

**“GESTIÓN TECNICA DE UN BANCO PARA PRUEBAS DE ENVEJECIMIENTO
ACELERADO A BARRAS DEL ESTATOR DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS
ROTATIVAS”**

**ANGELA CATALINA RAMIREZ GONZALEZ
ANGI CATALINA PARDO PINEDA**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
INGENIERIA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2012**

**“GESTIÓN TÉCNICA DE UN BANCO PARA PRUEBAS DE ENVEJECIMIENTO
ACELERADO A BARRAS DEL ESTATOR DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS
ROTATIVAS”**

**ANGELA CATALINA RAMIREZ GONZALEZ
ANGI CATALINA PARDO PINEDA**

Trabajo de grado

**José Luis Oslinger. PhD.
Luis Carlos Castro**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
INGENIERIA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2012**

DEDICATORIA

Primordialmente dedicamos este trabajo a nuestros padres, quienes nos brindaron su apoyo incondicional durante su desarrollo y a Dios por que nos brinda sabiduría y fortaleza en los momentos difíciles.

Agradecemos también a nuestro codirector y al director de proyecto el tiempo que pudieron dedicarnos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	6
JUSTIFICACIÓN.....	7
OBJETIVOS.....	8
OBJETIVO GENERAL.....	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
CAPITULO I.....	9
REQUERIMIENTOS Y PROCESOS PARA PRUEBAS ELÉCTRICAS.....	9
1.1. EL AISLAMIENTO Y SU IMPORTANCIA.....	9
1.2. PRUEBAS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO.....	10
1.3. IMPORTANCIA DE UNA CERTIFICACIÓN FUTURA DEL BANCO PARA PRUEBAS.....	23
1.4. DEFINICIÓN Y REQUISITOS DE UN LABORATORIO PARA PRUEBAS.....	24
1.5. CONTROL DE DOCUMENTACIÓN Y REVISIÓN DEL LABORATORIO.....	25
1.6. REQUISITOS TÉCNICOS.....	26
1.7. PERSONAL.....	27
1.8. MANUAL DE PROCEDIMIENTOS.....	27
1.9. VALIDACIÓN DE PROCEDIMIENTOS.....	29
1.10. CONTROL DE DATOS Y EQUIPOS.....	30
1.11. INFORME DE RESULTADOS.....	32
CAPÍTULO II.....	34
DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL LABORATORIO Y CONDICIONES DE SEGURIDAD.....	34
2.1. ELEMENTOS Y ADECUACIÓN ACTUAL DEL BANCO PARA PRUEBAS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO DEL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS.....	35
2.2. PROGRAMA DE SALUD OCUPACIONAL.....	39
2.3. ESPECIFICACIONES RELACIONADAS A LOS ELEMENTOS DEL LABORATORIO.....	42
2.4. FACTORES DE RIESGO EN EL LABORATORIO.....	42
2.5. SEGURIDAD EN RIESGO ELÉCTRICO (Normatividad).....	44
2.6. ESPECIFICACIONES GENERALES DEL LABORATORIO.....	45
2.7. RECOMENDACIONES GENERALES.....	55

CAPITULO III.	59
DISPOSICIÓN Y CÁLCULO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA.....	59
3.1. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.	59
3.2. RESISTIVIDAD DEL TERRERO.....	61
3.3. ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA.	64
3.4. CONECTORES.....	67
3.5. CONDUCTORES.....	67
3.6. MALLA DE PUESTA A TIERRA.	69
3.7. CÁLCULO Y DISEÑO DE MALLA A TIERRA.....	70
CAPITULO IV.....	83
MANUALES, PROTOCOLOS Y CAPTURA DE DATOS.....	83
4.1. MANUALES Y PROTOCOLOS DE PROCEDIMIENTO.....	83
4.2. CAPTURA DE DATOS.	83
CONCLUSIONES.....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	86

INTRODUCCIÓN

La presente investigación hace referencia a la gestión técnica del laboratorio que contiene el montaje para pruebas de envejecimiento acelerado a barras del estator de grandes máquinas rotativas y su contenido, acorde a lo requerido para una acreditación futura bajo normas colombianas vigentes y estándares asociados, con el enfoque a una prestación del servicio.

La gestión técnica identifica algunas de las pautas que harán posible la certificación tanto del banco para pruebas de envejecimiento acelerado, como del lugar en el que éste será situado, definiendo características de seguridad industrial, salud ocupacional, la aplicación de los procedimientos propios de las pruebas y el registro de los resultados obtenidos de su aplicación.

Actualmente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas del edificio 353 de la escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle se encuentra construido un “sub laboratorio” pensado para la aplicación de esfuerzos térmicos y termoeléctricos para la simulación de envejecimiento acelerado de barras/bobinas del estator de máquinas rotativas de hasta 13.2kV, sin embargo, éste no está debidamente acondicionado en todos sus aspectos para aspirar a su certificación. Aunque existe en el país un laboratorio de investigación en descargas parciales con capacidad para desarrollar procedimientos similares a los del envejecimiento a barras, éste no presta sus servicios al público y no muestra documentación disponible al respecto, salvo lo citado como referencia bibliográfica [1]¹; por lo anterior, es importante para la comunidad estudiantil, la investigación en el tema y los posibles clientes de los servicios del laboratorio en mención, el que se proceda a realizar dicha gestión en el futuro.

Nota: Para evitar confusiones, se aclara que el presente trabajo de grado busca definir algunos de los elementos y condiciones necesarios para la certificación futura de un banco para pruebas de envejecimiento acelerado a barras del estator de máquinas rotativas de hasta 13.2kV, con el enfoque a una prestación del servicio externo que no existe como tal en el país, aunque actualmente se tiene un montaje o banco para pruebas de envejecimiento acelerado a barras del estator de grandes máquinas rotativas en el laboratorio de máquinas eléctricas rotativas situado en el edificio 353 de la Universidad del Valle en la sede Meléndez en Santiago de Cali-Colombia al que a partir de lo consultado en este trabajo de grado se hace algunas recomendaciones. Cabe decir que por el momento, el laboratorio no se encuentra en búsqueda de su certificación.

¹ TORO, J C.; GONZÁLES, H D. (2003). Evolución de las señales de descargas parciales y su incidencia en el deterioro y fallo de los aislamientos sólidos de las barras estatóricas de los generadores 1 y 2 de la central Hidroeléctrica de Guatapé e E.E.P.P.M.

JUSTIFICACIÓN.

Las máquinas eléctricas rotativas son de suma importancia en la actualidad, debido a las diferentes aplicaciones industriales y otros campos de la tecnología de los que hacen parte. En la actualidad se ha podido detectar, que el 60% de las fallas de máquinas eléctricas rotativas están asociadas a la ruptura del aislamiento en las bobinas del estator.

Es necesario detenerse a estudiar algunos de los aspectos que afectan en gran medida su funcionamiento, aspectos que desencadenan principalmente en fallas del sistema de aislamiento. Es deseable identificar oportunamente el estado de sistema de aislamiento, motivo por el cual algunos laboratorios alrededor del mundo han centrado su interés en el estudio de pruebas de envejecimiento acelerado de elementos eléctricos donde se somete un material aislante a ensayos y pruebas dieléctricas por medio de esfuerzos mayores a los normales, de tal forma que se permita realizar una estimación de la vida útil de su sistema de aislamiento y producir un diagnóstico del estado en el que se encuentra.

En Colombia existen pocos laboratorios dedicados a las pruebas de envejecimiento acelerado de elementos eléctricos y ninguno que suministre información sobre el envejecimiento acelerado a barras del estator de máquinas rotativas que por lo menos se haya documentado y esté certificado, ya que demandan equipos con gran capacidad de potencia para reproducir los esfuerzos a los que se ven sometidas las máquinas en su operación y un conocimiento exhaustivo de los mecanismos de degradación desencadenados por la aplicación de dichos esfuerzos.

La implementación de este proyecto en un futuro puede implicar la gestión de recursos económicos ante diferentes entidades privadas o estatales del sector eléctrico y afines, y puede ser útil para las investigaciones de futuros profesionales del área.

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL

Definir los elementos y condiciones para la gestión técnica de un banco para pruebas de envejecimiento acelerado de barras del estator de máquinas rotativas de hasta 13.2kV con el enfoque a una prestación del servicio futura.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar los procedimientos empleados para realizar las pruebas que se requieren para el análisis de envejecimiento acelerado a barras del estator de máquinas rotativas y definir los protocolos para ejecutarlas en el laboratorio.
- Determinar la disposición de los distintos elementos de planta y las características de los de seguridad del laboratorio donde se realizará las pruebas.
- Definir según norma las distancias de seguridad del Laboratorio y la locación de otros elementos asociados en él.
- Posibilitar la captura de datos a través de formatos que aseguren la confiabilidad de la información para así contar con un registro histórico, importante en el análisis del comportamiento de las máquinas en estudio.
- Realizar el cálculo de malla a tierra del laboratorio del banco para pruebas de acuerdo a las normas colombianas pertinentes.

CAPITULO I.

REQUERIMIENTOS Y PROCESOS PARA PRUEBAS ELÉCTRICAS.

En este capítulo se pretende definir los algunos requerimientos técnicos que se necesitan en un laboratorio de pruebas para una certificación futura, enfatizando en el control de documentación, manuales y validación de los procedimientos asociados al envejecimiento acelerado a barras/bobinas del estator de grandes máquinas rotativas relacionados a la aplicación tanto de esfuerzos térmicos como termoeléctricos a través de un banco para pruebas dispuesto en un laboratorio con características adecuadas para prestar sus servicios en un futuro. A lo largo de este trabajo de grado se hará referencia al banco para pruebas de envejecimiento acelerado a barras del estator de máquinas eléctricas rotativas como “banco para pruebas”.

Teniendo en cuenta que los esfuerzos mencionados tienen incidencia directa sobre el estado del sistema de aislamiento de las barras/bobinas, seguidamente se dará un vistazo a lo que es el aislamiento y a su importancia.

1.1. EL AISLAMIENTO Y SU IMPORTANCIA.

Las máquinas eléctricas rotativas han contribuido a través del tiempo al desarrollo de la industria, investigación y al progreso de la sociedad, haciendo de gran importancia el estudio de su funcionamiento y mantenimiento. Estas máquinas son expuestas a esfuerzos térmicos, eléctricos, ambientales y mecánicos de manera permanente que pueden ser monitoreados para posibilitar la mitigación de los efectos de deterioro bajo mecanismos de mantenimiento. Las fallas ocasionadas en el estator son en su mayoría originadas en el aislamiento.

La operación correcta y funcionamiento eficiente de una máquina eléctrica rotativa, dependen en gran medida de la temperatura de operación, por lo tanto, es indispensable no exceder la temperatura límite a la que puede someterse el aislamiento sin sufrir daños.

Los materiales aislantes sólidos se clasifican en diferentes clases que se identifican con una letra y hacen referencia a una temperatura límite de operación:

Clase de aislamiento	A	E	B	F	H
Temperatura límite (°C)	105	120	130	155	180

Tabla 1. Clase de aislamientos y sus temperaturas límite.

El sistema de aislamiento de una máquina eléctrica aísla los conductores entre sí y respecto del núcleo, mantiene los conductores en una posición fija, está expuesto a esfuerzos que le ocasionan ruptura y envejecimiento. Por lo anterior, es esencial realizar un diagnóstico periódico de su estado y vida útil.

Un deterioro o envejecimiento del aislamiento ocasiona cambios perjudiciales incluso irreversibles en el estado de una máquina eléctrica que acortan su vida útil y afectan su rendimiento. Para realizar un pronóstico del estado y vida útil del sistema de aislamiento, es menester tener en cuenta la velocidad de envejecimiento del aislamiento a través de la aplicación de esfuerzos térmicos y eléctricos. Las pruebas de envejecimiento acelerado tienen entonces como propósito someter el sistema de aislamiento a dichos esfuerzos que superan a los nominales durante un determinado tiempo, con el fin de observar el deterioro que sufre el material probado.

A sabiendas del propósito de las pruebas de envejecimiento acelerado, a continuación se procede a hacer especificaciones de estas:

1.2. PRUEBAS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO.

Las variables que intervienen en la aplicación de los esfuerzos térmicos y eléctricos (donde el material bajo estudio es un material dieléctrico o aislamiento) son la temperatura T y la tensión V , ambas en función del tiempo.

Se puede lograr una estimación aproximada de la vida útil, sometiendo el sistema de aislamiento a una degradación respecto de su estado actual, por medio de modelos de estimación de vida útil donde se someten las barras/bobinas bajo estudio a condiciones de esfuerzos mayores que la condición normal de operación, acelerando la condición de envejecimiento, y logrando un desgaste progresivo y rápido de las barras/bobinas del estator.²No es objetivo de este trabajo el estimar la vida útil del aislamiento de las barras/bobinas del estator de máquinas rotativas.

1.2.1. Prueba de esfuerzos termoeléctricos a barras/bobinas de estator.³

El envejecimiento eléctrico consiste en someter el aislamiento de las bobinas o barras a una tensión aumentada de manera gradual según la norma IEEE Std 4-1995, durante el tiempo requerido según las características del sistema de aislamiento a probar. Cuando se

² REYNO, Herna José. Envejecimiento Acumulativo Acelerado del aislamiento sólido sometido a esfuerzos eléctricos y térmicos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá – 2012.

³ IEEE Std 1043-1996(R2009). IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils.

aplica tensión, se produce un campo eléctrico en el aislamiento de la barra/bobina que reduce la vida útil del material aislante bajo prueba. El material y la estructura de cada sistema de aislamiento sometido a un esfuerzo termoelectrónico definen su curva de envejecimiento.

La práctica recomendada en la IEEE 1043-1996 (R2009) propone un método y los elementos asociados a él que permiten someter un grupo de barras/bobinas a esfuerzos termoelectrónicos para ocasionar un desgaste o envejecimiento a un voltaje de prueba con frecuencia de 50Hz/ 60Hz, a temperatura ambiente o elevada. La figura 1 muestra la configuración del circuito para la aplicación de esfuerzos termoelectrónicos, localizado dentro del laboratorio de máquinas eléctricas rotativas de la Universidad del Valle.

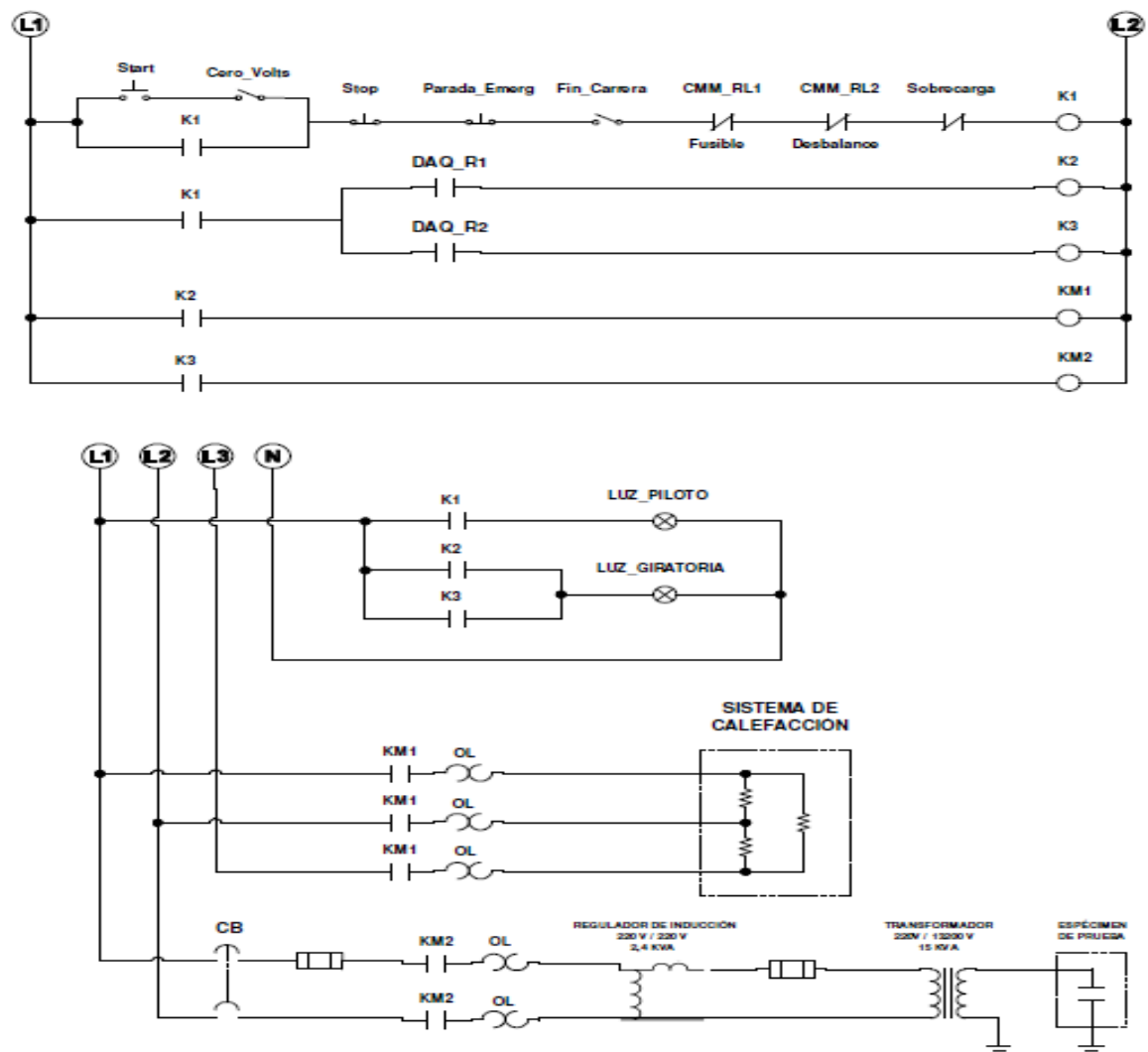


Figura. 1. Circuito configuración prueba de esfuerzos termoelectrónicos "Laboratorio de Envejecimiento Acelerado a Barras del Estator de Máquinas Eléctricas Rotativas".

Las características principales de los elementos del circuito propuesto por la práctica recomendada son los siguientes:

- a. Fuente de alimentación de salida variable, con sistema de control que le permita mantener un nivel de tensión durante un determinado tiempo. El valor RMS de tensión de entrada debe ser regulado entre $\pm 1,5\%$.
- b. La relación de tensión pico a pico al valor de la tensión RMS, desde el lado de alta tensión del transformador debe ser igual a $2\sqrt{2}$ y estar en un rango de $\pm 5\%$. Estos valores deben ser estables durante toda la prueba ya que si existe una diferencia mayor va a deberse a la aparición de una fuerte cantidad de armónicos de voltaje, que disminuye la vida útil del aislamiento.

Dependiendo de la carga de la muestra a probar se elige la potencia del transformador. Esta potencia afecta la forma de onda de la tensión; debe asegurarse que la magnitud del tercer armónico no sea mayor al 10% de la magnitud de la onda fundamental de la tensión.

- a. Para contar con protección, se necesita emplear un interruptor automático principal y un contactor para la alimentación del transformador, donde el transformador ha de tener:
 - ✓ Un contactor de disparo ajustable en el devanado de alta tensión en el lado del buje referenciado a tierra del transformador conectado en serie con una protección de sobre corriente que opere solo cuando se alcance el 150% de la corriente inicial.
 - ✓ Un contactor de emergencia que permite la suspensión de operación al instante y que corte el suministro de fluido eléctrico.
 - ✓ Un contactor de enclavamiento para limitar la zona de prueba mientras que el transformador se encuentre energizado.
 - ✓ Un contactor de limitación de la tensión, debido a posibles circulaciones de corriente por el transformador en estado de vacío.
- b. Para lograr mayor precisión y exactitud al momento de la medición de las variables principales, se requiere para la medición y registro de las variables, cumplir con las siguientes especificaciones:
 - ✓ Tensión: Para la medición de tensión, se usa un transformador de potencia que debe estar conectado a un medidor en el tablero de control, debe estar calibrado con un valor de $2\sqrt{2}$ veces el valor de la tensión pico a pico, el voltaje aplicado debe contar con una incertidumbre del 1,5% y esta medida se debe supervisar para que no se produzcan variaciones de tensión altas.

- ✓ Corriente: La medición de la corriente de carga se realiza desde el lado de alta tensión del transformador con un amperímetro que tenga una exactitud de $\pm 5\%$. Se recomienda además, adecuar un interruptor en derivación para protegerlo de sobre corriente.
 - ✓ Tiempo de prueba: Para el registro de datos y duración de la prueba, se utilizará un medidor de tiempo con resolución 0,1h.
 - ✓ Temperatura: Para medir temperatura se sugiere emplear termocuplas ubicadas en agujeros sobre las barras o bobinas a prueba.
 - ✓ Registro: Es necesario llevar un registro de datos cada 15 minutos para la tensión y temperatura. En el caso de anomalías o variaciones de datos, es importante también hacer un registro de dichos valores.
- c. Respecto al control de temperatura, ésta debe ser controlada entre $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ de la temperatura de prueba. Las placas para el calentamiento sujetas a los lados de la barra/bobina deben ser de 1cm de grosor para un buen contacto térmico y medición de temperatura. Si la temperatura recomendada se desvía, se hace necesario interrumpir la tensión aplicada durante ese tiempo.

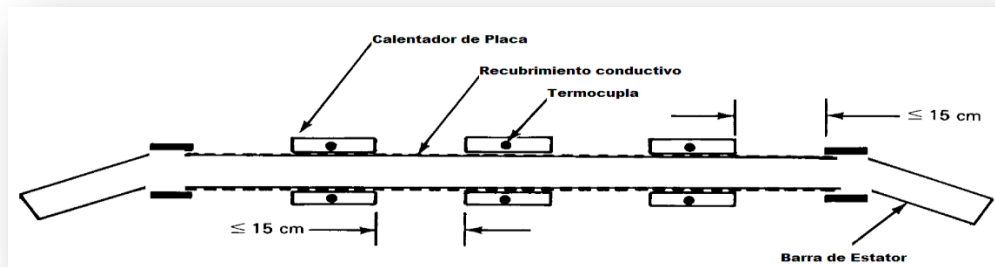


Figura. 2. Placas de Calefacción – IEEE Std 1043-1996.

Nota: Para la preparación de las barras a probar, se deben realizar con anticipación las siguientes pruebas recomendadas adicionales:

- ✓ Resistencia eléctrica: Puede aplicarse una tensión ac predefinida a la barra o sección preparada de la barra, como prueba en concordancia con el IEEE Std 4-1995. Se recomienda aplicar un valor del 110% de la tensión seleccionada para la aplicación de esfuerzos termoeléctricos. Esta tensión se sostiene en el valor requerido durante 1 minuto.⁴
- ✓ Factor de disipación (tangente delta): De requerirse, el factor de disipación *tip-up* o *tangente delta* y las medidas de capacitancia deberán desarrollarse en conformidad a lo descrito en el IEEE P286. Téngase en cuenta que puede no ser

⁴ IEEE Std 4-1978. Standard Techniques for High-Voltage Testing

práctico intentar realizar medidas del factor de disipación en cercanía de otros aparatos que operen con tensiones altas.⁵

- ✓ Resistencia de aislamiento: De requerirse, las mediciones de resistencia de aislamiento se ejecutarán acorde al IEEE Std 43-1974.⁶
- ✓ Descargas parciales: De requerirse, pueden medirse sus cantidades a temperatura ambiente a una tensión de línea a tierra mínima. Los métodos recomendados para medir la actividad de las descargas parciales recomendadas se describen en ASTM D1868-93.⁷

En cuanto a la tierra, se puede aterrizar el banco para prueba con una pinza desde la placa del calentador. Estas placas deben ser montadas en cada lado de la sección de la barra/bobina de prueba de tal forma que además de servir como tierra, ayuden a distribuir de manera uniforme el calor sobre la superficie; no debe haber más de 15cm entre placas adyacentes.

Para efectos de esta prueba de aplicación de esfuerzos termoeléctricos, han de tenerse en cuenta las consideraciones de seguridad siguientes:

1.2.1.1. Consideraciones de seguridad:

- a. Consideraciones de descarga: El banco para pruebas debe contar con un conductor que lo permita aterrizar, para evitar que los posibles picos de tensión lo afecten.
- b. Pruebas de área, luces y dispositivos de bloqueo: En el momento en que los equipos se encuentren energizados, es recomendable que el acceso a la zona energizada sea restringido, para esto es necesario contar con luces intermitentes rojas, bloqueos de cierre, vallas de seguridad, protección, puertas cerradas, alertas de seguridad, instrucciones de apagado de seguridad, contactor de bloqueo.
- c. Experiencia: Contar con personal capacitado para el manejo de equipos e implementos de la prueba.
- d. Conexión de circuito de alto voltaje: Las conexiones deben verificarse para evitar accidentes, el cable de prueba debe apoyarse cuando sea necesario, los cables de alta tensión deben estar alejados de equipos o elementos conectados a tierra para evitar descargas.
- e. Problemas de salud: Contar con un espacio ventilado.

Ya definidos los criterios y consideraciones anteriores, se define el procedimiento descrito

⁵ IEEE Std 286-2000. Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation.

⁶ IEEE Std 43-1974. Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery.

⁷ ASTM D1868-93(1998) Standard Test Method for Detection and Measurement of Partial Discharge (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems

a continuación:

1.2.1.2. *El procedimiento de la prueba consiste en los pasos siguientes:*

- a. Se aplica la temperatura estabilizada (dentro de ± 2 °C) a las barras.
- b. Se aplica tensión de forma gradual de acuerdo al Std 4-1995 de la IEEE, para evitar picos de voltaje.⁸
- c. Detectar la falla:
 - ✓ Localización de falla: En caso de producirse una ruptura en el aislamiento se debe interrumpir el flujo de corriente del transformador.
 - ✓ Falla en la prueba: Hay que llevar un registro de fallas para el análisis y lograr detectar la causa de las posibles fallas en el aislamiento.
 - ✓ Mantenimiento de capas semiconductoras: Durante la prueba de Voltage endurance (Esfuerzos termoeléctricos), puede deteriorarse las capas y ocasionar fallas en el aislamiento. Es necesario determinar el estado de las capas al inicio de la prueba y llevar un control de estado durante la prueba.
 - ✓ Falla de aislamiento.
 - ✓ Mediciones físicas: Determinar el espesor de la pared de aislamiento cerca de la falla.
- d. Se debe llevar un registro y control de la temperatura ambiente y humedad en la zona de prueba, tensión aplicada, frecuencia, tiempo total de cada prueba, resultados de las pruebas, observaciones de los lugares de falla, tensión de prueba, temperatura de termocuplas y alguna información adicional que se considere importante.

Después de implementar y realizar la prueba, se realiza un análisis de datos e interpretación de resultados:

- ✓ Datos de prueba: se determina el tiempo de falla para cada barra.
- ✓ Análisis de los datos: Es conveniente utilizar métodos estadísticos cuando se cuente con más de 5 barras idénticas probadas, además las fallas también deben representarse con comparaciones de datos y procedimientos de probabilidad.

Seguidamente, en el diagrama 1 se muestra un diagrama de flujo general del proceso de la aplicación de esfuerzos termoeléctricos:

⁸ IEEE Std 1043-1996(R2009). IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils.

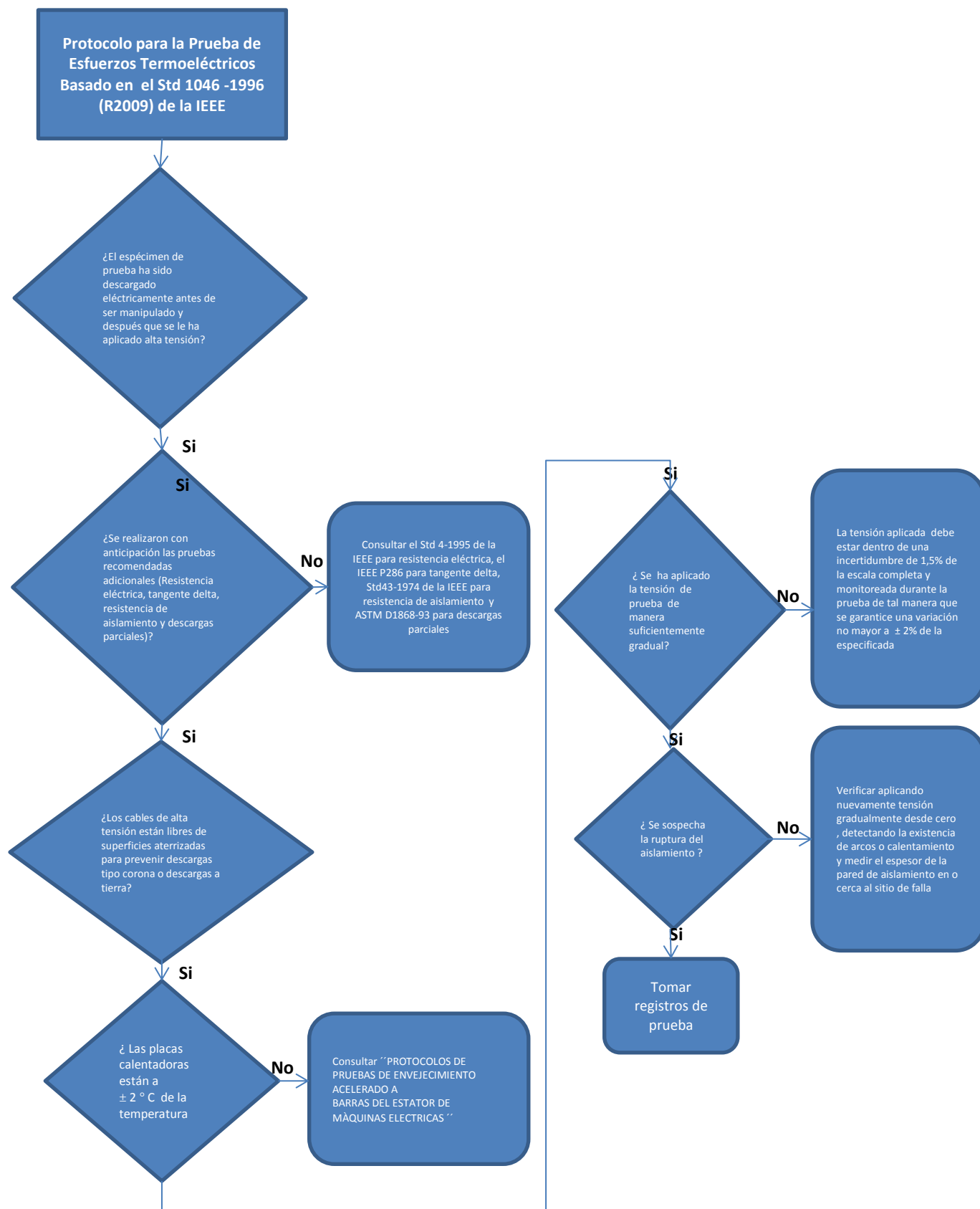


Diagrama 1. Diagrama de flujo del Protocolo para la prueba de Esfuerzos Termoeléctricos

1.2.2 Prueba de ciclado térmico aplicada al aislamiento de bobinas/barras del estator.⁹

Cuando se tiene en operación una máquina de gran potencia por un tiempo determinado y luego se reduce rápidamente a cero su salida, ocasiona cambios de temperatura grandes en el devanado del estator. A medida que la temperatura aumenta, se empieza a expandir el cobre en dirección axial sobre toda la barra. Como el recubrimiento del aislamiento funciona a una temperatura más baja que el cobre, la expansión inducida térmicamente del aislamiento es menor que la del cobre. Esta diferencia de expansión entre el aislamiento y el cobre es la que crea una tensión cortante entre las capas del aislamiento y si la unión entre éstos dos no es la correcta, el cobre puede llegar a separarse del aislamiento y producir un desgaste, descargas parciales.¹⁰

De acuerdo a lo anterior y tomando como referencia la práctica recomendada de la IEEE 1310-201, se describe el procedimiento requerido para someter el aislamiento de las barras del estator a esfuerzos de ciclado térmico. El objetivo de la prueba es producir ciclos de expansión/contracción (calentamiento-enfriamiento) bajo condiciones controladas, con el objetivo de diagnosticar e interpretar los resultados obtenidos realizando comparaciones con el estado del aislamiento inicial. El procedimiento está diseñado para barras de 11kV de adelante, a una frecuencia de 60Hz, sometidas a variaciones de carga desde vacío hasta plena carga en operación normal. Se presentan a continuación los requerimientos para llevar a cabo la prueba de ciclado térmico.

a. Preparación de la bobina.

Las barras se someten a temperaturas elevadas por lo que posiblemente tras la prueba se presenten daños en su aislamiento, no se recomienda hacer uso de estas barras después de la prueba.

b. Control de la temperatura.

De acuerdo al tipo de aislamiento se recomienda una temperatura en su límite inferior de 40 ° C y en su límite máximo de 155 ° C, con una variación promedio de 2,5°C(±1°C) por minuto tanto para su calefacción como para su enfriamiento. La fórmula para calcular el tiempo de duración del ciclo térmico de acuerdo a la clase de aislamiento es la siguiente, si se despeja el tiempo t:

⁹ IEEE Std 1310-1996. IEEE Trial Use Recommended Practice for Thermal Cycle Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for Large Generators.

¹⁰ CARANTON, Aida Yubelly. Evaluación de Vida útil residual de aislamiento compuesto de mica y resina con base en pruebas de envejecimiento acelerado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá 2012.

$$2 * \frac{X1^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}}{t} = 2.5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$$

$$2 * \frac{(T_{max} - T_{min})}{t} = 2,5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}, \text{ donde}$$

T_{max} = Temperatura máxima de calentamiento ($^{\circ}\text{C}$)

T_{min} = Temperatura mínima de enfriamiento ($^{\circ}\text{C}$)

t = tiempo nominal de duración del ciclado (m)

Se debe cumplir con las siguientes consideraciones:

- ✓ La temperatura máxima y mínima del cobre se controlarán dentro de $\pm 3^{\circ}\text{C}$ de su temperatura específica durante la prueba.
- ✓ La temperatura de aislamiento superficial se controlará dentro de $\pm 10^{\circ}\text{C}$ de la temperatura promedio.
- ✓ La temperatura del aislamiento de la barra de superficie y del cobre se puede medir a través de una termocupla con una salida eléctrica para su control.
- ✓ Se recomienda realizar mediciones de temperatura sobre cada metro de la barra para asegurar su distribución uniforme
- ✓ En cuanto a los sensores de temperatura, deben contar con una exactitud de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y buen contacto térmico.
- ✓ Para el control de los ciclos térmicos debe medirse la temperatura en cada barra (sobre su borde superior deben hacerse orificios de aproximadamente 10mm de diámetro, ubicados en el 25%, 50% y 75% de la longitud de la ranura, para situar las termocuplas).

Estando definidos los criterios y consideraciones descritos, se define el procedimiento siguiente:

c. Descripción de la prueba.

Para la prueba se debe contar con barras nuevas y conectadas en serie, por las que se hace circular una corriente de DC, tal que alcancen cierta temperatura.

Para la circulación de corriente inicial, se considera un valor de forma que no se exceda la temperatura máxima; para los valores posteriores, la corriente puede ajustarse de tal manera que el proceso se complete en menos de 5 ciclos. Se debe contar con un sistema de control que detecte por medio de una alarma si se excede la temperatura máxima o mínima.

Para la refrigeración, se debe aplicar aire forzado de forma uniforme a todas la superficie de las barras y hay que asegurar que la velocidad de enfriamiento sea similar a la de

aumento de la temperatura en las barras. Este ciclo, debe controlarse por los conductores de cobre que se encuentran en las barras, cuando se alcanza la temperatura máxima en los conductores, termina el ciclo de calefacción y el de enfriamiento debe comenzar de inmediato, de manera sucesiva hasta terminar con la prueba. Cada barra podría someterse aproximadamente a 500 ciclos térmicos.

d. Configuración de la prueba.

El banco para pruebas debe contar con un mínimo de 4 barras, de igual tamaño, profundidad y diseño para el desarrollo de la prueba. Como opción pueden usarse dos barras como protectores térmicos externos para proporcionar un sumidero de calor alrededor de las barras que se encuentran en prueba y controlar la variación de temperatura. También se debe contar con una muestra de barra adicional para el control y medición de temperatura interna del cobre con ayuda de una termocupla que se inserta sobre una perforación que se le realiza a esta barra.

Las muestras de las barras deben ubicarse de forma correcta, en paralelo y equidistantes a una distancia de 10cm entre cada una para que la distribución de la temperatura sobre el banco sea uniforme, además deben conectarse en serie por medio de cobre aislado y se deben conectar en serie a una fuente variable de alta corriente para formar un cortocircuito en los devanados secundarios de tal forma que se induzca una corriente de prueba, siempre y cuando pueda verificarse la tensión en cada barra.

Con respecto a los agujeros que se hacen para la medición de la temperatura, hay que tener en cuenta el contacto de la termocupla con la superficie de la perforación, ya que podría ocasionar datos erróneos, es recomendable por eso, fijar la termocupla con un material aislante al agujero sin ocasionar ningún otro tipo de contacto eléctrico.

Es necesario contar con un ciclo de disparo, llevar un control constante para la temperatura y un registro de datos e información de la temperatura en función del tiempo de todas las termocuplas instaladas en el banco para pruebas. En caso de ser necesario mejorar el flujo de transferencia de temperatura, puede usarse un disipador térmico compuesto y un medidor de temperatura por metro, con un mínimo de 3m.

Además, para asegurar el registro de la disipación de calor a través de la barra, los sensores pueden instalarse en las conexiones entre las barras y se debe verificar por un sistema de monitoreo que sea uniforme la distribución de temperatura y que no hayan puntos calientes.

Hay que tener un registro y control constante de la información sobre las temperaturas en función del tiempo con ayuda de los sensores de temperatura y si es necesario, sistematizarlos.

Además, hay que verificar que las barras no tengan cualquier daño externo, que todos sus “strands” se encuentren correctamente soldados para lograr un buen contacto eléctrico. Como opcional, se pueden agrupar conjuntos de “strands” de las barras y se conectan en serie, asegurar un mejor aislamiento y que la barra se caliente con menos corriente durante toda la prueba.

e. Pruebas de diagnóstico durante el proceso de ciclado térmico.

Debe establecerse un punto de referencia para el estado inicial del aislamiento, de esta manera se procede a realizar comparaciones con el estado final del aislamiento después de la prueba de ciclado térmico. Para que el aislamiento no presente rupturas durante el proceso de ciclado térmico por la repetición del procedimiento, se determina el grado de degradación del aislamiento mediante procedimientos de diagnóstico no destructivos.

Con el fin de obtener un punto de referencia para el estado de aislamiento, detectar los cambios que ocurren en el aislamiento durante el ciclado térmico, establecer la condición final del aislamiento después de la prueba de ciclado térmico, es importante considerar las siguientes técnicas de diagnóstico no destructivas, las cuales deben medirse antes, durante y después de la prueba:

- ✓ Prueba de resistencia eléctrica: Para una frecuencia de 50 o 60Hz, se aplica una corriente alterna a todas las barras antes de que inicie la prueba de ciclado térmico (potencial alto).
- ✓ Tangente delta: Esta prueba se lleva a cabo a cada una de las barras sometidas a prueba.
- ✓ Resistencia de aislamiento.
- ✓ Medición de descargas parciales.
- ✓ Mediciones físicas: Medir las dimensiones de las barras de su sección transversal antes, durante y después de haber finalizado el ciclado térmico. La medición para cada barra se hace mínimo en tres lugares diferentes y con una exactitud de $\pm 0,025$ mm, de esta manera, se registra si se ocasionan cambios en las dimensiones totales para cada barra.

f. Después de la prueba de ciclado térmico.

Las pruebas de diagnóstico deben repetirse al final de la prueba, acompañadas de la prueba de tangente delta, resistencia de aislamiento, y otras dependiendo de la cantidad

de información que se necesite obtener después del proceso de ciclado térmico. Algunas de las pruebas que se aplican después del ciclado térmico podrían provocar destrucción o ruptura de la barra, por tanto, deben ser comparadas con las de una barra de referencia (que no haya sido sometida a ninguna prueba).

Al finalizar todos los procedimientos se debe presentar un informe que incluya el comportamiento o característica calefacción/refrigeración de las barras sometidas a prueba, fotografías durante todo el procedimiento, tendencia de diagnóstico de aislamiento durante el ciclado térmico, resultados de la prueba de ruptura y adicionalmente registrar cualquier detalle de prueba.

Se muestra en el diagrama 2, un diagrama de flujo general de los pasos para la aplicación del ciclado térmico.

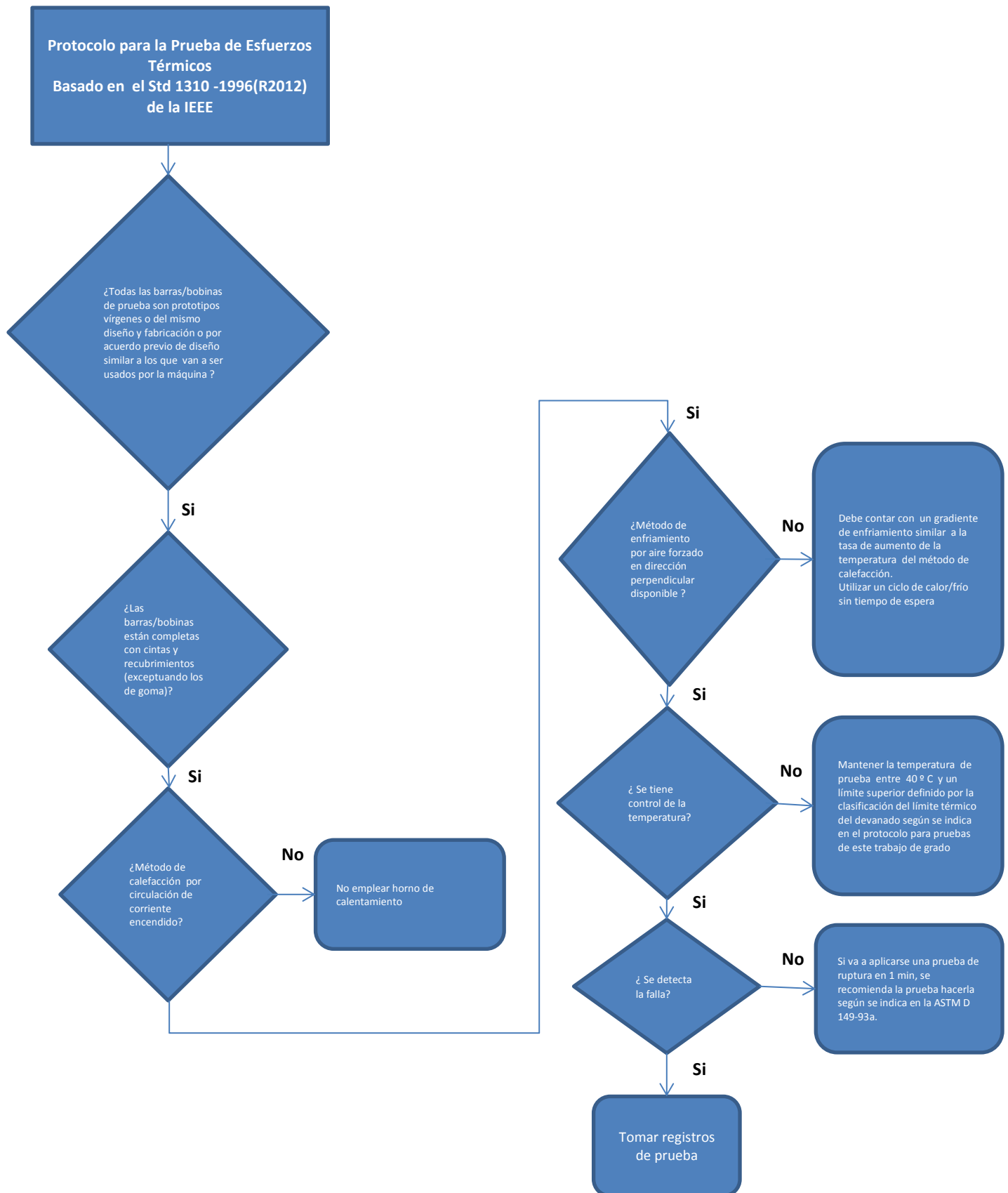


Diagrama 2. Diagrama de flujo para la aplicación de Ciclado Térmico

1.3. IMPORTANCIA DE UNA CERTIFICACIÓN FUTURA DEL BANCO PARA PRUEBAS.

Tanto para la Universidad del Valle, como para la escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica es de gran importancia contar con diversidad de laboratorios que además de contribuir a la formación de los estudiantes, sirvan como medio de investigación e incluso presten un servicio público en beneficio de diferentes entidades. Dado lo anterior, es necesario que cada laboratorio cuente con una certificación emitida por una entidad competente que le confiera legitimidad de sus pruebas.

Cada laboratorio debe estar enfocado hacia una implementación de un Sistema de Gestión de Calidad, aplicable a todo tipo de organización sin importar tamaño, tipo, categoría ni producto. Un Laboratorio se constituye como una organización, a la cual son aplicables los lineamientos de la ISO 9001:2008, considerando que no todos los requisitos de la Norma se aplican a todas las organizaciones.¹¹

Cuando el laboratorio cuente con un Sistema de Gestión de Calidad bajo la norma ISO 17025:2005 (vigente y empleada para laboratorios en la Universidad del Valle), puede proceder a certificarse ante el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia ONAC; y de ésta manera ser reconocido como organización con un sistema de Gestión de Calidad implementado en sus procesos.

Implementar un banco para pruebas de envejecimiento acelerado a barras del estator de máquinas eléctricas rotativas, implica además contar con un aseguramiento en cuanto a su competencia técnica, por lo cual es importante que a futuro, este banco cuente con la implementación de una norma técnica, considerando como apropiada la Norma ISO 17025:2005, la cual garantiza la calidad de procedimientos a todos los procesos organizativos y además asegura su competencia técnica dando validez a los resultados emitidos por el laboratorio.

La norma ISO 17025:2005 es la norma que contiene los requerimientos que los laboratorios de calibración y ensayo tienen que cumplir si desean demostrar que funcionan con un sistema de calidad, son técnicamente competentes y pueden generar resultados válidos. Esta norma se constituye como la guía para la evaluación de la conformidad de los requisitos para calidad y competencia aplicable a todos los laboratorios, independientemente de la naturaleza del ensayo y/o la calibración que se realice.

¹¹ ISO/IEC 9001:2008, Sistemas de Gestión de Calidad. Requisitos.

1.4. DEFINICIÓN Y REQUISITOS DE UN LABORATORIO PARA PRUEBAS

Es necesario para esto, definir un banco donde puedan llevarse a cabo diferentes pruebas a las que serán sometidas las barras del estator para determinar el estado y vida útil del aislamiento bajo un proceso de envejecimiento acelerado.

Debe contarse con un lugar equipado y dotado por un espacio físico definido, equipos e instrumentos de medida y técnicos necesarios para llevar a cabo actividades, experimentos, y las pruebas a las que serán sometidas las barras bajo parámetros normalizados que determinen la confiabilidad de los resultados y que permitan que las pruebas puedan desarrollarse de manera repetitiva. Además debe contar con un sistema de gestión adaptado al alcance de las actividades y pruebas que en él se van a desarrollar y poder documentar sus procedimientos, manuales, políticas, e instrucciones para asegurar la calidad de los resultados de las pruebas y ensayos.

Es necesario que cuente con diferentes parámetros organizacionales, cabe resaltar los siguientes:

✓ *Organizacional.*

- Establecer los perfiles de cada cargo y especificar sus funciones.
- Contar con una certificación u oficialización.
- Llevar documentado un inventario del laboratorio.
- Establecer las actividades y funciones del laboratorio.
- Documentar las funciones específicas y establecerlas en un registro histórico.

✓ *Aspectos sobre Gestión de Calidad.*

- El Laboratorio debe estar de acuerdo con los manuales de procedimiento.
- Establecer metodología de documentación de procedimientos: guías, protocolos.
- Establecer métodos e instrumentos de aplicación en el laboratorio.
- Análisis de resultados de los métodos.

✓ *Gestión administrativa.*

- Deben establecerse los Requisitos o condiciones de prestación del servicio incluyendo los métodos.
- Dejar registro de las actividades y pruebas que se realicen en el laboratorio.
- Establecer la capacidad instalada del laboratorio frente a: instalación física y capacidad de procesamiento.

✓ *Infraestructura y condiciones ambientales.*

- Verificar que el Laboratorio cumpla con la normatividad necesaria.
- Adecuada separación e identificación de las áreas.
- Protocolos o procedimientos de Aseo, Limpieza y Desinfección.

✓ *Equipos.*

- Ficha técnica e identificación de los Equipos, patrones y materiales de referencia.
- Identificación de equipos defectuoso – Fuera de servicio.
- Procedimientos y/o Instructivos de manejo para cada equipo (manual de uso).
- Realizar inventario de equipos, patrones y demás.

1.5. CONTROL DE DOCUMENTACIÓN Y REVISIÓN DEL LABORATORIO.

Para el cumplimiento técnico y administrativo del banco para pruebas, deben crearse manuales, reglamentación, protocolos y registros de equipos plasmados en un documento para llevar un control vigente, facilitar el acceso a esa información y que hagan parte de un sistema de gestión. Todos los registros deben ser legibles y de fácil acceso.

Para la aplicación de las pruebas de envejecimiento acelerado a las barras, debe llevarse un registro técnico con recopilación de datos e información antes, durante y después de la prueba, estos registros pueden ser digitales o físicos en forma de formularios, manuales, gráficos de control o informes de pruebas de ensayo. Todas las alteraciones a los registros deben ser notificadas o registradas.

Se recomienda realizar revisiones periódicas a las instalaciones del laboratorio de pruebas para verificar que sus procedimientos continúan cumpliendo con los requisitos del sistema de gestión y de las normas implementadas. Para este proceso hay que considerar todos los elementos del sistema de gestión, incluidos los procedimientos y pruebas de envejecimiento acelerado.

El propósito del control es la identificación de fallas, dudas en la eficacia del procedimiento, validez de resultados, equipos presentando fallas, entre otros; y de esta manera tomar acciones correctivas oportunas y llevar un registro de dichos controles.¹²

¹² ISO/IEC17025, Requisitos Generales para la competencia de los laboratorios de Ensayo y Calibración.

1.5.1. Mejoramiento continuo

El laboratorio ubicado en la Universidad del Valle, se regirá por la filosofía del mejoramiento continuo y tendrá en cuenta la política de calidad de la Institución y de los laboratorios, los objetivos de calidad planteados, los resultados de revisiones por la dirección y el análisis de las acciones correctivas y preventivas para el mejoramiento de sus actividades y servicios.

1.5.2. Instalaciones y condiciones ambientales

El laboratorio debe cumplir con las normas de seguridad, salud ocupacional y los requisitos legales correspondientes, estos requerimientos se especifican más a fondo en el Capítulo 2.

1.6. REQUISITOS TÉCNICOS.

Para determinar la exactitud y confiabilidad de las pruebas de envejecimiento acelerado es necesario tener en cuenta algunos factores o elementos que interfieren en el procedimiento.

- ✓ Factores humanos.
- ✓ Instalaciones y condiciones ambientales.
- ✓ Manejo de equipos.
- ✓ Calibración de equipos
- ✓ Trazabilidad en las mediciones.

Las instalaciones del laboratorio y del banco para pruebas, las fuentes de energía, la iluminación y las condiciones ambientales, deben facilitar la realización correcta de los procedimientos y pruebas de ensayo.

En el laboratorio debe realizarse un seguimiento, controlar y registrar las condiciones ambientales cuando en el desarrollo de las pruebas se presenten alteraciones en la calidad de los resultados, y si es pertinente debe interrumpirse el proceso. Debe prestarse especial atención, con la humedad, el suministro eléctrico, la temperatura, y a los niveles de ruido y vibración.

Para un buen funcionamiento organizacional del laboratorio, debe controlarse el acceso a al sitio donde se encuentra ubicado el banco para pruebas ya que si no se maniobran bien los elementos podría afectarse la validez de los procedimientos y pruebas de ensayos. Además, es necesario asegurar orden y la limpieza y correcta ubicación de elementos de medida en el laboratorio.

1.7. PERSONAL.

El director del grupo de investigación CONVERGÍA debe asegurar la competencia del personal que labora en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas, debe ser calificado sobre la base de una formación, habilidades y experiencia para la manipulación de todos los que equipos que en él se encuentran, maniobrar elementos a la hora de realizar las pruebas, ensayos de rutina y evaluación de resultados.

1.7.1. Servicios y compra de suministros adicionales.

Si en el laboratorio de Máquinas Rotativas debe realizarse una compra para suministros del mismo, debe realizarse con base a lo establecido en el Estatuto Autónomo de Contratación de la Universidad del Valle, Acuerdo No. 003 de Junio 11 de 2009, y a los procedimientos establecidos en el sistema de Gestión Integral de la Calidad de la Universidad del Valle GICUV. Además toda compra debe ser documentada en un instructivo de procedimiento.

1.8. MANUAL DE PROCEDIMIENTOS.

Es importante que el laboratorio mantenga un Sistema de Gestión de Calidad acorde con el Sistema de Gestión Integrado de la Universidad del Valle, GICUV, cumpliendo con las disposiciones específicas del manejo adecuado de documentación, equipos e instalaciones. El banco para pruebas debe tener en cuenta lo siguiente:

1.8.1. Definiciones y especificaciones.

- Documento: Es un escrito que contiene información acerca del propósito del laboratorio y de las pruebas de envejecimiento aplicadas en él.
- Procedimiento: Especificaciones de las pruebas de envejecimiento acelerado aplicando esfuerzos térmicos y termoeléctrico que se desarrollaran en el laboratorio.
- Registro: Documentos que contienen datos e información generada por las diferentes pruebas y que constituye la evidencia objetiva de las actividades desarrolladas y de los resultados obtenidos.
- Formulario: Es un documento (formato) con espacios (campos) en donde se registra la información y los datos obtenidos en las pruebas. No es modificable y cada campo tiene un objetivo.

1.8.2. Instructivos de procedimiento.

Los documentos a utilizar en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas para el banco para pruebas se denominarán instructivos de procedimientos, para este caso, el instructivo de procedimientos de la prueba de ciclado térmico (IEEE 1310-2012) y la prueba de esfuerzos termoelectrónicos (IEEE 1043-1996-R2009) conformarán el manual de prueba, con una codificación con letras y números de acuerdo a las condiciones, como se indica a continuación:

 Universidad del Valle Facultad, Instituto Académico, Seccional o Sede Regional	Instructivo de Procedimientos		Código:	Versión:
			Código del Manual de Procedimientos Marco:	
			Página: 1 de X	
Fecha de Emisión:	Título:			
Elaborado por:	Revisado por:	Revisado por:	Aprobado por:	

Tabla 2. Encabezado para los instructivos de procedimientos

En la Codificación del Manual se llevará una casilla adicional con el código del Manual de Procedimientos Institucional marco al cual pertenece el Instructivo. Codificación:

Carácter 1: Alfabético, hace referencia al instructivo “IP”.

Carácter 2: Guion.

Carácter 3: Alfabético, hacen referencia a la Facultad, Instituto Académico.

Carácter 4: Guion

Carácter 5: Alfabético, hacen referencia al laboratorio.

Carácter 6: Guion.

Carácter 7: Alfabético, hacen referencia a la sección o área dentro del laboratorio, de no existir se utiliza el 00.

Carácter 8: Guion.

Carácter 9: Numérico, consecutivo del manual.

Ejemplo: IP-FIEE-LMER-ACE-01

Manual de instructivos de procedimientos (IP) de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (FIEE), del Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas (LMER) del Área de Conversión de Energía (ACE) correspondiente al manual número 0.1.

No todo informe o registro necesita ser codificado, al interior del laboratorio se pueden tener reportes o formatos adicionales que sólo deberán contar con una identificación que incluye el título o nombre del registro y deberá estar incluido en el registro del laboratorio.

1.8.3. Registros técnicos.

Los datos que se obtienen durante las pruebas de envejecimiento acelerado deben ser registrados en un formato establecido anteriormente. Este formato debe brindar facilidad para repetir las prácticas e incluir el responsable de la ejecución y revisión de los resultados. Cuando se presenten errores en los registros o toma de datos, cada error debe ser tachado, no debe ser borrado, y el valor correcto debe ser registrado nuevamente. Cada anomalía encontrada debe ser avisada a la persona que hace la corrección. En caso de realizar un registro electrónico, debe tenerse precaución para evitar pérdida o cambio de los datos originales.

1.8.4. Informe de resultados

Los resultados emitidos por el laboratorio ubicado en la Universidad del Valle, deberán realizarse de acuerdo a los lineamientos del capítulo 5.10 de la norma NTC ISO/IEC 17025:2005. Los responsables de cada práctica realizada deben registrarse en un formato, el será manejado por el Director del Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas.

1.9. VALIDACIÓN DE PROCEDIMIENTOS.

Con la implementación de un Banco para pruebas de Envejecimiento Acelerado en el laboratorio se deben aplicar métodos y procedimientos normalizados que incluyan calidad de equipos, preparación de pruebas y técnicas estadísticas para el análisis de datos y resultados.

El banco para pruebas debe tener instrucciones para el uso y el funcionamiento de todos los equipos, para la manipulación y la preparación de las pruebas a realizar. Cada actividad documentada, manuales o pruebas referentes al banco para pruebas deben estar fácilmente disponibles para el personal que hace parte del laboratorio.

Los ensayos de esfuerzos termoeléctricos y térmicos aplicados a barras, deben contar con un diagnóstico final sobre su estado de aislamiento y deben satisfacer requisitos normativos en lo cual, pueden desarrollarse métodos adaptados por el grupo de Investigación CONVERGÍA si cumplen con condiciones mínimas y válidas por las normas, estos nuevos métodos deben contener como mínimo la siguiente información:

- ✓ Identificación apropiada.

- ✓ Alcance.
- ✓ Descripción del tipo de procedimiento.
- ✓ Parámetros, magnitudes y rangos.
- ✓ Equipos con requisitos técnicos de funcionamiento.
- ✓ Condiciones ambientales requeridas.
- ✓ Descripción del procedimiento.
- ✓ Registro de observaciones y resultados.
- ✓ Datos a registrar y método de análisis y de presentación.

Es necesario que el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas valide los métodos no oficiales y las ampliaciones o modificaciones de los métodos normalizados, para confirmar que los métodos son aptos para dicho propósito.

1.10. CONTROL DE DATOS Y EQUIPOS.

Todos los datos registrados y cálculos realizados se recomienda que sean verificados de una manera sistemática. Cuando sea necesario capturar y registrar los datos de los pruebas en el laboratorio, debe asegurarse que:

- ✓ El formato a usar debe contar con la información suficiente y validada.
- ✓ Se deben establecer e implementar procedimientos para proteger los datos.
- ✓ Realizar mantenimiento periódico al equipo que cuenta con la información y que lleva el control y registro de datos.

El laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas debe estar provisto con todos los equipos para las pruebas, si en algún momento se considera necesario utilizar equipos que estén fuera de su control permanente, debe asegurarse de que se cumplan los requisitos de la norma.

Los equipos que se encuentren en el laboratorio, deben ser operados sólo por personal autorizado. Además, toda la documentación referente a las pruebas debe estar disponible para ser utilizadas por el personal del laboratorio.

En caso de que algunos equipos hayan sido sometidos a una sobrecarga o a un mal uso y se encuentren defectuosos, se deben aislar y marcar para evitar su uso.

1.10.1. Equipos de medición.

Las etiquetas de identificación deben colocarse en un lugar visible del equipo y deben elaborarse en un material durable, ya que el personal del laboratorio es el principal

responsable del uso equipo en buen estado.

Cuando un equipo está defectuoso, debe reportarse, marcar y poner fuera de servicios con su respectivo formato donde se reporten los quipos fuera de uso.



Figura 3. Indicativo de equipo fuera de servicio.

Todos los equipos utilizados para realizar las pruebas de Ciclado Térmico y Esfuerzos Termoeléctricos, incluidos los equipos para mediciones auxiliares, deben ser calibrados antes de ser puestos en servicio. Es importante que por parte del director de Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas se establezca un programa y un procedimiento para la calibración de sus equipos.

1.10.2. Codificación de los equipos.

El código que identificará los equipos o instrumentos de medida, se componen de 10 caracteres, así:

Identificación: Indica el nombre del laboratorio al que pertenece el equipo.

Carácter 1: Un guion.

Carácter 2: Indica el elemento o característica del equipo a saber:

Equipo	utilizará la letra	"E"
Instrumento	utilizará la letra	"I"
Material de referencia	Utilizará la letra	"R"
Software	utilizará la letra	"S"

Caracteres 3 y 4 Consecutivo numérico.

Nota: si es equipo o patrón se utilizará el consecutivo "00"

Caracteres 5 y 6 Iniciales del nombre del equipo o patrón, que se esté codificando

Caracteres 7 y 8 Consecutivo, iniciando en el 01

Ejemplos: Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas-E00RU01 (Laboratorio de Máquinas Eléctricas, E = equipo, consecutivo cero cero (00), RU = tacómetro, número cero uno)

Nota: En caso de existir instrumentos repetidos "n" veces de frecuente uso y reposición como por ejemplo: Voltímetros, se codifican e identifican solo uno y su placa se coloca en un lugar cercano a todos.

1.11. INFORME DE RESULTADOS.

Debe crearse un sistema para la identificación de los pasos que se van implementando en el desarrollo de las pruebas de envejecimiento acelerado.

Los resultados obtenidos después de aplicar las diferentes pruebas recomendadas por las normas en el laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas deben ser plasmados a manera de reporte o informe de forma correcta y exacta de acuerdo con los requerimientos de diagnóstico y análisis para el estado del aislamiento en barras de estator.

Los resultados deben incluir toda la información requerida por el director del laboratorio, y necesaria para la interpretación de los resultados de los procedimientos aplicados, así como toda la información requerida por el método utilizado.

Cada informe de resultados debe incluir la siguiente información:

- ✓ Título.
- ✓ Nombre y la dirección del laboratorio donde se realizaron las pruebas.
- ✓ Identificación única del informe de la prueba (con el número de serie).
- ✓ Descripción específica de los procedimientos implementados.
- ✓ Duración del procedimiento y entrega de resultados
- ✓ Resultados de los ensayos con unidades de medida y datos registrados.
- ✓ Los nombres e identificación de la o las personas que autorizan el informe.

Para una buena interpretación de resultados y análisis, el informe además debe incluir:

- ✓ Información sobre condiciones de ensayo específicas, tales como las condiciones ambientales.
- ✓ Si es necesario, una declaración sobre el cumplimiento o no cumplimiento con los requisitos o las especificaciones de la prueba aplicada.
- ✓ Opiniones e interpretaciones.
- ✓ Información adicional que pueda ser requerida por métodos específicos, clientes o grupos de investigación.

Para el laboratorio de pruebas, es necesario contar con unos lineamientos referentes al mantenimiento correctivo y preventivo de los equipos y elementos utilizados en las pruebas de envejecimiento acelerado en caso de ser necesario, como se presenta a continuación:

1.11.1. Mantenimiento correctivo.

ETAPA	ACTIVIDAD	RESPONSABLE	REGISTROS
1. Detectar mal funcionamiento de los dispositivos	Detectar la falla en el equipo, al no poder ejecutar correctamente una operación.	Operario del Dispositivo	
	Colocar el equipo "Fuera de Servicio."	Operario del Dispositivo	
	Comunicar por escrito la falla al encargado del laboratorio, solicitando la revisión del equipo.	Operario del Dispositivo	
	No debe recibirse ningún servicio que incluya el equipo afectado.	Operario del Dispositivo	
2. Ejecutar mantenimiento correctivo	Realizar la visita para diagnosticar y reparar el equipo en cuestión.	Personal calificado	
	Definir la necesidad de repuestos, si es necesario el cambio de piezas o mecanismos.	Personal calificado	
	Solicitar la compra de repuestos	Encargado de equipos en Lab.	
	Realizar la instalación de repuestos	Personal contactado	
	Ensayo del equipo en reparación.	Personal contactado	
	Si el equipo necesita Calibración, no debe regresar a servicio hasta que ésta no sea ejecutada.	Profesional de Metrología	

Tabla 3. Mantenimiento correctivo.

1.11.2. Mantenimiento preventivo.

ETAPA	ACTIVIDAD	RESPONSABLE	REGISTROS
1. Planear mantenimiento preventivo	Elaborar el Programa de Mantenimiento Preventivo de los equipos, teniendo en cuenta la prestación de servicios solicitados o proyectados.	Profesional de Metrología	Programa de Mantenimiento Preventivo
	Ejecutar el mantenimiento programado	Personal calificado	
	Reportar las novedades encontradas y los ajustes realizados.	Personal calificado	
	Identificar los repuestos necesarios para cambio en caso de ser necesario.	Personal calificado	
	Solicitar la compra de repuestos, ejecutando el Procedimiento de Compras.	Profesional de Metrología	
	Realizar la instalación de repuestos	Personal calificado	
2. Verificar el funcionamiento de los dispositivos	Ensayar el equipo en reparación	Personal calificado	
	El ensayo del equipo se debe realizar cuantas veces sea necesario para asegurar su correcto funcionamiento.	Profesional de Metrología	
	Si el equipo necesita Calibración, no debe regresar a servicio hasta que ésta no sea ejecutada.	Profesional de Metrología	
	Colocar en funcionamiento el equipo e informar al Profesional de Metrología para tener en cuenta la programación de los servicios.	Operario del Dispositivo	

Tabla 4. Mantenimiento preventivo.

CAPÍTULO II

DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL LABORATORIO Y CONDICIONES DE SEGURIDAD

A continuación se describen las características técnicas con que debe contar un laboratorio en el que se realice pruebas de envejecimiento acelerado de barras del estator de máquinas rotativas mediante la aplicación de esfuerzos termoeléctricos o solamente de ciclado térmico. El laboratorio debe constar de sistemas capaces de aplicar estos esfuerzos a barras/bobinas (una tensión de hasta 13.2kV y temperatura según la clase de aislamiento a probar), tales sistemas conforman el banco para pruebas.

Un laboratorio para pruebas de envejecimiento acelerado de barras del estator de máquinas rotativas debe cumplir con aspectos de seguridad del personal y asegurar la confiabilidad de la información obtenida de las pruebas. Las características definidas para el laboratorio en mención hacen referencia a los requisitos mínimos que debe cumplir el laboratorio de envejecimiento acelerado que se está implementando¹ en las instalaciones del edificio 353 de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, sede Meléndez, para ser apto para la certificación de sus actividades e instalaciones, con la visión a una futura prestación de sus servicios.

Las pruebas a realizar en el laboratorio se ejecutan mediante el empleo de un montaje para la simulación de esfuerzos termoeléctricos y otro para los térmicos, que por simplicidad se nombra en este trabajo de grado como banco para pruebas. Los esfuerzos termoeléctricos simultáneos a barras del estator se basan en el estándar IEEE 1043 - 2006 (R2009) y los térmicos en el IEEE 1310 – 1996 (R2012).

El sistema de esfuerzos termoeléctricos consta de un arreglo de resistencias para la calefacción de las barras/bobinas del estator, un arreglo para la aplicación de tensión y un tablero de control del sistema. El arreglo de resistencias para la calefacción se conecta a la red de energía eléctrica a 220V y la temperatura en las barras/bobinas se censa con termocuplas. El arreglo para la aplicación de tensión eléctrica trata de un transformador de potencia de 110/220V a 13.2kV y de un regulador de tensión 220/110V. Para simular tales esfuerzos, se aplican al mismo tiempo alta tensión gradualmente y aumento de temperatura según las características del sistema a probar.

El ciclado térmico se hace mediante inyección de corriente con un generador de corriente de 500A DC con excitación independiente. El ciclado es monitoreado con una etapa de control para aplicar aumento de temperatura por determinado tiempo, según las características del sistema de aislamiento a probar. Una vez se suspende la aplicación de temperatura, se dispone de ventilación con orientación perpendicular a la barra/bobina

hasta descenderla y se aplique de manera cíclica nuevamente un ciclo de calefacción-ventilación.

A continuación se muestran las características del banco para pruebas de envejecimiento acelerado situado en el laboratorio de máquinas eléctricas rotativas actualmente:

2.1. ELEMENTOS Y ADECUACIÓN ACTUAL DEL BANCO PARA PRUEBAS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO DEL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS ROTATIVAS.

Actualmente el laboratorio¹³ cuenta con un espacio de 25,1m², sin embargo, para determinar las dimensiones y características que debe tener el laboratorio, se toman en consideración los equipos y estructuras que éste alberga. La estrategia consiste en hacer distribución de todos sus elementos y definir hacia fuera del banco para pruebas, los espacios y adecuaciones requeridos según normatividad colombiana.

Las características eléctricas y térmicas del banco para pruebas del laboratorio actual, son:

- ✓ El sistema de esfuerzos termoeléctricos consta de 11kW de carga (resistencias) conectada a 220V para el ajuste de una temperatura entre los 30°C y 155°C y una tensión de hasta 13.2kV para la aplicación de tensión.
- ✓ El sistema de ciclado térmico consta de una máquina de alta corriente de hasta 500A DC y una resistencia de carga en el rango de 25mΩ a 60mΩ.

Seguidamente se exponen los sistemas de esfuerzos térmicos y termoeléctricos del laboratorio actual de envejecimiento acelerado a barras del estator de máquinas rotativas de la Universidad del Valle y sus características.

2.1.1. Sistema de esfuerzos termoeléctricos.

El sistema de esfuerzos termoeléctricos implementado actualmente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas, cuenta con las características siguientes:

- ✓ Sistema de aplicación gradual de tensión mediante un transformador monofásico de distribución de 13.2kV/220V/110V, 15kVA, alimentado por el lado de baja tensión mediante un regulador de tensión de 0V a 220V, 2400W, 20A.

¹³ CASTRO, Luis Carlos. Informe Final sobre el proyecto Implementación de un Banco para Pruebas de Envejecimiento Acelerado a Barras del Estator de Máquinas Rotativas.



Figura 4. Transformador de distribución de 15KVA.

- ✓ Sistema de calefacción para el aumento de temperatura a las barras/bobinas, compuesto por grupos de resistencias de 470W conectadas a 220V en delta, corriente 21A y por platinas de aluminio de 0.6m y 1.4m de longitud con perforaciones de 0,04m de profundidad para la medición de temperatura mediante termocuplas.

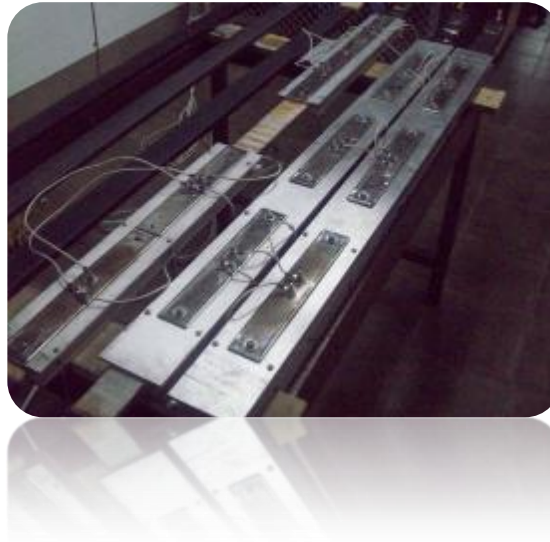


Figura 5. Sistema de calefacción aplicado a bobinas.

- ✓ Tablero de control para la alimentación de tensión trifásica por medio de mandos de arranque y frenado para la prueba, medidor de variables (multímetro digital trifásico), módulo DAQ para el control y registro de la temperatura, relés y contactores para el control de la aplicación de esfuerzos térmicos y eléctricos simultáneos.



Figura 6. Tablero de control.

2.1.2. Sistema de ciclado térmico.

El sistema de ciclado térmico implementado actualmente en el laboratorio de máquinas eléctricas rotativas de la Universidad del Valle no emplea el transformador de potencia del montaje de esfuerzos termoeléctricos. Este sistema emplea los elementos siguientes:

- ✓ Grupo Motor-Generador: Generador de corriente DC con excitación independiente, corriente del devanado de campo de 8A a 30V, corriente de armadura de 500A. El motor del grupo es trifásico de inducción, de 18.5kW conectado a 220V.

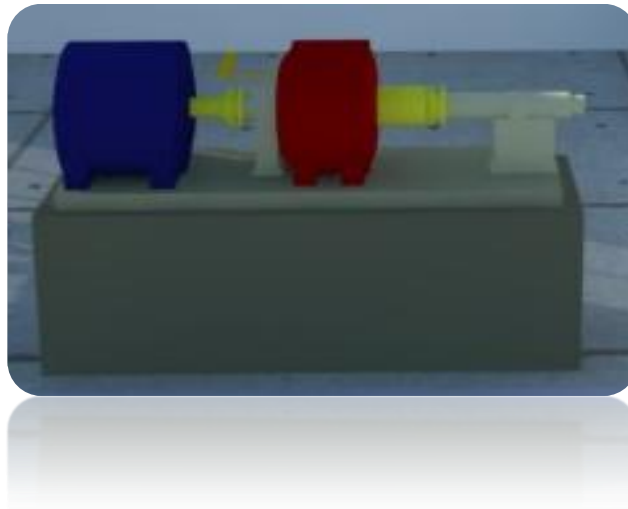


Figura 7. Grupo motor generador del Laboratorio de Máquinas Rotativas.

- ✓ Arrancador estrella-delta para el arranque del grupo motor-generador.
- ✓ Grupo de bobinas conectadas en serie a las que el generador suministra corriente por ciclos.
- ✓ registro de temperatura.



Figura 8. Muestra de bobinas de prueba.

- ✓ Tablero de control para el suministro de corriente a las bobinas/barras por medio de una fuente de DC y el registro de la temperatura hasta el momento de máximo calentamiento para el cual se inicia de inmediato el estado de enfriamiento. El cambio de estado calentamiento-enfriamiento se conoce como ciclado térmico y se realiza empleando una tarjeta con chip de control AT Megas y puente rectificador SCR.

El laboratorio para pruebas de envejecimiento acelerado a barras/bobinas del estator de máquinas rotativas de la Universidad del Valle tiene la disposición física siguiente:

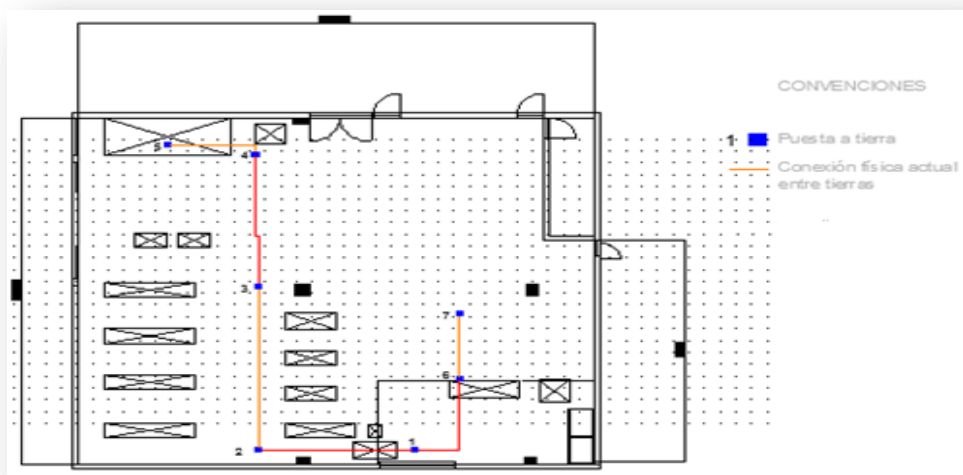


Figura 9. Vista de planta del laboratorio del banco para pruebas actual

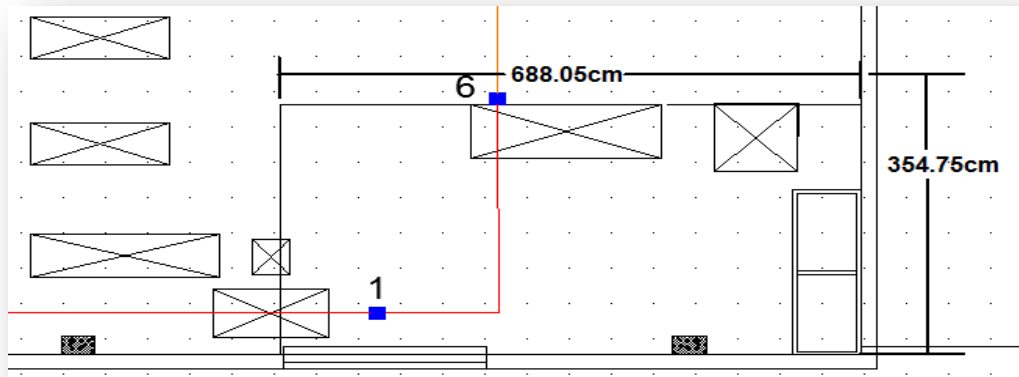


Figura 10. Zoom al laboratorio del banco para pruebas actual

La descripción anterior corresponde al laboratorio actual. Seguidamente se procede a definir las características que ha de tener el laboratorio para certificarse en un futuro según normatividad nacional.

Ya que en todo lugar de trabajo ha de establecerse un programa de salud ocupacional de carácter permanente y constituido por cuatro elementos básicos o subprogramas, se hace especificación de cada subprograma y de las respectivas actividades a realizar en el laboratorio por cada uno de ellos.

2.2. PROGRAMA DE SALUD OCUPACIONAL¹⁴

2.2.1. Subprograma de Medicina Preventiva y del Trabajo

Pretende mejorar y mantener las condiciones generales de salud y calidad de vida de los trabajadores.

Actividades a realizar en el laboratorio

- ✓ Educar a todo el personal en la forma de mantener su salud.
- ✓ Capacitar al personal en factores de riesgo, sus efectos sobre la salud y la manera de corregirlos.

¹⁴ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS. Guía para el diagnóstico de condiciones de trabajo o panorama de factores de riesgo y valoración. Norma GTC 45 de Icontec. Bogotá 2002.

- ✓ Prevenir, detectar y controlar enfermedades generales (EG) y profesionales (EP).
- ✓ Ubicar al trabajador en un cargo relacionado con sus condiciones psico-físicas.
- ✓ Hacer seguimiento periódico a los trabajadores para identificar y vigilar a los expuestos a riesgos específicos.

2.2.2. *Subprograma de Higiene Industrial*

Busca identificar y evaluar mediante estudios ambientales periódicos, los agentes y factores de riesgo del trabajo que pueden afectar la salud de los trabajadores. Además busca determinar y aplicar medidas para el control de riesgos de accidentes y enfermedades asociadas al trabajo y verificar periódicamente su eficiencia.

Actividades a realizar en el laboratorio

- ✓ Estudios de cada uno de los agentes contaminantes ambientales.
- ✓ En coordinación con ARP se debe realizar mediciones de ruido e iluminación.
- ✓ Aplicar correctivos relacionados al ruido y la iluminación: en la fuente, en el medio y en caso de no ser posible realizarse en ellos se hace en el individuo.
- ✓ Seguimiento anual con el fin de conocer la predominación y evolución de agentes contaminantes.

2.2.3. *Subprograma de Seguridad Industrial*

Su finalidad es mantener un ambiente laboral seguro, haciendo control a las causas básicas que pueden causar daño a la integridad física del trabajador o a los recursos de la empresa.

Actividades a realizar en el laboratorio

- ✓ Identificar, valorar y controlar las causas básicas de accidentes.
- ✓ Monitorear y controlar permanente los factores que tengan un alto potencial de pérdidas para la empresa.
- ✓ Relacionar actividades con los otros subprogramas para asegurar la protección de los empleados.
- ✓ Elaborar procedimientos de trabajo y capacitar en ellos bajo criterios de seguridad, calidad y producción.

Recursos

- ✓ Recurso Humano: El COPASO o Comité Paritario de Salud Ocupacional realizará visitas de inspección de riesgos en cada área de la compañía. Se cuenta con la asesoría de los funcionarios de la A.R.P a la cual la compañía se encuentre afiliada.

El Comité Paritario de Salud Ocupacional COPASO

El COPASO es un organismo de participación, ejecución y apoyo en lo relacionado al Programa de Salud Ocupacional-SO de una compañía, debe conformarse en las instalaciones de la empresa donde participarán el Representante Legal y sus trabajadores para dar cumplimiento a la Resolución 2013 de 1986 y al Decreto 1295 de 1994 en su artículo 63 y a las exigencias de la División de Salud Ocupacional del Ministerio de Trabajo.

Los comités paritarios de Salud Ocupacional son uno de los elementos básicos de los programas de SO en las empresas según lo definido en el Decreto 614 de marzo de 1984 y se ocupan de la promoción y vigilancia de normas y reglamentos de salud ocupacional en la empresa. El COPASO debe formarse inmediatamente inicie el funcionamiento del centro de trabajo.

Dado que la empresa cuenta con menos de 10 trabajadores, no se obliga directamente a conformar el COPASO, sin embargo se debe elegir un vigía Ocupacional y un suplente. El vigía y su suplente velarán por la debida ejecución de los aspectos de salud ocupacional y seguridad industrial definidos en este trabajo, dentro del laboratorio, y son elegidos de mutuo acuerdo entre la gerencia y los trabajadores.

- ✓ Recurso Técnico: Extintores y gabinetes contra incendio según lo recomendado por la inspección que realiza el cuerpo de bomberos de la ciudad.

2.2.4. Subprograma de Saneamiento Básico y Protección Ambiental

Actividades a realizar en el laboratorio

- ✓ Identificar y evaluar mediante estudios periódicos, los agentes y factores de riesgo del trabajo que afecten o puedan afectar los recursos naturales y a la comunidad.
- ✓ Determinar y aplicar las medidas para el control de riesgos verificando periódicamente su eficiencia.
- ✓ Desarrollar acciones de control de posibles enfermedades ocasionadas por el manejo inadecuado de las basuras, servicios sanitarios, agua para el consumo humano, consumo de alimentos, control de plagas, etc.

Seguidamente se especifican diversos factores de riesgo asociados a las actividades realizadas en el laboratorio, además se alude a la seguridad relacionada a la maquinaria. Para acceder a una certificación, es necesario que el laboratorio cuente con seguridad para la prevención de accidentes.

2.3. ESPECIFICACIONES RELACIONADAS A LOS ELEMENTOS DEL LABORATORIO.

La seguridad en los elementos del laboratorio recae en su diseñador, en el empleado que los opera y en el supervisor que vigila que las máquinas se operen de modo seguro.

- ✓ Protección de maquinaria: Las siguientes opciones permiten hacer protección de la maquinaria

Envoltura total: Construir una barrera fija que impida el contacto físico con las partes en movimiento.

Detección de movimiento cuando el área peligrosa esté descubierta: Mecanismo de bloqueo que impide que la máquina opere cuando la zona peligrosa esté accesible al operador.

Detección inmediata de la máquina en movimiento: Se vincula un sistema de frenado rápido en las máquinas al haber situación de riesgo.

2.4. FACTORES DE RIESGO EN EL LABORATORIO

Generalmente, los riesgos físicos a los que está expuesto el personal del laboratorio están relacionados a ruido, vibraciones, iluminación y de ventilación.

- 2.4.1. *Ruido:* La resolución 08321 de 1983 del Ministerio de Salud, define el Ruido como la contaminación emitida por un sonido que afecta adversamente la salud o seguridad de los seres humanos.

Nota: El ruido puede causar incluso reacción lenta frente a situaciones de peligro o accidentalidad.

Obsérvese la relación del tiempo de trabajo continuo y el nivel de ruido admisible asociado que soporta el oído del ser humano:

Nivel de Ruido	
Tiempo de Trabajo Continuo	
85dB	8h
90dB	4h
100dB	2h
105dB	1h
110dB	½ h
115dB	¼ h
120Db	1/8 h

Tabla 5. Nivel de ruido-Tiempo de trabajo continuo.

Ya que una vez se configura la prueba en el laboratorio esta es relativamente desatendida, los niveles de ruido permitidos por permanencia de personal en el laboratorio es variable.

Según resolución No.8321 de 1983 del Ministerio de Salud:

Día: de 7:01 de la mañana a 9:00 de la noche

Noche: de 9:01 de la noche a 7:00 de la mañana

Día	Noche	Zona
65dB	45Db	Residencial
70dB	60dB	Comercial
75dB	75dB	Industrial
45dB	45dB	De Tranquilidad

Tabla 6. Ruido admisible en el día y en la noche según zona.

Si el laboratorio es construido en zona industrial, el ruido máximo permitido durante el día y la noche es de 75dB.

2.4.2. *Vibraciones:* Son movimientos oscilatorios, que se transmiten a través de sólidos, pueden alterar la estabilidad emocional del trabajador y generarle problemas emocionales. Las vibraciones verticales afectan a los operarios sentados y las vibraciones horizontales afectan a los que están de pie.

2.4.3. *Iluminación:* Medida en Luxes, reduce los riesgos que pueden ocasionar accidentes y/o enfermedades.

En cuanto a la iluminación de los puestos de trabajo, teniendo en cuenta los niveles mínimos de intensidad de iluminación y que para examinar las muestras en el laboratorio

se hace diferenciación de detalles finos, con un grado regular de contraste y largos periodos de tiempo, se necesita una iluminación de 500 a 1.000 lux.

Para trabajos regulares de oficina es necesario contar con una iluminación de 1.500 Lux, 200 Lux en los corredores y 300 Lux en sanitarios.

2.4.4. *Ventilación:* Debe disponerse de una producción de corrientes de aire que permitan evacuar contaminantes de la atmósfera en la que se encuentra el trabajador para evitar el ingreso de estos a su organismo y le causen enfermedad.

2.4.5. *Otros Factores de Riesgo:*

- ✓ *Mecánicos:* Pueden ocasionarse lesiones por las máquinas, generalmente por falta de comprensión de los riesgos y de un diseño seguro.
- ✓ *Eléctricos:* La electricidad se define como un flujo de electrones a lo largo de un circuito cerrado y se controla interrumpiendo el circuito.
- ✓ *Ergonómicos:* Tienen que ver con las inadaptaciones físicas que el lugar de trabajo tiene para el trabajador.
- ✓ *Psicosociales:* Están asociados a los excesos de carga de trabajo, los turnos adicionales, las relaciones interpersonales, monotonía, desconocimiento del trabajo, problemas familiares, exceso de responsabilidades.
- ✓ *Locativos:* Son los relacionados con el estado físico del recinto en que operan los trabajadores.

Ya que las actividades realizadas en el laboratorio implican significativamente riesgo eléctrico para el personal que le habita, se dedica este espacio para determinar aspectos de seguridad y otras consideraciones relacionadas.

2.5. SEGURIDAD EN RIESGO ELÉCTRICO (Normatividad)¹⁵

En caso que se desee proceder a la certificación del laboratorio del banco para pruebas de envejecimiento acelerado de barras del estator de máquinas rotativas, debe hacerse ante el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia – ONAC. Para definir aspectos de seguridad en riesgo eléctrico (asociado a las actividades principales dentro del laboratorio), adoptamos el Código Eléctrico Colombiano NTC 2050 a través del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas-RETIE.

Nota: El Código Eléctrico Colombiano NTC 2050 está basado en los estándares internacionales IEC_Serie50 e IEEE_Serie100.

¹⁵ REGLAMENTO TECNICO DE INSTALACIONES ELECTRICAS. RETIE. Quinta Actualización 2008.

2.6. ESPECIFICACIONES GENERALES DEL LABORATORIO

2.6.1. Seguridad de los Seres Vivos

Para garantizarla, se tiene en cuenta lo que dicta la norma respecto a la soportabilidad de los seres humanos y animales a la electricidad, por tanto, según la figura 1 de la NTC 4120, con referente IEC 60479-2, debe trabajarse máximo dentro de los límites de la zona 3, donde a lo más, el ser vivo puede exponerse a una corriente de 500mA por 10ms.

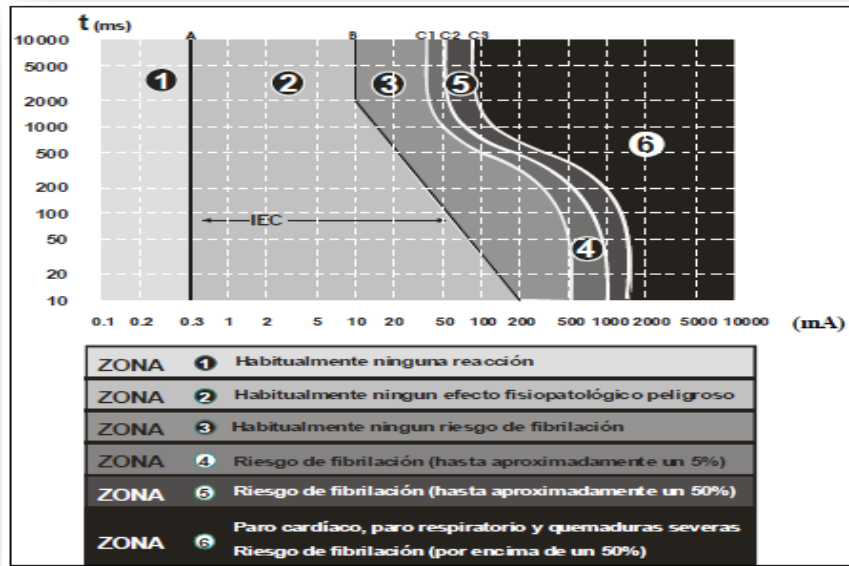


Figura 11. Zonas de t/I de los efectos de las corrientes alternas de 15Hz a 100Hz.¹⁶

Nota: Ya que el nivel máximo de tensión de operación en el laboratorio es 13,2kV (en bornes de un transformador de tensión), por estar en el rango de los 1000V a los 57,5kV, es clasificado como media tensión (MT).

2.6.2. Sistema de Unidades a emplear

Sistema Internacional de Unidades (SI), aprobado por la resolución No. 1832 de 1991 de la Superintendencia de Industria y Comercio.

2.6.3. Simbología General

De acuerdo a las normas unificadas IEC 60617, ANSI Y 32, CSA Z99, IEEE 315, puede utilizarse los siguientes símbolos relacionados a la electricidad.

¹⁶ NTC 4120. Efectos de la corriente sobre los seres humanos y los animales domésticos.

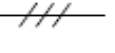
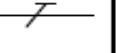
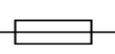
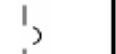
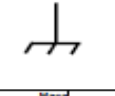
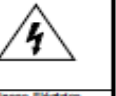
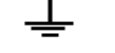
				
Anodo de Sacrificio	Caja de Empalme	Central de Generación	Central Hidráulica	Central Térmica
				
Clavija de 15 A	Clavija de 30 A	Conductores de Fase	Conductor Neutro	Conductor de Puesta a Tierra
				
Conector Removible	Descargador de Sobretensión	Detector Automático de Incendio	Doble Alimentación	Empalme
				
Equipotencialidad	Extintor para Equipo Eléctrico	Fusible	Generador	Interruptor Automático
				
Interruptor Diferencial	Interruptor - Seccionador para AT	Huelo	Parada de Emergencia	Riesgo Eléctrico
				
Seccionador	Subestación	Tierra	Tierra Alada	Tierra de Protección
				
Tomacorriente de 20 A	Tomacorriente Doble (Acoplamiento)	Tomacorriente en el piso	Transformador de Alimentación	Transformador de Seguridad

Figura 12. Principales símbolos gráficos relacionados a la electricidad

2.6.4. Señalización de Seguridad

Es necesario tener en cuenta que la señalización no elimina un riesgo, tan solo lo indica y no implica seguridad efectiva. El carácter de la señalización es preventivo.

2.6.4.1 Resoluciones referentes a la seguridad

1016 de 1989 (Artículo 11 - Numeral 17): Como parte del subprograma de Higiene y Seguridad Industrial, se trata la ``delimitación de las áreas de trabajo, zonas de almacenamiento y vías de circulación y señalización de las salidas, salidas de emergencia, resguardos y zonas peligrosas de las maquinas e instalaciones acorde a las disposiciones legales vigentes``.¹⁷

¹⁷ Resolución 1016 de 1989. Reglamento de organización y funcionamiento y forma de los Programas de Salud Ocupacional. Artículo 11

2400 de 1979 (Título V – Artículo 202 – Código de colores): “En todos los establecimientos de trabajo donde se lleven a cabo operaciones y/o procesos que integren aparatos, máquinas, equipos, ductos, tuberías, etc. y demás instalaciones locativas necesarias para su funcionamiento se utilizarán los colores básicos recomendados por la American Standards Asociación (ASA) y otros colores específicos, para identificar elementos, materiales, etc., y demás elementos específicos que determinen o prevengan riesgos que puedan causar accidentes o enfermedades profesionales”¹⁸.

✓ **Clases de señales sugeridas para emplear en el laboratorio**

Se muestran a continuación las dimensiones típicas de las señales de seguridad en milímetros mm, los colores de las señales y su significado, seguidamente se definen las señales sugeridas para señalizar el laboratorio.

Color de la señal	Significado	Color de contraste
Rojo	Peligro, parada, prohibición e Información sobre incendios.	Blanco
Amarillo	Riesgo, advertencia, peligro no inmediato.	Negro
Verde	Seguridad o ausencia de peligro	Blanco
Azul	Obligación o Información	Blanco

Tabla 7. Dimensiones físicas de las señales de seguridad en mm.

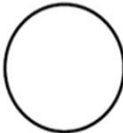
		
Ancho x largo	Lado	Diámetro
12,5 x 25	25	25
25 x 50	50	50
50 x 100	100	100
100 x 200	200	200
200 x 400	400	400
300 x 600	600	600
450 x 900	900	900

Tabla 8. Colores y significado de las señales de seguridad.

¹⁸ Resolución 2400 de 1979. Estatuto de Seguridad Industrial. Artículo 202.

Si la señal posee figura rectangular es informativa, triangular es de peligro y circular, es de prohibición u obligación. Las señales útiles para el laboratorio, son:

1. Prohibido encender fósforos o fumar



2. Prohibido usar agua como agente extintor



3. Uso obligatorio de protección para los ojos.



4. Uso obligatorio de protección para la cabeza.



5. Uso obligatorio de calzado de seguridad



6. Uso obligatorio de guantes de seguridad



7. Precaución, riesgo de incendio



8. Precaución, riesgo de choque eléctrico



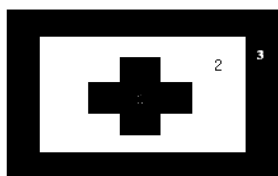
9. Ubicación del extintor



10. Ubicación de salida de emergencia



11. Ubicación de botiquín de primeros auxilios



Nota: 1. Negro o verde, 2. Blanco, 3. Verde

12. Nombre de la dependencia y número de oficina:



Otros elementos sugeridos

13. Protección del espacio de pruebas:

13. a Cinta de seguridad



13. b Iluminación de emergencia: Luz de alarma asociada a sirena.



13. c Balizamiento: Delimitación de una zona de trabajo para evitar el paso de cierto personal. Ejemplo las barandas o barreras del laboratorio o por cintas de delimitación y el siguiente símbolo:



13. d Tapete dieléctrico.



13. e Vallas de cerramiento y seguridad.



2.6.5. Distancias de Seguridad para la prevención de riesgos por arco eléctrico

Distancias Mínimas de Seguridad para la Prevención de Riesgos por Arco Eléctrico

Para prevenir lesiones al personal, es esencial respetar las distancias mínimas de aproximación a equipos dictadas según la tabla 20 y la figura 9 (adaptadas de la NFPA 70) del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE.

Nota: Para personal no calificado se dispone del límite de aproximación seguro. Para trabajos en tensión debe cumplirse el límite de aproximación técnica. Utilizar los elementos de protección personal (dotación de seguridad) acordes con el nivel del riesgo y el de entrenamiento para la realización de un trabajo que implique contacto directo.

Ya que la tensión fase-fase del sistema tomada en el laboratorio es de 13,2kV, es adecuado tomar los datos correspondientes a la tercera fila de la tabla (rango de 751V a 15kV). Entonces los límites de aproximación quedan definidos así:

- El límite de aproximación seguro a una parte móvil expuesta es de 3.0m.
- El límite de aproximación seguro a una parte fija expuesta es de 1.5m.
- El límite de aproximación restringida es de 0.66m.
- El límite de aproximación técnica es de 0.18m.

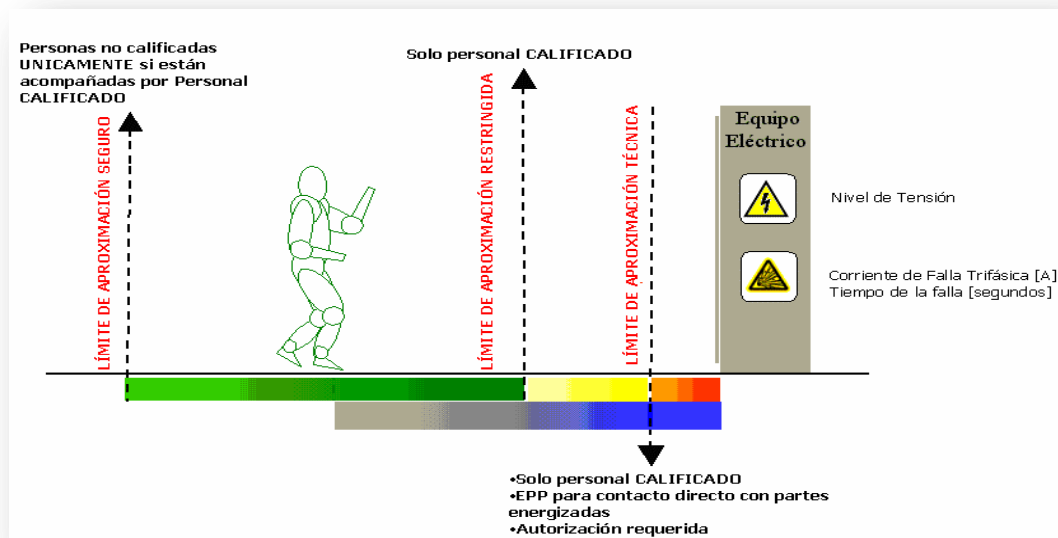


Figura 13. Límites de aproximación

2.6.6. *Requisitos Referentes a la Disposición Física de Estructuras y Elementos del Laboratorio*

Los requisitos siguientes relacionados a la disposición física de los elementos y estructuras que contiene el laboratorio actual de envejecimiento acelerado a barras del estator de máquinas rotativas obedecen a la necesidad de reducir los riesgos de accidentes laborales debido a la distribución de espacio o a la interacción del trabajador con los elementos del recinto.

La resolución 2400 de 1979¹⁹, llamado Estatuto Nacional de Seguridad Industrial relaciona algunas medidas que debemos tener en cuenta para realizar la distribución espacial del laboratorio. Basándonos en este estatuto, para el caso del laboratorio para pruebas ubicado en la Universidad del Valle se define debido cumplir las siguientes características:

Área de trabajo: Ya que el área por trabajador no debe ser menor de dos (2) metros cuadrados, con un volumen de aire suficiente de 11.5 metros cúbicos y se cuenta con dos (2) trabajadores, se reserva cuatro (4) metros cuadrados de espacio para el área de trabajo en el diseño del laboratorio.

Piso: El piso debe ser homogéneo y liso, de material resistente, antideslizante y preferiblemente de fácil limpieza.

Techo: La altura del techo debe ser mayor o igual a tres (3) metros para poder realizar trabajos. Los lugares por donde transiten los trabajadores debe tener al menos una altura de 1.80 metros entre piso y techo.

Puertas: La puerta de salida debe estar libre de obstáculos, ser amplia para facilitar el paso en casos de emergencia, debe abrir hacia el exterior. Tanto la puerta de salida como la de emergencia (que no existe en el laboratorio) deben poseer cerraduras interiores de fácil operación. No deben instalarse puertas giratorias, de corredera ni de enrollamiento vertical.

Distancia entre máquinas: La distancia entre máquinas, aparatos, equipos, etc., debe ser suficiente para que el trabajador pueda laborar sin dificultad y en ningún caso puede ser menor de 0.80 metros.

¹⁹ Resolución 2400 de 1979. Estatuto Nacional de Seguridad Industrial.

Iluminación: En cuanto a la iluminación de los puestos de trabajo, teniendo en cuenta los niveles mínimos de intensidad de iluminación y que para examinar las muestras en el laboratorio se hace diferenciación de detalles finos, con un grado regular de contraste y largos períodos de tiempo, se necesita una iluminación de 500 a 1.000 lux. Los cuartos sanitarios deben tener ventanas para aplicar ventilación forzada (seis (6) cambios de aire por hora) y deben tener iluminación de una intensidad uniforme de al menos de 300 luxes.

Extintores: Debe contarse con un extintor instalado a una altura no mayor a 1.5m (medido desde el suelo hasta la parte superior del extintor) y en el piso bajo él debe existir una franja cuadrada o semicircular para evitar que se invada su acceso. La cantidad de extintores no puede ser inferior a 1 por cada $200m^2$ y se disponen en las proximidades del lugar de peligro.

Se hace claridad que se hizo elección de las distancias mayores entre la tabla 20 (Límites de aproximación a partes energizadas de equipos) del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE y la Resolución 2400 de 1979 (Estatuto Nacional de Seguridad Industrial), para definir las distancias máximas de acercamiento a estructuras o equipos energizados. Le elección de las distancias se muestra en la figura 16.

Nota: La demarcación de las áreas de trabajo, almacenamientos y circulación se hace con líneas amarillas de 10 cm de ancho.

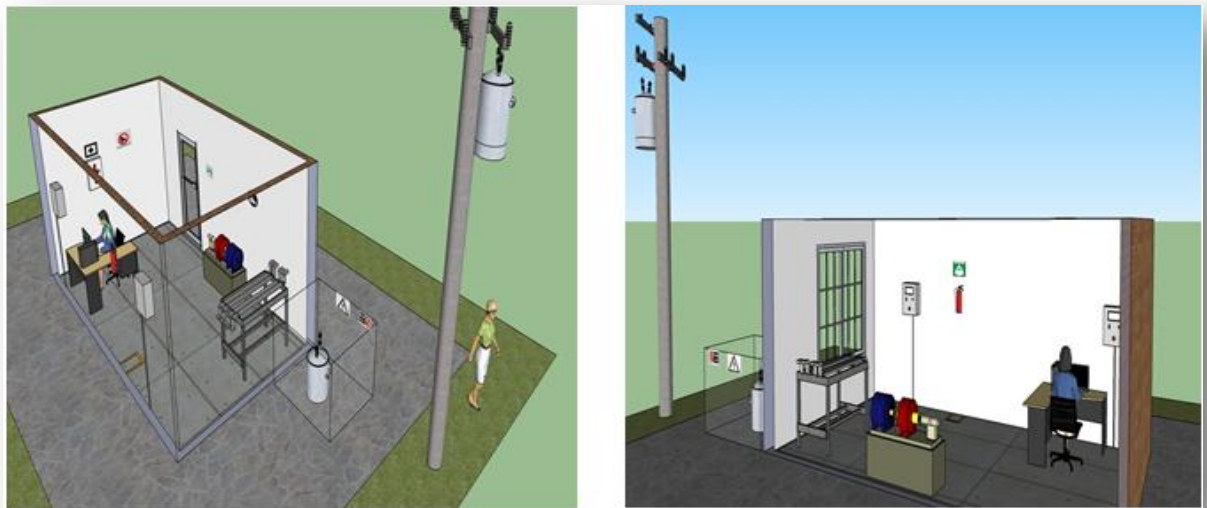


Figura 14. Disposición física del laboratorio y sus elementos.

En general no se determina una posibilidad única para la distribución espacial del laboratorio, sino que se definen las distancias máximas de acercamiento a elementos y estructuras en él, para que sea cual fuere el espacio con que se cuente al momento de distribuirlos, se respeten esas distancias.

Seguidamente se muestran las distancias máximas de acercamiento a los principales elementos de potencia presentes en el laboratorio.

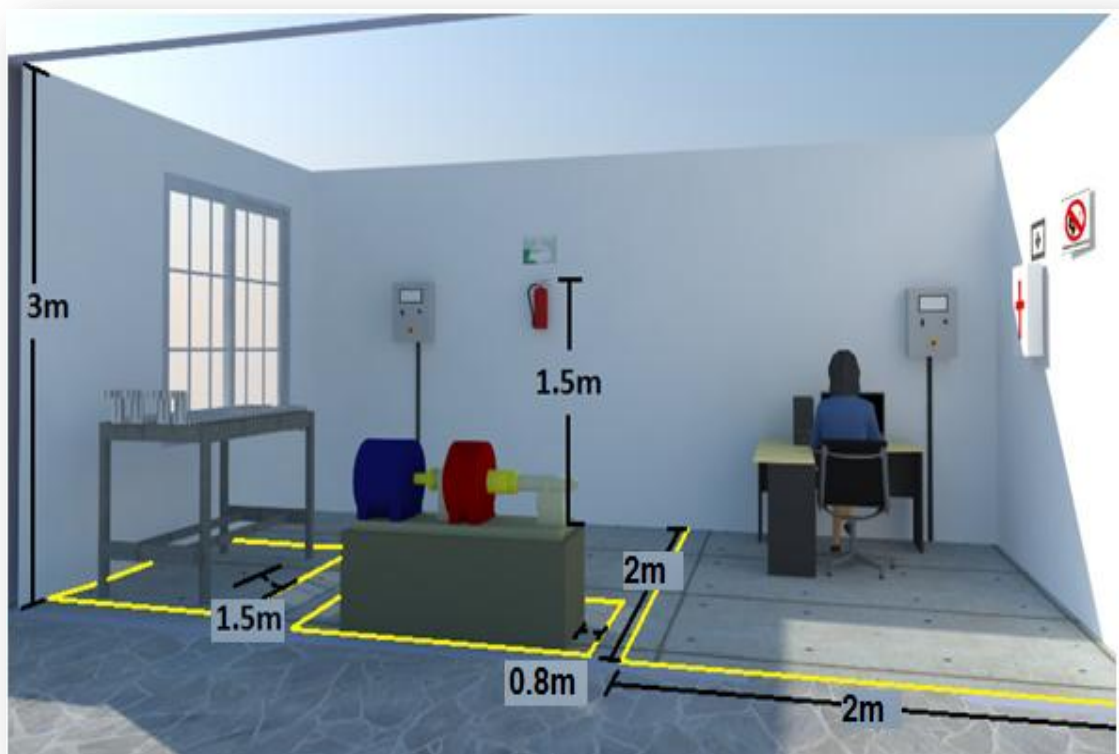


Figura 15. Distancias máximas de acercamiento a elementos y estructuras.



Figura 16. Ubicación del extintor de fuego y distancia máxima de acercamiento al transformador.

2.6.7. Extintor de Fuego

Téngase en cuenta que es posible apagar un incendio mediante un extintor portátil durante el primer minuto o conato, pasado dicho tiempo, el extintor no le servirá de nada.

La clasificación del fuego a extinguir depende del tipo de material implicado, así para los materiales presentes en el laboratorio, se requiere extintores de los tipos de fuego B y C.



Figura 17. Extintor clase BC

El extintor BC se utiliza para combatir fuegos de materiales inflamables tales como gasolina, pinturas, ceras, aceites, disolventes.

2.6.7.1 Modo de uso del extintor sugerido:

1. Lleve el extintor en forma vertical al sitio del conato
2. Saque el pasador de seguridad del extintor
3. Acérquese al fuego con el extintor, a una distancia no mayor de un metro.

4. Dirija el pitón del extintor de arriba hacia abajo, por encima de la llama y bárrala en abanico para sofocarla.
5. Oprima el gatillo de disparo.

Nota: El extintor debe ser señalizado mediante el símbolo designado con anterioridad y en el piso bajo él por medio de una franja en forma cuadrada o semicircular para evitar que se invada su acceso.

En general es necesario recargar un extintor posteriormente a un (1) uso o cuando el manómetro indique pérdida de presión. Se recomienda cargar el extintor por lo menos una vez al año.

2.6.8. Código de Colores para Conductores Aislados³

Para evitar confusiones futuras en la reparación o el mantenimiento de cableado eléctrico.

Sistema	Monofásico	Monofásico	Trifásico en Y	Trifásico en D	Trifásico en D	Trifásico en Y	Trifásico en D
Tensiones nominales	120V	240/120V	208/120V	240V	240/208/120V	480,460 ó 440V	480,460 ó 440V
Conductores activos	1fase 2hilos	2 fases 3 hilos	3 fases 4 hilos	3 fases 3 hilos	3 fases 4 hilos	3 fases 4 hilos	3 fases 3 hilos
Fases	Negro	Negro Rojo	Amarilo Azul Rojo	Negro Azul Rojo	Negro Naranja Azul	Negro Naranja Café	Negro Naranja Café
Neutro	Blanco	Blanco	Blanco	No aplica	Blanco	Gris	No aplica
Tierra de protección	Desnudo o Verde	Desnudo o Verde	Desnudo o Verde	Desnudo o Verde	Desnudo o Verde	Desnudo o Verde	Desnudo o Verde
Tierra aislada	Verde o verde amarillo	Verde o verde amarillo	Verde o verde amarillo	No aplica	Verde o verde amarillo	No aplica	No aplica

Tabla 9. Código de colores para conductores aislados – RETIE.

Referente al laboratorio de envejecimiento acelerado a barras/bobinas del estator de máquinas rotativas de la Universidad del Valle, dado lo consultado en este trabajo de grado, se hace algunas recomendaciones respecto a su estado actual.

2.7. RECOMENDACIONES GENERALES.

Al hacer seguimiento al Banco para Pruebas de Envejecimiento Acelerado a Barras del Estator implementado en el Laboratorio de Máquinas Rotativas a través de un proyecto a cargo del grupo de investigación CONVERGIA, y analizar las diferentes consideraciones para certificar cualquier tipo de prueba o ensayo en un laboratorio, hay que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Los esfuerzos térmicos y termoeléctricos a ser aplicados en el laboratorio han de

ejecutarse cumpliendo con lo estipulado en los estándares IEEE 1310 – 1996 (R2012) e IEEE 1043 - 2006 (R2009), respectivamente; para lo anterior, consultar los protocolos para pruebas propuestos por este trabajo de grado y remitirse a las normas citadas. Se hace las siguientes recomendaciones respecto a los procedimientos para aplicar los esfuerzos:

- ✓ Comprobar periódicamente que la ruta a tierra sea permanente y continua.
- ✓ Descargar eléctricamente el espécimen de prueba antes y después de una prueba.
- ✓ Tener en cuenta que al momento de aplicar los esfuerzos termoelectrónicos, la erosión o la decoloración de los especímenes es considerada normal por lo que no han de considerarse como fallas de aislamiento.
- ✓ Aunque actualmente el laboratorio cuenta con una máquina de alta corriente para el caso de la aplicación de esfuerzos térmicos, se recuerda que no es recomendado emplear en lugar de ella un horno de calentamiento, dado que éste no produce un gradiente suficiente de temperatura a través del aislamiento.
- ✓ Tener en cuenta que cualquier prueba de diagnóstico debe tener efecto de envejecimiento insignificante en relación a la prueba de ciclado térmico.
- ✓ El laboratorio debe contar con ventilación para evacuar contaminantes o sustancias como el ozono.
- ✓ Respecto a las siguientes características eléctricas y térmicas del banco para pruebas del laboratorio actual:
 1. 11kW para esfuerzos termoelectrónicos, a una tensión de hasta 13.2kV y una temperatura entre los 30°C y 155°C.
 2. Corriente de hasta 500A DC, con resistencia de carga en el rango de 25mΩ a 60mΩ, para el ciclado térmico.

Se recuerda que la aplicación de esfuerzos térmicos requiere de mantener una temperatura de prueba entre un límite inferior de 40°C y un superior según la clasificación del límite térmico del devanado, por lo que habrá que abstenerse de disponerla en valores menores o mayores aunque el montaje lo permita.

OTRAS RECOMENDACIONES

- ✓ Para hacer los reportes de la pruebas de envejecimiento acelerado a barras del

estator, la simbología a ser empleada en los formatos será la del SI (Sistema Internacional).

- ✓ Para hacerse planos del laboratorio, remitirse a la simbología mostrada en los estándares IEC 60617, ANSI Y 32, CSA Z99, IEEE 315.
- ✓ Para prevenir accidentes, se solicita que además de señalar el riesgo con iluminación de emergencia, se tenga en cuenta asociarle un complemento auditivo o sirena y se disponga de:
 1. Balizamiento en la entrada, que prohíba el paso.
 2. Punto de encuentro y la salida de emergencia.
 3. Dotación que debe portar el operador para el riesgo eléctrico.
 4. Botiquín de primeros auxilios.
 5. Extintor clase BC.
 6. Señalización de los límites de distancia con franjas visibles para el personal no calificado.



Figura 18. Algunas señales del laboratorio.

7. Una malla de puesta a tierra calculada según lo expuesto en este trabajo de grado.
8. Se recomienda cambiar el transformador sumergido en aceite con que cuenta el laboratorio actualmente, por uno tipo seco que no represente riesgo por estar en un lugar encerrado.
9. Ampliar y adecuar los espacios del laboratorio según lo establecido en este trabajo

de grado, actualmente el laboratorio cuenta con un espacio de 25,1m².

10. Dado que el transformador monofásico de distribución empleado en el laboratorio es sumergido en aceite, no es recomendable que se encuentre en un lugar encerrado, debe ser reemplazado por un transformador tipo seco.
11. El laboratorio posee paradas de emergencia dispuestas en partes alejadas del lugar central de la prueba, por lo que se recomienda que se sitúen más cerca del lugar donde generalmente se localiza el personal que la monitorea.
12. El laboratorio no se encuentra señalizado ópticamente a favor de la seguridad como se ha definido en el presente documento, se recomienda la implementación inmediata de lo expuesto.



Figura 19. Transformador sumergido en aceite ubicado en un espacio abierto.

En general, se recomienda que se adopte las medidas pertinentes respecto a la iluminación, nivel de ruido, señalización, delimitación sugeridos a lo largo del documento.

CAPITULO III.

DISPOSICIÓN Y CÁLCULO DE LA MALLA DE PUESTA A TIERRA.

Es muy importante entender el comportamiento de la electricidad, sus aplicaciones y sus sistemas de protección ya que todos de una u otra forma nos vemos involucrados con ella. Para implementar un banco para pruebas dieléctricas, es necesario primero contar con un sistema de protección para su sistema eléctrico, equipos, señales electrónicas, y principalmente para la protección del personal que se encuentre involucrado con él.

El propósito de este capítulo es presentar el cálculo de un sistema de puesta a tierra que cumpla con los requerimientos mínimos normalizados para la segura utilización del banco para pruebas de envejecimiento acelerado a barras del estator que se encuentra ubicado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas, que asegure la vida del personal, el sistema eléctrico y para que en una certificación futura de las pruebas de envejecimiento cuente con los requisitos mínimos para llevarla a cabo.

Por lo cual, en el desarrollo de este capítulo se presentarán cada uno de los requerimientos que hacen parte de la elaboración de la malla de puesta a tierra, su interpretación y su aplicación para el caso particular del banco para pruebas.

3.1. SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA.

3.1.1. Definición del sistema de puesta a tierra.

Las instalaciones y todos los sistemas eléctricos se encuentran sometidos a fallas de conexión, descargas, sobretensiones o fenómenos atmosféricos. El Reglamento Técnico Colombiano define la importancia de tener una puesta a tierra con el fin de limitar las tensiones que aparecen sobre un sistema eléctrico y se plantean parámetros para asegurar una buena puesta a tierra.

La importancia de una conexión de malla a tierra eficiente además de ayudar a conservar máquinas, elementos de medida, equipos y líneas, es preservar la vida de las personas. Por tal razón es necesario estudiar la instalación a tierra, conocer las características de la línea, la intensidad, la tensión a la que puesta ser usada y conocer la funcionalidad que tienen los electrodos.

3.1.2. Clasificación del sistema de puesta a tierra.

- ✓ Puesta a tierra para sistemas eléctricos: Su principal objetivo es limitar las sobretensiones producidas por fenómenos de inducción o de contacto producidas por descargas atmosféricas.
- ✓ Puesta a tierra para equipos eléctricos: Se diseña con el propósito de lograr que las protecciones de los equipos eléctricos operen ante sobre corrientes y reducir los potenciales de toque para proteger la vida del personal y los equipos que se encuentren en el lugar. La puesta a tierra se conecta a todas las partes metálicas que se puedan energizar, por medio de un conductor que se lleva a tierra física.
- ✓ Puesta a tierra para señales electrónicas: Su propósito es evitar la contaminación con señales de frecuencias diferentes a la deseada.
- ✓ Puesta a tierra para protección electrónica: Es útil para reducir la destrucción ocasionada por voltaje de los elementos semiconductores. Para ello, se ubican diferentes dispositivos de protección que van conectados a través de conductores activos a tierra.
- ✓ Puesta a tierra para protección atmosférica: Su propósito es conducir la energía producida por los rayos a una tierra segura. Se logra con una malla metálica igualadora de potencial conectada a tierra.
- ✓ Puesta a tierra para protección electrostática: Sirve para neutralizar las cargas electrostáticas producidas en los materiales dieléctricos. Se logra uniendo todas las partes metálicas y dieléctricas, utilizando el planeta tierra como referencia de voltaje cero.

La regla es: Cada sistema de tierra debe cerrar únicamente el circuito eléctrico que le corresponde²⁰.

3.1.3. Objetivos del sistema de puesta a tierra.

- ✓ Limitar sobretensiones en los sistemas eléctricos y sus componentes.
- ✓ Proteger la vida de las personas de diferencias de potencial, potenciales de contacto y de paso.
- ✓ Asegurar que las instalaciones, armazones de los equipos y carcasas tengan un punto de descarga y siempre estén a potencial de tierra, incluso en caso de fallas del aislamiento.
- ✓ Conducir a tierra en forma eficiente las corrientes de descargas atmosféricas, limitando las diferencias de potencial.

²⁰ ROJAS, Gregor. Manual de Sistemas de Puesta a tierra.

3.1.4. *Funciones del sistema de puesta a tierra.*

- Garantizar la seguridad de los seres vivos.
- Conducir a tierra las corrientes de falla como los rayos.
- Contribuir a que los equipos de protección despejen rápidamente las fallas.
- Servir de referencia común al sistema eléctrico.
- Realizar una conexión de baja resistencia con la tierra y con puntos de referencia de los equipos.

3.2. **RESISTIVIDAD DEL TERRERO.**

3.2.1. *Definición.*

Variable básica que afecta la resistencia a tierra de un sistema de electrodos. Es un parámetro característico de los medios conductores, su unidad de medida es el $\Omega\cdot m$ y se considera el parámetro sobre el cual se fundamenta el diseño de un sistema de puesta a tierra.

La resistividad del terreno varía a lo largo de cualquier terreno, ya que es difícil que éste sea homogéneo en todas sus dimensiones, no solo por su naturaleza, sino porque está sometido a diferentes efectos climáticos, variaciones de material, profundidad, temperatura, compactación y diversidad de factores que impiden una resistividad constante.

3.2.2. *Medición de la resistividad del suelo.*

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras de una subestación o sistema eléctrico.

Para un diseño de puesta a tierra, es recomendable encontrar el área o terreno con menor valor de resistividad para mejorar las condiciones de la malla a un menor costo.

La resistividad del suelo depende de:

- Tipo de suelo
- El porcentaje de humedad
- Su composición química
- La compactación del material

- La temperatura
- Estratificación del suelo

De acuerdo a la norma IEEE Std 81-1983 se emplean diferentes métodos para el cálculo de la resistividad de terreno, considerándolo como un terreno homogéneo, donde se destaca:

- Método de Wenner: Este método plantea una disposición en línea recta para los electrodos a una distancia igual y exacta entre ellos, se calcula el valor de la resistencia de tierra con un medidor de corriente y tensión para un punto común y dependiendo de la profundidad a la cual se entierran los electrodos, se calcula de la siguiente forma:

$$\rho_r = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}}}$$

a: Distancia horizontal entre los electrodos.

R: resistencia de puesta a tierra medida.

b: profundidad de enterramiento de los electrodos.

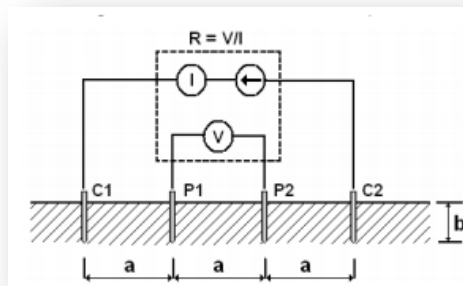


Figura 20. Medición de la resistividad del terreno por el método de Wenner

- Método convencional: Similar al método Wenner, por lo general se llevan a cabo con un telurómetro de cuatro electrodos conectados al suelo, dos de estos electrodos harán circular la corriente la cual debe medirse y los restantes medirán la diferencia de potencial en un punto. Se tiene en cuenta las siguientes ecuaciones:

$$V_p = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

De donde se despeja el valor de resistividad así:

$$\rho = \frac{2\pi r V_p}{I}$$

r : distancia (m)

ρ : resistividad del terreno (ohm – m)

I : corriente (A)

V_p : Diferencia de potencial.

Se realizan varias mediciones a diferentes distancias con el fin de obtener una aproximación ubicando el electrodo de retorno de corriente a la distancia más lejana con respecto al electrodo que inyecta la corriente. Para el cálculo de la resistividad se hace un estudio estadístico de valores calculados a diferentes distancias.

- Método de los tres electrodos: Se basa principalmente en realizar una medición de la resistencia de tierra de un electrodo enterrado verticalmente y de dimensiones conocidas, con la siguiente ecuación.

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} * \left(\ln \frac{8l}{a} - 1 \right)$$

Con el valor de la resistencia de tierra, ya se puede realizar el cálculo de la resistividad del terreno así:

$$\rho = \frac{2\pi l R}{\ln \frac{8l}{a} - 1}$$

l : longitud

a : radio

3.2.3. Resistividad del terreno y resistividad superficial para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas.

- Resistividad del terreno: Considerando algunos valores estándares se tiene en cuenta la siguiente tabla:

MATERIAL	RESISTIVIDAD (ohm-metro)
Suelos vegetales húmedos	10-50
Arcillas, gredas, linos	20-60
Arenas arcillosas	80-200
Fangos, turbas	150-300
Arenas	250-500
Suelos pedregosos	300-400
Rocas	1000-10000

Tabla 10. Datos típicos de Resistividad de terreno.

Como el análisis del cálculo de un sistema de puesta a tierra se realiza en un espacio ya construido, con un piso superficial de concreto, es difícil realizar el cálculo de la resistividad del terreno, y considerando que el Laboratorio de Máquinas Eléctricas se encuentra sobre un terreno vegetal, donde antiguamente existían humedales, se toma el valor de una resistividad de terreno estándar e ideal de acuerdo al tipo de suelo. Para este caso entonces, la resistividad del terreno sería $\rho_t = 50\Omega - m$, valor que será utilizado en el desarrollo del capítulo para el cálculo de la malla de puesta a tierra.

- Resistividad superficial del terreno: La selección de resistividad superficial del terrero se selecciona de acuerdo con la siguiente tabla:

Material de terrero	Resistividad superficial de terrero (ohm-m)
Suelo pedregoso mínimo	1000
Grava húmeda máximo	1200
Suelo pedregoso máximo	3000
Roca mínimo	3000
Piso en concreto mínimo	3000
Roca máximo	10000
Piso de concreto	10000
Arenisca mínimo	10000
Piso cubierto con vinilo	20000

Tabla 11. Datos típicos de Resistividad superficial de terreno.

Para el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas la resistividad superficial del terreno sería $\rho_s = 10000\Omega - m$. Ya que el laboratorio cuenta en su construcción con un piso de concreto (baldosa).

3.3. ELECTRODOS DE PUESTA A TIERRA.

El electrodo es un elemento metálico que ayuda a conducir la corriente de falla y a reducir diferencias de potencial. Además de tener buena conductividad eléctrica, debe tener buenas propiedades químicas ya que al estar enterrado sobre tierra está sometido a niveles variables de humedad y diferentes propiedades del terrero. Los electrodos de puesta a tierra para sistemas eléctricos deben estar accesibles y preferiblemente en la misma zona del puente de unión principal del sistema.

Como el electrodo afecta el valor de resistencia de tierra debe cumplir con ciertas condiciones. Según el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE- Art.15. la longitud mínima del electrodo que esté en contacto con la tierra es de 2,4m, distancia que se aplicará para el diseño de la malla a tierra para el banco para pruebas de

envejecimiento. Para un terreno poco rocoso, cuando la roca está a menos de 2,0 m, estos electrodos pueden enterrarse diagonalmente hasta con un ángulo de 45 grados de la vertical.

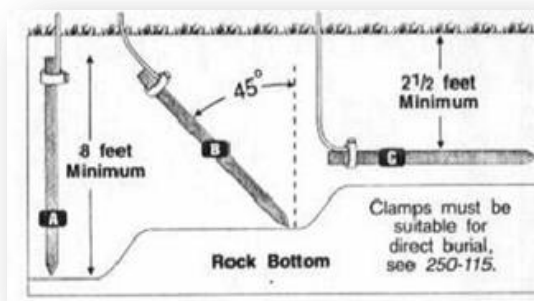


Figura 21. Instalación de Electrodos Tipo Varilla. NEC. Section 250-83(c)

De acuerdo a los criterios que se contemplan en la norma ANSI/IEEE Std. 142-1982²¹, las fórmulas aproximadas de resistencias de electrodos de tierra de acuerdo a su geometría son:

²¹ IEEE Std 142-1982 IEEE Recommended practice for grounding of industrial and commercial power system.

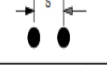
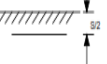
DESCRIPCIÓN	CONFIGURACIÓN	RESISTENCIA (Ω)
Hemisferio enterrado de radio a		$R = \frac{\Gamma}{2 \pi a}$
Una varilla de radio a y longitud L		$R = \frac{\Gamma}{2 \pi L} \times \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
Dos varillas $S > L$		$R = \frac{\Gamma}{4 \pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\Gamma}{2 \pi S} + \left(1 - \frac{L^2}{3S^2} + \frac{2L^2}{5S^2} + \dots \right)$
Dos varillas $S < L$		$R = \frac{\Gamma}{4 \pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \right)$
Conductor horizontal enterrado $S/2$ de longitud 2L		$R = \frac{\Gamma}{4 \pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \right)$
Anillo con diámetro D, hecho de alambre de radio a, enterrado $S/2$		$R = \frac{\Gamma}{4 \pi L} \left(\ln \frac{4D}{a} + \ln \frac{4D}{S} \right)$
Placa enterrada a $S/2$ y de radio a		$R = \frac{\Gamma}{8 a} + \frac{\Gamma}{4 \pi S} \left(1 + \frac{7}{12} \frac{a^2}{S^2} + \frac{33}{40} \frac{a^4}{S^4} + \dots \right)$
Placa rectangular de dimensiones a x b		$R = \frac{\Gamma}{\pi} \left(\frac{1}{a} + \ln \frac{a^2 + (a^2 + b^2)^{1/2}}{b} + \frac{1}{b} + \ln \frac{b^2 + (a^2 + b^2)^{1/2}}{a} \right) + \frac{a}{3b^2} + \frac{b}{3a^2} + \frac{(a^2 + b^2)(a^2 + b^2)^{1/2}}{3a^2 + b^2}$ aproximadamente

Figura 22. Resistencia de puesta a tierra de acuerdo a su geometría.

Para la malla a tierra del laboratorio donde se encuentra ubicado el banco para pruebas es útil usar electrodos tipo varilla, donde su valor de resistencia de acuerdo a la figura 16, se calculará de la siguiente forma:

$$R = \frac{\rho_t}{2\pi L} * \left(\ln \left(4 * \frac{L_v}{a} \right) - 1 \right)$$

ρ_t : Resistividad del terreno en $\Omega - m$

L_v : Largo de la varilla (m)

a : Radio de la varilla (m)

3.3.1. Varillas.

De acuerdo al Código Eléctrico Colombiano en la sección 250-83c²², los electrodos de varilla y tubo, no deben tener menos de 2,40 m de longitud y adicionalmente deben instalarse de tal modo que por lo menos 2,40 m de su longitud esté en contacto con la tierra. Las varillas de metales no ferrosos deben estar aprobadas y tener un diámetro no inferior a 13 mm y las demás de por lo menos 16 mm.

²² CÓDIGO ELÉCTRICO COLOMBIANO. (1998-11-25). NTC2050

Se define que un solo electrodo no sería suficiente para obtener un valor de resistencia menor a 25 Ohm, por lo que para las dimensiones del banco para pruebas, es necesario electrodos adicionales, los cuales deben estar a una distancia mínima de 3m entre sí y dentro de lo posible en línea recta, en caso de que no sea posible lograr una configuración en línea recta para los electrodos tipo varilla, se puede utilizar una configuración en cuadrado, rectángulo o triángulo, de tal forma que siempre se forme un anillo cerrado con el cable de conexión.

La varilla se fijará con ayuda de un conector el cual debe ser de cobre o aleación de cobre con un contenido mínimo de 80% de cobre y debe proveer una conexión eléctrica y mecánica entre la varilla de puesta a tierra y el conductor. La unión de este cable con el de bajada a la toma de tierra se hará a través de un conector o de soldadura exotérmica preferiblemente, conectando ambos conductores

3.4. CONECTORES.

Con el propósito de evitar que el sistema eléctrico se encuentre inseguro en algún punto de la malla a tierra, se utilizan conectadores por soldadura exotérmica a presión. Hay que tener en cuenta que los materiales que componen las abrazaderas sean compatibles con los electrodos y que cumplan ya sea la norma IEEE Std80, NTC 2050 o el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE.

3.5. CONDUCTORES.

El conductor es el que permite la unión entre los electrodos enterrados a tierra. Es muy importante su calibre, ya que existen una serie de consideraciones normalizadas para su uso:

- El aislamiento de los conductores de los cableados de puesta a tierra debe ser de color verde, verde con rayas amarillas, o identificado con marcas verdes en los puntos de inspección y en los extremos.
- En el caso de que el sistema de puesta a tierra cuente con un solo electrodo tipo varilla, el conductor no debe exceder el calibre AWG 6 en cobre. Los conductores número 6 AWG, pueden tenderse sin daños mecánicos.
- Para todas las secciones inferiores al número 6 AWG, los conductores deben ir protegidos por conductos.

3.5.1. Selección de los conductores y uniones.

Las consideraciones principales para la selección de un buen conductor son:

- Material con buena conductividad.
- Componentes anticorrosivos.
- Capacidad de resistir la duración de las corrientes de falla.
- Ser mecánicamente resistentes.

Para el tamaño del calibre del conductor para baja tensión, según el RETIE hay que tener en cuenta su material, por lo cual, el calibre no debe ser menor al planteado en la siguiente tabla a excepción del conductor que se conecta a varillas electrodos, donde no es necesario que el calibre sea mayor a AWG 6 en cobre o AWG 6 en aluminio.

Tamaño nominal del mayor conductor de entrada a la acometida o sección equivalente de conductores en paralelo mm ² (AWG o kcmil)		Tamaño nominal de conductor al electrodo de tierra mm ² (AWG o kcmil)	
Cobre	Aluminio	Cobre	Aluminio
33,62 (2) o menor	53,48 (1/0) o menor	8,367 (8)	13,3 (6)
42,41 o 53,48 (1 o 1/0)	67,43 o 85,01 (2/0 o 3/0)	13,3 (6)	21,15 (4)
67,43 o 85,01 (2/0 o 3/0)	4/0 o 250 kcmil	21,15 (4)	33,62 (2)
Más de 85,01 a 177,3 (3/0 a 350)	Más de 126,7 a 253,4 (250 a 500)	33,62 (2)	53,48 (1/0)
Más de 177,3 a 304,0 (350 a 600)	Más de 253,4 a 456,04 (500 a 900)	53,48 (1/0)	85,01 (3/0)
Más de 304 a 557,38 (600 a 1100)	Más de 456,04 a 886,74 (900 a 1750)	67,43 (2/0)	107,2 (4/0)
Más de 557,38 (1100)	Más de 886,74 (1750)	85,01 (3/0)	126,7 (250)

Tabla 12. Conductor del electrodo de puesta a tierra. NTC 2050- Tabla 250-94

De acuerdo a la norma IEEE Std.80-1983²³, el espaciamiento de la cuadrícula debe ser mínimo de 3m.

Aplicado al banco para pruebas, donde se propone una malla a tierra rectangular, el cual cuenta con unas dimensiones de 6,84m x 3,55m. Se plantean conductores en paralelo para proporcionar una menor resistencia que comparada con la de un electrodo simple, se reduce a la mitad. Es decir, se formarán cuadrículas de 9m², por lo cual se necesitan unas nuevas dimensiones de 9mx6m con el propósito de que cumpla las especificaciones de la norma.

²³ IEEE Std 80-1983. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding

La norma IEEE Std 80-1983, también plantea parámetros para elegir el calibre del conductor dependiendo de la corriente máxima de falla a tierra, según la siguiente tabla:

Corriente máxima de falla a Tierra (A)	Calibre AWG o KCMIL	mm ²
Hasta 4000	1/0	53,49
De 4001 a 5000	2/0	67,43
De 5001 a 7000	3/0	85,01
De 7001 a 8500	4/0	107,2
De 8501 a 10000	250	126,67
De 10000 en adelante	500	253,35

Tabla 13. Calibre de acuerdo a la corriente máxima de falla.

3.6. MALLA DE PUESTA A TIERRA.

Cuando el sistema eléctrico está expuesto a corrientes y tensiones elevadas, la mayoría de las normas relacionadas con instalaciones eléctricas plantean el uso de la malla a tierra para evitar el riesgo de las personas que transiten o se encuentren en el lugar y puedan afectarse por diferentes tensiones de paso y contacto que superen su nivel de soportabilidad frente a una falla.

De acuerdo a lo anterior es necesario considerar los valores de tensión máxima de contacto que un ser humano puede soportar.

Tiempo de despeje de la falla	Máxima tensión de contacto admisible IEC (95% de la población)	Máxima tensión de contacto IEEE 50kg (ocupacional)
Mayor a 2 segundos	50 voltios	82 voltios
1 segundo	55 voltios	116 voltios
700 milisegundos	70 voltios	138 voltios
500 milisegundos	80 voltios	164 voltios
400 milisegundos	130 voltios	183 voltios
300 milisegundos	200 voltios	211 voltios
200 milisegundos	270 voltios	259 voltios
150 milisegundos	300 voltios	299 voltios
100 milisegundos	320 voltios	366 voltios
50 milisegundos	345 voltios	518 voltios

Tabla 14. Máxima tensiones de contacto admisibles según normas.

Además, el cable debe tener buena conductividad y ser resistente a la corrosión como acero, acero inoxidable, acero galvanizado o cobre, que recorra el perímetro de la malla y que cubra todo el sistema eléctrico a proteger. Las puntas del perímetro deben unirse preferiblemente con soldadura.

Para el banco para pruebas implementado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas, la adecuación de la red se realiza en forma cuadrangular por que la configuración del espacio se adecúa más a esta configuración. La profundidad de enterramiento para los conductores que definen la malla no tiene un valor fijo normalizado, se recomienda una profundidad de enterramiento entre 60cm y 130cm, por lo cual, para la malla del laboratorio que se desea plantear, se toma un valor fijo a una profundidad de $h = 0,7m$. Para el caso de los electrodos de acuerdo al numeral 3.1. “Electrodos”, estarán enterrados en línea recta a una profundidad de 2,4m.

Como opción, se puede usar una barra equipotencial de cobre que es donde terminarían todas las conexiones a tierra provenientes de los equipos y elementos que se necesiten aterrizar. La barra debe estar en un lugar equidistante a todos los elementos a conectar, se debe conectar a un punto de la tierra con un conductor # 2 AWG o mayor de cobre que posea una chaqueta de color verde, además de ir por una tubería PVC, con pintura de revestimiento color verde.

3.7. CÁLCULO Y DISEÑO DE MALLA A TIERRA.

Para diseñar un sistema de puesta a tierra útil en el laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas, específicamente para el banco para pruebas, se tiene en cuenta el Reglamento Técnico para instalaciones eléctricas RETIE y la NTC-2050 en su revisión más reciente donde plantea que toda instalación eléctrica cubierta en dicho reglamento debe disponer de un sistema de puesta a tierra.

3.7.1. *Requisitos de diseño.*

- Seguir los lineamientos básicos del RETIE.
- Usar materiales anticorrosión galvánica.
- Los elementos conductores de las corrientes durante el tiempo de duración de falla no deben producir sobrecalentamiento.
- Usar materiales aptos para soportar esfuerzos mecánicos.
- Los conductores de conexión deben protegerse de la temperatura que puedan adquirir.
- Evitar arcos eléctricos entre partes metálicas y el terreno.

3.7.2. *Tensiones de paso y de contacto permisibles.*

- TENSION DE PASO: Es la diferencia de potencial entre dos puntos de un terreno que pueden ser tocados simultáneamente por una persona, es decir la máxima

tensión que soporta una persona cuando se encuentre circulando sobre el área de la malla a tierra²⁴.

La resistencia de paso está dada por:

$$R_p = 1000 + 6\rho_s$$

R_p : Resistencia de paso (Ω)

ρ_s : Resistividad superficial del terrero ($\Omega - m$).

$$R_p = 1000 + 6 * 10000\Omega - m$$

$$R_p = 61000\Omega$$

Ahora, la tensión de paso se calcula así:

$$E_p = \frac{116 + 0,696\rho_s}{\sqrt{t}}$$

E_p : Tensión de paso permisible (V)

ρ_s : Resistividad de terreno ($\Omega - m$)

t : Duración máxima de falla (sg).

El tiempo de despeje de la falla debe ser de 500milisegundos, en caso de ser menor es necesario realizar una verificación de las características de placa de los interruptores.

$$E_p = \frac{116 + 0,696 * 10000\Omega - m}{\sqrt{0,5s}}$$

$$E_p = 10006,9752 V$$

También se calcula un valor de tensión de paso real en caso de una falla:

$$E_p = k_s * k_i * \frac{\rho_t * I}{L}$$

k_s : Coeficiente que tiene en cuenta la influencia combinada de la profundidad y del espaciamiento de la malla.

k_i : Coeficiente de irregularidad del terreno.

ρ_t : Resistividad del suelo ($\Omega - m$)

I : Corriente máxima de falla (A)

L : longitud total del conductor (m)

²⁴ M. VILLAR. RUBIA. Seguridad Eléctrica: Efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano.

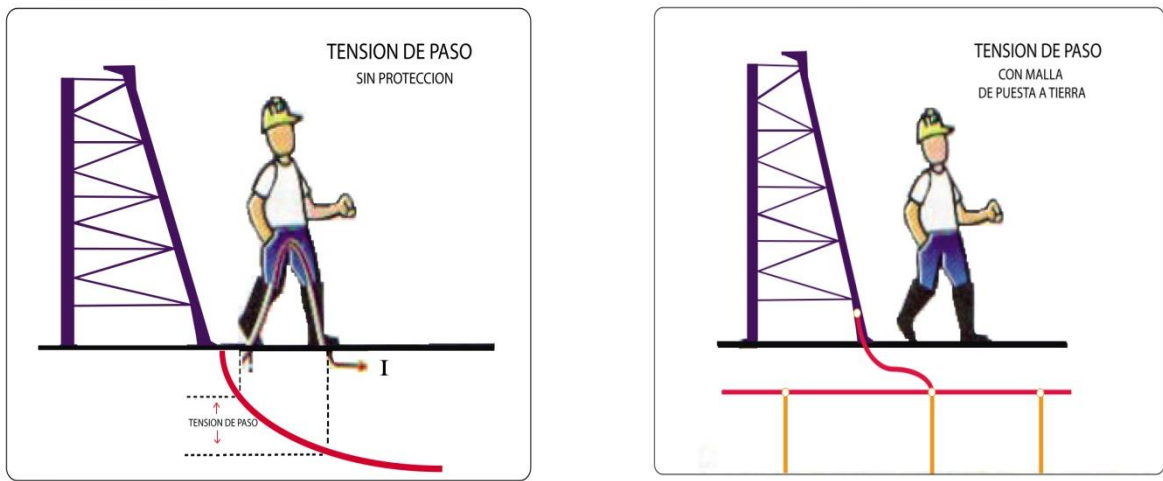


Figura 23. Tensión de paso.

- **TENSION DE CONTACTO:** Es la diferencia de potencial entre un punto en la superficie del terreno y cualquier otro punto en contacto con una persona al mismo tiempo. Es decir, la tensión máxima que una persona soporta cuando al momento de una falla se encuentre tocando algún elemento conectado a tierra.

La resistencia de contacto está dada por:

$$R_c = 1000 + 1,5\rho_s$$

R_c : Resistencia de contacto(Ω)

ρ_s : Resistividad superficial del terrero ($\Omega - m$)

$$R_c = 1000 + 1,5 * 10000\Omega - m$$

$$R_c = 16000 \Omega$$

$$E_c = \frac{116 + 0,174\rho_s}{\sqrt{t}}$$

E_c : Tensión de contacto permisible (V)

ρ_s : Resistividad superficial terreno ($\Omega - m$)

t : Duración máxima de falla (sg)

$$E_c = \frac{116 + 0,174 * 10000\Omega - m}{\sqrt{0,5s}}$$

$$E_c = 2624,7804V$$

También se calcula un valor de tensión de contacto real en caso de una falla:

$$E_t = k_m * k_i * \frac{\rho_t * I}{L}$$

k_m : Coeficiente que tiene en cuenta las características geométricas de la malla

k_i : Coeficiente de irregularidad del terreno.

ρ_t : Resistividad del suelo ($\Omega - m$)

I : Corriente máxima de falla (A)

L : longitud total del conductor (m)

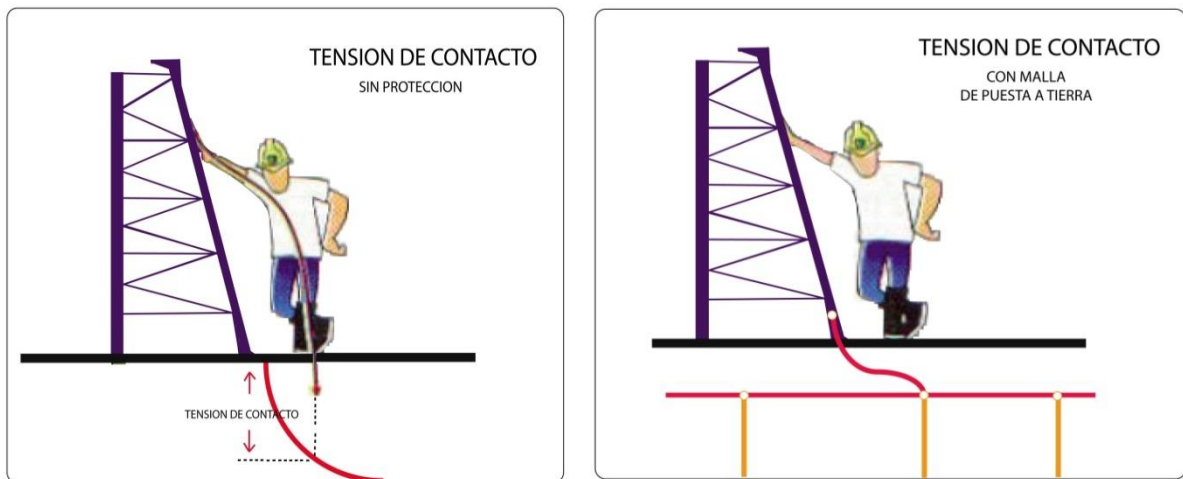


Figura 24. Tensión de contacto.

Las medidas de seguridad útiles para evitar las tensiones producidas por la circulación de corriente de puesta a tierra, deben fundamentarse principalmente en “aislar o igualar potenciales”.

3.7.3. Corriente asimétrica efectiva de falla.

El banco para pruebas cuenta con un transformador Siemens de 110/220V a 13.2kV, con una potencia de 15kVA y con una red de alimentación de 220V. Se considera que el transformador dentro del banco es alimentado por el lado de baja tensión desde una fuente de alimentación externa.

El valor de la corriente de cortocircuito se obtuvo mediante una consulta realizada a EMCALI, ya que el laboratorio de Máquinas Eléctricas es alimentado por un transformador Rymel de 150kVA ubicado en un poste con número de nodo 635-36-06. Los datos obtenidos por el operador de EMCALI fueron los siguientes:

- Alimentación: Subestación Meléndez.
- Distancia Aproximada a la subestación: 2350m.
- Nivel de cortocircuito en demanda media: 3981A.
- Tipo de Acometida: En No. 2 ACSR.
- Red Primaria: En No. 4 ACSR.

La corriente de cortocircuito entonces es: $I_{cc} = 3981 A$

$$S_{cc} = \sqrt{3} * V_f * I_{cc}$$

S_{cc} = Potencia de cortocircuito (MVA)

V_f = Tensión de fase (V)

I_{cc} = Corriente de cortocircuito(A)

$$S_{cc} = \sqrt{3} * 13200V * 3981A$$

$$S_{cc} = 91,018MVA$$

Debe tenerse en cuenta los siguientes valores:

- Potencia base: $S_{base} = 15kVA$
- Tensión base: $V_{base} = 220 V$

Entonces el cálculo de la corriente base I_{base} es,

$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} * V_{base}} = \frac{15kVA}{\sqrt{3} * 220} = 39,3648 A$$

Ahora se realiza el cálculo de la impedancia del transformador Z_t referida a la potencia de cortocircuito:

$$Z_t = \frac{S_{base}}{S_{cc}} = \frac{15kVA}{91,018MVA} = 0,0001648 pu$$

Para referir la impedancia de la red Z_{red} , al sistema base, se la considera como un 3%. Por lo cual, la impedancia vista después del transformador principal del campo Z_T es:

$$Z_T = Z_t + Z_{red}$$

$$Z_T = 0,0001648pu + 0,03pu = 0,030165p.u.$$

Para la corriente de falla del transformador I_{ct} hay que tener en cuenta la corriente de cortocircuito que corresponde al aporte al momento de una falla. Se calcula con el 70% de la capacidad del transformador así:

$$I_{ct} = \frac{0,7 * S_{base}}{\sqrt{3} * V_f} = \frac{0,7 * 15kVA}{\sqrt{3} * 220V} = 27,5553 A$$

La corriente de falla del secundario del transformador I_{sf} , se calcula con ayuda del resultado anterior:

$$I_{sf} = \frac{I_{base}}{Z_T} + 4I_{ct} = \frac{39,3648A}{0,030165} + 4 * 27,5553A$$

$$I_{sf} = 1415,2038A$$

La corriente asimétrica de falla I_{af} en el secundario corresponde a un 125% del valor calculado:

$$I_{af} = 125\% * I_{sf}$$

$$I_{af} = 1,25 * 1415,2038 = 1769,0048A$$

3.7.4. Selección del tamaño del conductor.

Se sabe que por el conductor debe circular una corriente de falla durante un tiempo determinado sin ocasionar daños y destrucción en él, además debe tener buena conductividad. El área mínima del conductor está dada por la siguiente expresión (IEEE Std80-1876):

$$A_c = I_{af} * \sqrt{\frac{33 * t}{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}}$$

A_c : Sección transversal del conductor (c – mil)

I_{af} : Corriente asimétrica efectiva de falla (A)

t : Duración de la corriente en circulación (igual al tiempo de ajuste de los relés de respaldo, es decir 0,5s)

T_m : Máxima temperatura permisible en las uniones de la malla. (450°C)

T_a : Temperatura promedio del suelo (26°C)

$$A_c = 1769,0048A * \sqrt{\frac{33 * 0,5}{\log\left(\frac{450 - 26}{234 + 26} + 1\right)}} = 11086,7322c - mil$$

Para obtener una mejor resistencia mecánica debe usarse un calibre mínimo de 1/0 AWG (105,295c-mil), pero este calibre no es valor comercial, por lo cual, para la construcción de una malla donde se implemente un laboratorio para pruebas se recomienda hacer uso de

un calibre AWG 2/0 con área nominal de 67,44mm² y con un diámetro nominal de 0,0093m.

3.7.5. Cálculo de la longitud mínima del conductor enterrado.

Recordando las dimensiones reales y las propuestas, para que la malla a tierra cumpla con la normativa, se formarán cuadrículas de 3m², y dimensiones totales de 9mx6m. Entonces, el cálculo de la longitud del conductor es el siguiente:

$$L = n * A + m * B$$

$$L = 4 * 9 + 3 * 6 = 54m$$

A: Longitud de la malla (m)

B: Ancho de la malla (m)

L: Longitud total del conductor (m)

n: Número de conductores en paralelo de la longitud A

m: Número de conductores en paralelo de la longitud B

D: Espaciamiento entre conductores (m)

h: Profundidad de enterramiento(m)

d: Diámetro del conductor(m)

Además, la determinación de los coeficientes adicionales sería:

$$k_s: \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{d+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right)$$

$$k_s: \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{d+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{1}{\pi} \ln \left[\left(\frac{3}{4} \right) * \left(\frac{5}{6} \right) * \left(\frac{7}{8} \right) \dots \right]$$

Planteamiento de la longitud mínima del conductor:

$$L_{min} = \frac{K_m * K_i * \rho_t * I_{cc} * \sqrt{t}}{165 + 0,25\rho_p}$$

t: Duración de la corriente de choque (igual al tiempo de ajuste de los relés de protección primaria, es decir 0,2s)

ρ_t : Resistividad del suelo(Ω/m)

ρ_p : Resistividad superficial del suelo (Ω/m)

K_m : Coeficiente de malla o factor de geometría

K_i : Factor de irregularidad por geometría

$$K_m = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{D^2}{16 \cdot h \cdot d} + \frac{1}{\pi} \ln \left[\left(\frac{3}{4} \right) * \left(\frac{5}{6} \right) * \left(\frac{7}{8} \right) \dots \right]$$

$$N = \frac{\text{Largo de la malla}}{D} + 1$$

El espaciamiento entre conductores, como se ya determinó es $D = 3m$

$$N = \frac{9}{3} + 1 = 4$$

Entonces el número de factores en el paréntesis debe ser $N-2=2$, el diámetro para un calibre AWG 2/0 es $d = 0,0093m$ y la profundidad de enterramiento sugerida es $h = 0,7m$ entonces, el cálculo de los factores son:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} * \ln \frac{3^2 m}{16 * 0,7m * 0,0093m} + \frac{1}{\pi} \ln \left[\left(\frac{3}{4} + \frac{5}{6} \right) \right] = 0,8559$$

$$k_s: \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{1}{2 * 0,7m} + \frac{1}{0,0093m + 0,7m} + \frac{1}{2 * 0,0093m} + \frac{1}{3 * 0,0093m} \right) = 0,7192$$

K_i Varía de 1,2 a 2, dependiendo de las siguientes relaciones:

$$\begin{array}{ll} K_i = 0,65 + 0,172 * N & \text{para } N \leq 7 \\ K_i = 2 & \text{para } N > 8 \end{array}$$

Como $N=4$, entonces $K_i = 0,65 + 0,172 * 4 = 1,3380$

Aplicando la fórmula para la longitud mínima L_{min} se logra el siguiente resultado:

$$L_{min} = \frac{0,8559 * 1,3380 * 50\Omega - m * 1769,0048A * \sqrt{0,2s}}{165 + 0,25 * 10000\Omega - m} = 16,9979m$$

Este valor de L_{min} , es menor que la longitud de cobre necesaria para construir la malla propuesta.

Se ratifica que para la selección del conductor, debe elegirse un calibre que combine capacidad de corriente y resistencia mecánica (2/0 AWG cobre).

3.7.6. Cálculo de la longitud real de conductor enterrado.

La forma más conveniente para asegurar que las tensiones de toque y paso estén por debajo de los límites de soportabilidad y seguridad, es calculando una nueva longitud del conductor donde se incluyan la longitud de contrapesos y conductor adicional que se usa para unir los equipos a la malla, llamado “cola”.

$$L_T = L_{cable} + L_{varilla}$$

No hay un criterio definido para escoger las varillas por lo cual se determinan de acuerdo a las dimensiones de la malla y la proximidad de los elementos a aterrizar. Para la malla en diseño se ubica 1 colas en una esquina, de tal forma que cumpla con la normativa. La longitud de las colas L_c es:

$$L_c = 6m$$

La longitud del conductor tendido es:

$$L = 4 * 9 + 3 * 6 = 54m$$

La longitud total de conductor es:

- Electrodo (12 varillas):	2,4m
- Alambre tendido:	54m.
- Colas :	<u>6m</u>
- Longitud total:	88,8m.

Entonces, la longitud real del conductor calibre AWG 2/0 que se desea implementar para que la malla pueda ser normalizada²⁵ es de **$L_T = 88,8m$**

3.7.7. Cálculo de las tensiones de contacto y paso reales.

Después de todo el procedimiento anterior y con las variables ya calculadas, se procede a encontrar el valor para cada tensión.

- Tensión de paso real:

$$E_p = k_s * k_i * \frac{\rho_t * I}{L_T}$$

²⁵ BELTRAN, Alejandro Vañegas. LUNA SALOMON, Rodrigo. Diseño de un campo de pruebas de rutina para transformadores de distribución hasta 250KVA y 34.5KVA Universidad del Valle. Santiago de Cali 1994.

$$E_p = 0,7192 * 1,3380 * \frac{50\Omega - m * 1769,0048A}{88,8m} = 958,4990V$$

- Tensión de contacto real.

$$E_c = k_m * k_i * \frac{\rho_t * I}{L_T}$$

$$E_c = 0,8559 * 1,3380 * \frac{50\Omega - m * 1769,0048A}{88,8m} = 1140.6800V$$

3.7.8. Resistencia de la malla a tierra.

De acuerdo al método de Laurent y Niemann, con un valor real de la longitud total del conductor de la malla y las dimensiones de la misma, puede calcularse la resistencia de puesta a tierra así:

$$R = 0,443 * \rho_t \left(\frac{1}{\sqrt{A}} + \frac{1}{L_T} \right)$$

R: Resistencia de la malla a tierra

A: Area de la malla a tierra

L_T: Longitud total del conductor

$$R = 0,443 * 50\Omega - m \left(\frac{1}{\sqrt{54m^2}} + \frac{1}{88,8m} \right)$$

$$R = 3,2637\Omega$$

En razón a que la resistencia de puesta a tierra es un indicador que limita directamente la máxima elevación de potencial y controla las tensiones transferidas, pueden tomarse los siguientes valores máximos de resistencia de puesta a tierra adoptados de las normas técnicas IEC 60364-4442, ANSI/IEEE 80, NTC 2050, NTC 4552:

APLICACIÓN	Valores máximos de resistencia de puesta a tierra.
Estructuras de líneas de transmisión o torrecillas metálicas de distribución.	20Ω
Subestaciones de alta y extra larga tensión	1Ω
Subestaciones de media tensión	10Ω
Protección contra rayos.	10Ω
Neutro de acometida en baja tensión.	25Ω

Tabla 15. Valores máximo de resistencia de puesta a tierra.

Debe verificarse que la resistencia sea menor que 10Ω . Un buen diseño de puesta a tierra debe reflejarse en el control de las tensiones de paso, de contacto y transferidas; sin embargo, la limitación de las tensiones transferidas principalmente en subestaciones de media y alta tensión es igualmente importante.

Un bajo valor de resistencia de puesta a tierra es siempre deseable para disminuir el máximo potencial de tierra, por tanto al diseñar un sistema de puesta a tierra, es fundamental determinar tensiones aplicadas al ser humano en caso de falla.

El procedimiento implementado en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas, e cuanto al sistema de puesta a tierra, que se llevó a cabo en el proyecto “IMPLEMENTACIÓN DE UN BANCO PARA PRUEBAS DE ENVEJECIMIENTO ACELERADO A BARRAS DEL ESTATOR DE MÁQUINAS ROTATIVAS”²⁶ a dirección del profesor José Luis Oslinger y Luis Carlos Castro, es:

Se realizaron una serie de mediciones con los telurómetros AEMC 4500, y Megger AVO DET5/3R, con el método de los tres puntos, se midió la resistencia de puesta a tierra (en adelante, PTs) de cada una de las 7 PTs, con las que cuenta el laboratorio de máquinas eléctricas.

	AEMC 4500			Megger AVO DET5/3R		
Distancia [m]	22,5	25	27,5	22,5	25	27,5
R1 [Ω]	29	29,5	29,7	30,1	30,3	30,5
R2 [Ω]	10,2	10,4	10,5	10,2	10,4	10,5
R4 [Ω]	7,3	7,4	7,6	7,2	7,35	7,4
R6 [Ω]	15,2	15,5	15,7	15,5	15,78	15,9

Tabla 16. Mediciones de resistencia de PT - Implementación de un banco para pruebas de envejecimiento acelerado a barras del estator de máquinas rotativas.

Nota: Los puntos de puesta a tierra R3, R5 y R7 no se muestran puesto que se encontraban conectados eléctricamente con R2, R4 y R6 respectivamente.

El punto de puesta a tierra (R1) que se encuentra en el espacio asignado al banco para pruebas, estaba compuesto por una varilla de hierro de media pulgada de diámetro, de

²⁶ . OSLINGER, José Luis. CASTRO, Luis Carlos. Implementación de un banco para pruebas de envejecimiento acelerado a barras del estator de máquinas rotativas. Universidad del Valle – Grupo de Investigación Convergía. 2012.

longitud desconocida, enterrada en una caja de 0,3mx0,3m a 0,25m bajo el nivel del piso. Analizando esos valores, se observa que el valor de la resistencia de puesta a tierra obtenido bajo parámetros de medición no cumple con los valores máximos establecidos para subestaciones de media tensión.

Por lo anterior, se considera que el sistema de puesta a tierra ubicado en el laboratorio de máquinas eléctricas rotativas no es confiable para el desarrollo de las pruebas de envejecimiento, esto debido a su alto nivel de resistencia de tierra y a que no cuenta con una malla a tierra independiente. Por tanto, para considerar factible el diseño y cálculo de malla a tierra desarrollado durante este capítulo se verifica que:

- El valor de la resistencia de la malla a tierra debe ser menor a 10Ω .

$$R = 3,2637\Omega \quad \textbf{Si cumple.}$$

- El valor de la tensión de paso real (en caso de falla) debe ser menor a la tensión de paso tolerable.

$$E_{preal} = 958,4990V < E_p = 10006,9752 V \quad \textbf{Si cumple}$$

- El valor de la tensión de contacto real (en caso de falla) debe ser menor a la tensión de contacto tolerable.

$$E_{creal} = 1140,6800V < E_c = 2624,7804V \quad \textbf{Si cumple}$$

Por lo cual, el cálculo y diseño del sistema de puesta a tierra planteado en este capítulo se considera factible y adecuado para que sea implementado para una futura certificación del Banco para pruebas de envejecimiento acelerado a barras del estator. Hay que tener en cuenta que corregir los daños de una malla a tierra existente resulta más costoso, que invertir en la instalación de una nueva malla a tierra más segura y confiable.

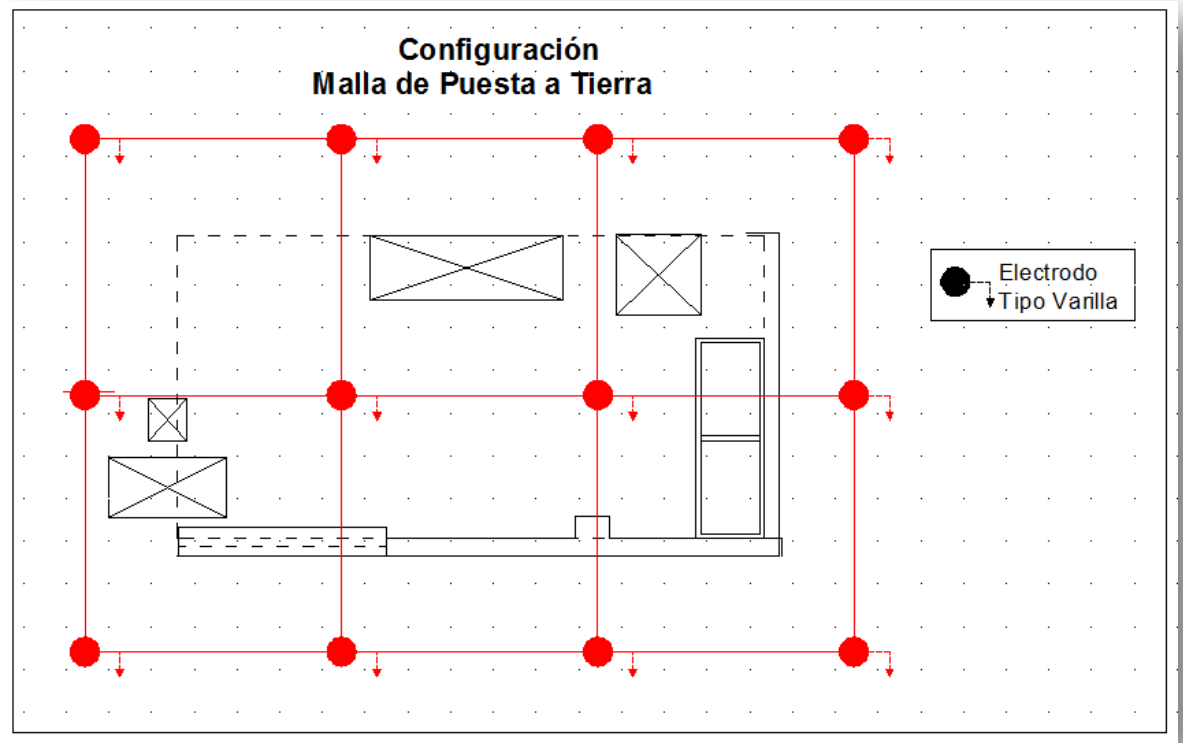


Figura 25. Configuración sistema de puesta a tierra del banco para pruebas de envejecimiento acelerado.

CAPITULO IV.

MANUALES, PROTOCOLOS Y CAPTURA DE DATOS.

4.1. INSTRUCTIVOS DE PROCEDIMIENTO.

Con el propósito principal de lograr recopilar una serie de información útil para una posible futura certificación del Banco para Pruebas de Envejecimiento Acelerado a barras del estator de Máquinas Rotativas, se proponen dos protocolos que sirvan como manuales de procedimiento a la hora de aplicar las pruebas de ciclado térmico o esfuerzos termoeléctricos que se encuentran en el Anexo ***“Instructivo para la ejecución de Pruebas de Envejecimiento Acelerado a Barras del Estator de Máquinas Rotativas”***

4.2. CAPTURA DE DATOS.

De acuerdo a la recolección de datos obtenidos de las pruebas y con el propósito de generar información para definir parámetros de diagnóstico sobre el estado de aislamiento de las barras del estator, se propone unos formatos para la captura y recolección de datos incluidos en el Anexo ***“Listas de Chequeo y para el Registro de Datos de las Pruebas”***. Este procedimiento alude al almacenamiento de formatos con datos que resultan de las pruebas en el tiempo, teniendo en cuenta las especificaciones hechas en el capítulo 1.

Además se realiza se relaciona los formatos para la inspección y control de un laboratorio en base a los estándares de seguridad, salud ocupacional y buenas prácticas ambientales.

La lista de chequeo para el procedimiento de prueba de esfuerzos termoeléctricos **R-027** y ciclado térmico **R-028**, son realizados en base a los procedimientos del trabajo de grado **“Implementación de un banco de Pruebas de Envejecimiento Acelerado de Bobinas Estatóricas de Grandes Generadores Eléctricos”**.

Nota: Los protocolos de Envejecimiento Acelerado a Barras del Estator de Grandes Máquinas Rotativas según estándares de la IEEE y los formatos de inspección y control del laboratorio y su personal, se muestran en los anexos.

CONCLUSIONES.

- Los procedimientos a emplear para realizar las pruebas de envejecimiento acelerado a barras del estator de grandes máquinas rotativas son la aplicación de esfuerzos térmicos y/o termoeléctricos, según las prácticas recomendadas Std1043-1996(R2009) de la IEEE para esfuerzos termoeléctricos y Std1310-1996(R2012) de la IEEE para los térmicos. Consultar los protocolos para pruebas definidos según estas prácticas recomendadas, en el capítulo 4 de este trabajo de grado.
- La disposición de los distintos elementos de planta y las características de los de seguridad, se definen según el numeral 17 del artículo 11 de la resolución 1016 de 1989, como parte del subprograma de higiene y seguridad industrial, para la delimitación de las áreas de trabajo, zonas de almacenamiento y vías de circulación y señalización de las salidas de emergencia, resguardos y zonas peligrosas de las máquinas e instalaciones acorde a disposiciones legales vigentes. Consultar la cartilla de la documentación de características físicas y eléctricas en el capítulo 4 de este trabajo de grado.
- Dado que es de naturaleza eléctrica el riesgo más representativo en el laboratorio, se definen las distancias de seguridad en el recinto y la locación de otros elementos asociados en él para la prevención de riesgos por arco eléctrico conocidos como los límites de aproximación seguros, técnicos y restringidos, según la tabla 20 y la figura 9 del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE. También se tuvo en cuenta para esto, la resolución 2400 o Estatuto Nacional de Seguridad Industrial, que propone algunas medidas referentes a la constitución física de los espacios. Consultar el gráfico de disposición física desarrollado en el capítulo dos de este trabajo.
- La captura de datos y la interpretación de resultados obtenidos de las pruebas ejecutadas para contar con un registro histórico se hace posible desde la recolección de datos en un formato creado con el propósito de generar información para la definición de parámetros de diagnóstico sobre el estado del aislamiento de las barras del estator.

- El cálculo de la malla de puesta a tierra, desarrollado en el capítulo tres de este trabajo, tiene en cuenta las tensiones de paso y de contacto permisibles, la corriente asimétrica efectiva de falla y otros aspectos según lo contempla el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE y el Código Eléctrico Colombiano - CEC; posteriormente y regida por la misma normatividad se hace la elección del tamaño del conductor, la longitud mínima del conductor enterrado y la resistencia de la malla de puesta a tierra. Consultar el cálculo de la malla de puesta a tierra en el capítulo 3 de este trabajo de grado.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] TORO, J C.; GONZÁLES, H D. (2003). Evolución de las señales de descargas parciales y su incidencia en el deterioro y fallo de los aislamientos sólidos de las barras estatóricas de los generadores 1 y 2 de la central Hidroeléctrica de Guatapé e E.E.P.P.M.
- [2] CASTRO, L C. (2011). Implementación de un Banco para Pruebas de Envejecimiento Acelerado a Barras del Estator de Máquinas Rotativas.
- [3] IEEE STD1043-1996(R2009). IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils.
- [4] IEEE STD1310-1996. IEEE Trial Use Recommended Practice for Thermal Cycle Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for Large Generators.
- [5] REGLAMENTO TÉCNICO DE INSTALACIONES ELÉCTRICAS – RETIE. (2008). Resolución No. 18 1294.
- [6] CÓDIGO ELÉCTRICO COLOMBIANO. (1998-11-25). NTC2050.
- [7] IEEE STD 81-1983. IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface potentials of a Ground System
- [8] IEEE Std. 142-1982 IEEE Recommended practice for grounding of industrial and commercial power system
- [9] ISO/IEC 17025, Requisitos Generales para la competencia de los laboratorios de Ensayo y Calibración.
- [10] ISO/IEC 9001:2008, Sistemas de Gestión de Calidad. Requisitos.
- [11] IEEE STD 80-1983. IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.
- [12] Resolución 2400 de 1979. Estatuto de Seguridad Industrial.
- [13] Resolución 2013 de 1986. Comité Paritario Salud Ocupacional.
- [14] M. VILLAR. RUBIA. Seguridad Eléctrica: Efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano

- [15] JOSE LUIS OSLINGER. LUIS CARLOS CASTRO. Implementación de un banco para pruebas de envejecimiento acelerado a barras del estator de máquinas rotativas. Universidad del Valle – Grupo de Investigación Convergía. 2012
- [16] AIDA YUBELLY CARANTON. Evaluación de Vida útil residual de aislamiento compuesto de mica y resina con base en pruebas de envejecimiento acelerado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá 2012.
- [17] HERNAN JOSE REYNO. Envejecimiento Acumulativo Acelerado del aislamiento sólido sometido a esfuerzos eléctricos y térmicos. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá – 2012.
- [18] Resolución 1016 de 1989. Reglamento de organización y funcionamiento y forma de los Programas de Salud Ocupacional
- [19] Resolución 2400 de 1979. Estatuto de Seguridad Industrial. Artículo 202.
- [20] IEEE STD 4-1978. Standard Techniques for High-Voltage Testing
- [21] IEEE STDA 43-1974. Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery
- [22] ASTM D1868-93(1998) Standard Test Method for Detection and Measurement of Partial Discharge (Corona) Pulses in Evaluation of Insulation Systems
- [23] IEEE 286-2000 Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation
- [24] NTC 4120. Efectos de la corriente sobre los seres humanos y los animales domésticos
- [25] DIEZ HENAO, Carlos Mario. Instalaciones Eléctricas. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. 2011.