y pérdidas en vacío y cortocircuito.

Figura 16. Campo de Pruebas de Construcciones y Montajes Electroductama



Fuente: *El Autor*

El desarrollo técnico del laboratorio se hizo durante el paso de los años dependiendo de los requerimientos de las empresas con las cuales se suscribieron cada uno de los contratos, sin embargo la falta de un desarrollo planificado ocasionó que no exista un plano de conexión, una guía de mantenimiento y tampoco un plan de mejoras a corto, mediano o largo plazo.

Físicamente el campo tiene un área aproximada de 180 m² separada en dos partes, la primera que contiene el tablero de mando, el motor generador y es el sitio desde donde se ejecutan las pruebas y la segunda que es el sitio donde se disponen los transformadores para poder ejecutar cada una de las pruebas. El área presenta un encerramiento en malla puesto a tierra como lo muestra la figura 16.

4.2 ELEMENTOS DEL CAMPO DE PRUEBA

Retomando el numeral 3.2 el campo de pruebas consta con un grupo motor-generador, un tablero de mando, un transformador intermedio y uno elevador además de cada uno de los elementos requeridos para el control y la medición. De la figura 15 a 17 se evidencia el estado inicial del campo de prueba de la empresa.

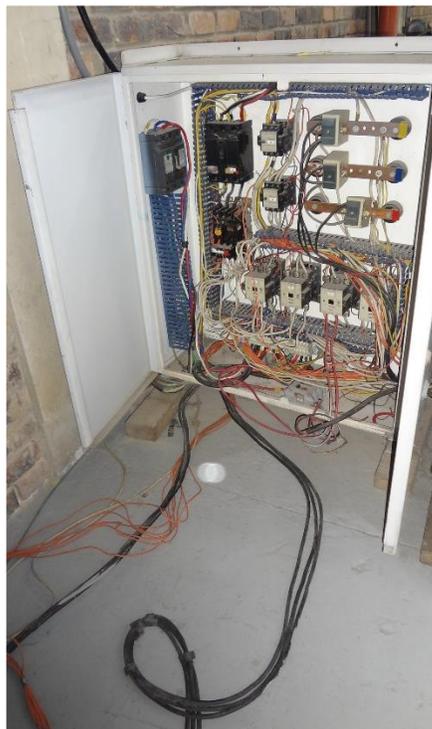
Figura 17. Tablero de mando de campo de pruebas C.M.E.



Fuente: *El Autor*

De acuerdo a la información tomada del capítulo denominado como “Marco Referencial” es posible hacer un inventario de los elementos presentes en el banco como lo demuestra la tabla denominada como indica la Tabla 10. *Inventario equipos campo de pruebas C.M.E.*

Figura 18. Tablero de control campo de pruebas C.M.E.



Fuente: *El Autor*

Figura 19. Transformador intermedio campo de pruebas C.M.E.



Fuente: *El Autor*

Con el fin de evitar que puedan presentarse errores de medición se hace una calibración de cada uno de los elementos presentes en el inventario se hacen las siguientes pruebas a cada uno de los elementos:

Transformadores de potencia

- Relación de transformación
- Medida de aislamiento AT-T ,AT-BT ,BT-T
- Resistencia de devanados

Transformadores de voltaje

- Relación de transformación
- Medida de Aislamiento AT-T, AT-BT, BT-T
- Resistencia de devanados

Transformadores de Corriente

- Relación de transformación
- Medida de aislamiento AT-T, AT-BT, BT-T
- Resistencia de Devanados

Cada una de las pruebas es realizada mediante el uso del equipo multiprueba CPC 100 de Omicron; para ver los protocolos de pruebas y el certificado de calibración es necesario referirse al Anexo B: Protocolos de Pruebas a Equipos Campo de Pruebas.

Tabla 10. Inventario equipos campo de pruebas C.M.E.

ELEMENTO	REFERENCIA	MARCA
MOTOR TRIFÁSICO	200-300 V	ANTON PILLER
GENERADOR	44,5 kW	ANTON PILLER
TRANSFORMADOR INTERMEDIO 1Φ	5 kVA	C.M.E
TRANSFORMADOR INTERMEDIO 3Φ	30 kVA	C.M.E
TRANSFORMADOR ELEVADOR	30 kVA	C.M.E
VARIAC MONOFÁSICO	3,3 kVA	Yamabishi Electric
VARIAC TRIFÁSICO	50 kVA	DRTEUUMOH
ANALIZADOR DE POTENCIA	WT230	YOKOGAWA

Tabla 11. Inventario equipos campo de pruebas C.M.E. (Continuación)

ELEMENTO	REFERENCIA	MARCA
VOLTÍMETRO ANÁLOGO 1	600 V	CG
VOLTÍMETRO ANÁLOGO 2	600 V	CG
VOLTÍMETRO ANÁLOGO 3	600 V	CG
VOLTÍMETRO ANÁLOGO 4	600 V	CG
AMPERÍMETRO ANÁLOGO 1	300 A	CG
AMPERÍMETRO ANÁLOGO 1	300 A	CG
AMPERÍMETRO ANÁLOGO 1	300 A	CG
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE 1	2241	YOKOGAWA
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE 2	2241	YOKOGAWA
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE 3	2241	YOKOGAWA
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE 4	2241	YOKOGAWA
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE 5	2241	YOKOGAWA
TRANSFORMADOR DE CORRIENTE 6	2241	YOKOGAWA
TRANSFORMADOR DE VOLTAJE 1	2261	YOKOGAWA
TRANSFORMADOR DE VOLTAJE 2	2261	YOKOGAWA
TRANSFORMADOR DE VOLTAJE 3	2261	YOKOGAWA
MULTÍMETRO DIGITAL		FLUKE
PINZA VOLTIAMPERIMETRICA		FLUKE

Fuente: El Autor

4.3 ESTADO ACTUAL DEL CAMPO PARA EJECUCIÓN DE PRUEBAS

El procedimiento desde el punto de vista de control para la ejecución de pruebas está explicado en la figuras 6, 11 y 14; sin embargo desde el punto de vista de potencia existen procesos manuales que se encuentran mejor explicados en el Anexo A que muestra el diagrama unifilar del estado actual del campo de pruebas. En él se observa que:

- Para poder ejecutar la prueba de tensión aplicada es necesario hacer una conexión manual con el variac monofásico desconectando el resto del circuito para ejecutar otras pruebas. El tiempo necesario para hacer este cambio es

de aproximadamente **30 min** dependiendo de la pericia del operario, sin embargo la posibilidad de cometer errores en la conexión es una realidad.

- Para ejecutar la prueba de tensión inducida y pérdidas en vacío y en corto es necesario cambiar la manera de alimentación del variac dependiendo del tipo de transformador que se tiene ya sea trifásico o monofásico lo que ocasiona una pérdida de tiempo de **30 min** aproximadamente dependiendo de la pericia del operario sin embargo como estos empalmes se hacen tan solo con cinta aislante cabe la posibilidad de que quedé mal aislado y presente una falla a tierra cuando se le inyecta tensión al transformador.
- La prueba de tensión inducida está inhabilitada después de haberse hecho un cambio de cableado.
- No existe selectividad en las protecciones como se puede observar en el diagrama unifilar anexo.
- El variac trifásico se maneja desde el mando de control donde se selecciona el sentido de giro y se acciona sin embargo no es posible determinar visualmente cuando el mismo ha alcanzado uno de sus límites tanto para la mínima tensión tanto para la máxima.

Las pruebas son realizadas a cada transformador por aparte de acuerdo a los indicadores de falla se determina si puede ser entregado o si por el contrario se devuelve a reprocesar con el fin de determinar su falla. Para la ejecución de pruebas se requiere de la presencia del Jefe de Planta que diligencia el formato de los protocolos de pruebas, la del ingeniero de calidad y la de dos o una persona que se encargan de hacer las conexiones manuales cuando se pasa de una prueba a otra. Además de ello el cableado no se encuentra canalizado lo que ocasiona fallas continuas en el circuito de control además de que como lo muestra la figura 20 el tablero de control presenta una cantidad exagerada de elementos en relación con el espacio del tablero como tal.

4.4 ETAPAS PARA LA EJECUCIÓN DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS

El proceso de automatización y actualización se hará por etapas estando netamente limitadas por el presupuesto de la empresa y las autorizaciones a cada uno de los procesos por parte del gerente general y el gerente encargado así como de la disponibilidad de los equipos requeridos cuando así se necesite.

Tabla 12. Plan de automatización del campo de pruebas de C.M.E.

ETAPA	ACTIVIDADES
1. REPARACIÓN Y MANTENIMIENTO	<ul style="list-style-type: none"> • Calibración y mantenimiento de equipos. • Puesta en servicio de todas las pruebas que pueden realizarse. • Construcción de planos del tablero de pruebas. • Creación del manual de mantenimiento y operación de acuerdo a la norma del Sistema de Gestión Integral interno. • Cambio de cableado de acuerdo a fallas. • Marcación de fases de acuerdo a RETIE. • Limpieza y Organización de cableado de potencia y de control • Reemplazo de pilotos que presenten fallas. • Verificación de estado de protecciones
2. AUTOMATIZACIÓN DE CABLEADO MANUAL	<ul style="list-style-type: none"> • Eliminación de la necesidad de cableado manual cuando se realizan pruebas a transformadores monofásicos o trifásicos. • Automatización de conexión para la realización de pruebas • Puesta en servicio de sensores de fin de carrera del variac trifásico • Diseño de circuito de señalización visual del estado del regulador
3. SIMPLIFICADO O FUNCIONAMIENTO Y CABLEADO	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño de un circuito de control que permita reducir el volumen de cables mediante la aplicación de sistemas PLC o microcontroladores mediante relés. • Cotizar el costo de la implementación de cada uno de los sistemas. • Justificar técnicamente cada uno de los diseños.
4. INTERFAZ GRÁFICA	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñar un circuito que permita controlar cada una de las pruebas desde una interfaz gráfica manejada desde computador.

Fuente: El Autor

CAPÍTULO 5. MANTENIMIENTO DEL CAMPO DE PRUEBAS DE C.M.E

El mantenimiento a continuación expuesto incluye la puesta en servicio de todas las pruebas teniendo en cuenta que algunas de ellas se encontraban deshabilitadas; la aplicación del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas “RETIE”, la determinación del error de cada uno de los equipos de medida y la verificación de que cada uno de los elementos seleccionados cumple con los requerimientos de potencia.

5.1 PUESTA EN SERVICIO DE PRUEBAS

El tablero de mando del campo de pruebas de C.M.E. a la fecha de febrero de 2016 tiene inhabilitada la prueba de tensión inducida, como método de solución se construyen los planos encontrando que el operario encargado del ensamble del circuito cometió errores en la conexión de pulsadores.

El contactor KM4 que representa la alimentación del variac debe estar energizado para que pueda ejecutarse cualquiera de las pruebas activadas por los pulsadores H1 “Tensión Aplicada”, H2 “Tensión Inducida” o H4 “Corto y Vacío”, sin embargo de acuerdo a esta figura para que se puede realizar la prueba de tensión inducida debe accionarse también el pulsado de tensión aplicada lo que puede generar una falla.

El error se debe a una mala interpretación por parte de la persona encargada del ensamble ya que confunde los terminales de los pulsadores H1 y H4 haciendo que en vez de tener un mismo punto común del contacto NC 13-14 de KM4 en el borne 14 quede en serie.

Para solucionar el inconveniente se coloca el punto 13 de todos los pulsadores antes mencionados a la salida del contacto NC 13-14 de KM4 permitiendo que se pueda ejecutar cualquier prueba de acuerdo al diagrama de control ya existente.

5.2 PUESTA EN SERVICIO DE CIRCUITO DE PROTECCIÓN DE SOBRE CORRIENTE

KM1 es el nombre del contactor de alimentación general dispuesto en el anexo A, en el plano 3 de circuito de control, este consta de un contactor de marca Telemecanique de referencia LC1-D403 que al añadirse un módulo de protección por sobre corriente de referencia LR1-D63357 permite actuar a niveles de corriente de 38, 44 y 50 A.

Figura 20. Protección de sobre corriente



Fuente: El Autor

En el momento de la revisión del estado inicial de tablero de control se da por hecho que la protección está desactivada, como lo demuestra la figura 21. Como medida correctiva se pone en servicio la protección como lo muestra la figura 21.

5.3 CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO DE EQUIPOS DE MEDIDA

De acuerdo al capítulo 2 del documento de la Comisión Federal de Electricidad de México cuyo tema es Pruebas Eléctricas(s. f.) “Las pruebas de campo se efectúan a los equipos que se encuentran en operación o en proceso de puesta en servicio y se consideran de la siguiente manera: a) Recepción y/o Verificación, b) Puesta en Servicio y c) Mantenimiento”.

La tabla 2 especifica que para transformadores de distribución línea 13200/240-120 V en laboratorios tipo 4 el error de precisión debe ser igual o menor al 0,5%; con el fin de verificar el estado de cada uno de los elementos se verifica el estado de los mismos mediante el uso del equipo multiprueba CPC 100 donde los datos son plasmados en la tabla 13 de la página 53

Los transformadores intermedios tanto el trifásico como el monofásico se realizan a partir de una medición entre fases donde para el caso del transformador trifásico se toma la medida entre fases con el error más alto. Los transformadores de corriente y de voltaje son medidos en todas sus posiciones para que en caso de que se requiera cambiar la relación de transformación no se presenten errores en la medición. Todos los elementos del campo cumplen con los requerimientos de la norma por lo que no se hace necesario hacer ningún cambio o recalibración de equipos.

5.4 CONSTRUCCIÓN DE PLANOS

Para poder desarrollar las labores de mantenimiento y reparación se requiere la construcción de planos del laboratorio en su estado original; a partir de estos planos se procede a diseñar un plan de mejora que permita cumplir con los objetivos de automatización planteados. El **Anexo A** incluye los planos después de las mejoras aplicadas al banco de pruebas; este mismo presenta una copia magnética de los mismos para que permita su modificación en caso de mantenimiento

Tabla 13. Precisión equipos de medida campo de pruebas

Equipo	Relación Teórica		Relación Medida		Error (%)
	Pri.	Sec.	Prim	Sec.	
Transformador (30 kVA)	440	220	439,99	219,05	-0,4314
Transformador (5 kVA)	440	220	439,998	219,56	-0,1999
Transformador de Corriente 1	10	5	9,999	4,987	-0,2507
	15	5	14,996	4,976	-0,4555
	30	5	29,998	4,981	-0,3748
	50	5	49,997	4,979	-0,4157
	100	5	99,985	4,993	-0,1252
Transformador de Corriente 2	10	5	9,998	4,991	-0,1603
	15	5	14,997	4,983	-0,3211
	30	5	29,999	4,985	-0,2976
	50	5	49,997	4,979	-0,4157
	100	5	99,998	4,993	-0,1382
Transformador de Corriente 3	10	5	9,996	4,991	-0,1403
	15	5	14,996	4,979	-0,3950
	30	5	29,999	4,983	-0,3378
	50	5	49,999	4,978	-0,4399
	100	5	99,978	4,988	-0,2185
Transformador Corriente 4	10	5	9,9997	4,987	-0,2577
Transformador de Corriente 5	10	5	9,996	4,99	-0,1603
Transformador de Corriente 6	10	5	9,999	4,981	-0,3714
Transformador de Potencial 1	3300	110	1999,52	66,7824	0,1973
	2200	110	2000,08	100,208	0,2034
	440	110	439,88	110,199	0,2078
	220	110	219,61	110,007	0,1833
Transformador de Potencial 2	3300	110	1999,6	66,856	0,3031
	2200	110	1999,63	100,193	0,2111
	440	110	440,05	110,246	0,2118
	220	110	219,74	110,074	0,1852

Transformador de Potencial 3	3300	110	1999,6	66,6783	0,0374
	2200	110	1999,73	100,208	0,2208
	440	110	439,97	110,246	0,2299
	220	110	219,67	110,073	0,2162

Fuente: El Autor

5.5 MANTENIMIENTO DE CIRCUITO DE SEÑALIZACIÓN

El circuito de señalización permite determinar el estado del proceso de pruebas, cada uno de los contactores energiza un piloto de señalización como lo muestra la figura 12; sin embargo cuando se hizo la revisión inicial los pilotos referentes a alimentación de red y tensión aplicada se encontraban en falla. Sus bombillas son de tipo bayoneta a 240 Vac, sin embargo por disponibilidad de elementos limitados por la zona geográfica da la necesidad el cambio total de los pilotos por otros de señalización de tipo LED, como lo demuestra la figura 21.

Figura 21. Cambio de circuito de señalización



Fuente: El Autor

5.6 APLICACIÓN NORMATIVIDAD

5.6.1 Código de colores para conductores La marcación por colores tiene como fin determinar el nivel de tensión visualmente, es utilizado en tableros de control o distribución, y su única restricción se refiere a que no se debe utilizar el color blanco ni el verde para las fases (RETIE, 2005). La tabla 12 indica el código de colores para conductores c.a.

Para el caso del sistema de potencia de los ensayos aplicados dentro del campo se utilizan los colores negro, azul y rojo para un sistema trifásico en delta; en caso de elementos que requieren alimentación monofásica para su funcionamiento como el Analizador Digital de Potencia los tonos se remitirán a la segunda columna de la tabla 14 de izquierda a derecha.

Tabla 14. Código de colores para conductores c.a.

Sistema c.a.	1	3ΦΔ
Tensión nominal (voltios)	120	240
Conductor activo	1 fase	3 fases
	2 hilos	3 hilos
Fase	Color fase o negro	Negro Azul Rojo
Neutro	Blanco	No aplica
Tierra de protección	Desnudo o verde	Desnudo o verde
Tierra aislada	Verde o Verde/ amarillo	No aplica

Fuente: RETIE 2013

5.6.2 Evaluación del nivel de riesgo Entendiendo que todo tablero indica indirectamente un grado de riesgo de tipo eléctrico se aplica una matriz para análisis de riesgos. La tabla 14 indica los riesgos presentes y su valoración para la ejecución de pruebas eléctricas para transformadores y las medidas para mitigarlos, en primera medida se dan valoraciones iniciales a los riesgos en personas, en el ámbito económico y en la imagen de la empresa basados en la tabla 15 y 16.

De acuerdo al numeral 9.2 de RETIE se debe hacer una matriz de análisis de riesgos ya que permite definir el factor de riesgo y determinar si es potencial o real y con ello las consecuencias para las personas, económicas y de imagen de la empresa dependiendo de cada uno de los riesgos que se evalúan.

La estimación de la consecuencia incrementa progresivamente de 1 a 5 en función de la gravedad de la falla siendo 5 el caso más grave como lo denota la tabla 15, a partir de este valor se cruza con la tabla 16 para determinar la calificación del riesgo. Comparando la calificación de los 3 casos la de mayor calificación será la calificación definitiva del riesgo.

Los controles operacionales son gestionados de la mano entre la gestión del departamento HSEQ de la empresa C.M.E. y la jefatura de planta con el fin de disminuir el riesgo, para el caso particular del riesgo en campo de pruebas de acuerdo a la tabla 9.4(RETIE, 2005) llamada “Decisiones y acciones para controlar el riesgo” de RETIE se determina como un nivel de riesgo bajo donde se debe asumir haciendo controles administrativos rutinarios siguiendo los procedimientos establecidos además del uso obligatorio de EPPs.

Tabla 15. Matriz para análisis de riesgos

 MATRIZ DE IDENTIFICACION DE PELIGROS, VALORACION DE RIESGOS Y DETERMINACION DE CONTROLES															G-011-MT01														
															REVISIÓN: 01														
PROYECTO	PLANTA		ESPONSABLE HSE	LEIDY CATALINA ECHEVERRÍA				FECHA	jun-16		ROXIMA VERIFICACIÓN	2017	24/02/2016																
ACTIVIDAD	ACTIVIDAD RUTINARIA		PELIGRO	RIESGO	VALORACIÓN INICIAL								CONTROLES OPERACIONALES				VALORACIÓN RESIDUAL												
	SI	NO			PERSONAS		ECONOMICO			IMAGEN			ELIMINACIÓN	SUSTITUCIÓN	CONTROLES DE INGENIERÍA	CONTROLES ADMINISTRATIVOS	EQUIPOS Y ELEMENTOS PROTECCIÓN PERSONAL	PERSONAS		ECONOMICO		IMAGEN							
					C	P	C	P	C	P	C	C						C	P	C	C	P	C	C	P	C			
Pruebas de Resistencia de Devanados, Tensión, Perdidas en Vacío, Corto circuito y Demás pruebas de rutina	X		Equipos Energizados	Electrocución, Tetanización, Quemaduras, Arco Eléctrico, Incendios	4	A	L	1	A	N			N	L		Ubicación Bandejas portacables	Encerramiento Campo de Pruebas, Cambio Cables en mal estado, Ubicación de Sistema Alarma Visual	Realizar pruebas solo personal autorizado, No permitir el paso de personal ajeno, Verificar puntos de conexión, Identificar Planos Unifilares, Seguir Procedimiento Pruebas	Botas dieléctricas	1	A	N	1	A	N	1	A	N	N
	X		Ubicación de Transformadores Campo Pruebas	Lesiones Osteomusculares, Caídas al mismo nivel, Tropezones, Golpes	3	A	N	1	A	N			N	N		Ayuda Mecánica Uso de Polipasto Acercamiento Transformadores	Ubicación de Transformadores sobre Polines, Definir Área Desplazamiento, Ubicar los mas cercano posible los Transformadores a Puntos de Conexión	Botas dieléctricas	1	A	N	1	A	N	1	A	N	N	

Fuente: El Autor – SGI C.M.E.

Tabla 16. Consecuencias – Matriz para análisis de riesgo

CONSECUENCIA			
PERSONAS	ECONOMICA (EN DOLARES) DAÑO A LA PROPIEDAD	IMAGEN DE LA EMPRESA	ESTIMACIÓN
UNA O MAS FATALIDADES , Muertes por accidente o enfermedad profesional.	CATASTROFICA > 1 MILLON , Daños generalizados, perdida total o sustancial en la producción del cliente o de la operación de la empresa.	INTERNACIONAL , Interés público internacional, impacto potencialmente grave que pueda generar rompimiento de lazos con clientes internacionales.	5
INCAPACIDAD PERMANENTE PARCIAL O TOTAL Y ENFERMEDADES PROFESIONALES , Afectan el desempeño laboral por largo tiempo, como una ausencia prolongada al trabajo. Daños irreversibles en la salud con inhabilitación seria. Sin pérdida de vida.	GRAVE 10.001-1 MILLON , Daños mayores, perdida parcial de las operaciones por mas de dos semanas.	NACIONAL , Interés público nacional, oposición general de los medios de prensa nacionales, políticas nacionales y regionales.	4
INCAPACIDAD TEMPORAL >1 DIA , Lesiones que producen tiempo perdido, afectan el rendimiento laboral, como la limitación a ciertas actividades o requiere unos días para recuperarse completamente, efectos menores en la salud que son reversibles.	SEVERO 100 MIL-10.000 MIL , Daños Locales, parada temporal.	REGIONAL , De interés público regional, oposición de los medios de comunicación, interés de partidos políticos de la región, oposición de la comunidad regional.	3
LESION MENOR SIN INCAPACIDAD , Incluye Casos de primeros auxilios y de tratamiento médico y enfermedades ocupacionales, no afectan el rendimiento laboral ni causa incapacidad.	IMPORTANTE 10 MIL - 100 MIL , Daños menores, interrupción breve de la actividad.	LOCAL , De interés público local (dentro de la zona de influencia), atención de comunidades locales que pueden afectar potencialmente el proyecto.	2
LESION LEVE PRIMEROS AUXILIOS , Atención en el lugar de trabajo y no afectan el rendimiento laboral ni causan incapacidad.	MARGINAL < 10 MIL , Daños leves, no hay interrupción de la actividad ni daño en propiedad.	INTERNA , Puede ser de conocimiento interno a la oficina principal y al proyecto.	1
NINGUNA LESIÓN	NINGUNA LESIÓN	NINGUNA IMPACTO , No es de Interés	0

Fuente: SGI C.M.E.

Tabla 17. Probabilidad de que ocurra un riesgo

NO HA OCURRIDO EN LA EMPRESA	HA OCURRIDO EN LA EMPRESA	SUCEDE VARIAS VECES POR AÑO EN LA EMPRESA	HA OCURRIDO EN EL PROYECTO	SUCEDE VARIAS VECES POR AÑO EN EL PROYECTO
A	B	C	D	E
M (medio): Se generan programas de gestión para el control del riesgo.	M (medio): Se generan programas de gestión para el control del riesgo.	H (alto): Se realizan Programas de Gestión para el control del riesgo.	H (alto): Se realizan Programas de Gestión para el control del riesgo.	VH (muy alto): No es aceptable Las Actividades de control Programadas serán inmediatas teniendo encuenta las situaciones de emergencias, no se escatimarán recursos para el control.
L (bajo): Riesgo aceptable se generan controles operacionales.	M (medio): Se generan programas de gestión para el control del riesgo.	M (medio): Se generan programas de gestión para el control del riesgo.	H (alto): Se realizan Programas de Gestión para el control del riesgo.	H (alto): Se realizan Programas de Gestión para el control del riesgo.
N (muy bajo): Control con inspección.	L (bajo): Riesgo aceptable se generan controles operacionales.	M (medio): Se generan programas de gestión para el control del riesgo.	M (medio): Se generan programas de gestión para el control del riesgo.	H (alto): Se realizan Programas de Gestión para el control del riesgo.
N (muy bajo): Control con inspección.	N (muy bajo): Control con inspección.	L (bajo): Riesgo aceptable se generan controles operacionales.	L (bajo): Riesgo aceptable se generan controles operacionales.	M (medio): Se generan programas de gestión para el control del riesgo.
N (muy bajo): Control con inspección.	N (muy bajo): Control con inspección.	N (muy bajo): Control con inspección.	L (bajo): Riesgo aceptable se generan controles operacionales.	L (bajo): Riesgo aceptable se generan controles operacionales.
N (muy bajo): Control con inspección.				

Fuente: SGI C.M.E.

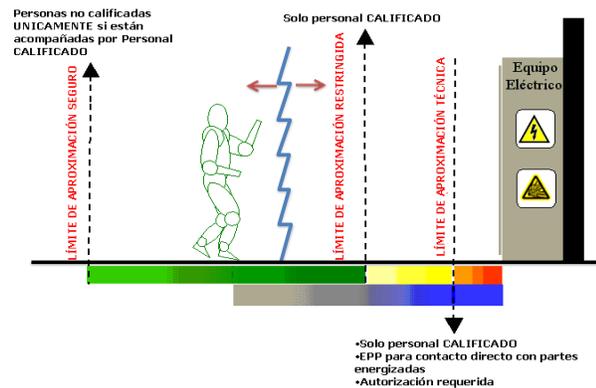
5.6.3 Límites de aproximación Con el fin de cumplir el numeral 13.4 del RETIE acerca de distancias mínimas para trabajos en partes energizadas basándose en la tabla 13.7. Para la figura 23 las distancias utilizadas se presentan en la tabla 18.

Tabla 18. Distancias de seguridad

ITEM	DIST	UNIDAD	PERSONAL
Límite de Aproximación Restringida	0,7	m	Personal que no cuente con los conocimientos técnicos requeridos
Límite de Aproximación Técnica	0,2	m	personal técnico calificado
Línea de delimitación	0,05	m	

Fuente: El Autor

Figura 22. Límites de aproximación



Fuente: RETIE

5.6.4 Ductos

Potencia: Con el fin de evitar que el cableado se encuentre sobre el suelo sin ningún tipo de canalización se utilizan bandejas porta cables con bajantes en tubo MT con posterior conexión a conduleta para el caso de tomacorrientes de potencia o alimentación a los tableros de conexión. La figura 24 muestra el paralelo luego de organizar el cableado en cada una de las etapas de pruebas.

Estos elementos de conexión se encuentran puestos a tierra mediante el uso de un barraje que también cuenta con las conexiones de los tableros de control estando equipotenciados con la malla de puesta a tierra.

En vista de que el campo de pruebas se considera una instalación industrial, se decide utilizar bandeja porta cable como elemento de soporte para los conductores de potencia, de acuerdo al numeral 20.3 del RETIE (RETIE, 2005) se verifica que la separación entre travesaños horizontales no se supere los 15 cm para conductores entre 2 y 8 AWG.

Figura 23. Cableado de potencia campo de pruebas C.M.E.



Fuente: El Autor

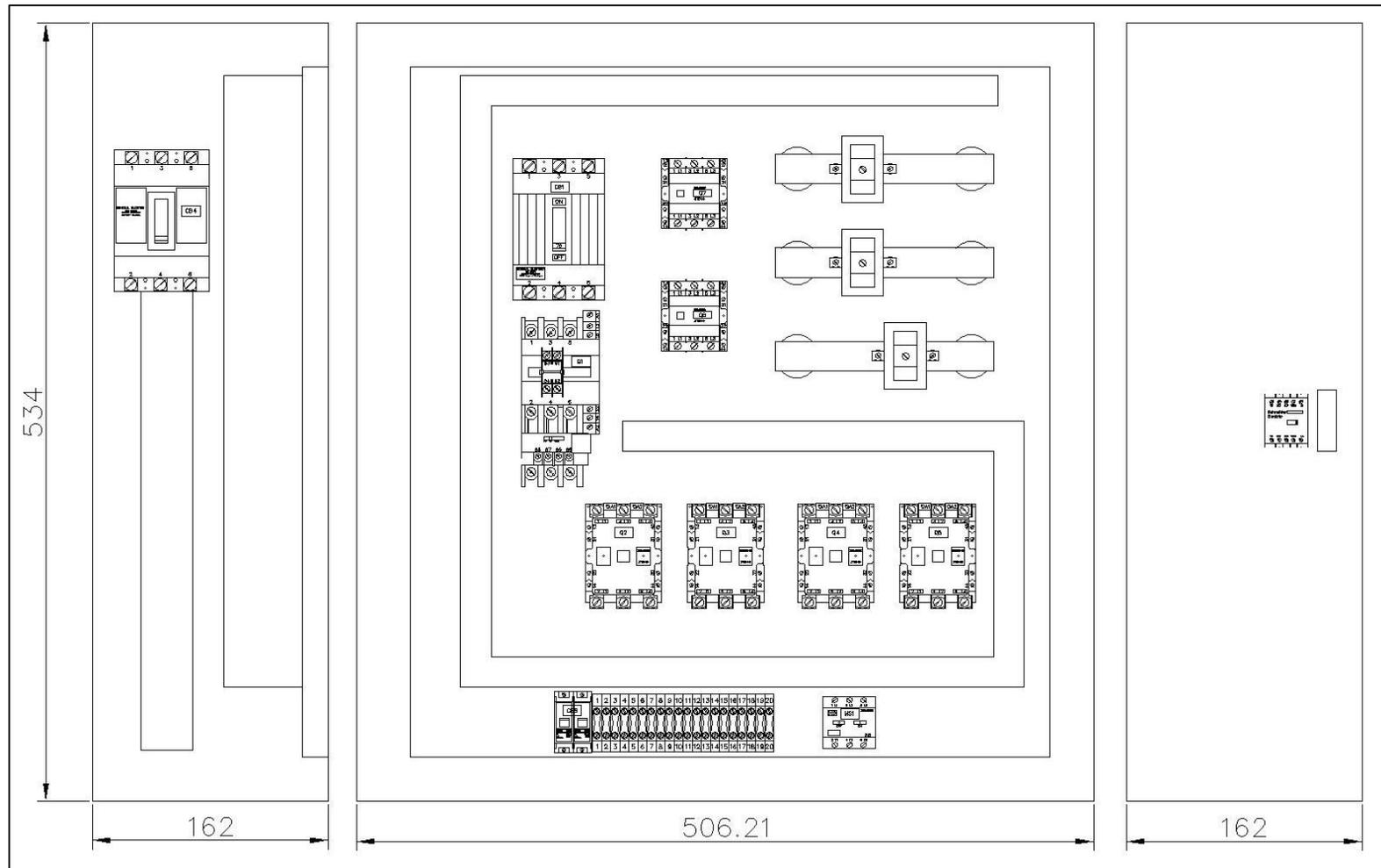
Control: De acuerdo a la norma las canaletas no metálicas deben presentar encerramiento completo de los conductores, se utilizan canaletas ranuradas de 6x4 cm dentro de los tableros de control previniendo equivocaciones en el cableado; para los elementos de cableado que tienen que salir de un tablero de control para ir a otro se utiliza conduflex o espiral dependiendo del caso en específico.

5.6.5 Cableado El tablero de control original como lo muestra la figura 25 presenta elementos que no están anclados a ninguna base además de presentar cableado que no se encuentra dentro de ningún ducto; debido a que adicional a las razones anteriores se adicionarán 4 contactores más se toma la decisión de utilizar un tablero adicional .

5.6.6 Tableros de control Inicialmente se cuenta con un tablero de control de dimensiones iguales a las mostradas en la figura 25; debido a que se presentan elementos en los laterales del banco y en el suelo sin base algunas se toma la decisión de adicionar un banco de control adicional además de adicionar 30 cm en su dimensión de largo.

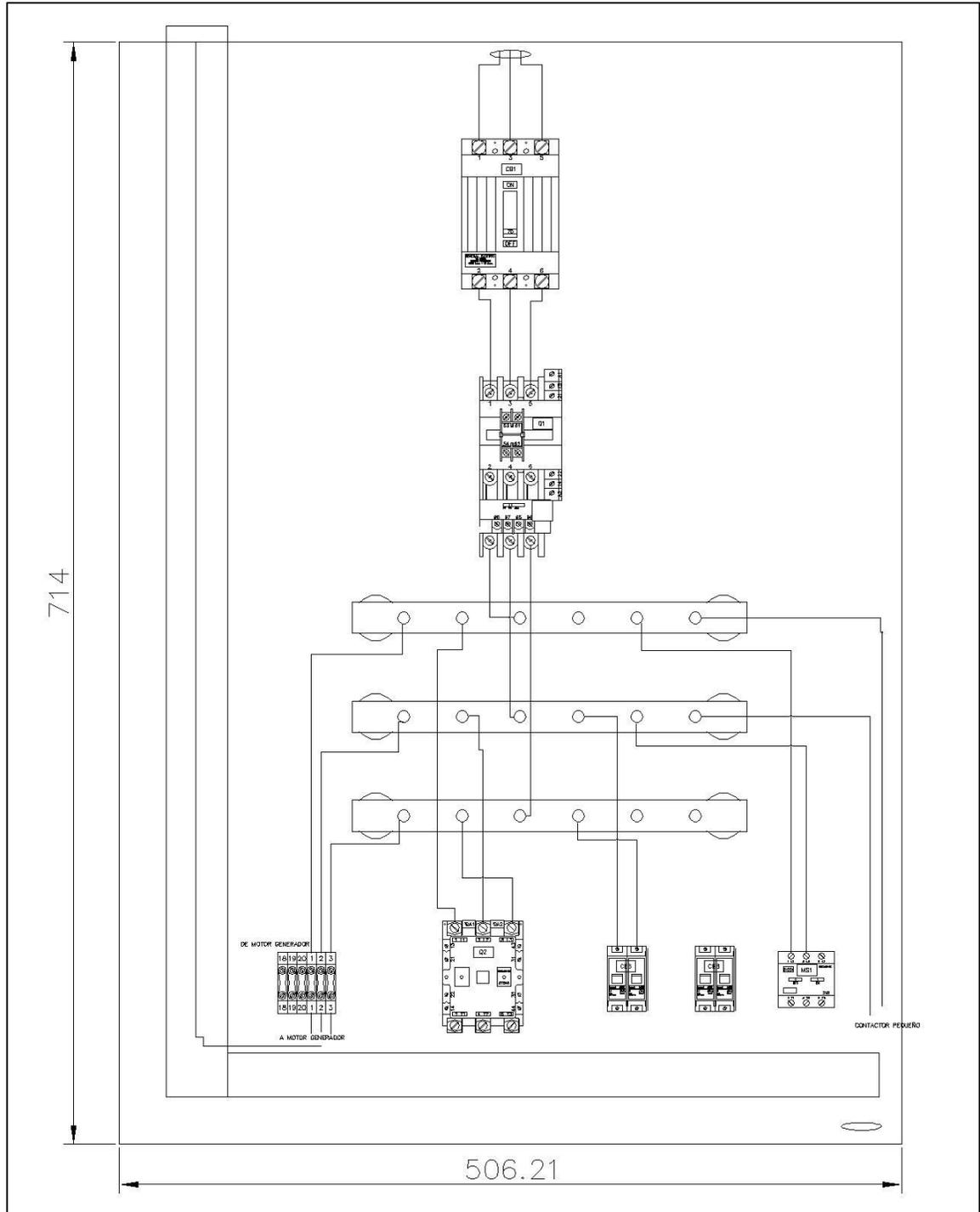
Las medidas de los tableros 25 y 26 presentados en las siguientes páginas se encuentran en milímetros.

Figura 24. Tablero de control 1



Fuente: El Autor

Figura 25. Tablero de control adicional



Fuente: El Autor

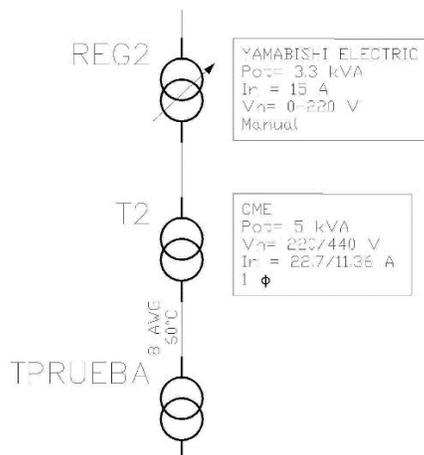
5.7 SELECCIÓN DE EQUIPOS Y COMPONENTES PARA CADA ENSAYO

Los valores a continuación presentados se encuentran mejor explicados en el **Anexo E**.

5.7.1 Ensayo de pérdidas en vacío y cortocircuito Los equipos necesarios para ejecutar las pruebas de cortocircuito y vacío incluyen el uso de un analizador digital de potencia, tres transformadores de corriente y tres transformadores de tensión, dicho análisis ya fue hecho en el diseño original del campo inicial por lo que a continuación se procede a comprobar el dimensionamiento de conductores, protecciones y el transformador teniendo en cuenta que para cada caso se utilizan dos circuitos independientes.

5.7.1.1 Red monofásica Tomando del anexo A un extracto se encuentra la figura 28. Para ejecutar la prueba de cortocircuito y la de vacío desde el tablero de mando se alimenta el transformador con la red que viene desde el operador de red que para este caso es un transformador público de 45 kVA de relación 13200 / 220-128 V de configuración Dyn5 refrigerado en aceite; desde allí se alimenta el regulador de tensión 2 (monofásico) de operación manual y con capacidad de corriente de hasta 15 A. El regulador de tensión alimentará el transformador intermedio de potencia igual a 5 kVA tipo seco, desde el punto de vista de potencia este transformador alimentará al transformador de prueba variando la tensión manualmente desde el variac monofásico.

Figura 26. Diagrama unifilar prueba cortocircuito y vacío transformadores monofásicos



Fuente: El Autor

- Verificación de transformador:

Para determinar la potencia requerida del transformador intermedio para ejecutar la prueba de vacío se utiliza la siguiente ecuación:

El transformador existente en las instalaciones de C.M.E tiene una potencia de 5 kVA, además de ello teniendo en cuenta que los transformadores de distribución monofásicos manejan una relación de 13200 V / 240 V es posible determinar que:

$$I_{vac} = \frac{P_{vac}}{V_{vac}} = \frac{5000 VA}{240 V} = 20,83 A \text{ (Ec. 10)}$$

La corriente máxima para una prueba de vacío debe ser menor a 20,83 A teniendo en cuenta que se aplica por el lado secundario del transformador; sin embargo existe el limitante del variador de tensión monofásico ya que su corriente nominal es de 15 A; teniendo en cuenta este valor y basándose en la norma NTC 1954(ICONTEC, 1996) referida a reparación de transformadores incluyendo aquellos fabricados antes de 1996 (peor condición de pérdidas) para un transformador de 167,5 kVA monofásico el porcentaje de corriente nominal en el devanado secundario para la prueba en vacío no debe exceder el 2,1 %, tal que:

$$I_{BT_{167,5 kVA}} = \frac{167500 VA}{240 V} = 697,9166 A \text{ (Ec. 11)}$$

$$I_{vac_{167,5kVA}} = \frac{697,92 A * 2,1}{100} = 14,656 A \text{ (Ec. 12)}$$

Concluyendo que el transformador intermedio para pruebas a transformadores monofásicos puede ejecutar pruebas a transformadores de hasta 167,5 kVA.

Si se prueba la misma potencia del transformador verificando que también pueda ser utilizado para la prueba de cortocircuito se utiliza el mismo método anterior encontrando que:

$$I_{BT} = \frac{167500 VA}{13200 V} = 12,68 A$$

$$V_{cc} = \frac{13200 * 3,15}{100} = 416 V$$

$$P_{cc} = 12,68 A * 416 V = 5274 VA$$

Un transformador puede sobrecargarse hasta un 25% de su valor nominal por lo que el transformador intermedio también puede aplicarse a pruebas de cortocircuito en transformadores de hasta 167,5 kVA.

- Selección de conductores

$$I_{cond} = I_n * 1,45 = 16,472 \text{ (Ec. 13)}$$

Por el lado del devanado del secundario del transformador puede utilizarse un conductor de calibre 10 AWG en adelante, sin embargo este cálculo aún no se aplica definitivamente debido a que este cable también debe permitir ejecutar las pruebas aplicadas a transformadores trifásicos.

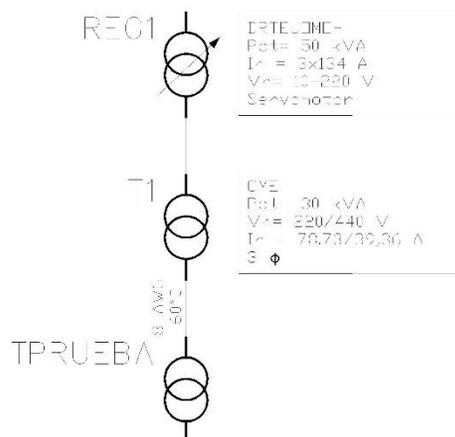
- Selección de protecciones

$$I_{prot} = 1,25 * I_n = 14,20 \text{ A (Ec. 14)}$$

La protección existente es de 63 A; se cambia esta misma por una protección de 20 A que es la existente en el ámbito comercial.

5.7.1.2 Red trifásica El circuito de aplicación de pruebas a transformadores trifásicos utiliza un circuito diferente al de transformadores monofásicos, éste se encuentra mejor explicado en la figura 27.

Figura 27. Diagrama unifilar prueba cortocircuito y vacío transformadores monofásicos



Fuente: El Autor

El circuito para ejecutar las pruebas de corto y vacío a transformadores trifásicos está conectado al operador de red y es accionado mediante el tablero de mando, para su funcionamiento primero llega a un regulador de tensión trifásico de potencia igual a 50 kVA con capacidad de corriente igual a 3x134 A para luego pasar a un transformador trifásico intermedio refrigerado en aceite con relación de transformación 220/440 y potencia igual a 30 kVA de conexión estrella-delta. Los equipos de medición se encuentran mejor explicados en el plano denominado como Circuito de Potencia.

- Verificación de transformador

Para determinar la potencia requerida del transformador intermedio trifásico se tiene que:

$$P_{vac} = \sqrt{3} * I_{vac} * V_{vac} \text{ (Ec. 15)}$$

El transformador existente en las instalaciones de C.M.E tiene una potencia de 30 kVA, retomando el procedimiento para comprobar la potencia a los transformadores a los cuales se les puede hacer las pruebas de corto y vacío se encuentra que:

$$I_{vac} = \frac{P_{vac}}{V_{vac}} = \frac{30000 \text{ VA}}{220 \text{ V} * \sqrt{3}} = 78,729 \text{ A}$$

La corriente máxima para una prueba de vacío debe ser menor a 78,73; teniendo en cuenta este valor y basándose en la norma NTC 1954 (ICONTEC, 1996) referida a reparación de transformadores incluyendo aquellos fabricados antes de 1996 (peor condición de pérdidas):

$$I_{BT_{1250 \text{ kVA}}} = \frac{1250 \text{ kVA}}{220 \text{ V} * \sqrt{3}} = 3280,39 \text{ A} \text{ (Ec. 16)}$$

$$I_{vac_{167,5 \text{ kVA}}} = \frac{3280,39 \text{ A} * 1,7}{100} = 55,766 \text{ A} \text{ (Ec. 17)}$$

Para un transformador de serie 13,2 kV / 220 V y potencia igual a 1250 kVA la potencia requerida para ejecutar las pruebas de cortocircuito y vacío debe ser igual a:

$$P_{vac} = \sqrt{3} * 55,766 \text{ A} * 220 \text{ V} = 21250 \text{ VA} = 21,25 \text{ kVA}$$

El transformador presente en las instalaciones de C.M.E de 30 kVA permite realizar las pruebas de cortocircuito y vacío a un transformador de distribución de 1250 kVA de relación de transformación 13,2 kV /220 V

- Selección de conductores

$$I_{cond} = I_n * 1,45 = 57,1 A$$

Por el lado de baja tensión se decide utilizar un cable tripolar calibre 8 AWG, temperatura de operación 90 °C, corriente nominal 55 A y nivel de aislamiento del 100%.

- Selección de protecciones

$$I_{prot} = 1,25 * 39,364 A = 49,2 A (Ec. 18)$$

La protección más cercana comercialmente es una protección termo magnética de 63 A, sin embargo actualmente no existe protección alguna por el lado de baja tensión.

5.7.2 Cálculo de impedancia, admitancia y resistencia estándar de un transformador La impedancia, admitancia y resistencia de un transformador pueden ser halladas mediante los resultados de la prueba en vacío y cortocircuito, estos parámetros son utilizados para poder seleccionar el transformador utilizado para las pruebas de tensión inducida debido a que esta prueba tiene la misma conexión de la prueba en vacío el principio se basa en adaptar los datos ya obtenidos a una frecuencia mayor que para este caso es de 420 Hz.

5.7.2.1 Transformador trifásico de 1250 kVA De acuerdo a García (Pedro Julián García, 2012) los parámetros de un transformador pueden ser determinados mediante los parámetros de las pruebas de corto y vacío como se verá desarrollado durante los siguientes párrafos.

La tabla 19 indica los resultados en la peor de las condiciones para un transformador de 1250 kVA construido antes de 1996 en proceso de reparación o reconstrucción de acuerdo a la norma NTC 1954 (ICONTEC, 1996); cada uno de estos datos es ajustado a la norma NTC 1005(ICONTEC, 1998) que está enfocada a la Determinación de la Tensión de Cortocircuito.

Tabla 19. Datos prueba en cortocircuito y vacío para transformador trifásico de 1250 kVA

Vacío			Cortocircuito		
P_{vac}	2645	W	P_{CC}	16800	W
I_{vac}	55,766	A	I_{CC}	54,67	A
V_{vac}	220	V	V_{CC}	224,4	V

Fuente: El Autor

La tabla 20 presenta los parámetros de un transformador de 1250 kVA hallados a partir de los datos de las pruebas de cortocircuito y vacío; estos datos se toman como los valores más altos de pérdidas de cada una de las pruebas. El **Anexo E** contiene la demostración y la explicación de cada uno de los valores acá tomados.

Tabla 20. Parámetros de transformador de 1250 kVA

Ítem	Valor	Descripción
Conductancia de la resistencia de pérdidas en vacío (G_m)	0,055 S	Relación entre la potencia de las pérdidas en vacío sobre el cuadrado del voltaje de la prueba que es igual al voltaje del secundario del transformador en prueba.
Resistencia de Magnetización (R_m)	18,298 Ω	Inverso de la conductancia
Admitancia Total (Y_m)	0,439 S	Valor absoluto de la raíz de 3 multiplicada por la corriente de vacío sobre la tensión de vacío
Impedancia de Magnetización (Z_m)	2,277 Ω	Inverso de la admitancia
Susceptancia de Magnetización (B_m)	0,436 S	La parte imaginaria de la admitancia
Reactancia de Magnetización (X_m)	2,296 Ω	Oposición ofrecida al paso de corriente - valor imaginario de la resistencia

Fuente: El Autor

Ensayo de cortocircuito

Los parámetros obtenidos del ensayo de cortocircuito se encuentran explicados en las ecuaciones 19, 20 y 21.

$$Z_{cc} = \frac{224,4 V}{\sqrt{3} * 54,67 A} = 2,37 \Omega \text{ (Ec. 19)}$$

$$R_{cc} = \frac{16800 W}{3 * (54,67 A)^2} = 1,8736 \Omega \text{ (Ec. 20)}$$

$$X_{cc} = \sqrt{(2,37 \Omega)^2 - (1,8736 \Omega)^2} = 1,45 \Omega \text{ (Ec. 21)}$$

- Pérdidas sin carga a una temperatura Tm

De acuerdo a la norma NTC 1031(ICONTEC, 1998) “el valor total correcto de las pérdidas totales sin carga del transformador es igual a:

$$P_m = 0,975 * P_{vac} = 0,975 * 2675 W = 2608,125 W \text{ (Ec. 22)}$$

5.7.2.2 Transformador monofásico de 167,5 kVA De acuerdo al numeral 6.2.1 de presente documento la máxima potencia permitida para hacer pruebas a transformadores monofásicos es igual a 167,5 kVA; al igual que en el numeral 5.2.2.1 se considerará el peor de los casos para los resultados obtenidos en la prueba de cortocircuito y vacío como lo denota la tabla 21.

Tabla 21. Datos prueba en cortocircuito y vacío para transformador monofásico de 167,5 kVA

Vacío			Cortocircuito		
P_{vac}	483	W	P_{cc}	1660	W
I_{vac}	14,656	A	I_{cc}	12,68	A
V_{vac}	220	V	V_{cc}	416	V

Fuente: El Autor

Tabla 22. Parámetros de transformador de 1250 kVA

Ítem	Valor	Descripción
Conductancia de la resistencia de pérdidas en vacío (Gm)	$9,97 \times 10^{-3} \text{ S}$	Relación entre la potencia de las pérdidas en vacío sobre el cuadrado del voltaje de la prueba
Resistencia de Magnetización (Rm)	100,207 Ω	Inverso de la conductancia
Admitancia Total (Ym)	0,066 S	Valor absoluto de la raíz de 3 multiplicada por la corriente de vacío sobre la tensión de vacío
Impedancia de Magnetización (Zm)	15,011 Ω	Inverso de la admitancia
Susceptancia de Magnetización (Bm)	0,065 S	La parte imaginaria de la admitancia
Reactancia de Magnetización (Xm)	15,327 Ω	Oposición ofrecida al paso de corriente - valor imaginario de la resistencia

Fuente: El Autor

- Ensayo de cortocircuito

Los parámetros obtenidos del ensayo de cortocircuito obtenidos son iguales a

$$Z_{cc} = \frac{416 V}{12,68 A} = 32,807 \Omega$$

$$R_{cc} = \frac{1660 W}{(12,68 A)^2} = 10,324 \Omega$$

$$X_{cc} = \sqrt{(32,807 \Omega)^2 - (10,324 \Omega)^2} = 31,14 \Omega$$

- Pérdidas sin carga a una temperatura Tm

$$P_m = 0,975 P_{vac} = 0,975 * 483 W = 470,925 W \quad (Ec. 23)$$

5.7.3 Ensayo de tensión inducida El ensayo de tensión inducida se basa en la misma conexión de la prueba en vacío su diferencia radica en que la frecuencia del generador es igual a 420 Hz, basándose en la conversión de valores obtenidos mediante la prueba de vacío a diferentes niveles de frecuencia hecha en la tesis desarrollada por García (Pedro Julián García, 2012) se puede determinar la potencia requerida para el transformador de prueba inducida.

Para el caso de la empresa C.M.E el transformador utilizado para la prueba de corto circuito y vacío es el mismo que se utiliza para el ensayo de tensión de inducida; lo que se hace a continuación es comprobar que la capacidad del transformador sea la suficiente para el transformador seleccionado anteriormente en los numerales 6.2.1 y 6.2.2 teniendo en cuenta que desde el punto de vista unifilar el circuito de potencia para ejecutar cada una de las pruebas a un transformador monofásico o trifásico es diferente.

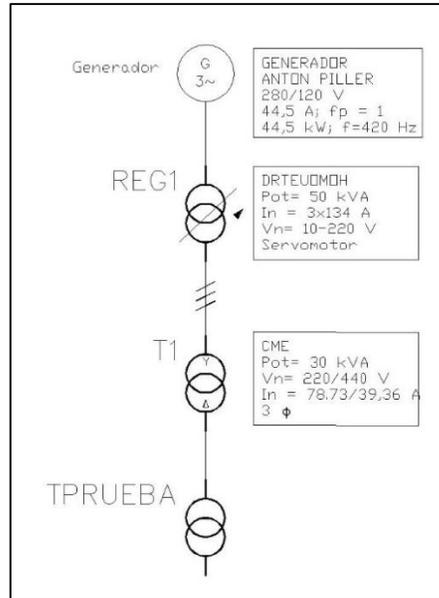
5.7.3.1 Ensayo de tensión inducida a transformadores trifásicos De acuerdo al despeje presentado en el anexo E la frecuencia del ensayo de tensión inducida es de 420 Hz lo que es igual a 7 veces la frecuencia nominal del ensayo en vacío por lo que la expresión de la ecuación 55 se reduce a

$$P_{ind} = 25P_{vac} = 66125 KW \quad (Ec. 24)$$

La resistencia inducida en el núcleo del transformador se calcula:

$$R_{ind} = \frac{(2V_{vac})^2}{3P_{vac}} \quad (Ec. 25)$$

Figura 28. Ensayo de tensión inducida a transformador trifásico



Fuente: El Autor

Para transformadores reparados parcialmente los ensayos de aislamiento deben efectuarse al 75% de la potencia nominal (ICONTEC, 1996)

$$R_{ind} = \frac{(2 * 220 * 0,75)^2}{3 * 2645} = 13,724 \Omega$$

La admitancia del transformador es proporcional a la frecuencia:

$$X_{ind} = 7Xm \text{ (Ec. 26)}$$

X_{ind} = Admitancia de magnetización inducida.

$$X_{ind} = 7 * 2,2957 = 16,07 \Omega$$

La impedancia de magnetización inducida es igual:

$$Z_{ind} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{ind}}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_{ind}}\right)^2}} \text{ (Ec. 27)}$$

$$Z_{ind} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{13,724}\right)^2 + \left(\frac{1}{16,07}\right)^2}} = 10,436 \Omega$$

La corriente inducida es igual:

$$I_{ind} = \frac{2V_{vac} * 0,75}{\sqrt{3}Z_{ind}} \quad (Ec. 28)$$

$$I_{ind} = \frac{2 * 220 * 0,75}{\sqrt{3} * 10,436} = 18,256 A$$

La potencia inducida es igual:

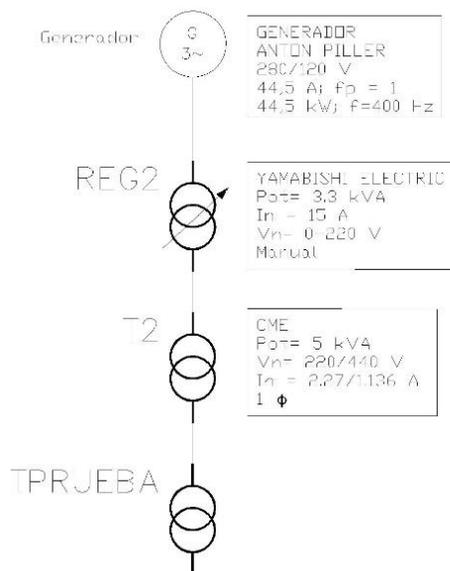
$$P_{ind} = \sqrt{3} * 2V_{vac} * 0,75 * I_{ind} \quad (Ec. 29)$$

$$P_{ind} = \sqrt{3} * 2 * 220 * 0,75 * 18,256 = 10434 VA = 10,4 KVA$$

El transformador utilizado como se dijo anteriormente es el de cortocircuito y vacío que cumple con la potencia requerida; el conductor y las protecciones de este circuito ya fueron especificadas anteriormente.

5.7.3.2 Ensayo de tensión inducida a transformadores monofásicos

Figura 29. Ensayo de tensión inducida a transformador monofásico



Fuente *El Autor*

Basándose en el cálculo del transformador intermedio para realizar la prueba de tensión inducida hecho en el numeral anterior a continuación se determinará la potencia máxima de transformadores a los cuales se les puede ejecutar la prueba.

De la ecuación 24

$$P_{ind} = 25 * 483 W = 12075 W$$

Determinando la resistencia inducida en el núcleo del transformador

$$R_{ind} = \frac{(2 * 220 * 0,75)^2}{3 * 483} = 75,155 \Omega$$

La admitancia inducida en el transformador de acuerdo a la ecuación 58

$$X_{ind} = 7 * 15,327 \Omega = 107,289 \Omega$$

La impedancia de magnetización será igual a

$$Z_{ind} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{75,155}\right)^2 + \left(\frac{1}{107,289}\right)^2}} = 61,555 \Omega$$

La corriente es igual a

$$I_{ind} = \frac{2V_{vac} * 0,75}{Z_{ind}} \quad (Ec. 30)$$

$$I_{ind} = \frac{2 * 220 * 0,75}{61,555} = 5,36 A$$

La potencia inducida es igual:

$$P_{ind} = 2V_{vac} * 0,75 * I_{ind} \quad (Ec. 31)$$

$$P_{ind} = 2 * 220 V * 0,75 * 5,36 A = 1769 VA$$

El transformador que actualmente se utiliza es de 5 kVA por lo que cumple con los requerimientos de potencia para ejecutar las pruebas de tensión inducida

CAPÍTULO 6. AUTOMATIZACIÓN DE CABLEADO MANUAL

El cableado manual en su circuito original presentaba el problema de que en cada tipo de prueba o tipo de transformador había que hacer un cambio manual de conexiones ocasionando tiempos muy largos para la ejecución de diferentes pruebas eléctricas, de allí que para un transformador trifásico o monofásico era necesario desconectar la alimentación de un transformador intermedio trifásico o monofásico dependiendo de los parámetros que se requirieran.

La automatización del campo de pruebas de C.M.E tiene como fin la optimización del proceso de ejecución de pruebas eliminando el cableado manual; esta mejora se basa en el uso de un selector de tres posiciones: monofásico, trifásico y estado cero. Al implementar el selector de conexión mencionado anteriormente se hace necesario cambiar el circuito unifilar y el circuito de potencia; teniendo en cuenta que la potencia requerida de los transformadores utilizados en las pruebas y los conductores necesarios para ello ya fueron probados en el numeral 5.2

6.1 CIRCUITO DE POTENCIA

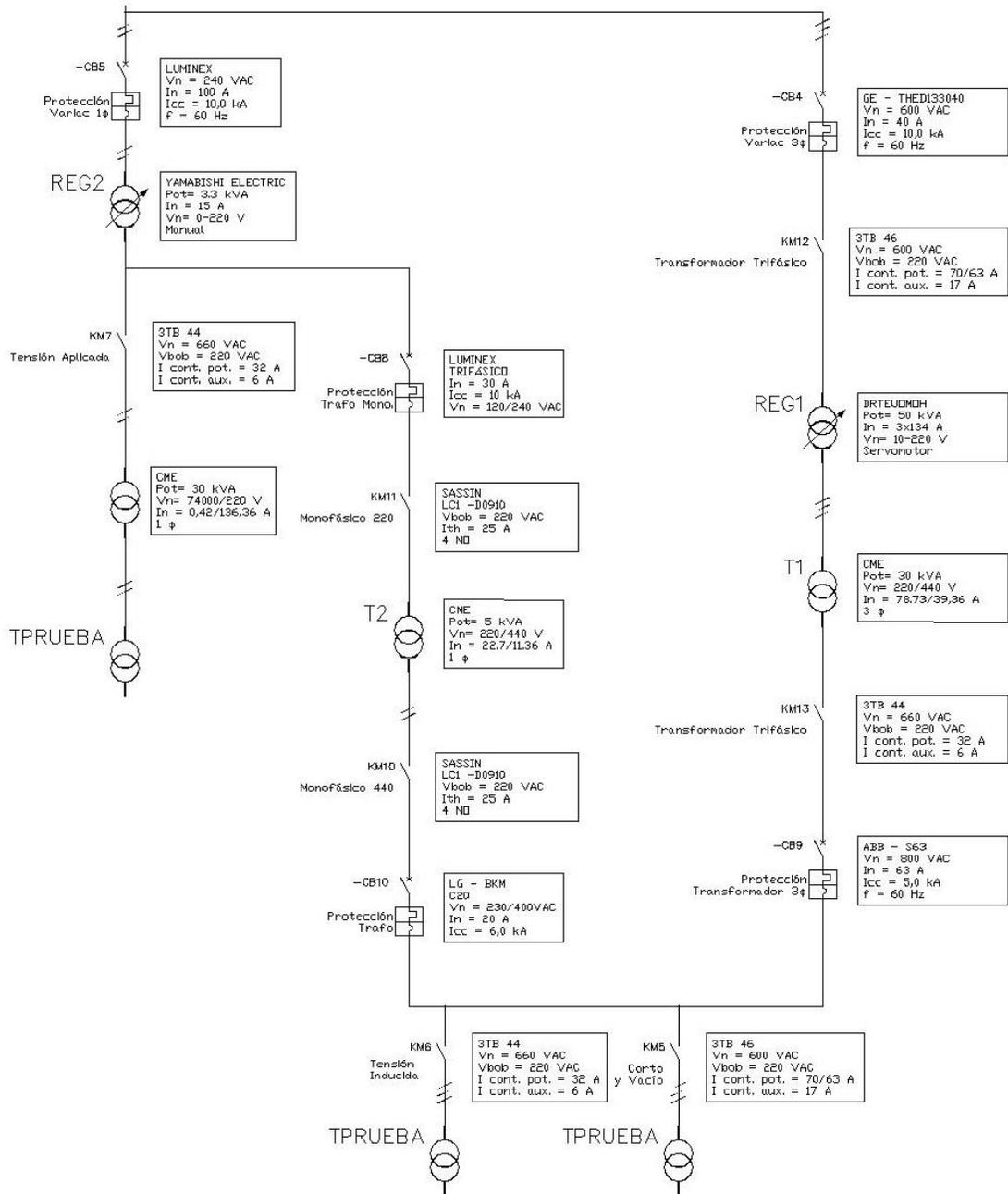
La figura 30 muestra la conexión inicial del tablero de control; en ella se evidencia mediante el uso de líneas punteadas las conexiones manuales que debían realizarse anteriormente. Para contrarrestar el efecto de los retrasos y los riesgos debidos a conexiones manuales se utiliza un selector de tres posiciones, además de la implementación de 4 contactores nuevos, dos de cada ellos inhabilitarán al transformador intermedio que no se utilizó evitando errores en las mediciones.

El cálculo de cada uno de los contactores depende de la corriente nominal de cada transformador tanto en su devanado primario como en su devanado secundario. Tal que los contactores nuevos a utilizarse se presentan en la tabla 23. El transformador monofásico es de potencia igual a 5 kVA y presenta una relación de transformador de 220/440 V lo que indica que la corriente que fluirá por sus devanados primario y secundario serán iguales a 22,7/11,36 A respectivamente. Se escoge un contactor con capacidad comercial de por lo menos 25 A. A pesar de que la corriente nominal en el secundario es menor debido al incremento en la tensión los dos contactores seleccionados contarán con la misma potencia.

El transformador trifásico por el contrario contará con una relación de corrientes de 78,73/39,36 A nominales; sin embargo para este caso debido a los costos que se

0 el selector 2 y se repite el procedimiento realizado anteriormente evitando que se pueda alimentar el transformador monofásico intermedio.

Figura 31. Diagrama unifilar – Uso de contactores para evitar el cableado manual



Fuente: El Autor

Las pruebas de cortocircuito, vacío y tensión inducida presentan una complejidad en su conexión mayor a la presentada por la prueba de tensión aplicada debido a que la prueba puede requerir del transformador monofásico o del transformador trifásico. Cuando cualquiera de las pruebas se realiza, se selecciona el tipo de conexión requerida por el pulsador siendo el lado izquierdo el que habilita el circuito monofásico al conectar los contactores KM10 y KM11 en paralelo; cuando se requiere ejecutar la prueba en trifásico es necesario mover el selector a la posición de la derecha desenergizando el circuito monofásico y habilitando los contactores KM12 y KM13 que están en paralelo y al cerrarse energizan el transformador trifásico intermedio.

Como medida de protección para evitar cortocircuitos como primera medida se tiene al selector como tal que evita que se utilicen dos circuitos al tiempo; sin embargo para evitar que se puedan presentar inconvenientes se utiliza un contacto NC del contacto KM13 en serie con la bobina de KM11 (en paralelo con KM10) que impide que se activen los dos circuitos al tiempo.

Cada circuito de conexión presenta una señalización visual por medio de pilotos de 220 Vac que indican el estado de cada circuito energizado a partir del uso de un contacto NA para cada uno de los circuitos (Se presenta un piloto por circuito debido a que ambos contactores se encuentran en paralelo).

6.2 CIRCUITO DE CONTROL

El circuito de control presentó modificaciones en su principio de funcionamiento debido a la presencia del nuevo selector S2. Para la operación secuencial se describirá la ejecución paso a paso de cada una de las pruebas que se efectúan en este campo de prueba.

6.2.1 Prueba de tensión aplicada: Para realizar esta prueba se conectará el transformador de acuerdo al capítulo referido al capítulo 2 “Pruebas Eléctricas a Transformadores”

- Se gira el interruptor **I1** a la derecha (posición “General”).
- Se gira el selector **S2** en la posición central deshabilitando los dos transformadores intermedios.
- Se gira el interruptor **I5** a la derecha conectando la alimentación de la red.
- Se gira el interruptor **I4** para conectar la alimentación del variac al trafo intermedio.

- Se mantiene oprimido el pulsador **H1**, en este momento el transformador bajo prueba queda energizado.
- Se utiliza el variac monofásico para alcanzar el valor de voltaje requerido en baja tensión teniendo en cuenta la relación de transformación del transformador de tensión aplicada girando el mismo hacia la derecha.
- Esta lectura se toma en el voltímetro **V1** de la parte superior del tablero; en caso de que se requiera mayor precisión en la medida, se encuentran dos terminales que permiten la conexión de un multímetro.
- A partir de este momento se cuentan los 60 segundos que debe durar la prueba.
- Luego de completar el tiempo de ejecución de la prueba se utiliza el variador de tensión monofásico para disminuir la tensión aplicada sobre el transformador; cuando el valor llegue de nuevo a la mínima tensión aplicada se suelta el pulsador **H1**.

6.2.2 Prueba de tensión inducida: Para realizar esta prueba se conectará el transformador de acuerdo al capítulo referido al capítulo 2 “Pruebas Eléctricas a Transformadores”

- Una vez conectado el transformador de acuerdo al Instructivo mencionado se gira el interruptor **I1** a la posición general.
- Se utiliza el selector **S2** para determinar si el transformador a probarse es monofásico o trifásico; en caso de que sea monofásico se gira el selector a la izquierda, en caso de que sea trifásico se gira el mismo elemento hacia la derecha.
- Seguidamente se gira el interruptor **I2** a la derecha, para darle arranque al grupo motor-generator, el cual genera a una frecuencia de 420 Hz.
- Cuando se ha estabilizado el grupo, se gira el interruptor **I3** a la derecha con lo cual se da salida del generador al regulador de voltaje (variac).
- Se oprime el pulsador **H2** el cual da salida de tensión a las puntas que se conectan al transformador bajo prueba y se mantiene oprimido mientras dura la prueba.
- En caso de que sea un transformador trifásico se coloca el selector **M1** en la posición 1 (sube), y se empieza a oprimir el pulsador **H3** hasta alcanzar el valor de voltaje que se va a aplicar al trafo bajo prueba. Este voltaje se lee en los voltímetros **V3, V4, V5**.
- Si es un transformador monofásico la variación de la tensión se hace mediante el uso del regulador monofásico.
- Una vez alcanzado el voltaje de prueba se empieza a contar **17 segundos que es el tiempo de duración de la prueba**.

- Para el transformador trifásico, cuando se han cumplido, se gira el conmutador **M1** a la posición **2** (baja) y se oprime el pulsador **H3** hasta que el valor de voltaje disminuya por lo menos a 1/3 del voltaje aplicado, se suelta el pulsador **H2** y la prueba ha concluido.
- Para el transformador monofásico se gira la perilla del regulador monofásico después de haber concluido el tiempo requerido se gira la perilla hacia el lado izquierdo hasta haber alcanzado un 1/3 del voltaje aplicado.
- Se continúa hasta bajar a cero con el pulsador **H3** y se apaga el equipo.

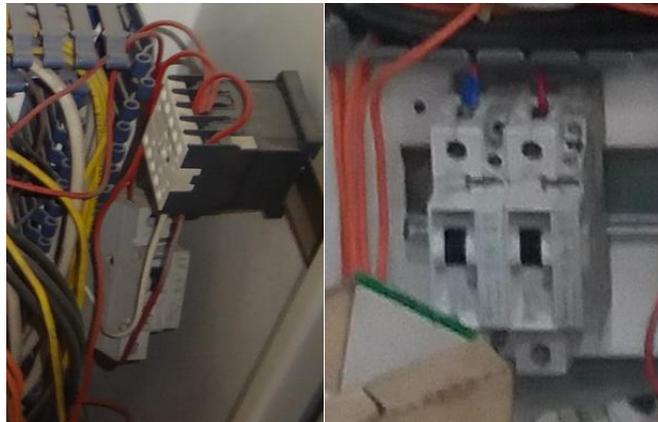
6.2.3 Medida de pérdidas en vacío y corrientes de excitación; pérdidas en el cobre y tensión de cortocircuito: Para la medición de pérdidas se emplean los transformadores de medida y el analizador digital de potencia y se utilizan los procedimientos de conexión tratados en el capítulo 2.

- Se acciona el interruptor **I1** a la posición *general*, dando entrada a la alimentación general.
- Se utiliza el selector **S2** para determinar si el transformador a probarse es monofásico o trifásico; en caso de que sea monofásico se gira el selector a la izquierda, en caso de que sea trifásico se gira el mismo elemento hacia la derecha.
- Se acciona el interruptor **I5** a la derecha para dar entrada de la alimentación de red al variac.
- Se acciona **I4** Para dar alimentación al regulador de voltaje (variac).
- Presionar y mantener en esta posición el pulsador **H4**, marcado "*Instrumentos de medida, cortocircuito prueba de vacío*";
- Girar el interruptor **M1** a la posición 1 (sube). Incrementar el voltaje oprimiendo el pulsador **H3**, (marcado "*variac*"), hasta obtener el valor de voltaje o de corriente deseado, dependiendo de la prueba. Estos parámetros se medirán el analizador digital de potencia
- Si es un transformador monofásico la variación de la tensión se hace mediante el uso del regulador monofásico.
- Tomar las lecturas correspondientes de voltaje, corriente y potencia.
- Accionar el conmutador **M1** a la derecha a la posición 2 (baja) y oprimir el pulsador **H3** hasta disminuir el voltaje a cero.
- En el caso del transformador monofásico en pruebas disminuir la tensión mediante el regulador de tensión monofásico.
- Apagar el equipo.

6.3 CIRCUITO DE SEÑALIZACIÓN

El circuito original de señalización en un principio se encontraba conformado por los pilotos de señalización de cada etapa y las balizas giratorias. Los pilotos se encontraban en paralelo con los terminales A1 y A2 de cada una de las etapas presentadas; sin embargo este tipo de conexión ocasiona que en caso de falla en el circuito de control está llegue a los pilotos ocasionando fallas; con el fin de solucionar este problema se decide utilizar una protección bifásica que marca SIEMENS, corriente nominal 1 A y referencia 5SX91.

Figura 32. Protección circuito de señalización



Fuente: *El Autor*

Debido a que se modifica el circuito de control debido a la añadidura del selector S2 se adicionan dos pilotos más que permiten verificar el estado de conexión en el circuito de control al utilizar dos contactos NA de los contactores KM10 y KM12. El circuito de señalización en detalle se encuentra mejor explicado en el Anexo A – Plano 3 “Circuito de Control”.

Las balizas giratorias estaban conectadas mediante un circuito autoalimentado donde no se encontraba separado el circuito de control con el de señalización al igual que los pilotos; con la condición adicional de que sólo existía una protección para una de las fases (contando con el agravamiento de que no estaba fija a un riel) mientras que la otra quedaba desprotegida. Con el objetivo de proteger las balizas se tomó la decisión de independizar el contactor KM9 y dejarlo en el circuito de control mientras que las balizas quedarían en el circuito de señalización protegido por los mismos elementos antes mencionados.

En el numeral 6.1.5 se especificó el mantenimiento hecho a los sensores de fin de carrera del variac trifásico; como medida de verificar el estado del variac, se habilitaron dos pilotos adjuntos al circuito de señalización que se energizan cuando el variac llega a alguno de sus extremos.

6.4 MANUAL DE MANTENIMIENTO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS DE C.M.E

El Sistema de Gestión Integral “SGI” en concordancia con la acreditación de calidad ISO: 9001 otorgada por el CIDET invita a que cada actualización cambio, proceso de mejora o mantenimiento sea llevado en los folios dispuestos para ello. Con el fin de no entorpecer los procesos de auditoría y beneficiar al encargado de mantenimiento y al operario/s del cambio de pruebas se tiene el anexo D; que indica los procesos técnicos requeridos para el uso del mismo; además se ello se anexa al SGI una nueva codificación para los diagramas o planos que permita tener un control claro de las instalaciones eléctricas presentes en C.M.E.

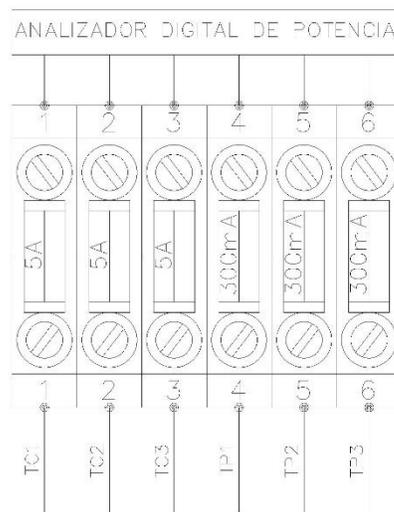
CAPÍTULO 7. MEJORAS A FUTURO

El capítulo 7 contiene las propuestas de mejora que son aplicables al campo de pruebas de CME. Contiene la propuesta de implementación de un controlador lógico programable que facilita las labores de mantenimiento incluyendo en él los diferentes costos relacionados con los implementos requeridos junto con sus especificaciones técnicas y propuestas de desarrollo que implican más tiempo de desarrollo del proyecto.

7.1 PROTECCIÓN DE ENTRADAS A ANALIZADOR DE POTENCIA

Actualmente las entradas del analizador de potencia vienen desde el secundario de los transformadores de corrientes y los transformadores de tensión. Con el fin de eliminar el riesgo de que cuando se presente una falla en un transformador en prueba el equipo pueda sufrir daños se recomienda diseñar un barraje con fusibles como el de la figura 33 presentada a continuación.

Figura 33. Protección de entradas de analizador digital de potencia



Fuente: El Autor

La protección para las entradas de los transformadores de corriente es igual a 5 A teniendo en cuenta que su configuración actualmente está dada por una relación de

10 A/ 5 A donde los 10 amperios es una medida muy alta para las pruebas que se realizan. Para los transformadores de tensión el valor en miliamperios cumple.

7.2 USO DE TRANSFORMADORES DE TENSIÓN

Los transformadores de tensión utilizados tienen una relación de 3300 V / 110 V sin embargo cada uno de los transformadores intermedios presentan una relación de 220 / 440 V por lo que la medida que llega al analizador es muy pequeña. El uso de los transformadores de tensión se hace innecesario si se tiene en cuenta que las entradas del analizador digital soportan hasta 600 Vac.

Se propone medir la tensión en el primario y en el secundario del transformador cada vez que se ejecute una prueba para verificar cuanto realmente se está midiendo porque el uso de estos equipos está generando un error sobre la medida.

7.3 CIRCUITO DE CONTROL MEDIANTE LENGUAJE LADDER

El uso de lógica cableada sumado al uso de una gran cantidad de elementos trae consigo problemas de mantenimiento, espacio y conexión. El uso de Controladores Lógico Programables (PLCs) puede solucionar el problema ya que evita el cableado referente a las condiciones de control debido a que las ejecuta internamente.

De acuerdo a los elementos de maniobra y los elementos de control es posible determinar la cantidad de entradas y salidas requeridas para el PLC.

7.3.1 Número de entradas y salidas del PLC Las entradas del PLC están directamente relacionadas con la cantidad de pulsadores, selectores o paradas de emergencia dispuestas para el funcionamiento del circuito de control; además de adicionar la importancia del relé de sobre corriente.

A nivel comercial es necesario buscar como primera medida un PLC de por lo menos 11 entradas análogas. Las salidas dependen de la cantidad de contactores a utilizar; debido a que existen dos contactores que actúan en paralelo sólo se determinará una salida para disminuir la cantidad de puertos requeridos. La tabla 24 indica la cantidad de puertos de salida y el elemento que cada uno de ellos controlará.

Tabla 24. Entradas PLC

ENTRADA	ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
<i>10.0</i>	E1	Emergencia 1
<i>10.1</i>	E2	Emergencia 2
<i>10.2</i>	F1	Relé térmico en KM1
<i>10.3</i>	I1	Selector ON/OFF
<i>10.4</i>	I2	Selector Alimentación Grupo Motor Generador
<i>10.5</i>	I3	Selector Salida Grupo Motor Generador
<i>10.6</i>	I4	Alimentación Variac
<i>10.7</i>	I5	Alimentación Tensión de Red
<i>11.0</i>	H1	Pulsador Tensión Aplicada
<i>11.1</i>	H2	Pulsador Tensión Inducida
<i>11.2</i>	H4	Pulsador Corto y Vacío
<i>11.3</i>	S2	Selector Monofásico-Trifásico

Fuente: *El Autor*

Tabla 25. Entradas PLC

SALIDA	ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
<i>00.0</i>	KA1	Alimentación General
<i>00.1</i>	KA2	Alimentación Tensión de Red
<i>00.2</i>	KA3	Salida Generador
<i>00.3</i>	KA4	Alimentación Variac
<i>00.4</i>	KA5	Cortocircuito y Vacío
<i>00.5</i>	KA6	Tensión Inducida
<i>00.6</i>	KA7	Tensión Aplicada
<i>00.7</i>	KA8	Alimentador Motor
<i>01.0</i>	KA9	Auxiliar - Señalización
<i>01.1</i>	KA10	Circuito Monofásico
<i>01.2</i>	KA12	Circuito Trifásico

Fuente: *El Autor*

Los contactores usualmente presentan una cantidad menor de entradas que de salidas por lo que el parámetro de selección del PLC será el número de salidas mínimas que puede tener, de acuerdo a la tabla 25 se escoge un PLC de mínimo 12 salidas independientemente del nivel de tensión que maneje el dispositivo debido a que como medida de protección se utilizarán contactores auxiliares para cada una de las salidas como se mostrará en los siguientes capítulos.

7.3.2 Simulación y circuito de control El software Codesys es un programa de FESTO de licencia libre que presenta las siguientes ventajas:

- Permite simular los circuitos de control programados
- Permite crear una interfaz (SCADA) de servicio y de componentes del Sistema de potencia, creando así un ambiente realista del proceso a controlar.
- Cuenta con estándar IEC 61131-3 garantizando flexibilidad y movilidad a otros programas de diseño

Se desarrolla un sistema de control basado en las tablas 24 y 25 que permite disminuir la cantidad de cableado limitándolo a entradas, salidas y etapa de potencia. El Anexo C contiene del diagrama de programación además de una descripción de cada una de las líneas indicando su manera de funcionamiento.

7.4 COTIZACIÓN DE ELEMENTOS

El anexo C contiene las especificaciones técnicas de cada uno de los productos que van a ser enunciados en los siguientes numerales.

7.4.1 Selección de PLC Al hacer una comparación entre diferentes elementos de la marca Schneider (“Autómata programable - Twido - Schneider Electric AR-UY-PY”, s. f.) Se seleccionan tres modelos diferentes de elementos donde el primero tiene una alimentación en AC a 110 o 220 V AC y los otros dos tienen una alimentación igual a 24 VDC.

Tabla 26. Cotización PLCs

	<u>TWDLCAA40DRF</u>	<u>TWDLMDA40DTK</u>	<u>TWDLMDA40DUK</u>
Número de salida digital	2 transistor 14 relé	16 transistor fuente	16 transistor colector
Tensión de alimentación	100...240 V AC	24 V CC	24 V CC
Número de entrada analógica	C	1	1
Precio	\$735 294	\$929 411	\$833 823.53

Fuente: Schneider Electric (Costo para Elementos comprados en Estados Unidos)

El costo se convierte en uno de las prioridades a la hora de comprar el PLC por lo que se escoge el primer tipo de PLC teniendo en cuenta que independientemente de su alimentación sus entradas y salidas estarán alimentadas a 24 VDC por lo que también es requerido cotizar una fuente de tensión igual a 24 VDC y 12 contactores auxiliares que se verán aplicados en el numeral 8.3

El uso de entradas analógicas puede darse en casos de mejora a futuro permitiendo adicionalmente la regulación de la tensión de la prueba; sin embargo debido a los costos que implicaría la compra de transformadores de tensión y rectificadores para cada una de las entradas se limita la competencia al circuito originalmente diseñado junto con las mejoras de un selector que permita seleccionar el circuito por alimentar.

7.4.2 Fuente de alimentación de E/S La potencia mínima requerida para una fuente switchada es igual o superior a 30 W. La tabla 27 incluye la cotización de diferentes referencias, marcas y precios teniendo en cuenta que estos costos son sólo una aproximación en caso de que se desee implementar el sistema.

Tabla 27 Fuentes fijas de 24 VDC

	LOGO	MEAN WELL	RHONA
Referencia	6EP1331-1SH03	NES-35-24	SPA-030-24
Vin	100-240 VAC	85-264 VAC	85-264 VAC
PRECIO	\$ 146.431	\$50.300	\$46.721

Fuente: *El Autor*

7.4.3 Contactores auxiliares Debido a que cada salida está a un voltaje igual a 24 VCC se requiere un contactor por salida; sin embargo debido a que la única potencia que maniobrará cada uno de ellos es la de la de la excitación de cada uno de los contactores principales es factible utilizar una bobina de un relé con capacidad de tensión en sus contactos igual a 240 V AC que es la tensión de la mayoría de los contactores utilizados.

La tabla 28 a continuación presenta diferentes bobinas y sus diferentes costos de la empresa fabricante OMRON("Relay Omron MY2 24VDC Omron Relés universales | Mouser", s. f.).

Tabla 28. Contactores auxiliares

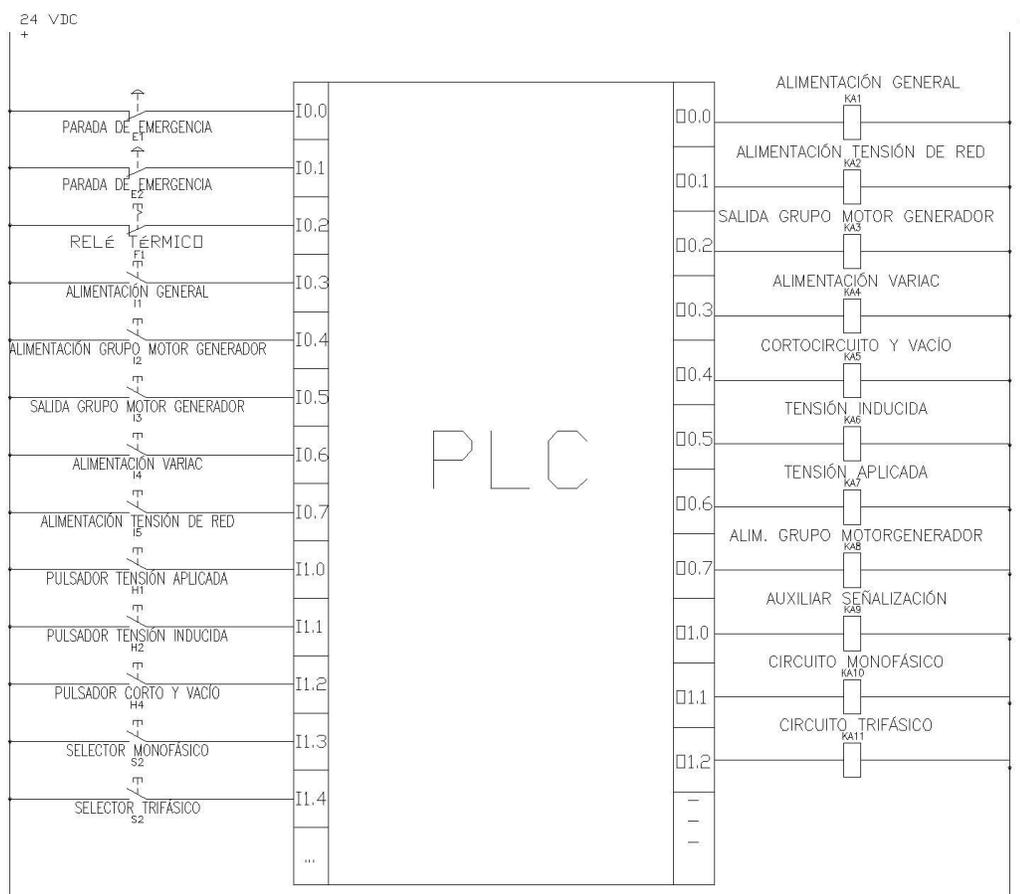
Referencia	MY2-DC24(S)	MY2-02-DC24	MY2N-DC24(S)
Fabricante	Omron	Omron	Omron
Voltaje de la Bobina:	24 VDC	24 VDC	24 VDC
Capacidad de Corriente de los Contactos	10 A	10 A	10 A
Voltaje de Contactos	250 VAC, 125 VDC	250 VAC, 125 VDC	250 VAC, 125 VDC
Costo	\$24.000	\$32.800	\$15.100

Fuente: *OMRON*

7.5 CIRCUITO DE ALIMENTACIÓN

La lógica de cableado ocurre dentro del PLC sin embargo su alimentación y la de sus salidas se da externamente mediante el uso de fuentes de tensión para las entradas o para el PLC en sí. La figura a continuación mostrada describe la conexión del PLC suponiendo que su alimentación es a 240 Vac; sin embargo en caso de que se escoja uno de ellos con alimentación igual a 24Vdc lo único que debe hacerse es alimentarlo desde la fuente de tensión fija.

Figura 34. Alimentación de pulsadores y bobinas de salida



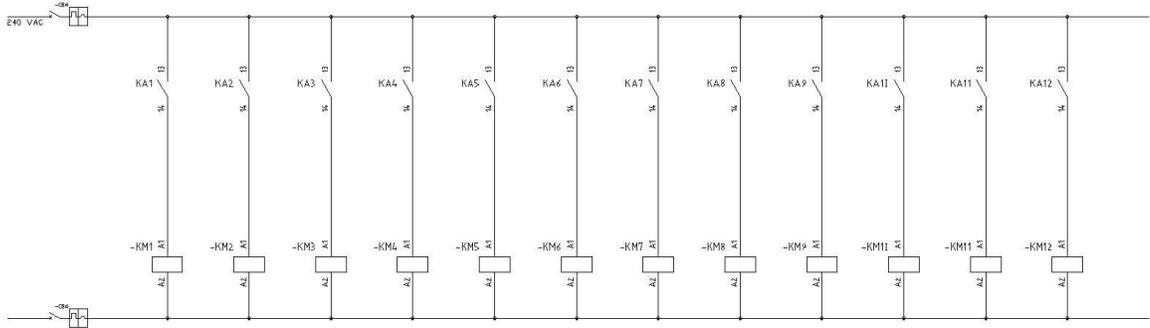
Fuente: *El Autor*

Los pulsadores utilizados con anterioridad en el campo de pruebas pueden reutilizarse al cambiar su tensión de alimentación teniendo en cuenta la corriente de entrada de cada uno de los elementos. En el caso del selector S2 que se utiliza en

el proceso de automatización se seleccionan dos entradas; una que permita energizar el circuito monofásico y otro que alimenta el circuito trifásico.

Para la alimentación del circuito de potencia se utilizan contactores auxiliares como los de la tabla 25 que al alimentar sus contactos NA como lo muestra la figura 42 energizan las bobinas de cada uno de sus contactores principales.

Figura 35. Circuito de potencia PLC



Fuente: *El Autor*

7.6 MEJORAS A FUTURO

El campo de pruebas se guía por los requerimientos dados por los entes regulatorios colombianos; sin embargo cualquier mejora puede traer consigo procesos más ágiles, precisos y automatizados. Algunas de las opciones de mejora además de las ya planteadas en los numerales anteriores se planten a continuación junto con una sugerencia de cómo puede ser realizado:

- **Interfaz gráfica:** Los indicadores para la realización de cada una de las pruebas son elementos en su mayoría análogos como voltímetros o amperímetros a excepción del analizador de potencia; cuando el ingeniero encargado de ejecutar las pruebas toma los datos al mismo tiempo que opera al campo se encuentra con el problema de poca precisión en su medida. Si se genera un Sistema de interfaz gráfica las pruebas se podrán realizar de forma casi automática, además de permitir observar la variación de la corriente en las pruebas de tensión aplicada e inducida y los resultados del corto y vacío cuando se desee.
- **Precisión en la operación de reguladores:** Los reguladores son utilizados para llegar a un nivel de tensión requerido específicamente por una prueba

en particular; sin embargo la precisión de la medida requerida depende directamente de la pericia del operario; mediante la automatización de procesos es posible independizar los variac haciendo que se energicen solos hasta llegar a cierto nivel de tensión dependiendo únicamente de ellos; este logro conllevaría a mayor facilidad en la ejecución de ensayos además de procesos más tecnificados.

- Ejecución de varias pruebas al tiempo: Actualmente se presenta el inconveniente de que mientras se ejecuta una prueba y otra es necesario desconectar la alimentación influyendo en los tiempos requeridos para ejecutar un proceso. Una ventaja a futuro puede incluir la posibilidad de ejecutar varias pruebas al tiempo trayendo como ventaja un tiempo menor requerido para ejecutar cualquier prueba.
- Aumento de serie: Actualmente el campo de pruebas se encuentra habilitado solamente para transformadores de distribución; es necesario hacer el cálculo de elementos requeridos para aumentar la capacidad para transformadores de serie 34,5/13,2 teniendo en cuenta la verificación de elementos de potencia como transformadores y de control como pulsadores e instrumentos de medida.

CONCLUSIONES

- El cambio del cableado manual por un automatizado mediante contactores permitió disminuir el riesgo eléctrico al que estaban expuestos los operarios cada vez que se ejecutaba una prueba. Es necesario mantener cada uno de los equipos utilizados puestos a tierra con el fin de garantizar la no existencia de corrientes remanentes
- La construcción de planos actualizados permite a CME diseñar un plan de mejoras a largo, mediano y corto plazo garantizando los más altos estándares de calidad estando siempre de la mano con las nuevas tecnologías ofrecidas por el mercado.
- La automatización de conexiones garantiza confiabilidad en el servicio debido a que en caso de falla su ubicación se hace más sencilla disminuyendo los tiempos que el sistema este fuera de servicio.
- El uso de módulos lógico programables puede facilitar las labores de cableado; si se añaden otros módulos de control como voltímetros digitales que estén en comunicación con el principal el error ocasionado por imprecisiones del operario disminuye sustancialmente.

RECOMENDACIONES

- Antes de iniciar el proceso de diseño de automatización es necesario hacer una búsqueda exhaustiva técnica que incluya los parámetros originales seleccionados por el constructor del elemento; en caso de que no se tengan construya usted mismo los planos requeridos para que pueda completar la labor de desarrollo.
- A pesar de que el circuito de control y de potencia de un sistema van de la mano, es necesario tratar cada uno de ellos independientemente teniendo cuidado de no generar cortocircuito entre los dos sistemas; para evitar este tipo de problemas utilice protecciones diferentes para el sistema de control y para los diferentes sistemas de potencia.
- En el caso de diseño de circuitos de control tenga en cuenta los limitantes ocasionados por la existencia de los equipos en el mercado regional; si no se cuentan con los elementos requeridos lo más aconsejable es adecuarse a las existencias del mercado.
- Permitir que el circuito de señalización se encuentre en el mismo circuito de control puede ocasionar fallas, este debe ser totalmente independiente o de lo contrario cuando se presente una falla los pilotos utilizados inmediatamente se quemarán.
- Verificar el uso de los transformadores de voltaje en conexión al analizador digital de potencia debido a que es posible que su uso sea inoficioso, ocasionando únicamente error en la medida

ANEXOS

Anexo A. Construcción de planos existentes C.M.E.

Anexo C. Propuesta de Diseño de Automatización del Banco

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE EQUIPOS PARA AUTOMATIZACIÓN POR PLC

Tabla 29. Cotización PLCs

	<u>TWDLCAA40DRF</u>	<u>TWDLMDA40DTK</u>	<u>TWDLMDA40DUK</u>
Tipo de producto o componente	Controlador de base compacta	Controlador base modular	Controlador base modular
Número de salida digital	2 transistor 14 relé	16 transistor fuente	16 transistor colector
Tensión de alimentación	100...240 V AC	24 V CC	24 V CC
Tipo de conexión integrada	Adaptador interfaz enlace serie RS232C/RS485 Alimentación Enlace serie sin aislar mini DIN modo Modbus/de carácter maestro/esclavo RTU/ASCII RS485 dúplex med. 38.4 kbit/s	Alimentación Enlace serie sin aislar mini DIN modo Modbus/de carácter maestro/esclavo RTU/ASCII RS485 dúplex med. 38.4 kbit/s	Alimentación Enlace serie sin aislar mini DIN modo Modbus/de carácter maestro/esclavo RTU/ASCII RS485 dúplex med. 38.4 kbit/s
	<u>TWDLCAA40DRF</u>	<u>TWDLMDA40DTK</u>	<u>TWDLMDA40DUK</u>
Corriente de entrada digital	7 mA I0.2 a I0.5 7 mA I0.8 a I0.23 11 mA I0.0 a I0.1 11 mA I0.6 a I0.7	5 mA I0.0 a I0.1 5 mA I0.6 a I0.7 7 mA I0.2 a I0.5 7 mA I0.8 a I0.23	5 mA I0.0 a I0.1 5 mA I0.6 a I0.7 7 mA I0.2 a I0.5 7 mA I0.8 a I0.23
Conexión de e/s	Bornero de tornillo no extraíble	Conector HE -10	Conector HE -10
Límites tensión alimentación	85...264 V	20,4...26,4 V	20,4...26,4 V
Memoria de programa	3000 instrucciones	3000 instrucciones 6000 instrucciones con cartucho de memoria de 64 K	3000 instrucciones 6000 instrucciones con cartucho de memoria de 64 K
Número de entrada analógica	C	1	1
Rango de entrada analógica	C	0...10 V	0...10 V
PRECIO	\$735 294	\$929 411	\$833 823.53

Fuente: Schneider Electric (Costo para Elementos comprados en Estados Unidos)

Tabla 30 Fuentes fijas de 24 VDC

	LOGO	MEAN WELL	RHONA
Referencia	6EP1331-1SH03	NES-35-24	SPA-030-24
Vin	100-240 VAC	85-264 VAC	85-264 VAC
Potencia	31,2 W	36 W	30 W
In	1,3 A	1,5 A	1,5 A
PRECIO	\$ 146.431	\$50.300	\$46.721

Fuente: *El Autor*

Tabla 31. Contactores auxiliares

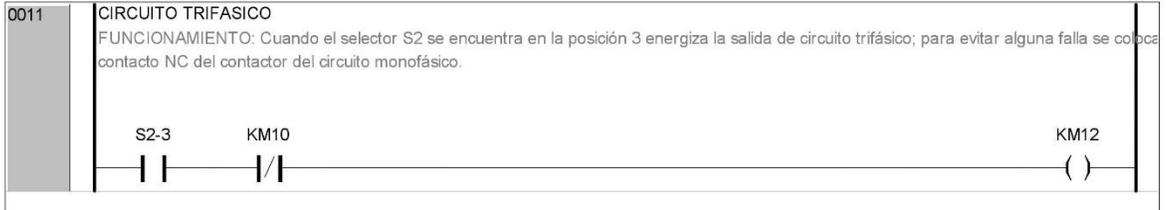
ESPECIFICACIONES

Referencia	MY2-DC24(S)	MY2-02-DC24	MY2N-DC24(S)
Fabricante	Omron	Omron	Omron
Voltaje de la Bobina:	24 VDC	24 VDC	24 VDC
Potencia Consumida:	900 mW	900 mW	900 mW
Producto:	Power Relays	Power Relays	Power Relays
Serie:	MY	MY	MY
Tipo:	Indicator	Cube	Indicator
Corriente Bobina:	37.7 mA	37.7 mA	37.7 mA
Capacidad de Corriente de los Contactos	10 A	10 A	10 A
Voltaje de Contactos	250 VAC, 125 VDC	250 VAC, 125 VDC	250 VAC, 125 VDC
Costo	\$24.000	\$32.800	\$15.100

Fuente: *OMRON*

0001	PROGRAM PLC_PRG
0002	VAR
0003	KM1: BOOL; (*Contactor Alimentación General *)
0004	E1: BOOL; (*Parada de Emergencia Tablero de Mando *)
0005	E2: BOOL; (*Parada de Emergencia 2 - Tablero de Control *)
0006	F1: BOOL; (*Relé Térmico *)
0007	I1: BOOL; (*Selector Alimentación General *)
0008	I2: BOOL; (*Selector Alimentación Grupo Motor-Generador *)
0009	KM8: BOOL; (*Contactor Alimentación Grupo Motor Generador*)
0010	KM2: BOOL; (*Contactor Alimentación Tensión de Red
0011	*)
0012	I3: BOOL; (*Selector Salida Grupo Motor Generador*)
0013	KM3: BOOL; (*Contactor Salida Grupo Motor Generador
0014	*)
0015	I5: BOOL; (*Selector Alimentación Tensión de Red
0016	*)
0017	I4: BOOL; (*Selector Alimentación Variac
0018	*)
0019	KM4: BOOL; (*Contactor Alimentación Variac*)
0020	H1: BOOL; (*Pulsador Tensión Aplicada
0021	*)
0022	KM5: BOOL; (*Contactor Corto Circuito y Vacío
0023	*)
0024	KM6: BOOL; (*Contactor Tensión Inducida
0025	*)
0026	KM7: BOOL; (*Contactor Tensión Aplicada
0027	*)
0028	H2: BOOL; (*Pulsador Tensión Inducida
0029	*)
0030	H4: BOOL; (*Pulsador Corto Circuito y Vacío
0031	*)
0032	KM9: BOOL; (*Contactor Señalización Balizas
0033	*)
0034	S2: BOOL; (*Selector 2 - Posición 1 - Circuito Monofásico
0035	*)
0036	KM10: BOOL; (*Contactor Circuito Monofásico
0037	*)
0038	KM12: BOOL; (*Contactor Circuito Trifásico
0039	*)
0040	END_VAR
0001	<p>ALIMENTACION_GENERAL</p> <p>ARRANQUE: Cuando el selector I1 se acciona queda enclavado automáticamente cerrando el circuito ocasionando que se energice la bobina de principal KM1</p> <p>PARADA: Cuando se abre el contacto de I1 se abre el circuito ocasionando que se desenergice el contactor de la alimentación principal.</p> <p>PARADA DE EMERGENCIA Y PROTECCIONES: La parada E1 actua desde el tablero de mando en caso de que se presente una falla con la ej</p>
0002	<p>ALIMENTACION_GRUPO_MOTOR_GENERADOR</p> <p>Arranque: Para energizar el contactor KM8 encargado de la alimentación del grupo motor generador se cierra el circuito cerrando el contacto del selector I2; para que la bobina del contactor se energice antes debe haberse cerrado el contacto de KM1.</p> <p>PARADA: Al abrir el selector I2 se desenergiza el contactor KM2.</p> <p>PROTECCIÓN Y EMERGENCIA: Si se acciona alguna de las protecciones presentes en la primera línea se desenergiza todo el circuito aguas al</p>
0003	<p>SALIDA_GRUPO_MOTOR_GENERADOR</p> <p>ARRANQUE: Para energizar el contactor KM3 debe haberse cerrado el contacto NA de KM8 además de cerrar el selector I3.</p> <p>PARADA: Al abrir el selector I3 se desenergiza el contactor KM3.</p> <p>PROTECCIÓN Y EMERGENCIA: Si se acciona alguna de las protecciones presentes en la primera línea se desenergiza todo el circuito aguas al la presente línea; además de ello para evitar cortocircuitos el circuito solo puede completarse mientras el contactor KM2 referido a la alimentación</p>

0004	<p>ALIMENTACION_TENSION_DE_RED</p> <p>ARRANQUE: El circuito de alimentación desde la red es utilizado para las pruebas de cortocircuito, vacío y tensión aplicada. Para energizar la bobina del contactor KM2 no debe estar energizado el contactor KM8 referente a la alimentación del grupo motor generador ni tampoco el contactor KM3 debido a que puede presentar corrientes residuales en el generador; desde el punto de vista de control se utilizan dos contactos NC de KM8 y KM3.</p> <p>PARADA: La parada se hace abriendo el selector I5.</p> 
0005	<p>ALIMENTACION_VARIAC</p> <p>ARRANQUE: Para que el variac funcione debe tener una entrada de energía por ello se utilizan 2 contactos NA de KM2 y KM3. La bobina del contactor variac KM4 se activa mediante la acción del selector I4.</p> <p>PARADA: La parada se hace abriendo el selector I4.</p> <p>PROTECCIÓN Y EMERGENCIA:</p> 
0006	<p>TENSION_APLICADA</p> <p>ARRANQUE: Cuando el contacto NA de KM4 se cierra permite que al cerrar el pulsador H1 se pueda aplicar tensión al transformador en prueba para poder ejecutar una de las pruebas al tiempo por lo que se utilizan contactos NC de los contactores KM5 y KM6 que indican cortocircuito y vacío y prueba de tensión inducida.</p> <p>PARADA: El contactor solo funciona mientras se tenga presionado el pulsador H1</p> 
0007	<p>TENSION_INDUCIDA</p> <p>ARRANQUE: Cuando el contacto NA de KM4 se cierra permite que al cerrar el pulsador H1 se pueda aplicar tensión al transformador en prueba para poder ejecutar una de las pruebas al tiempo por lo que se utilizan contactos NC de los contactores KM5 y KM7</p> <p>PARADA: El contactor solo funciona mientras se tenga presionado el pulsador H2</p> <p>PROTECCIÓN Y EMERGENCIA:</p> 
0008	<p>CORTOCIRCUITO-VACIO</p> <p>ARRANQUE: Cuando el contacto NA de KM4 se cierra permite que al cerrar el pulsador H1 se pueda aplicar tensión al transformador en prueba para poder ejecutar una de las pruebas al tiempo por lo que se utilizan contactos NC de los contactores KM5 y KM7</p> <p>PARADA: El contactor solo funciona mientras se tenga presionado el pulsador H4</p> <p>PROTECCIÓN Y EMERGENCIA:</p> 
0009	<p>SENALIZACION_ALARMAS</p> <p>FUNCIONAMIENTO: Cuando se ejecuta alguna de las pruebas el contactor KM9 es energizado ocasionando que en el circuito de potencia se energicen las balizas giratorias. Cuando se deja de ejecutar alguna de las pruebas se apagan.</p> 
0010	<p>CIRCUITO MONOFASICO</p> <p>FUNCIONAMIENTO: Cuando el selector S2 se encuentra en la posición 1 energiza la salida de circuito monofásico; para evitar alguna falla se utiliza un contacto NC del contactor del circuito trifásico.</p> 



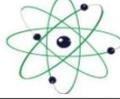
Anexo D. Manual de Uso de Campo de Pruebas C.M.E – SGI

	MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS	HOJA: 93- 119
Elaboró: Jhon Tristancho	TECN-001-I13	ACTUALIZACIONES
Revisó: Ing. Oscar González		REVISION NÚMERO: 02
Aprobó: Luis Ignacio González		FECHA REV.: AGOSTO 2016

MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS

INDICE DE MODIFICACIONES

Rev No	Descripción	Elaborada por	Revisada por	Aprobada por	Fecha
00	Revisión Y Aprobación inicial	Ing. José M. Burbano	Ing. Hermes Llanes	Luis Ignacio González	31/01/2002
01	Actualización de acuerdo a la nueva codificación del SGC	Claudia Torres	Ing. Héctor Pulido	Luis Ignacio González	07/01/2006
02	Automatización y Construcción de Planos	Jhon Tristancho	Ing. Oscar González	Luis Ignacio González	07/09/2016

	MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS	HOJA: 2- 12
Elaboró: Jhon Trisancho	TECN-001-I13	ACTUALIZACIONES
Revisó: Ing. Oscar González		REVISION NÚMERO: 02
Aprobó: Luis Ignacio González		FECHA REV.: AGOSTO 2016

1 OBJETO	3
2 ALCANCE.....	3
3 DEFINICIONES.....	3
4 EQUIPOS DEL CAMPO DE PRUEBAS	3
4.1 GRUPO MOTOR GENERADOR PARA TENSIÓN INDUCIDA	3
4.2 REGULADORES DE TENSIÓN	3
4.3 TRANSFORMADORES	4
5 CIRCUITOS DE FUERZA Y CONTROL.....	5
5.1 CIRCUITO DE FUERZA	5
5.2 CIRCUITO DE CONTROL	6
6 ESQUEMA Y DESCRIPCIÓN DEL PUPITRE DE MANDO.....	6
6.1 DESCRIPCIÓN DEL TABLERO.....	7
7 OPERACIÓN SECUENCIAL DEL PUPITRE DE MANDO	10
8 REFERENCIAS	11

	MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS	HOJA: 3- 12
Elaboró: Jhon Tristancho	TECN-001-I13	ACTUALIZACIONES
Revisó: Ing. Oscar González		REVISION NÚMERO: 02
Aprobó: Luis Ignacio González		FECHA REV.: AGOSTO 2016

1 OBJETO

Establecer los pasos para el correcto manejo, operación y mantenimiento del campo de pruebas de transformadores de distribución y media Potencia de CME Ltda.

2 ALCANCE

Se incluyen los temas que se consideran fundamentales para el completo conocimiento de los equipos y su operación secuencial hasta llevar a buen término las pruebas completas de un transformador. Los temas son:

- Relación de equipos con sus características.
- Diagrama de los circuitos de fuerza y control.
- Esquema y descripción del tablero de control.
- Operación secuencial para cada una de las pruebas.

3 DEFINICIONES

N/A

4 EQUIPOS DEL CAMPO DE PRUEBAS

4.1 GRUPO MOTOR GENERADOR PARA TENSIÓN INDUCIDA

Máquina	CARACTERÍSTICAS							
	Fases	Potencia (kW)	Un	In	Frecuencia	Marca	Excitatriz	
							U	I
Motor	3	16	220/120		60	PILLER		
Generador	3		220/120	60	409			

4.2 REGULADORES DE TENSIÓN

El campo de prueba cuenta con dos reguladores de voltaje (Variac), los cuales se emplean de acuerdo a los requerimientos de potencia de la prueba en desarrollo.

El regulador N° 1 trifásico se encuentra fuera del pupitre de mando y se acciona por un mecanismo servomotor, comandado desde el pupitre.

El regulador N° 2 monofásico se encuentra ubicado a un lado del pupitre de mando; se acciona en forma manual para incrementar tensión, cuando se utiliza.

Las características de estos equipos se consignan en la tabla siguiente:

	MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS	HOJA: 4- 12
Elaboró: Jhon Trisancho	TECN-001-I13	ACTUALIZACIONES
Revisó: Ing. Oscar González		REVISION NÚMERO: 02
Aprobó: Luis Ignacio González		FECHA REV.: AGOSTO 2016

CARÁCTERÍSTICAS	REGULADOR TRIFÁSICO	REGULADOR MONOFÁSICO
Potencia nominal	50KVA	3.3KVA
Rango de tensión	10-220	0-220 V
Corriente Máxima	134	15
Fases	3	1
Tipo de accionamiento	SERVOMOTOR	MANUAL
Marca		YAMABISHI ELECTRIC

4.3 TRANSFORMADORES

CARÁCTERÍSTICAS	TRANSFORMADOR INTERMEDIO, ELEVADOR	TRANSFORMADOR INTERMEDIO, ELEVADOR	TRANSFORMADOR ELEVADOR PARA TENSIÓN APLICADA
Potencia nominal (kVA)	5	30	30
Tensión nominal AT/BT (V)	440/214	440/214	74000/220
Corriente nominal AT/BT (Amperios)	11.36/22.72	78.36/39.46	0.42/136.36
Fases	1	3	1
Marca	Propia fabricación	Propia fabricación	Propia Fabricación

4.4 NOMENCLATURA ELEMENTOS PARA CIRCUITOS

El circuito de control y potencia cuenta con el uso de 13 contactores, 14 pilotos y



MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS

HOJA: 5- 12

Elaboró: Jhon Trisancho

Revisó: Ing. Oscar González

Aprobó: Luis Ignacio González

TECN-001-I13

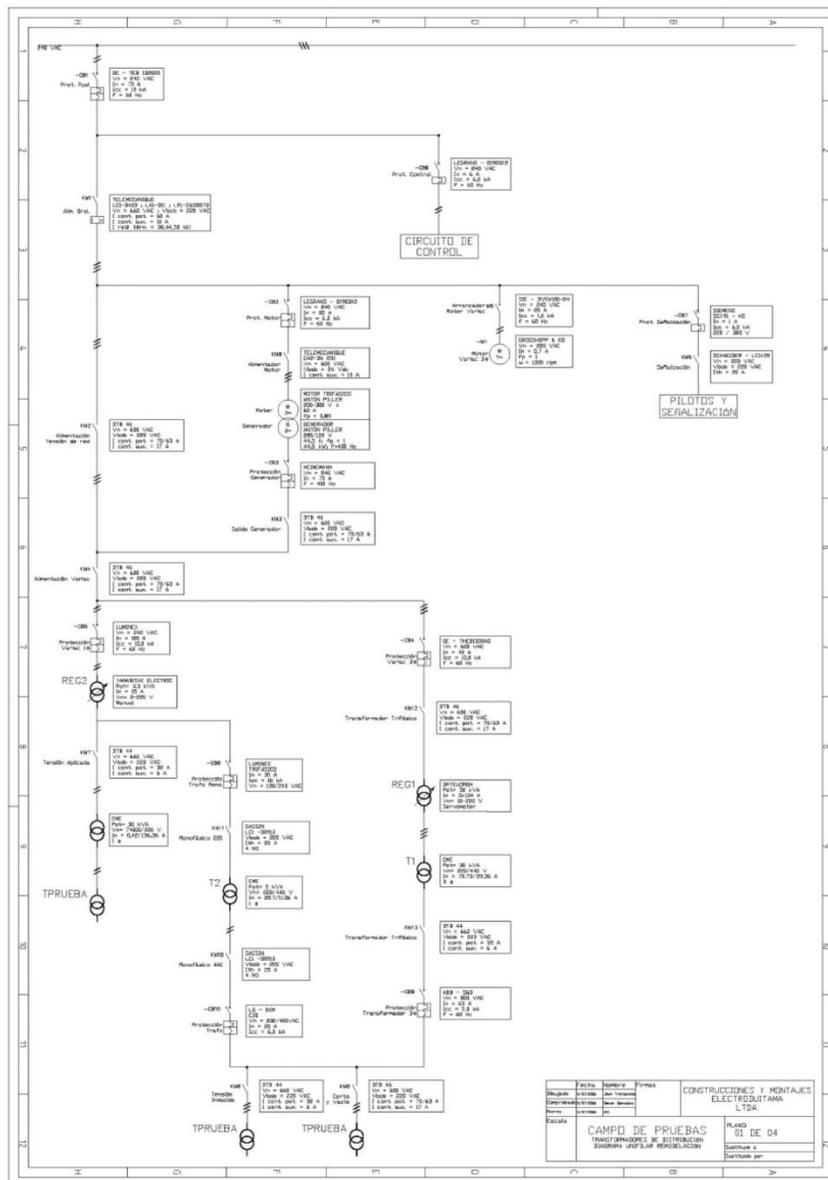
ACTUALIZACIONES

REVISION NÚMERO: 02

FECHA REV.: AGOSTO 2016

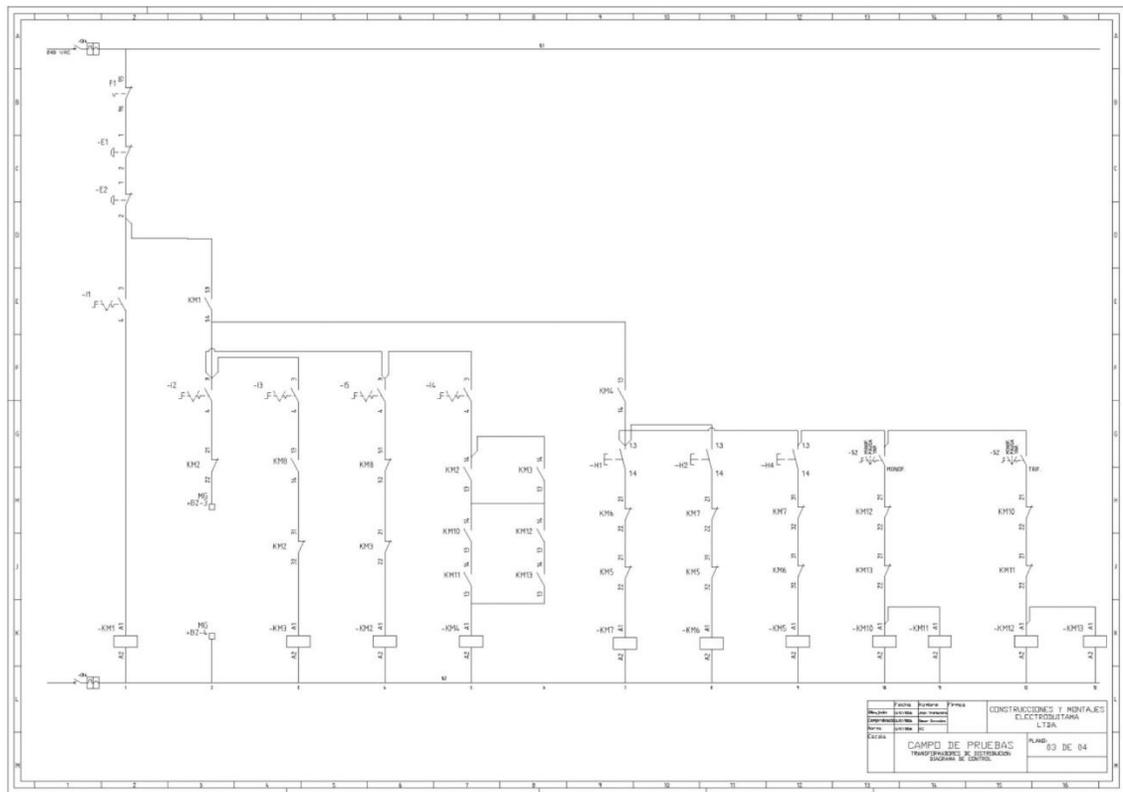
5 CIRCUITOS DE FUERZA Y CONTROL

5.1 CIRCUITO UNIFILAR



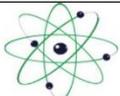
	MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS	HOJA: 6- 12
Elaboró: Jhon Tristancho	TECN-001-113	ACTUALIZACIONES
Revisó: Ing. Oscar González		REVISION NÚMERO: 02
Aprobó: Luis Ignacio González		FECHA REV.: AGOSTO 2016

5.2 CIRCUITO DE CONTROL



6 ESQUEMA Y DESCRIPCIÓN DEL PUPITRE DE MANDO

El esquema general del tablero de control se ilustra en la figura 1; en ésta aparecen los instrumentos y los comandos que se emplean para la ejecución de las pruebas que se les hacen a los transformadores reparados en CME.

	MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS	HOJA: 7-12
Elaboró: Jhon Tristancho	TECN-001-I13	ACTUALIZACIONES
Revisó: Ing. Oscar González		REVISION NÚMERO: 02
Aprobó: Luis Ignacio González		FECHA REV.: AGOSTO 2016

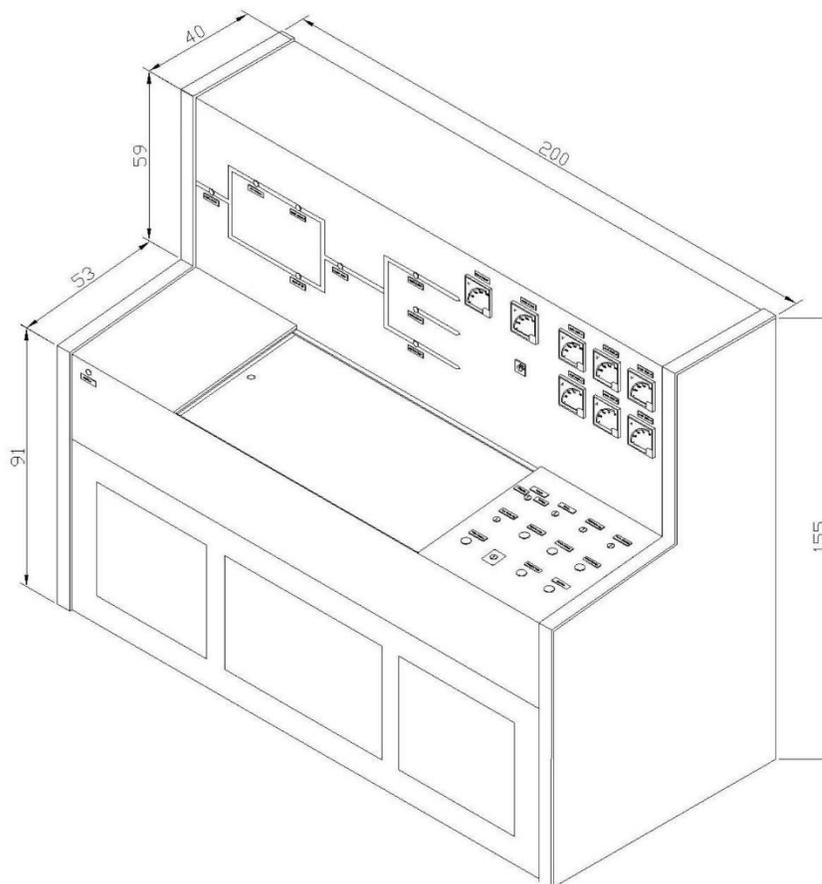


Figura 2 Pupitre de mando campo de prueba

A cada uno de los elementos que aparecen en el pupitre se le ha asignado un número que lo identificará para orientar al usuario en el manejo paso a paso del laboratorio de pruebas.

6.1 DESCRIPCIÓN DEL TABLERO

En la figura 3 que aparece a continuación, se visualiza con un mímico y por medio de señales luminosas el avance en la energización de los equipos así:

	MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS	HOJA: 8- 12
Elaboró: Jhon Tristancho	TECN-001-113	ACTUALIZACIONES
Revisó: Ing. Oscar González		REVISION NÚMERO: 02
Aprobó: Luis Ignacio González		FECHA REV.: AGOSTO 2016

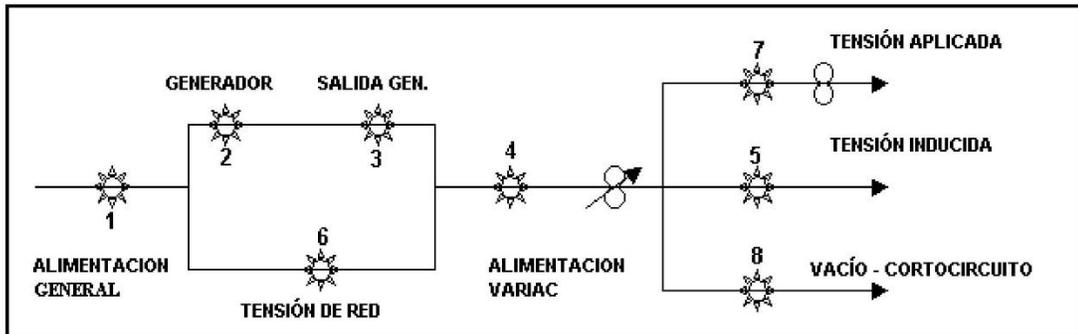
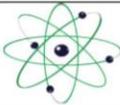


Figura 4 Circuito mímico del campo de pruebas

- **H1** – Esta señal aparece marcada en el tablero como “*Alimentación general*”. Se activa cuando se encuentra conectada la acometida general del laboratorio de pruebas.
- **H8** – Esta luz piloto se encenderá cuando se energiza el motor del grupo motor-generator empleado para prueba de tensión inducida. En el tablero está marcada como “*Alimentación Generator*”.
- **H2** - Este piloto se encenderá cuando se energice la salida del generador para iniciar la prueba de tensión inducida. Cabe anotar que genera a 220 voltios y 420 Hz y con esta señal alimenta el variac que a su vez alimentará al transformador intermedio elevador. En el tablero se encuentra marcado como “*Salida Generator*”.
- **H4** – Este piloto se encenderá cuando se dé alimentación a alguno de los reguladores de voltaje (Variacs). Se encuentra marcado en el tablero como “*Alimentación Variac*”.
- **H6** – Este piloto se encenderá cuando se energicen las puntas de prueba para tensión inducida. En el tablero se encuentra marcado como “*Tensión inducida*”.
- **H3** – Este piloto se encenderá cuando no se utilice el grupo motor-generator, sino alimentación directa de la red.
- **H7** – Este piloto se encenderá cuando se dé salida al transformador elevador de tensión aplicada y únicamente cuando se vaya a realizar esta prueba. Se encuentra marcado, en el tablero, como “*Tensión aplicada*”.
- **H5** – Este piloto se encenderá cuando se vayan a realizar las pruebas para medición de pérdidas en vacío o de pérdidas con carga (cortocircuito). En el tablero se encuentra marcado como “*Corto circuito, Prueba de vacío*”.

A la derecha del área descrita, se encuentra una serie de instrumentos de medida y selectores que se emplean para el monitoreo grueso de las señales de tensión y de corriente utilizadas en las diferentes pruebas. Para efectos de este instructivo, estos instrumentos y accesorios de monitoreo se identificarán con una letra y un número que indicarán si es un voltímetro, o un selector, así:

- **V1** – Voltímetro digital Fluke 81760111. Este voltímetro mide la tensión que se está aplicando al transformador elevador, de tensión aplicada, por el lado de baja tensión. La tensión leída en este, debe multiplicarse por la relación del transformador de tensión

	MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS	HOJA: 9- 12
Elaboró: Jhon Trisancho	TECN-001-I13	ACTUALIZACIONES
Revisó: Ing. Oscar González		REVISION NÚMERO: 02
Aprobó: Luis Ignacio González		FECHA REV.: AGOSTO 2016

aplicada (327.27) para obtener la tensión que se está aplicando al transformador bajo prueba durante el ensayo de tensión aplicada. En el tablero se encuentra identificado como “*Tensión Aplicada*”.

- **V2** – Voltímetro clase 1.5, rango 0 a 300 voltios. Este voltímetro indica el nivel de tensión presente en la línea de alimentación. En el tablero se identifica con el nombre de “*Tensión de línea*”.
- **V3, V4, V5** – Voltímetros clase 1.5, rango de medida 0 a 600 voltios. Estos voltímetros indican el nivel de tensión a la salida de los reguladores de voltaje (variacs). En el tablero se encuentran identificados como “**Salida variac L1**”, “**Salida variac L2**”, y “**Salida variac L3**”, respectivamente.
- **S1** – Selector de cuatro posiciones marcadas como **0, RS, ST, RT**. Este selector permite seleccionar las líneas de donde se tomará la tensión leída en **V2**.

En la parte horizontal (o mesa) del pupitre de mando se encuentra en primer lugar, de izquierda a derecha, un alojamiento para todos los instrumentos empleados en la medición de los parámetros eléctricos del transformador bajo prueba.

En la parte derecha del pupitre se encuentra una serie de botones y selectores que comandan la operación del campo de pruebas. Para efectos de este instructivo, a todos y cada uno de los elementos mencionados se les ha asignado un código de identificación en la figura N° 1, para proceder a la descripción de su función dentro de la secuencia de pruebas, así:

- **Ic**: Este dispositivo comanda todo el campo de prueba, se acciona por medio de una llave, si no está conectado ninguno de los demás comandos responderá. En el tablero se encuentra sin identificación específica.
- **I1**: Este es un selector. Da la entrada general de la red, girado a la izquierda apaga la alimentación general. Girado a la derecha en posición vertical da entrada a la alimentación de la red. En el tablero se encuentra identificado como “*General*”
- **I2**: Este selector se encuentra identificado en el tablero como “*Alimentación generador*”. Como su nombre lo indica, da entrada para energizar y arrancar el grupo motor-generador para la prueba de tensión inducida. Girado a la izquierda apaga el grupo, girado a la derecha en posición vertical arranca el grupo motor-generador.
- **I3**: Este interruptor se encuentra identificado en el tablero como “*Salida generador*”. Girado a la izquierda, está apagado. Girado a la derecha, en posición vertical, da la salida de tensión del generador al variac N° 1.
- **I4**: Este interruptor, se encuentra identificado en el tablero como “*Alimentación Variac*”, Girado a la izquierda, está apagado. Girado a la derecha en posición vertical energiza al regulador de voltaje o variac.
- **I5**: Este interruptor da la entrada de alimentación directamente desde la red al variac. En el tablero se encuentra identificado como “*Alimentación de red*”.
- **H1**: Este es un interruptor de presión. Controla la salida al transformador de tensión aplicada y debe permanecer oprimido mientras se desarrolla la prueba, si se suelta se suspende la misma. En el tablero se encuentra identificado como “*Tensión aplicada*”. Y es de color rojo
- **H2**: Este es un interruptor de presión. Controla la salida del variac al transformador bajo prueba, durante el ensayo de tensión inducida. Debe permanecer oprimido durante el

	MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS	HOJA: 10- 12
Elaboró: Jhon Trisancho	TECN-001-I13	ACTUALIZACIONES
Revisó: Ing. Oscar González		REVISION NÚMERO: 02
Aprobó: Luis Ignacio González		FECHA REV.: AGOSTO 2016

desarrollo de la prueba. Si se suelta, se suspende la misma. En el tablero se encuentra identificado como "*Tensión inducida*".

- **H3:** Este pulsador sirve para incrementar o disminuir la tensión que se está aplicando con el variac. En el tablero se encuentra identificado como "*Variac*".
- **H4:** Este interruptor de presión da entrada a los transformadores de medida que a su vez dan señal al analizador digital de potencia, los cuales son empleados para la medida de pérdidas sin carga, corrientes de excitación, pérdidas con carga (en el cobre) y tensión de cortocircuito. El interruptor debe permanecer oprimido mientras se toman las lecturas de los instrumentos. El interruptor se encuentra identificado en el tablero como "*Instrumentos de medida Cortocircuito – Prueba de vacío*".
- **M1:** Este es un selector que permite elegir el sentido de variación del regulador de voltaje N°1 (Variac). Muestra tres puntos: a izquierda "1", al centro "0", a derecha "2". Cuando está en el número 1 el regulador aumenta tensión, cuando está en la posición 2, disminuye la tensión, esto es a medida que se pulsa el "**H3**". En la posición "0", está neutro. Este dispositivo se identifica, en el tablero, como "**Moto-reductor variac**".
- **S2:** Selector de 3 posiciones que permite seleccionar el tipo de conexión presentado en el banco de pruebas, al lado izquierdo del selector habilita el circuito de alimentación monofásico utilizado en las pruebas de cortocircuito, vacío, aplicada e inducida; el lado derecho del selector limita la conexión a un circuito trifásico utilizado en las pruebas de cortocircuito, vacío y tensión inducida.
- **E1, E2:** Estos dos interruptores son de emergencia, al ser pulsados, desconectan todo el campo de prueba. Se operan cuando se presente cualquier inconveniente durante el desarrollo de las pruebas. Es indiferente cual de los dos se acciona, el resultado es el mismo: desconexión total del campo de prueba.

7 OPERACIÓN SECUENCIAL DEL PUPITRE DE MANDO

Para la operación secuencial se describirá la ejecución paso a paso de cada una de las pruebas que se efectúan en este campo de prueba.

- **Prueba de Tensión Aplicada:** Para realizar esta prueba se conectará el transformador bajo prueba de acuerdo al instructivo. TECN-001-I07.
 - Se gira el interruptor **I1** a la derecha (posición "General").
 - Se gira el selector **S2** en la posición central deshabilitando los dos transformadores intermedios.
 - Se gira el interruptor **I5** a la derecha conectando la alimentación de la red.
 - Se gira el interruptor **I4** para conectar la alimentación del variac al trafo intermedio.
 - Se mantiene oprimido el pulsador **H1**, en este momento el transformador bajo prueba queda energizado.
 - Se utiliza el variac monofásico para alcanzar el valor de voltaje requerido en baja tensión teniendo en cuenta la relación de transformación del transformador de tensión aplicada girando el mismo hacia la derecha.
 - Esta lectura se toma en el voltímetro **V1** de la parte superior del tablero; en caso de que se requiera mayor precisión en la medida, se encuentran dos terminales que permiten la conexión de un multímetro.

	MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS	HOJA: 11- 12
Elaboró: Jhon Tristancho	TECN-001-I13	ACTUALIZACIONES
Revisó: Ing. Oscar González		REVISION NÚMERO: 02
Aprobó: Luis Ignacio González		FECHA REV.: AGOSTO 2016

- A partir de este momento se cuentan los 60 segundos que debe durar la prueba.
 - Luego de completar el tiempo de ejecución de la prueba se utiliza el variador de tensión monofásico para disminuir la tensión aplicada sobre el transformador; cuando el valor llegue de nuevo a la mínima tensión aplicada se suelta el pulsador **H1**.
- **Prueba de Tensión Inducida:** Esta prueba se realiza de acuerdo a lo expuesto en el instructivo **TECN-001-I08**.
 - Una vez conectado el transformador de acuerdo al Instructivo mencionado se gira el interruptor **I1** a la posición general.
 - Se utiliza el selector **S2** para determinar si el transformador a probarse es monofásico o trifásico; en caso de que sea monofásico se gira el selector a la izquierda, en caso de que sea trifásico se gira el mismo elemento hacia la derecha.
 - Seguidamente se gira el interruptor **I2** a la derecha, para darle arranque al grupo motor-generator, el cual genera a una frecuencia de 420 Hz.
 - Cuando se ha estabilizado el grupo, se gira el interruptor **I3** a la derecha con lo cual se da salida del generador al regulador de voltaje (variac).
 - Se oprime el pulsador **H2** el cual da salida de tensión a las puntas que se conectan al transformador bajo prueba y se mantiene oprimido mientras dura la prueba.
 - En caso de que sea un transformador trifásico se coloca el selector **M1** en la posición 1 (sube), y se empieza a oprimir el pulsador **H3** hasta alcanzar el valor de voltaje que se va a aplicar al trafo bajo prueba. Este voltaje se lee en los voltímetros **V3, V4, V5**.
 - Si es un transformador monofásico la variación de la tensión se hace mediante el uso del regulador monofásico.
 - Una vez alcanzado el voltaje de prueba se empieza a contar **17 segundos que es el tiempo de duración de la prueba**.
 - Para el transformador trifásico, cuando se han cumplido, se gira el conmutador **M1** a la posición **2** (baja) y se oprime el pulsador **H3** hasta que el valor de voltaje disminuya por lo menos a 1/3 del voltaje aplicado, se suelta el pulsador **H2** y la prueba ha concluido.
 - Para el transformador monofásico se gira la perilla del regulador monofásico después de haber concluido el tiempo requerido se gira la perilla hacia el lado izquierdo hasta haber alcanzado un 1/3 del voltaje aplicado.
 - Se continúa hasta bajar a cero con el pulsador **H3** y se apaga el equipo.
 - **Medida de pérdidas en vacío y corrientes de excitación; pérdidas en el cobre y tensión de cortocircuito:** (Ver instructivos TECN-001-I09 y TECN-001-I10) Para la medición de pérdidas se emplean los transformadores de medida y el analizador digital de potencia.
 - Se acciona el interruptor **I1** a la posición *general*, dando entrada a la alimentación general.
 - Se utiliza el selector **S2** para determinar si el transformador a probarse es monofásico o trifásico; en caso de que sea monofásico se gira el selector a la izquierda, en caso de que sea trifásico se gira el mismo elemento hacia la derecha.
 -
 - Se acciona el interruptor **I5** a la derecha para dar entrada de la alimentación de red al variac.
 - Se acciona **I4** Para dar alimentación al regulador de voltaje (variac).

	MANEJO Y OPERACIÓN DEL CAMPO DE PRUEBAS	HOJA: 12- 12
Elaboró: Jhon Tristancho	TECN-001-I13	ACTUALIZACIONES
Revisó: Ing. Oscar González		REVISION NÚMERO: 02
Aprobó: Luis Ignacio González		FECHA REV.: AGOSTO 2016

- Presionar y mantener en esta posición el pulsador **H4**, marcado “*Instrumentos de medida, cortocircuito prueba de vacío*”;
- Girar el interruptor **M1** a la posición 1 (sube).Incrementar el voltaje oprimiendo el pulsador **H3**, (marcado “*variac*”), hasta obtener el valor de voltaje o de corriente deseado, dependiendo de la prueba. Estos parámetros se medirán el analizador digital de potencia
- Si es un transformador monofásico la variación de la tensión se hace mediante el uso del regulador monofásico.
- Tomar las lecturas correspondientes de voltaje, corriente y potencia.
- Accionar el conmutador **M1** a la derecha a la posición 2 (baja) y oprimir el pulsador **H3** hasta disminuir el voltaje a cero.
- En el caso del transformador monofásico en pruebas disminuir la tensión mediante el regulador de tensión monofásico.
- Apagar el equipo.

REFERENCIAS

TECN-001-I07	ENSAYO DE TENSIÓN APLICADA
TECN-001-I09	MEDIDA DE PÉRDIDAS EN VACÍO
TECN-001-I10	DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE CORTO CIRCUITO Y PÉRDIDAS CON CARGA
TECN-001-D01	DIAGRAMA UNIFILAR CAMPO DE PRUEBAS
TECN-001-D02	DIAGRAMA DE POTENCIA CAMPO DE PRUEBAS
TECN-001-D03	DIAGRAMA DE CONTROL CAMPO DE PRUEBAS
TECN-001-D04	DIAGRAMA DE SEÑALIZACIÓN CAMPO DE PRUEBAS
TECN-001-D05	TABLERO DE MANDO CAMPO DE PRUEBAS

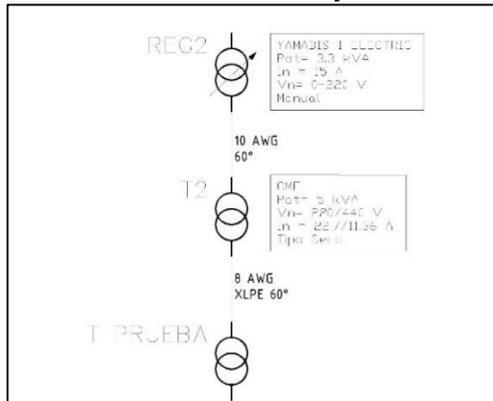
Anexo E. Calculo de Equipos para Pruebas

El anexo a continuación presentado es la versión extendida del capítulo tomado del libro de tésis; debido a ello continua con la misma numeración de ecuaciones y gráficas.

6.7.1 Ensayo de pérdidas en vacío y cortocircuito Los equipos necesarios para ejecutar las pruebas de cortocircuito y vacío incluyen el uso de un analizador digital de potencia, tres transformadores de corriente y tres transformadores de tensión, dicho análisis ya fue hecho en el diseño original del campo inicial por lo que a continuación se procede a comprobar el dimensionamiento de conductores, protecciones y el transformador teniendo en cuenta que para cada caso se utilizan dos circuitos independientes.

6.7.1.1 Red Monofásica Tomando del anexo 2 un extracto se encuentra la figura 34. Para ejecutar la prueba de cortocircuito y la de vacío desde el tablero de mando se alimenta el transformador con la red que viene desde el operador de red que para este caso es un transformador público de 45 kVA de relación 13200 / 220-128 V de configuración Dyn5 refrigerado en aceite; desde allí se alimenta el regulador de tensión 2 (monofásico) de operación manual y con capacidad de corriente de hasta 15 A. El regulador de tensión alimentará el transformador intermedio de potencia igual a 5 kVA tipo seco que tiene como fin aumentar el nivel de tensión para disminuir la corriente de alimentación, desde el punto de vista de potencia este transformador alimentará al transformador de prueba variando la tensión manualmente desde el variac monofásico.

Figura 36. Diagrama Unifilar Prueba Cortocircuito y Vacío Transformadores Monofásicos



Fuente: El Autor

- Verificación de Transformador:

Para determinar la potencia requerida del transformador intermedio para ejecutar la prueba de vacío se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{vac} = I_{vac} * V_{vac} \text{ (Ec. 10)}$$

El transformador existente en las instalaciones de C.M.E tiene una potencia de 5 kVA, además de ello teniendo en cuenta que los transformadores de distribución monofásicos manejan una relación de 13200 V / 240 V es posible determinar que:

$$P_{vac} = 5000 \text{ VA}$$
$$V_{vac} = V_{BT} = 240 \text{ V}$$

$$I_{vac} = \frac{P_{vac}}{V_{vac}} = \frac{5000 VA}{240 V} = 20,83 A \text{ (Ec. 11)}$$

La corriente máxima para una prueba de vacío debe ser menor a 20,83 A teniendo en cuenta que se aplica por el lado secundario del transformador; sin embargo existe el limitante del variador de tensión monofásico ya que su corriente nominal es de 15 A; teniendo en cuenta este valor y basándose en la norma NTC 1954 (ICONTEC, 1996) referida a reparación de transformadores incluyendo aquellos fabricados antes de 1996 (peor condición de pérdidas) para un transformador de 167,5 kVA monofásico el porcentaje de corriente nominal en el devanado secundario para la prueba en vacío no debe exceder el 2,1 %, tal que:

$$I_{BT_{167,5 kVA}} = \frac{167500 VA}{240 V} = 697,9166 A \text{ (Ec. 12)}$$

$$I_{vac_{167,5kVA}} = \frac{697,92 A * 2,1}{100} = 14,656 A \text{ (Ec. 13)}$$

Concluyendo que el transformador intermedio para pruebas a transformadores monofásicos puede ejecutar pruebas a transformadores de hasta 167,5 kVA.

Si se prueba la misma potencia del transformador verificando que también pueda ser utilizado para la prueba de cortocircuito se utiliza el mismo método anterior encontrando que:

$$P_{cc} = I_{cc} * V_{cc}$$

$$P_{cc} = I_{BT} * V_{cc}$$

$$I_{BT} = \frac{167500 VA}{13200 V} = 12,68 A$$

$$V_{cc} = \frac{13200 * 3,15}{100} = 416 V$$

$$P_{cc} = 12,68 A * 416 V = 5274 VA$$

Un transformador puede sobrecargarse hasta un 25% de su valor nominal por lo que el transformador intermedio también puede aplicarse a pruebas de cortocircuito en transformadores de hasta 167,5 kVA.

- Selección de Conductores

$$I_n = \frac{5 kVA}{440 V} = 11,36 A$$

$$I_{cond} = I_n * 1,45 = 16,472 A \text{ (Ec. 14)}$$

Por el lado del devanado del secundario del transformador puede utilizarse un conductor de calibre 10 AWG en adelante, sin embargo este cálculo aún no se aplica definitivamente debido a que este cable también debe permitir ejecutar las pruebas aplicadas a transformadores trifásicos.

- Selección de Protecciones

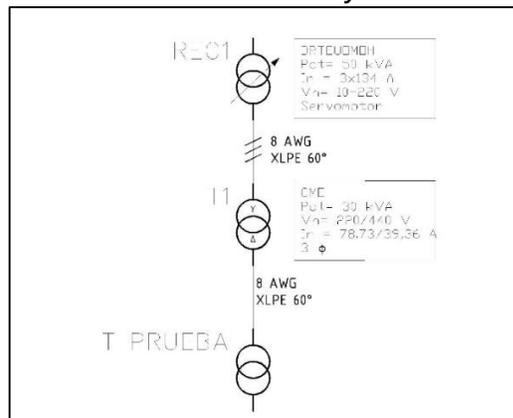
$$I_{prot} = 1,25 * I_n = 14,20 A \text{ (Ec. 15)}$$

La protección existente es de 63 A; se cambia esta misma por una protección de 20 A que es la existente en el ámbito comercial.

6.7.1.2 Red Trifásica El circuito de aplicación de pruebas a transformadores trifásicos utiliza un circuito diferente al de transformadores monofásicos, éste se encuentra mejor explicado en la figura 29.

El circuito para ejecutar las pruebas de corto y vacío a transformadores trifásicos está conectado al operador de red y es accionado mediante el tablero de mando, para su funcionamiento primero llega a un regulador de tensión trifásico de potencia igual a 50 kVA con capacidad de corriente igual a 3x134 A para luego pasar a un transformador trifásico intermedio refrigerado en aceite con relación de transformación 220/440 y potencia igual a 30 kVA de conexión estrella-delta. Los equipos de medición se encuentran mejor explicados en el plano denominado como Circuito de Potencia.

Figura 37. Diagrama Unifilar Prueba Cortocircuito y Vacío Transformadores Monofásicos



Fuente: El Autor

- Verificación de Transformador

Para determinar la potencia requerida del transformador intermedio trifásico se tiene que:

$$P_{vac} = \sqrt{3} * I_{vac} * V_{vac} \text{ (Ec. 16)}$$

El transformador existente en las instalaciones de C.M.E tiene una potencia de 30 kVA, retomando el procedimiento para comprobar la potencia a los transformadores a los cuales se les puede hacer las pruebas de corto y vacío se encuentra que:

$$P_{vac} = 30000 \text{ VA}$$

$$V_{vac} = V_{BT} = 220 \text{ V}$$

$$I_{vac} = \frac{P_{vac}}{V_{vac}} = \frac{30000 \text{ VA}}{220 \text{ V} * \sqrt{3}} = 78,729 \text{ A}$$

La corriente máxima para una prueba de vacío debe ser menor a 78,73; teniendo en cuenta este valor y basándose en la norma NTC 1954 (ICONTEC, 1996) referida a reparación de transformadores incluyendo aquellos fabricados antes de 1996 (peor condición de pérdidas):

$$I_{BT_{1250 \text{ kVA}}} = \frac{1250 \text{ kVA}}{220 \text{ V} * \sqrt{3}} = 3280,39 \text{ A (Ec. 17)}$$

$$I_{vac_{167,5 \text{ kVA}}} = \frac{3280,39 \text{ A} * 1,7}{100} = 55,766 \text{ A (Ec. 18)}$$

Para un transformador de serie 13,2 kV / 220 V y potencia igual a 1250 kVA la potencia requerida para ejecutar las pruebas de cortocircuito y vacío debe ser igual a:

$$P_{vac} = \sqrt{3} * I_{vac} * V_{vac}$$

$$P_{vac} = \sqrt{3} * 55,766 A * 220 V = 21250 VA = 21,25 kVA$$

Por lo que para la ejecución de la prueba de vacío el transformador cumple con la potencia requerida. En el caso de la prueba de cortocircuito para el transformador de la misma potencia retomando la norma NTC 1954 se encuentra que la potencia mínima de transformador requerida debe determinarse como:

$$P_{cc} = \sqrt{3} * I_{cc} * V_{cc}$$

$$P_{cc} = \sqrt{3} * I_{BT} * V_{cc}$$

$$I_{AT} = I_{cc} = \frac{1250 kVA}{13200 V * \sqrt{3}} = 54,67 A$$

$$V_{cc} = \frac{13200 * 1,7}{100} = 224,4 V$$

$$P_{cc} = \sqrt{3} * 54,67 A * 224,4 V = 21,25 kVA$$

El transformador presente en las instalaciones de C.M.E de 30 kVA permite realizar las pruebas de cortocircuito y vacío a un transformador de distribución de 1250 kVA de relación de transformación 13,2 kV /220 V

- Selección de Conductores

$$I_n = \frac{30 kVA}{\sqrt{3} * 440 V} = 39,364 A \text{ (Ec. 19)}$$

$$I_{cond} = I_n * 1,45 = 57,1 A$$

Por el lado de baja tensión se decide utilizar un cable tripolar calibre 8 AWG, temperatura de operación 90 °C, corriente nominal 55 A y nivel de aislamiento del 100%.

- Selección de Protecciones

$$I_{prot} = 1,25 * I_n = 49,2 A \text{ (Ec. 20)}$$

La protección más cercana comercialmente es una protección termo magnética de 63 A, sin embargo actualmente no existe protección alguna por el lado de baja tensión.

6.7.2 Cálculo de impedancia, admitancia y resistencia estándar de un transformador

La impedancia, admitancia y resistencia de un transformador pueden ser halladas mediante los resultados de la prueba en vacío y cortocircuito, estos parámetros son utilizados para poder seleccionar el transformador utilizado para las pruebas de tensión inducida debido a que esta prueba tiene la misma conexión de la prueba en vacío el principio se basa en adaptar los datos ya obtenidos a una frecuencia mayor que para este caso es de 420 Hz.

6.7.2.1 Transformador Trifásico de 1250 kVA De acuerdo a García (Pedro Julián García, 2012) los parámetros de un transformador pueden ser determinados mediante los parámetros de las pruebas de corto y vacío como se verá desarrollado durante los siguientes párrafos.

Tabla 32. Datos Prueba en Cortocircuito y Vacío para Transformador Trifásico de 1250 kVA

Vacío | Cortocircuito

P_{vac}	2645	W	P_{CC}	16800	W
I_{vac}	55,766	A	I_{CC}	54,67	A
V_{vac}	220	V	V_{CC}	224,4	V

Fuente: El Autor

La tabla 19 indica los resultados en la peor de las condiciones para un transformador de 1250 kVA construido antes de 1996 en proceso de reparación o reconstrucción de acuerdo a la norma NTC 1954 (ICONTEC, 1996); cada uno de estos datos es ajustado a la norma NTC 1005(ICONTEC, 1998) que está enfocada a la Determinación de la Tensión de Cortocircuito.

- Conductancia de la resistencia de pérdidas en vacío (G_m)

Como lo indica la ecuación 35 la conductancia de la resistencia de pérdidas en vacío es la relación entre la potencia de las pérdidas en vacío sobre el cuadrado del voltaje de la prueba que es igual al voltaje del secundario del transformador en prueba.

$$G_m = \frac{P_{vac}}{(V_{vac})^2} \quad [S] \quad (Ec. 21)$$

$$G_m = \frac{2645 \text{ W}}{(220 \text{ V})^2} = 0,05465 \text{ S}$$

- Resistencia de Magnetización (R_m)

La resistencia de magnetización se da como el inverso de la conductancia como se observa en la ecuación 36.

$$R_m = \frac{1}{G_m} \quad [\Omega] \quad (Ec. 22)$$

$$R_m = \frac{1}{0,05465} = 18,298 \quad \Omega$$

- Admitancia Total (Y_m)

La admitancia de un transformador trifásico se da como el valor absoluto de la raíz de 3 multiplicada por la corriente de vacío sobre la tensión de vacío siendo sus unidades el Siemens como lo demuestra la ecuación 37.

$$|Y_m| = \frac{I_{vac} * \sqrt{3}}{V_{vac}} \quad [S] \quad (Ec. 23)$$

$$|Y_m| = \frac{55,766 \text{ A} * \sqrt{3}}{220 \text{ V}} = 0,4390 \text{ [S]}$$

- Impedancia de Magnetización (Z_m)

La impedancia y la admitancia son opuestos por lo que para hallar la impedancia de magnetización se hace uso de la admitancia total como lo muestra la ecuación 38.

$$Z_m = \frac{1}{Y_m} \quad [\Omega] \quad (Ec. 24)$$

$$Z_m = \frac{1}{0,439} = 2,277 \quad [\Omega]$$

- Susceptancia de Magnetización (Z_m)

La susceptancia se define como la parte imaginaria de la admitancia, teniendo en cuenta este concepto se encuentra la relación entre la susceptancia, la admitancia y la conductancia como lo demuestra la ecuación 39; si se despeja la ecuación 39 se encuentra

la ecuación 40 que indica una expresión que permite determinar la susceptancia en Siemens a partir de los valores hallados anteriormente.

$$|Y_m| = \sqrt{G_m^2 + B_m^2} \text{ (Ec. 25)}$$

$$B_m = \sqrt{Y_m^2 - G_m^2} \text{ [S] (Ec. 26)}$$

$$B_m = \sqrt{(0,4390 \text{ S})^2 - (0,05465 \text{ S})^2} = 0,4356 \text{ [S]}$$

- Reactancia de Magnetización (Xm)

La reactancia es la oposición ofrecida al paso de corriente y es considerado el valor imaginario de la resistencia; su valor está expresado en ohmios y su representación matemática está explicada en la ecuación 41.

$$X_m = \frac{1}{B_m} \text{ [\Omega] (Ec. 27)}$$

$$X_m = \frac{1}{0,4356} = 2,2957 \text{ [\Omega]}$$

- Ensayo de cortocircuito

Los parámetros obtenidos del ensayo de cortocircuito se encuentran explicados en las ecuaciones 42, 43 y 44.

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{\sqrt{3} * I_{cc}} \text{ (Ec. 28)}$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 * (I_{cc})^2} \text{ (Ec. 29)}$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \text{ (Ec. 30)}$$

Reemplazando los valores obtenidos:

$$Z_{cc} = \frac{224,4 \text{ V}}{\sqrt{3} * 54,67 \text{ A}} = 2,37 \text{ \Omega}$$

$$R_{cc} = \frac{16800 \text{ W}}{3 * (54,67 \text{ A})^2} = 1,8736 \text{ \Omega}$$

$$X_{cc} = \sqrt{(2,37 \text{ \Omega})^2 - (1,8736 \text{ \Omega})^2} = 1,45 \text{ \Omega}$$

- Pérdidas sin Carga a una Temperatura Tm

De acuerdo a la norma NTC 1031(ICONTEC, 1998) "el valor total correcto de las pérdidas totales sin carga del transformador se puede determinar por medio de la ecuación 45)

$$P_c(T_m) = \frac{P_m}{P_H + kP_F} \text{ (Ec. 31)}$$

$P_c(T_m)$ = Pérdidas sin carga, corregidas por forma de onda a temperatura Tm.

P_m = Pérdidas sin carga medidas a temperatura Tm.

P_H = Pérdidas por histéresis por unidad, referidas a Pm.

P_F = Pérdidas por corrientes parásitas, referidas a Pm.

T_m = Temperatura del líquido en el punto superior al momento de prueba en °C.
 El uso de la ecuación 35 implica que deben conocerse las pérdidas por histéresis y las pérdidas por corrientes parásitas ya que la suma de estas dos es el resultado de las pérdidas en vacío; sin embargo en el numeral 4.1.15 de la norma NTC 1031 especificada anteriormente se explica que en caso de que no se conozcan la proporción de cada tipo de pérdidas se dará como valor el 50% como lo demuestran las ecuaciones 46 y 47.

$$P_{vac} = 0,5P_F \text{ (Ec. 32)}$$

$$P_{vac} = 0,5P_H \text{ (Ec. 33)}$$

El valor de K es el factor de las pérdidas sin carga corregidas por forma de onda a temperatura T_m , igual a 0,95. Reduciendo las anteriores expresiones se tiene que:

$$P_m = 0,975 P_{vac} \text{ (Ec. 34)}$$

$$P_m = 0,975 * 2675 \text{ W} = 2608,125 \text{ W}$$

6.7.2.2 Transformador Monofásico de 167,5 kVA De acuerdo al numeral 6.2.1 de presente documento la máxima potencia permitida para hacer pruebas a transformadores monofásicos es igual a 167,5 kVA; al igual que en el numeral 6.2.2.1 se considerará el peor de los casos para los resultados obtenidos en la prueba de cortocircuito y vacío como lo denota la tabla 19.

Tabla 19. Datos Prueba en Cortocircuito y Vacío para Transformador Monofásico de 167,5 kVA

Vacío		Cortocircuito			
P_{vac}	483	W	P_{CC}	1660	W
I_{vac}	14,656	A	I_{CC}	12,68	A
V_{vac}	220	V	V_{CC}	416	V

Fuente: El Autor

- Conductancia de la resistencia de pérdidas en vacío (G_m)

De acuerdo a la ecuación 35 retomando el cálculo hecho en el numeral anterior

$$G_m = \frac{P_{vac}}{(V_{vac})^2} \text{ [S]}$$

$$G_m = \frac{483 \text{ W}}{(220 \text{ V})^2} = 9,97 \times 10^{-3} \text{ S}$$

- Resistencia de Magnetización (R_m)

De acuerdo a la ecuación 36

$$R_m = \frac{1}{9,97 \times 10^{-3}} = 100,207 \text{ } \Omega$$

- Admitancia Total (Y_m)

Para este caso al ser un transformador monofásico no aplica la ecuación 37, sino que se remite a la ecuación 45.

$$|Y_m| = \frac{I_{vac}}{V_{vac}} \text{ [S] (Ec. 35)}$$

$$|Y_m| = \frac{14,656 \text{ A}}{220 \text{ V}} = 0,066 \text{ [S]}$$

- Impedancia de Magnetización (Z_m)

De acuerdo a la ecuación 38

$$Z_m = \frac{1}{0,066} = 15,0109 \text{ } [\Omega]$$

- Susceptancia de Magnetización (Zm)
Retomando la ecuación 40.

$$B_m = \sqrt{Y_m^2 - G_m^2} \text{ } [S] \text{ (Ec. 36)}$$

$$B_m = \sqrt{(0,066 \text{ } S)^2 - (9,97 \times 10^{-3} \text{ } S)^2} = 0,065 \text{ } [S]$$

- Reactancia de Magnetización (Xm)
De la ecuación 41

$$X_m = \frac{1}{0,065} = 15,327 \text{ } [\Omega]$$

- Ensayo de cortocircuito

Los parámetros obtenidos del ensayo de cortocircuito se encuentran explicados en las ecuaciones 37, 38 y 39

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \text{ (Ec. 37)}$$

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{(I_{cc})^2} \text{ (Ec. 38)}$$

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2} \text{ (Ec. 39)}$$

Reemplazando los valores obtenidos:

$$Z_{cc} = \frac{416 \text{ } V}{12,68 \text{ } A} = 32,807 \text{ } \Omega$$

$$R_{cc} = \frac{1660 \text{ } W}{(12,68 \text{ } A)^2} = 10,324 \text{ } \Omega$$

$$X_{cc} = \sqrt{(32,807 \text{ } \Omega)^2 - (10,324 \text{ } \Omega)^2} = 31,14 \text{ } \Omega$$

- Pérdidas sin Carga a una Temperatura Tm

$$P_m = 0,975 P_{vac} \text{ (Ec. 40)}$$

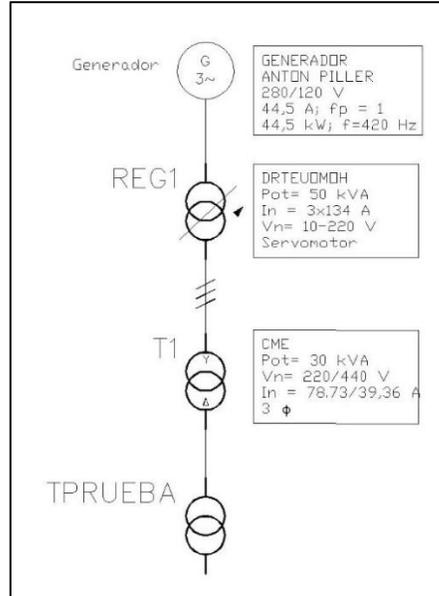
$$P_m = 0,975 * 483 \text{ } W = 470,925 \text{ } W$$

6.7.3 Ensayo de Tensión Inducida El ensayo de tensión inducida se basa en la misma conexión de la prueba en vacío su diferencia radica en que la frecuencia del generador es igual a 420 Hz, basándose en la conversión de valores obtenidos mediante la prueba de vacío a diferentes niveles de frecuencia hecha en la tesis desarrollada por García (Pedro Julián García, 2012) se puede determinar la potencia requerida para el transformador de prueba inducida.

Para el caso de la empresa C.M.E el transformador utilizado para la prueba de corto circuito y vacío es el mismo que se utiliza para el ensayo de tensión de inducida; lo que se hace a continuación es comprobar que la capacidad del transformador sea la suficiente para el transformador seleccionado anteriormente en los numerales 6.2.1 y 6.2.2 teniendo en cuenta que desde el punto de vista unifilar el circuito de potencia para ejecutar cada una de las pruebas a un transformador monofásico o trifásico es diferente.

6.7.3.1 Ensayo de Tensión Inducida a Transformadores Trifásicos

Figura 38. Ensayo de Tensión Inducida a Transformador Trifásico



Fuente: El Autor

De acuerdo a Ortega (Ortega, 2004) si se utiliza el mismo transformador de ensayos a pruebas de cortocircuito y vacío a una frecuencia diferente se tiene que:

$$P_F = k_F * f_{ind}^2 \quad (Ec. 41)$$

$$P_H = k_H * f_{ind} \quad (Ec. 42)$$

Dónde:

P_F = Pérdidas sin carga medidas a temperatura T_m .

P_H = Pérdidas por histéresis por unidad, referidas a P_m .

k_H = Constante de pérdidas por histéresis KW/Hz.

k_H = Constante de pérdidas por histéresis KW/Hz.

f = Frecuencia del generador en Hz

Al despejar la constante de las ecuaciones 49 y 50 y retomando el supuesto de las ecuaciones 46 y 47 al despejarlas dejándolas en función de las pérdidas en vacío que es un valor que ya se tiene se encuentran las ecuaciones 51 y 52.

$$k_F = \frac{P_{vac}}{2f_{vac}^2} \quad (Ec. 43)$$

$$k_H = \frac{P_{vac}}{2f_{vac}} \quad (Ec. 44)$$

Dónde:

Para una frecuencia diferente se tiene que:

$$P_{ind} = P_F + P_H \quad (Ec. 45)$$

Reemplazando las ecuaciones 49 y 50 en la ecuación 53

$$P_{ind} = k_F * f_{ind}^2 + k_H * f_{ind} \quad (Ec. 46)$$

Reemplazando las ecuaciones 51 y 52 y despejando se tiene que

$$P_{ind} = \frac{P_{vac}}{2} * \left(\frac{f_{ind}}{f_{vac}}\right)^2 + \frac{P_{vac}}{2} * \frac{f_{ind}}{f_{vac}} \quad (Ec. 47)$$

La frecuencia del ensayo de tensión inducida es de 420 Hz lo que es igual a 7 veces la frecuencia nominal del ensayo en vacío por lo que la expresión de la ecuación 55 se reduce a

$$P_{ind} = 25P_{vac} \quad (Ec. 48)$$

$$P_{ind} = 66125 \text{ KW}$$

La resistencia inducida en el núcleo del transformador se calcula:

$$R_{ind} = \frac{(2V_{vac})^2}{3P_{vac}} \quad (Ec. 49)$$

Para transformadores reparados parcialmente los ensayos de aislamiento deben efectuarse al 75% de la potencia nominal (ICONTEC, 1996)

$$R_{ind} = \frac{(2 * 220 * 0,75)^2}{3 * 2645} = 13,724 \Omega$$

La admitancia del transformador es proporcional a la frecuencia:

$$X_{ind} = 7X_m \quad (Ec. 50)$$

X_{ind} = Admitancia de magnetización inducida.

$$X_{ind} = 7 * 2,2957 = 16,07 \Omega$$

La impedancia de magnetización inducida es igual:

$$Z_{ind} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{R_{ind}}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_{ind}}\right)^2}} \quad (Ec. 51)$$

$$Z_{ind} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{13,724}\right)^2 + \left(\frac{1}{16,07}\right)^2}} = 10,436 \Omega$$

La corriente inducida es igual:

$$I_{ind} = \frac{2V_{vac} * 0,75}{\sqrt{3}Z_{ind}} \quad (Ec. 52)$$

$$I_{ind} = \frac{2 * 220 * 0,75}{\sqrt{3} * 10,436} = 18,256 \text{ A}$$

La potencia inducida es igual:

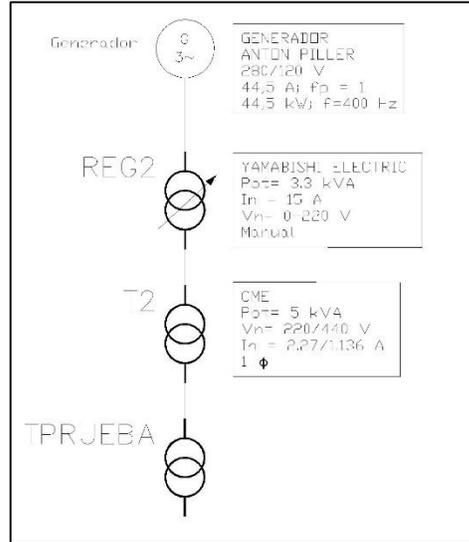
$$P_{ind} = \sqrt{3} * 2V_{vac} * 0,75 * I_{ind} \quad (Ec. 61)$$

$$P_{ind} = \sqrt{3} * 2 * 220 * 0,75 * 18,256 = 10434 \text{ VA} = 10,4 \text{ KVA}$$

El transformador utilizado como se dijo anteriormente es el de cortocircuito y vacío que cumple con la potencia requerida; el conductor y las protecciones de este circuito ya fueron especificadas anteriormente.

6.7.3.1 Ensayo de Tensión Inducida a Transformadores Monofásicos

Figura 39. Ensayo de Tensión Inducida a Transformador Monofásico



Fuente El Autor

Basándose en el cálculo del transformador intermedio para realizar la prueba de tensión inducida hecho en el numeral anterior a continuación se determinará la potencia máxima de transformadores a los cuales se les puede ejecutar la prueba.

De la ecuación 56

$$P_{ind} = 25 * 483 \text{ W} = 12075 \text{ W}$$

Determinando la resistencia inducida en el núcleo del transformador

$$R_{ind} = \frac{(2 * 220 * 0,75)^2}{3 * 483} = 75,155 \Omega$$

La admitancia inducida en el transformador de acuerdo a la ecuación 58

$$X_{ind} = 7 * 15,327 \Omega = 107,289 \Omega$$

La impedancia de magnetización será igual a

$$Z_{ind} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{75,155}\right)^2 + \left(\frac{1}{107,289}\right)^2}} = 61,555 \Omega$$

La corriente es igual a

$$I_{ind} = \frac{2V_{vac} * 0,75}{Z_{ind}} \text{ (Ec. 53)}$$

$$I_{ind} = \frac{2 * 220 * 0,75}{61,555} = 5,36 \text{ A}$$

La potencia inducida es igual:

$$P_{ind} = 2V_{vac} * 0,75 * I_{ind} \text{ (Ec. 54)}$$

$$P_{ind} = 2 * 220 \text{ V} * 0,75 * 5,36 \text{ A} = 1769 \text{ VA}$$

El transformador que actualmente se utiliza es de 5 kVA por lo que cumple con los requerimientos de potencia para ejecutar las pruebas de tensión inducida

BIBLIOGRAFÍA

- ICONTEC. (1996, abril 24). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1954 - ELECTROTECNIA. TRANSFORMADORES RECONSTRUIDOS Y REPARADOS. REQUISITOS. Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado a partir de <http://www.wmsas.co/documentos/Normas%20sector%20electrico/Transformadores/NTC1954.PDF>
- ICONTEC. (1998, marzo 29). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1031 - TRANSFORMADORES. ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS Y CORRIENTE SIN CARGA. Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado a partir de <http://www.wmsas.co/documentos/Normas%20sector%20electrico/Transformadores/NTC1005.PDF>
- Ortega, J. J. (2004). *Mantenimiento de máquinas eléctricas: ciclos formativos : grado medio*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.
- Pedro Julián García. (2012, de). *DISEÑO DEL LABORATORIO DE ENSAYOS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA, SERIE 230 KV DE LA EMPRESA CONSTRUCCIONES Y MONTAJES ELECTRODUITAMA LTDA*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Duitama.

BIBLIOGRAFÍA

- Autómata programable - Twido - Schneider Electric AR-UY-PY. (s. f.). Recuperado 13 de septiembre de 2016, a partir de <http://www.schneider-electric.com/products/ar/ls/3900-pac-plc-y-otros-controladores/3920-controladores-plc-para-maquinas-comerciales/533-automata-programable-twido/>
- BURBANO, José. (2006, Enero). Determinación de la Tensión de Corto Circuito y Pérdidas con Cargas. C.M.E. (Archivo Interno).
- BURBANO, José. (2006, Enero). Ensayo de Tensión Aplicada. C.M.E. (Archivo Interno).
- BURBANO, José. (2006, Enero). Manejo y Operación del Campo de Pruebas. C.M.E. (Archivo Interno).
- Cabra, P. A. A. (2004). Ensayos de rutina a transformadores. *Tekhnê*, 1(2), 41–49.
- CAMARGO TORRES, Fausto Vicente, & MORENO LEMUS, Carlos Julio. (2010). *Diseño de un plan de mantenimiento preventivo para los transformadores de distribución de la Empresa de Energía de Boyacá S.A. E.S.P.* Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Duitama.
- Chapman, S. J. (2000). *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill.
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. (s. f.). *PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS DE CAMPO PARA EQUIPO PRIMARIO DE SUBESTACIONES DE DISTRIBUCIÓN* (26^a-04–94^a ed.). México D.F.: Gerencia de Distribución. Recuperado a partir de <http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/LASE/SOM-3531%20%20MANUAL%20DE%20PROCEDIMIENTOS%20DE%20PRUEBAS%20DE%20EQUIPO%20PRIM.pdf>
- FLECHAS, Diana. (2015, Enero). Manual de Gestión Integral. C.M.E. (Archivo Interno).
- ICONTEC. (2008). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1486 - DOCUMENTACIÓN, PRESENTACIÓN DE TESIS, TRABAJOS DE GRADO Y OTROS TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN. Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado a partir de www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_15/recursos/01_general/09_062014/n_icontec.pdf
- ICONTEC. (1995, noviembre 29). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 818 - TRANSFORMADORES. TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS AUTORREFRIGERADOS Y SUMERGIDOS EN LÍQUIDO. CORRIENTE SIN CARGA, PÉRDIDAS Y TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO. Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado a partir de

<http://www.wmsas.co/documentos/Normas%20sector%20electrico/Transformadores/NTC818.PDF>

ICONTEC. (1995, noviembre 29). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 819 - TRANSFORMADORES. TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS AUTORREFRIGERADOS Y SUMERGIDOS EN LÍQUIDO. CORRIENTE SIN CARGA, PÉRDIDAS Y TENSIÓN DE CORTOCIRCUITO. Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado a partir de <http://www.wmsas.co/documentos/Normas%20sector%20electrico/Transformadores/NTC819.PDF>

ICONTEC. (1996, abril 24). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1954 - ELECTROTECNIA. TRANSFORMADORES RECONSTRUIDOS Y REPARADOS. REQUISITOS. Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado a partir de <http://www.wmsas.co/documentos/Normas%20sector%20electrico/Transformadores/NTC1954.PDF>

ICONTEC. (1997a, julio 17). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 837 - TRANSFORMADORES. ENSAYO DEL DIELECTRICO. Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado a partir de <http://www.wmsas.co/documentos/Normas%20sector%20electrico/Transformadores/NTC837.PDF>

ICONTEC. (1997b, octubre 22). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 2743 - ELECTROTECNIA. CAMPOS DE PRUEBAS PARA TRANSFORMADORES. REQUISITOS MÍNIMOS Y CLASIFICACIÓN. Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado a partir de <http://www.wmsas.co/documentos/Normas%20sector%20electrico/Transformadores/NTC2743.PDF>

ICONTEC. (1998, marzo 29). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1031 - TRANSFORMADORES. ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS Y CORRIENTE SIN CARGA. Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado a partir de <http://www.wmsas.co/documentos/Normas%20sector%20electrico/Transformadores/NTC1005.PDF>

ICONTEC. (1998, abril 22). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 836 - ELECTROTECNIA. NIVELES DE AISLAMIENTO Y ENSAYOS PARA TRANSFORMADORES SUMERGIDOS EN LÍQUIDO REFRIGERANTE. Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado a partir de <http://www.wmsas.co/documentos/Normas%20sector%20electrico/Transformadores/NTC836.PDF>

ICONTEC. (1998, noviembre 25). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 317 - ELECTROTECNIA. TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y MEDIA POTENCIA. TERMINOLOGÍA. Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado a partir de <http://www.wmsas.co/documentos/Normas%20sector%20electrico/Transformadores/NTC317.PDF>

ICONTEC. (2005, octubre 26). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 17025 - REQUISITOS GENERALES PARA LA COMPETENCIA DE LOS LABORATORIOS DE ENSAYO Y CALIBRACIÓN. Instituto de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Recuperado a partir de <http://www.wmsas.co/documentos/Normas%20sector%20electrico/Transformadores/NTC317.PDF>

Mora, J. F. (2008). *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L.

Pedro Julián García. (2012, de). *DISEÑO DEL LABORATORIO DE ENSAYOS PARA TRANSFORMADORES DE POTENCIA, SERIE 230 KV DE LA EMPRESA CONSTRUCCIONES Y MONTAJES ELECTRODUITAMA LTDA*. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Duitama.

PEREZ, Pedro A. (2001). *Transformadores de distribución: teoría, cálculo, construcción y pruebas* (2ª ed.). México D.F.: Reverte.

Relay Omron MY2 24VDC Omron Relés universales | Mouser. (s. f.). Recuperado 13 de septiembre de 2016, a partir de <http://co.mouser.com/Search/Refine.aspx?Keyword=Relay+Omron+MY2+24VDC>

RETIE, R. T. de I. E. (2005). *Ministerio de minas y Energía*. Mayo.

RTE. (2014, febrero 10). Enfriamiento en Transformadores. Recuperado a partir de <http://rte.mx/tipos-de-enfriamiento-en-transformadores>