

ACONDICIONAMIENTO TÉCNICO DE LA PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO
TERMOELÉCTRICO ACELERADO EN EL LABORATORIO DE ENSAYO DE
BOBINAS “CONVERGIA”

MIGUEL ANGEL GONZÁLEZ GONZÁLEZ

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2019

ACONDICIONAMIENTO TÉCNICO DE LA PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO
TERMOELÉCTRICO ACELERADO EN EL LABORATORIO DE ENSAYO DE
BOBINAS “CONVERGIA”

MIGUEL ANGEL GONZÁLEZ GONZÁLEZ

Trabajo de Grado

Ing. José Luis Oslinger Gutierrez Ph.D
Ing. Oscar Román Tudela Rangel. MSc

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIAGO DE CALI
2019

ESPACIO DEDICADO A LA NOTA DE ACEPTACIÓN

Nota: _____ Firma del Jurado: _____

Nota: _____ Firma del Jurado: _____

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. Marco teórico	3
1.1. El aislamiento como vida útil de las máquinas.	3
1.2. Polarización:	4
1.3. Constante dieléctrica:	10
1.4. Conductancia:	12
1.5. Pérdidas dieléctricas:	18
1.6. Perforación de los dieléctricos:	25
2. Planteamiento del procedimiento técnico.	31
2.1. Fallas en generadores, repercusiones económicas del sistema de aislamiento e historia	36
2.2. Aislamiento en barras estáticas – tipos de bobina del estator	43
2.3. Medición de temperatura:	46
2.4. Modelos de envejecimiento	51
3. Práctica recomendada para prueba de soportabilidad a la tensión (Voltage-Endurance) de barras y bobinas preformadas ieee std. 1043	56
3.1. Evaluación de las muestras antes de la prueba de envejecimiento	66
3.2. Condiciones de seguridad	67
4. Monitoreo de las condiciones del laboratorio, control de la prueba, Validación de los procedimientos normalizados y almacenamiento de los datos a ser analizados-Resultados obtenidos.	69
5. Conclusiones	78
6. Bibliografía	79
7. Anexos	83
7.1. Código de “take photo” para tomar evidencia fotográfica de las muestras por medio de la cámara infrarroja de la Raspberry pi 3B+:	83
7.2. Clipboard módulo de temperatura y humedad por lectura a partir de node-red:	83
7.3. Clipboard de adquisición de datos desde node-red del sensor de temperatura y humedad tomado a partir de arduino leonardo:	84

7.4. Código arduino para la lectura del sensor de temperatura y humedad DHT11: _____	85
7.5. Clipboard node red lectura modbus (RS485-Ethernet) a partir del nodo modbus-read: _____	86
7.6. Clipboard node red lectura modbus (RS485-Ethernet) a partir del nodo modbus flex getter: _____	87
7.7. Clipboard de node-red del dashboard final, monitoreo centralizado de datos: _____	88
7.8. ENTORNO GRAFICO NODE-RED. _____	96
7.9. Maleta de monitoreo y control portatil _____	97
7.10. Notificación en dispositivo movil- Pushbullet y visualización del dashboard principal: _____	97

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de la resistividad volumétrica de los dieléctricos sólidos porosos a distinta humedad relativa del aire y temperatura.	15
Tabla 2. Resistividad superficial de algunos materiales cuando la humedad relativa es del 70%.....	16
Tabla 3. Clasificación de las pérdidas en los dieléctricos.....	19
Tabla 4. Valores de la rigidez dieléctrica de algunos materiales sólidos en un campo homogéneo de 50 Hz de frecuencia.....	28
Tabla 5. Referencias de clasificación térmica de sistemas de aislamiento eléctrico	32
Tabla 6. Clasificación térmica según IEC 60085	32
Tabla 7. Valores de aumento de temperatura aconsejables a seleccionar según IEEE std. 1	57
Tabla 8. Longitudes recomendadas de prueba para barras o bobinas.	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagramas energéticos de los dieléctricos (a), Semiconductores (b) y conductores (c) a la temperatura de cero absoluto, según la teoría de las bandas en el sólido.	4
Figura 2. Dieléctrico con diversos mecanismos de polarización en un campo eléctrico.	5
Figura 3. Circuito equivalente de un dieléctrico complejo con diversos mecanismos de polarización.	6
Figura 4. Frontera entre dieléctricos perfectos con permitividades ϵ_1 y ϵ_2 . Se muestra la continuidad de la densidad de flujo eléctrico DN por medio de la superficie gaussiana, en el lado derecho y la continuidad de la intensidad de campo eléctrico tangencial E_{tan} por medio de la integral de línea a lo largo de una trayectoria cerrada a la izquierda.	9
Figura 5. Combinación de dieléctricos sometidos a una diferencia de tensión; Intensidad de campo eléctrico y potencial para la misma combinación de dieléctricos	10
Figura 6. Componentes, propia y de las impurezas, de la conductividad de un dieléctricos, para distintos contenidos de impurezas (N es la concentración de impurezas).	14
Figura 7. Dependencia de la resistividad superficial, con respecto a la humedad relativa, en diversos dieléctricos (1. Ceresina; 2. Cera de abejas; 3. Vidrio alcalino; 4. Fenoplasto; 5. Mármol).	15
Figura 8. Variación de la corriente que pasa a través del material dieléctrico en función del tiempo.	17
Figura 9. Corrientes volumétrica (I) y superficial (I_s) de escape que pasa por el sector de aislamiento (esquemáticamente).	18
Figura 10. Valores de $\tan\delta$, en función de la temperatura, para el papel seco sometido a distintas frecuencias.	21
Figura 11. $\tan\delta$ en función de la temperatura, para la cerámica a base de titanio, siendo $f = 50\text{Hz}$	22
Figura 12. Variación de $\tan\delta$ y la constante dieléctrica, en función de las temperatura, para probetas de titanata de bario con distintos aditivos (1 y 2 son los números de las probetas)	23
Figura 13. Valores de la resistividad volumétrica de la mica moscovita en función de la temperatura (1. ρ calculado por la $\tan\delta$, siendo $f = 50\text{Hz}$; 2. ρ medido con corriente continua)	24

Figura 14. Dependencia de $\tan\delta$, con respecto a la temperatura, en el papel para condensador impregnado (80% de colofonia y 20% de aceite para transformador).	24
Figura 15. Representación esquemática de la propagación en la perforación de un gas.	26
Figura 16. Variación de la rigidez dieléctrica del aire en dependencia de la distancia entre los electrodos en un campo homogéneo.	26
Figura 17. Variación de la tensión disruptiva del aire, en función de la distancia entre los electrodos, para distintas frecuencias.	27
Figura 18. Dependencia de la rigidez dieléctrica con respecto al contenido de agua que hay en el aceite.(Ensayo realizado con $h = 2,5mm$).	27
Figura 19. Rigidez dieléctrica del aceite para transformadores en función de la temperatura (1. Aceite seco, 2. Aceite usado (con trazas de agua))	27
Figura 20. Variación de la rigidez dieléctrica de la porcelana electrotécnica, en función de la temperatura siendo $f = 50Hz$ (A. Región de la perforación eléctrica; B. Región de la perforación térmica)	29
Figura 21. Sección de bobina preformada de múltiples espiras	35
Figura 22. Sección de barra tipo Roebel - aislamiento	35
Figura 23. Principales causas de fallas en generadores hidroeléctricos.	36
Figura 24. Causas de falla en el Sistema de aislamiento eléctrico.	37
Figura 25. Desarrollo de sistemas de dimensionamiento de aislamiento de alta tensión para máquinas rotativas desde sus inicios.	38
Figura 26. Línea de tiempo de la intensidad nominal de campo eléctrico para sistemas de aislamiento de alta tensión para máquinas rotativas.	39
Figura 27. Curva de costo promedio de componentes eléctricos para centrales hidroeléctricas según [14]	40
Figura 28. Tipos de sistemas de aislamiento en los hidrogeneradores analizados en la referencia [7]	40
Figura 29. Desarrollo y principales mejoras en los sistemas de aislamiento de máquinas eléctricas rotativas que llevaron a los sistemas disponibles en la actualidad.	42
Figura 30. Sección de ranura y cabeza de bobina - Barra tipo Roebel	44
Figura 31. Tipos de bobinas que forman el devanado del estator (Bobinas preformadas de múltiples espiras).	45
Figura 32. Tipos de bobinas que forman el devanado del estator (Barras tipo Roebel).	45
Figura 33. Grafico polar de las temperaturas de refrigeración con las alarmas de temperatura estática y dinámica para cada barra.	48

Figura 34. Ilustración de un RTD de ranura instalado en la cuña separadora y ubicada en la ranura entre la barra del estator superior e inferior.	49
Figura 35. el tiempo de envejecimiento de semanas a temperaturas elevadas para que el papel manila disminuya en diversas condiciones al 20 por ciento de la resistencia a la tracción original, representado en una escala logarítmica frente a la temperatura absoluta recíproca.	51
Figura 36. Comparación de envejecimiento entre material de referencia y Sistema de aislamiento probado IEEE Std.1	59
Figura 37. Descomposición del Sistema de aislamiento de la pared a tierra. A. Canal de descarga y delaminación en los bordes de la barra, B. Carbonización del portador de fibra de vidrio, C. Resina	60
Figura 38. Aplicación de temperatura por medio de placas calefactoras a una barra del estator según la práctica recomendada IEEE Std 1043.	63
Figura 39. Barras conductoras del estator que muestran una importante erosión de la capa semiconductora y partes del aislamiento degradado debido a descargas parciales graves en un generador refrigerado por aire con una potencia de aproximadamente 80 MW.	64
Figura 40. Descargas internas de, huecos en el aislamiento y delaminación en el aislamiento principal de la pared a tierra.	64
Figura 41 Raspberry PI modelo 3B+	69
Figura 42. Funcionamiento protocolo MQTT	71
Figura 43. Desktop Raspberry #1 (Inferior) y Raspberry #2 (Superior)	71
Figura 44. Comparación de la medición de temperatura y humedad ambiente entre DHT11 (izquierda) y sensor SD700 EXTECH calibrado.	72
Figura 45. Servicios utilizados en el monitoreo y control de la prueba de envejecimiento acelerado, a la izquierda protocolo MQTT y servicio de notificaciones a dispositivos móviles Pushbullet, en el centro el servicio de vigilancia DVR motion-eye y cámara infrarroja, a la derecha servicio VNC para escritorio remoto.	73
Figura 46. Arquitectura de red Sistema de monitoreo y control, prueba de envejecimiento termoeléctrico acelerado IEEE std 1043	75
Figura 47. Múltiples sistemas de monitoreo posibles con la configuración realizada en el acondicionamiento del laboratorio de bobinas (Raspberry pi 3 B+ / Datalogger Fieldlogger novus	76
Figura 48. Dashboard de monitoreo y control – Prueba de envejecimiento termoeléctrico acelerado siguiendo práctica recomendada IEEE 1043.	77

Los mejores momentos de la vida son aquellos en los que nos entregamos a un objetivo sin ninguna otra motivación que disfrutar paso a paso del proceso, desplegando toda nuestra creatividad.

Todo fluye y se experimenta la dicha de la existencia, en eso consiste vivir... así vale la pena vivir.

Teresa González.

RESUMEN

Dada la necesidad del sector energético de ensayar barras/bobinas con el fin de determinar la vida útil del devanado del estator, el laboratorio de Máquinas Eléctricas Rotativas de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle realizó el proceso de acondicionamiento para lograr a futuro prestar el servicio de ensayo a bobinados, más específicamente en realizar la prueba de envejecimiento acelerado a barras/bobinas del estator tipo preformada y Roebel. Se presentan los aspectos técnicos que conllevan el envejecimiento del aislamiento, el procedimiento para realizar la prueba y el proceso de automatización y control de la prueba de envejecimiento termoeléctrico acelerado según la práctica recomendada IEEE STD 1043.

Palabras claves: Máquinas eléctricas - generadores eléctricos - ruptura dieléctrica - envejecimiento termoeléctrico acelerado - internet de las cosas (IOT) - aislamiento eléctrico - barras preformadas - bobinas preformadas - prueba de resistencia al voltaje.

ABSTRACT

Due the need of the electric sector of testing bars/coils to determinate the service life of the stator winding, the University of Valle's Rotary Electric Machines Laboratory carried out the conditioning process to provide the winding tests service in the future, more specifically the accelerated aging test to the stator's form-wound bars/form wound-windings. Technical aspects are presented that cause the isolation aging, the test procedure, the automation process and the thermo-electric accelerated aging test control based on IEES STD 1043 recommended practice.

Keywords: Electric Machines - Electric Generators - Dielectric Breakdown - Accelerated Thermoelectric Aging - Internet Of Things (Iot) - Electrical Insulation - Form-Wound Bars - Form-Wound Coils - Voltage Endurance Testing.

INTRODUCCIÓN

A través de los años, el aislamiento para los devanados del estator de máquinas rotativas ha pasado de ser visto como simples separaciones de las barras/bobinas del núcleo del estator para convertirse en uno de los indicadores más importantes para determinar la vida útil de la máquina. Las especificaciones del aislamiento, no sólo del estator sino de toda la máquina, repercute en factores que van desde la reducción de costos y variaciones en la eficiencia, hasta disminución de las dimensiones del equipo. Por ello desde hace décadas existe la continua necesidad de lograr avances tecnológicos respecto al aislamiento que representen un costo/beneficio rentable, garantizando la confiabilidad de la operación de la máquina rotativa bajo su régimen de trabajo específico.

Durante la operación de las máquinas rotativas el aislamiento principal del estator está sometido a esfuerzos térmicos, eléctricos, ambientales y mecánicos. Aunque existe la discusión sobre qué tipo de esfuerzos repercuten más para la operación de la máquina, en conjunto, los esfuerzos termoeléctricos reducen las propiedades físicas y químicas del sistema de aislamiento, por lo tanto, el dimensionamiento y diseño del aislamiento debe ser seleccionado correctamente para limitar al máximo la degradación del mismo.

Para identificar la relación entre los mecanismos de degradación y los esfuerzos que la causan, se hace uso de estudios de envejecimiento acelerado junto a técnicas de diagnóstico al sistema de aislamiento, estos estudios permiten sugerir modelos de vida útil, verificar dichos modelos y aplicarlos en condiciones de trabajo nominales.

La definición de un programa de envejecimiento supone el problema de seleccionar los métodos y procesos más apropiados para envejecer la estructura del aislamiento bajo condiciones reales en una proyección de tiempo. Es de vital importancia, en el estudio de envejecimiento acelerado, la selección de un programa de envejecimiento con una magnitud y duración oportunos y precisos de los esfuerzos aplicados para lograr un ritmo de degradación adecuado, por ende, existe la necesidad de laboratorios donde se pueda realizar pruebas teniendo las consideraciones necesarias planteadas por la norma, para conocer, con precisión y exactitud el estado de los elementos bajo estudio.

El laboratorio de ensayo de bobinas “CONVERGIA” de la Universidad del Valle cuenta con los equipos para lograr el alcance de probar barras/bobinas estáticas

tipo preformadas y Roebel de hasta 13,8 kV, sin embargo, es necesario definir, categorizar y aplicar los procedimientos técnicos necesarios según las normativas y prácticas recomendadas que garanticen la fiabilidad del ensayo de envejecimiento acelerado por medio de esfuerzos termoeléctricos, teniendo en cuenta las limitaciones referente a las particularidades del espacio asignado. La finalidad del presente trabajo de grado es , (dejando a un lado aspectos como el manejo de las condiciones ambientales y el sistema de gestión de calidad), lograr el correcto funcionamiento del ensayo, la automatización del procedimiento y el acondicionamiento del laboratorio para dicha prueba mediante la práctica recomendada IEEE 1043 más específicamente lo referente a resistencia al voltaje (voltage endurance) además de presentar someramente las bases físicas que sustentan la prueba de envejecimiento acelerado.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. EL AISLAMIENTO COMO VIDA ÚTIL DE LAS MÁQUINAS.

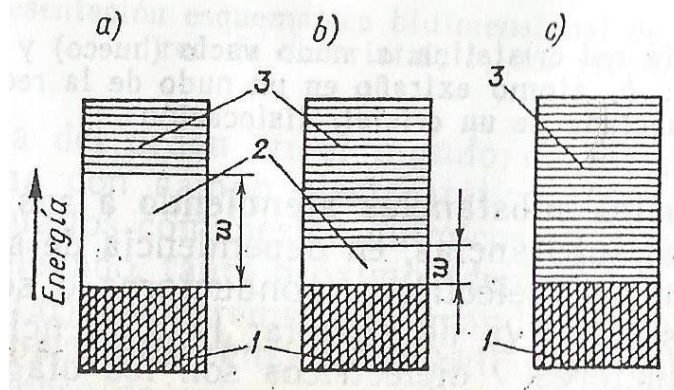
El objetivo general del presente trabajo de grado especifica realizar el acondicionamiento del Laboratorio de Ensayo de Bobinas (L.E.B) para la prueba de envejecimiento termoeléctrico acelerado siguiendo los lineamientos planteados según la IEEE Std-1043, para ello es necesario entender la importancia y el funcionamiento del sistema de aislamiento para la máquina eléctrica, correlacionando dos aspectos importantes y fundamentales para la prueba, **el envejecimiento y la temperatura**.

Un material dieléctrico o aislante ideal, en comparación con un conductor, no tiene cargas libres que puedan transportarse a través de ellos para producir una corriente eléctrica, sin embargo, la naturaleza de los materiales dieléctricos hace que en un campo eléctrico puedan considerarse como un arreglo de dipolos eléctricos microscópicos compuestos por cargas positivas y negativas cuyos centros no coinciden perfectamente. La medida en que ocurre esta formación de dipolos eléctricos se cuantifica por medio de la permitividad relativa o constante dieléctrica del material.

Las propiedades eléctricas de los diferentes materiales están determinadas por condiciones de interacción de los átomos de la sustancia y no son una peculiaridad permanente de un átomo dado, la forma más intuitiva de apreciar la diferencia entre conductores, semiconductores y dieléctricos son los diagramas energéticos de la teoría de las bandas en los sólidos, como se puede apreciar en la Figura 1. Los dieléctricos son los materiales en los cuales la banda prohibida es tan grande que la conductividad por electrones no se observa en las condiciones normales, la energía necesaria para hacer que un electrón pasase a un estado de nivel de energía libre puede ser aportada por diversas fuentes de energía como por ejemplo un movimiento térmico, un flujo de electrones y partículas nucleares, campos eléctricos y magnéticos, acciones mecánicas, etc.

Figura 1. Diagramas energéticos de los dieléctricos (a), Semiconductores (b) y conductores (c) a la temperatura de cero absoluto, según la teoría de las bandas en el sólido.

1, banda saturada de electrones; 2, banda prohibida; 3, banda de niveles de energía libres



Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979[1]

Ningún circuito eléctrico, incluso el más simple, puede ser realizado sin el empleo de materiales tanto conductores como dieléctricos, es el aislamiento eléctrico el que ante todo sirve para impedir el paso de la corriente por caminos indeseables, protegiendo tanto a los seres vivos de una situación riesgosa como permitiendo el correcto funcionamiento del esquema eléctrico dado.

El fin de este capítulo se centra en dar una introducción y plantear los conocimientos básicos necesarios para la prueba de envejecimiento acelerado, no obstante, si se desea abordar el tema de una manera más amplia sobre las características químicas y constructivas de los materiales y los conceptos generales acerca de la estructura molecular de las sustancias se recomienda comenzar por estudiar los tipos de enlaces según el estado de la materia; por sí mismos, todos los dieléctricos, ya sean sólidos, líquidos o gaseosos, tengan o no estructura cristalina, la característica común es la capacidad para almacenar energía. Este almacenamiento ocurre al cambiar las posiciones relativas de las cargas positivas y negativas ligadas en el interior en contra de las fuerzas moleculares y atómicas siendo la fuente de esta energía el campo externo al cual se ve sometido el dieléctrico.

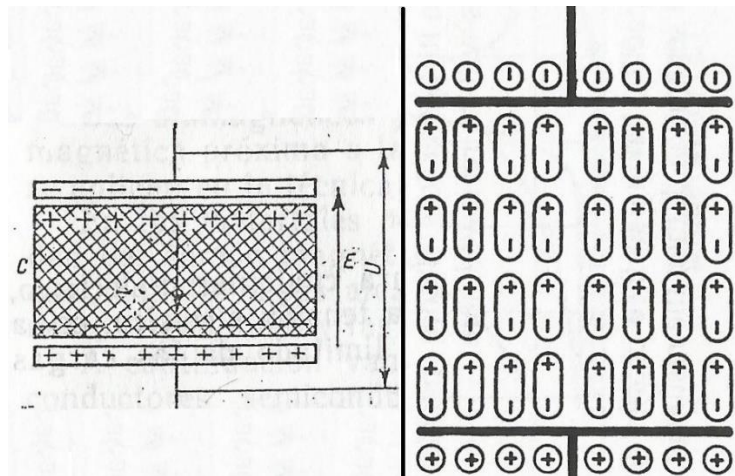
1.2. POLARIZACIÓN:

El almacenamiento de energía comienza con el fenómeno de polarización, este proceso principal se produce cuando sobre el dieléctrico actúa una tensión eléctrica. Como se dijo anteriormente, el desplazamiento de las cargas o la orientación de las moléculas dipolares se mide según la constante dieléctrica del material y el ángulo de pérdidas dieléctricas. Al existir disipación de energía en forma de calentamiento en el dieléctrico, puede producir que las pocas cargas libres en el aislamiento, por

influencia de la tensión aplicada, pasen a través del material aislante existiendo corrientes de fuga. Dichas corrientes están medidas cuantitativamente por la conductividad volumétrica y la conductividad superficial, valores que están fuertemente influenciados por el medio donde esté presente el material aislante, donde predominan dos variables importantes: la temperatura y la humedad del ambiente.

La polarización de los dipolos dentro del dieléctrico y su almacenamiento de energía bajo la influencia de un campo eléctrico, hace que todo dieléctrico (con sus respectivos electrodos y usado en un circuito eléctrico) pueda considerarse como un condensador con una capacitancia definida (Figura 2), el valor de dicha capacitancia y de la cantidad de carga almacenada para una tensión aplicada, está relacionada directamente con la permitividad relativa [2], es decir, la constante dieléctrica del material, la cual puede determinarse como la razón de la capacitancia de un condensador con el dieléctrico dado a la capacitancia de otro condensador de las mismas dimensiones cuyo dieléctrico sea el vacío, es por ello que para caracterizar la calidad de los dieléctricos se emplea dicho valor de permitividad o constante dieléctrica (ϵ).

Figura 2. Dieléctrico con diversos mecanismos de polarización en un campo eléctrico.

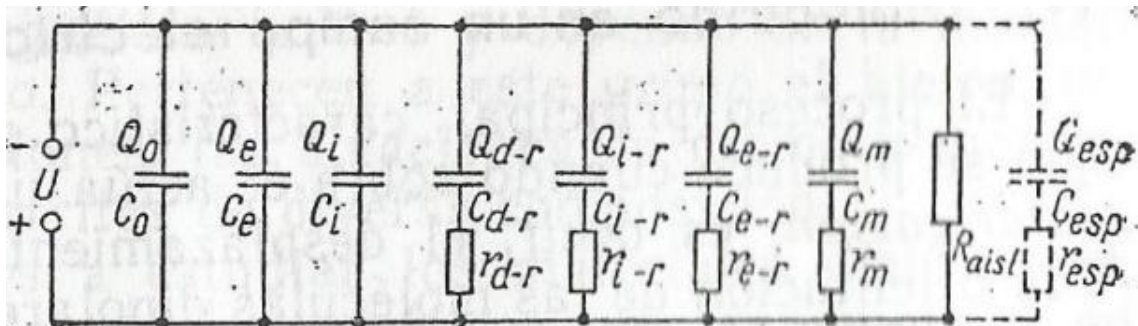


Fuente: (Izq.) Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1] – (Der.) Electrical insulation in power systems. (N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, and M. I. Qureshi), CRC Press, 2018. [3]

Los mecanismos que llegan a polarizar un dieléctrico son variados y se diferencian según la estructura del dieléctrico, la caracterización de los dieléctricos no se basa solo en definir su permitividad relativa. El modelo complejo de capacitancia presentado en la Figura 2 presenta un circuito equivalente donde se tienen en cuenta la polarización por cada uno de los medios posibles según el material; La capacitancia de un condensador con dieléctrico y la carga eléctrica acumulada en él viene determinada por la suma de diversos mecanismos de polarización, dichos

mecanismos pueden observarse en dieléctricos diferentes, y en un mismo material pueden coexistir varios mecanismos.

Figura 3. Circuito equivalente de un dieléctrico complejo con diversos mecanismos de polarización.



Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

En la Figura 3 se evidencia el circuito equivalente del dieléctrico complejo presentado anteriormente, el cual consta de una serie de capacitores conectados en paralelo a la fuente de tensión U , la capacitancia C_0 y la carga Q_0 corresponden al campo de los electrodos, si entre ellos no hay dieléctrico, dicho de otra manera en vacío; las demás C y Q son las capacitancias y cargas correspondientes a los distintos tipos de mecanismos de polarización que puede presentar el dieléctrico, respectivamente se presentan como polarización electrónica, iónica, dipolar de relajación, electrónica de relajación, por migración y espontánea; r , con los subíndices respectivos representa las resistencias equivalentes a las pérdidas de energía correspondientes a estos mecanismos de polarización, mientras que R_{aisl} se presenta como la resistencia del aislamiento a la corriente de fuga a través del dieléctrico[1].

Los tipos de polarización presentados anteriormente pueden ser divididos en dos grupos fundamentales. El primer tipo, al cual pertenece la polarización electrónica e iónica, tienen lugar en el dieléctrico bajo la presencia del campo eléctrico de una manera instantánea, totalmente elástica y sin disipación de energía, es decir sin desprendimiento de calor. Al segundo grupo pertenecen los demás tipos de polarización, al cual se llama polarización de relajación, las polarizaciones pertenecientes a este grupo no son de tipo instantáneo, estas crecen y decrecen lentamente y van acompañadas de **disipación de energía** lo cual provoca el calentamiento del dieléctrico. Existe un mecanismo de polarización especial, llamado polarización por resonancia, se presenta en dieléctricos sometidos a frecuencias de ondas luminosas y por ello tienen poca importancia en la práctica.

La polarización electrónica (C_e y Q_e - Figura 3) consiste en el desplazamiento elástico y en la deformación de las capas electrónicas de los átomos y iones [1], dicha polarización tarda un tiempo insignificante en establecerse alrededor de 10^{-15} s. Anteriormente se expuso que la polarización electrónica al igual que la iónica no

presenta disipación de calor, sin embargo, a pesar que el desplazamiento y la deformación de las órbitas electrónicas de los átomos y iones no depende de la temperatura, esta polarización de la sustancia disminuye al aumentar la temperatura, debido a que el dieléctrico se dilata y el número de partículas por unidad de volumen, disminuye. La variación de la permitividad de un dieléctrico con polarización electrónica al cambiar la temperatura, se debe únicamente a que varía su densidad.

La polarización iónica (C_1 y Q_1 - Figura 3) es característica de los sólidos de estructura iónica, los cuales tienen la característica de no ser volátiles y tener un punto de fusión alto (normalmente entre 600 °C y 2000 °C), no conducen electricidad, puesto que los iones cargados tienen posiciones fijas. Sin embargo, dichos sólidos llegan a ser buenos conductores cuando están fundidos o disueltos en agua, además que muchos compuestos iónicos (pero no todos) son solubles en agua, el desplazamiento de los iones de estos sólidos al estar ligados elásticamente, son característicos de este tipo de polarización. Al elevarse la temperatura se intensifica la polarización, ya que se debilitan las fuerzas elásticas interiónicas a causa de que aumentan las distancias entre los iones al dilatarse el cuerpo, y en la mayoría de los casos el coeficiente de variación de la permitividad (también llamado coeficiente de temperatura) de los dieléctricos iónicos resulta ser positivo. El tiempo de establecimiento de la ionización iónica es del orden de 10^{-13} s [1].

El grupo del tipo de polarización por relajación se puede dividir en tres tipos de polarización:

- Polarización dipolar de relajación. (C_{d-r} , Q_{d-r} y r_{d-r})
- Polarización iónica de relajación. (C_{i-r} , Q_{i-r} y r_{i-r})
- Polarización electrónica de relajación. (C_{e-r} , Q_{e-r} y r_{e-r})

La polarización dipolar de relajación está directamente relacionada con el movimiento térmico de las partículas. Las moléculas dipolares, que se encuentran en movimiento térmico caótico, se orientan parcialmente por la acción del campo, lo cual es la causa de la polarización.

La polarización dipolar es posible cuando las fuerzas moleculares no impiden que los dipolos se orienten a lo largo del campo, cuando se aumenta la temperatura, las fuerzas moleculares se debilitan disminuyéndose la viscosidad de la sustancia, aumentándose la polarización dipolar, pero a su vez incrementándose la energía del movimiento térmico de las moléculas, que hace que se disminuya la influencia orientadora del campo. Esto significa que la polarización dipolar aumenta al principio con el incremento de la temperatura, mientras la debilitación de las fuerzas moleculares influye más que la intensificación del movimiento térmico caótico, después, cuando este último se intensifica, la polarización dipolar empieza a decaer a medida que aumenta la temperatura.

Se debe tener en cuenta que para que en un medio viscoso los dipolos puedan girar en dirección al campo se tiene que vencer cierta resistencia, por lo tanto la polarización dipolar va ligada a pérdidas de energía, reflejado en el circuito equivalente como r_{d-r} en serie con la capacitancia, en algunos casos, como en los líquidos viscosos es tan grande la resistencia a giro de la moléculas, que en campos rápidamente variables, los dipolos no tienen tiempo a orientarse, así que a frecuencias muy altas la polarización dipolar en esta clase de materiales puede excluirse totalmente [4].

Otra característica importante de este tipo de polarización es que el tiempo en que los dipolos vuelven a organizarse luego de ser orientados por un campo, tarda en disminuir a causa del movimiento térmico con respecto a su valor inicial, este tiempo se le conoce como tiempo de relajación.

A pesar de que la polarización dipolar es propia de gases y líquidos polares, puede observarse también en las sustancias orgánicas sólidas polares, en estos casos la polarización no se debe por lo general al giro de la molécula misma, sino al giro de los radicales que hay en ella con respecto a la molécula, se le conoce como dipolar de radicales y un ejemplo claro de sustancia con este tipo de polarización es la **celulosa**, donde la polaridad se explica por la existencia en ella de grupos hidroxilos OH.

La polarización iónica de relajación es característica de los cristales inorgánicos y en algunas sustancias iónicas cristalinas con empaquetamiento no denso de los iones, donde estos iones débilmente ligados de la sustancia por acción del campo eléctrico externo, reciben además de impulsos térmicos caóticos otros adicionales en la dirección del campo.

Al eliminarse el campo, el desplazamiento de los iones se va debilitando y a medida que la temperatura aumenta, la polarización iónica de relajación se intensifica.

La polarización electrónica de relajación se produce por causa de los electrones en exceso (o en defecto) o huecos excitados por la energía térmica. Está polarización, característica principalmente de los dieléctricos con alto índice de refracción, gran campo propio y conductividad eléctrica por electrones como por ejemplo el bióxido de titanio con impurezas de Nb^{+5} , Ca^{+2} y Ba^{+2} ; el bióxido de titanio con huecos o lagunas aniónicas e impurezas de iones Ti^{+3} ; y una serie de compuestos basados en óxidos de metales de valencia variable, como el titanio, niobio y bismuto.

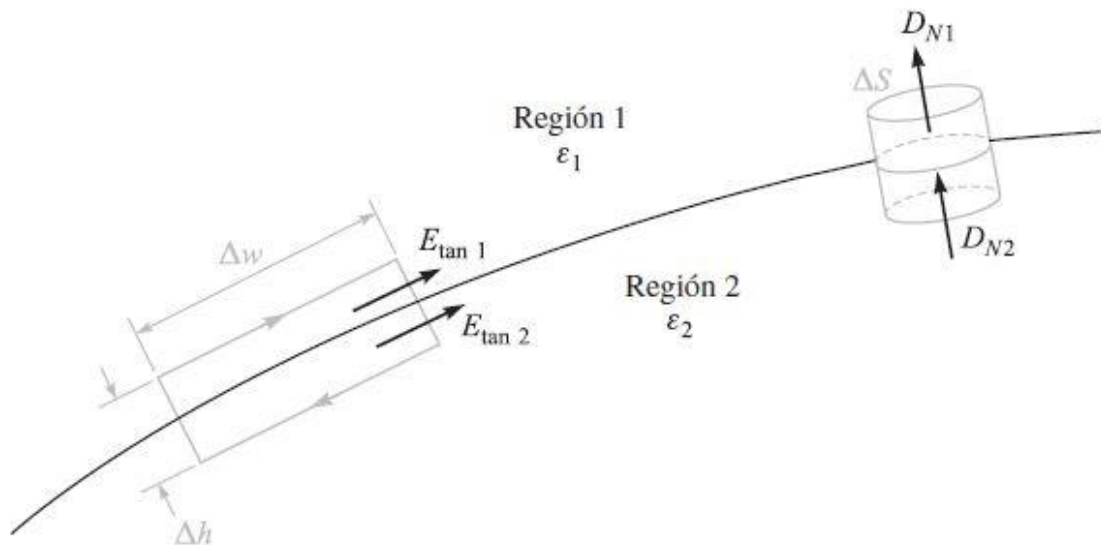
Las sustancias que cuentan con polarización electrónica de relajación pueden obtener un alto valor de la constante dieléctrica, además existe un máximo en la dependencia de ϵ con respecto a la temperatura.

Existen dos tipos de polarización adicionales, la polarización por migración (C_m , Q_m y r_m - Figura 3) que se manifiesta en los sólidos con estructura no homogénea,

cuando las heterogeneidades son macroscópicas y existen impurezas. Como causantes de este tipo de polarización las inclusiones conductoras y semiconductoras que hay en algunos dieléctricos técnicos, las capas de distinta conductividad, etc. La polarización por migración se produce con frecuencias bajas e implica una dispersión considerable de energía eléctrica.

Cuando en un campo eléctrico se introducen materiales no homogéneos, sucede lo que se conoce como condiciones de frontera [2] Figura 4 los electrones libres y los iones de las inclusiones conductoras y semiconductoras se desplazan dentro de los límites de cada material formando grandes zonas polarizadas, dicha acumulación de carga (donde los iones se mueven lentamente), puede producirse en los límites de separación de las capas y en las capas anexas a los electrodos.

Figura 4. Frontera entre dieléctricos perfectos con permitividades ϵ_1 y ϵ_2 . Se muestra la continuidad de la densidad de flujo eléctrico D_N por medio de la superficie gaussiana, en el lado derecho y la continuidad de la intensidad de campo eléctrico tangencial E_{tan} por medio de la integral de línea a lo largo de una trayectoria cerrada a la izquierda.



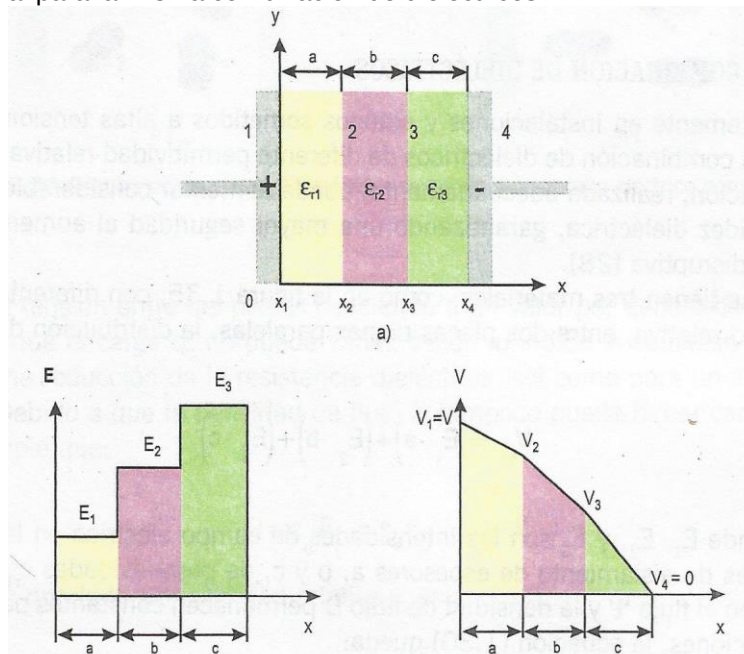
Fuente: W. H. Hayt Jr. and J. A. Buck, *Teoría electromagnética*, Séptima ed. 2006. [2]

Y la polarización espontánea (C_{esp} , Q_{esp} y r_{esp} - Figura 3) existente en los materiales ferroeléctricos, en este tipo de polarización a diferencia de las otras, cuando la intensidad del campo externo adquiere cierto valor, se produce la saturación del material y al aumentar más allá el campo del valor de saturación no provoca ya aumento de la intensidad de polarización. En la polarización espontánea la constante dieléctrica depende de la intensidad del campo eléctrico, en la dependencia de la permitividad dieléctrica con respecto a la temperatura se observan uno o varios máximos y en presencia de campos eléctricos alternos, los

materiales con este tipo de polarización se caracterizan por una considerable disipación de la energía, lo que se traduce en desprendimiento de calor.

Como síntesis, en los dieléctricos sólidos son posibles todos los tipos de polarización, además, el uso de varios tipos de dieléctricos produce que el análisis de las características de dichos materiales sea más complejo aún, al utilizar varias capas de aislantes con distintas constantes dieléctricas, la inclusión de materiales conductores y semiconductores con dieléctricos, las impurezas de materiales, el uso de materiales laminares o estratificados, los límites de separación entre las capas y en las capas anexas a los electrodos, entre otras características de los dieléctricos sólidos comúnmente empleados en máquinas eléctricas forman grandes zonas polarizadas donde se pueden producir una acumulación importante de cargas (a dicho proceso se le conoce como polarización por migración).

Figura 5. Combinación de dieléctricos sometidos a una diferencia de tensión; Intensidad de campo eléctrico y potencial para la misma combinación de dieléctricos



Fuente: H. Torres Sánchez, *Aislamientos Eléctricos*, Primera ed. Bogotá, D.C, 2011.[5]

1.3. CONSTANTE DIELECTRICA:

La constante dieléctrica de los sólidos puede tomar diferentes valores, esto de acuerdo con las peculiaridades estructurales del dieléctrico bajo estudio, como se aprecia en los párrafos anteriores cada material debido a su tipo de polarización, el estado en el que se encuentre y las características intrínsecas del mismo varía ampliamente su comportamiento frente a la temperatura, la humedad y la frecuencia de trabajo.

Para sólidos complejos, formados por la mezcla de componentes con distintas constantes dieléctricas, juega un papel importante las condiciones de frontera de cada material, en primera aproximación si las diferencias entre las permitividades ε de los componentes no son demasiado grandes (menos del 50% de diferencia entre la permitividad de los materiales), basándose en la ley logarítmica de mezcla se tiene:

$$\varepsilon^x = \theta_1 \varepsilon_1^x + \theta_2 \varepsilon_2^x \quad (1.1)$$

Esta ley de mezcla en su expresión más general es aplicable al cálculo de propiedades diversas como por ejemplo la conductividad térmica, el índice de refracción, entre otras[1].

En la ecuación (1.1) ε , ε_1 y ε_2 son respectivamente las constantes dieléctricas de la mezcla y de los dos componentes aislados, θ_1 y θ_2 son las concentraciones en volumen de los componentes que satisfacen la correlación $\theta_1 + \theta_2 = 1$ (donde θ_1 y θ_2 significan la concentración volumétrica porcentual de cada material), y x es una constante que caracteriza la distribución de los componentes y que toma los valores desde +1 hasta -1. En el caso en que suceda una conexión en paralelo de los componentes la ley de la mezcla toma una variante de distribución $x = +1$ y la fórmula toma la forma:

$$\varepsilon = \theta_1 \varepsilon_1 + \theta_2 \varepsilon_2 \quad (1.2)$$

Si los componentes están conectados en serie, el valor de x es igual a -1 por lo cual

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{\theta_1}{\varepsilon_1} + \frac{\theta_2}{\varepsilon_2} \quad (1.3)$$

Cuando los dos tipos de material están distribuidos caóticamente, que suele ocurrir en muchos dieléctricos como por ejemplo en los cerámicos, el valor de distribución x tiende a cero y la ecuación después de efectuar la diferenciación con respecto a x es igual a:

$$\ln \varepsilon = \theta_1 \ln \varepsilon_1 + \theta_2 \ln \varepsilon_2 \quad (1.4)$$

A partir de esta ecuación se puede encontrar el coeficiente de variación de la constante dieléctrica con la temperatura del dieléctrico ($CT\varepsilon$), que es la variación relativa de la constante dieléctrica cuando la temperatura aumenta en un grado, hallando la diferencial de la ecuación con respecto a la temperatura:

$$\frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\theta_1}{\varepsilon_1} \cdot \frac{d\varepsilon_1}{dt} + \frac{\theta_2}{\varepsilon_2} \cdot \frac{d\varepsilon_2}{dt} \quad (1.5)$$

Esto quiere decir que el análisis de la variación de la constante dieléctrica con la temperatura del dieléctrico complejo es la suma de las concentraciones en volumen de los componentes del dieléctrico complejo por la variación de la constante dieléctrica con la temperatura de cada material:

$$CT\varepsilon = \theta_1 CT\varepsilon_1 + \theta_2 CT\varepsilon_2 \quad (1.6)$$

Todos los procesos de polarización, por el desplazamiento de las cargas que ocurren en los dieléctricos hasta el estado de equilibrio, crean corrientes de polarización o también llamadas de desplazamiento. Las corrientes de desplazamiento durante las polarizaciones de tipo electrónica e iónica duran un tiempo tan corto que por lo general no son registradas en los instrumentos de medida. El caso de las corrientes de desplazamiento causadas por polarizaciones retardadas es totalmente diferente, son llamadas también corrientes de adsorción; cuando la tensión a la que se somete el dieléctrico es constante, estas corrientes de adsorción sólo pasan invirtiendo su dirección, en los instantes en que se conecta y desconecta la tensión; cuando la tensión es variable, las corrientes de adsorción se producen durante todo el tiempo en que el material permanece en el campo eléctrico. Teniendo en cuenta que los dieléctricos no son ideales, las presencias de algunas cargas libres ocasionan corrientes de fuga. Por lo tanto, la densidad total de la corriente en un dieléctrico es igual a la suma de densidades de las corrientes de fuga y de desplazamiento[4].

1.4. CONDUCTANCIA:

La conductancia de los sólidos depende del movimiento de los iones del dieléctrico, del movimiento de los iones de las impurezas impregnadas en el material, y sobre todo se debe tener en cuenta que las corrientes de conducción se deben en principal medida, a la presencia de electrones libres en el material.

Un aspecto importante de ser analizado es que el proceso de paso de la corriente eléctrica a través de un dieléctrico sólido, los iones de impurezas que hay en él pueden eliminarse parcialmente, desprendiéndose en los electrodos.

En cada caso en particular, dependiendo las propiedades de cada dieléctrico, el problema de cuál es el mecanismo de la conductancia se resuelve basándose en los datos acerca de la energía de activación del portador de carga. En los dieléctricos sólidos de estructura iónica, la conductancia se debe principalmente a la traslación de los iones que se liberan por la acción de las fluctuaciones del movimiento térmico. A bajas temperaturas se mueven los iones sujetos débilmente, en particular los iones de las impurezas. Cuando las temperaturas son altas, se liberan también algunos iones de los nudos de la red cristalina propia de este tipo de dieléctricos.

En el caso de los dieléctricos con red atómica o molecular, la conductancia únicamente depende de la existencia de impurezas, y su conductividad es muy pequeña.

La conductividad en el caso de los dieléctricos sólidos a una temperatura T determinada se calcula por medio de la relación entre la velocidad de equilibrio y la intensidad del campo eléctrico

$$\frac{v}{E} = u \quad (1.7)$$

También llamada movilidad de los portadores de carga medida en el SI en $m^2/(s.V)$. Para la conductancia iónica el número de iones disociados y su movilidad se encuentran en dependencia exponencial con respecto a la temperatura:

$$n_0 = n_{0m} \exp\left(-\frac{\omega_d}{kT}\right) \quad (1.8)$$

$$u = u_m \exp\left(-\frac{\omega_t}{kT}\right) \quad (1.9)$$

n_0 es el número de partículas en la unidad de volumen, también conocido como concentración de portadores, u representa nuevamente la movilidad de los portadores de carga, n_{0m} y u_m representan los valores respectivos anteriormente descritos correspondientes al valor de $T = \infty$; ω_d es la energía del proceso de disociación en donde los enlaces de componentes químicos se separan en moléculas más pequeñas hasta formar iones; ω_t es la energía de traslación de un ion, que se define como el paso de una posición en desequilibrio a otra.

La expresión general de conductividad está dada por:

$$\gamma = n_0 q v / E \quad (1.10)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores ((1.8)(1.9)(1.10)) y nombrando el coeficiente $A = n_{0m} q u_m$ (q es la carga del portador) se obtiene que:

$$\gamma = A \exp(-b/T) \quad (1.11)$$

Donde $b = (\omega_d + \omega_t)/k$.

Esto indica que cuanto mayores sean los valores de la energía de disociación y de traslación, así mismo variará la conductividad con la temperatura [4].

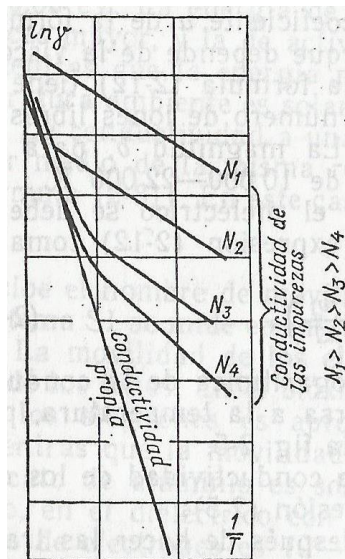
El valor numérico de b se halla partiendo de la relación obtenida experimentalmente, entre la conductividad y el valor inverso de la temperatura:

$$b = \frac{\Delta \ln \gamma}{\Delta(1/T)} \quad (1.12)$$

Δ representa los intervalos de variación de las magnitudes sobre los ejes de la gráfica.

Generalmente el valor de la energía de disociación de los iones es mucho mayor a la energía de traslación de los mismos ($\omega_d \gg \omega_t$), por lo tanto la conductividad cuando varía la temperatura depende principalmente de la concentración de los portadores.

Figura 6. Componentes, propia y de las impurezas, de la conductividad de un dieléctricos, para distintos contenidos de impurezas (N es la concentración de impurezas).



Fuente: N. P. Bogoróditski, V. V. Pásinkov, and B. M. Taréiev, *Materiales electrotécnicos*. 1979.[1]

La conductividad de los dieléctricos sólidos porosos aumenta si tienen humedad, aunque sea en cantidades insignificantes.

La desecación de los materiales eleva la resistividad de los mismos, pero vuelve a disminuir cuando se encuentran en un medio húmedo, la conductividad superficial depende de la presencia de humedad o de otras impurezas en la superficie del dieléctrico. Con siquiera una pequeña capa de humedad sobre la superficie del dieléctrico se pone en manifiesto una conductancia apreciable, determinada principalmente por el espesor de la capa de humedad, cabe señalar que la resistencia de la película de humedad adsorbida tiene una relación inherente con el

material, la conductancia superficial suele estudiarse como una propiedad del dieléctrico mismo [5].

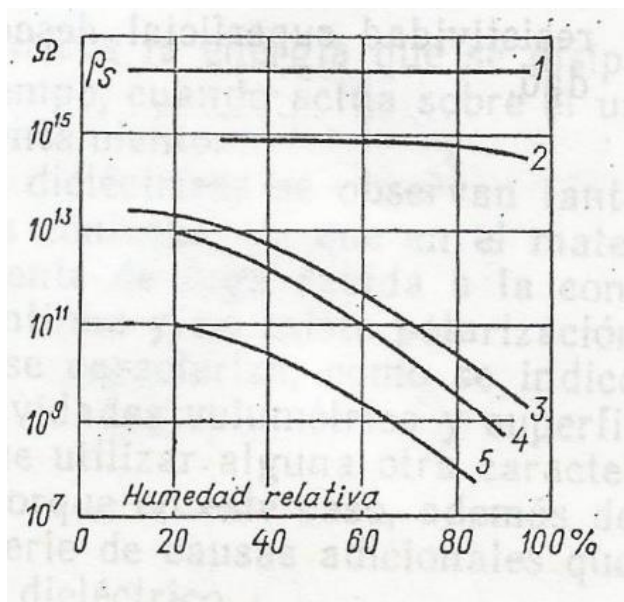
Tabla 1. Valores de la resistividad volumétrica de los dieléctricos sólidos porosos a distinta humedad relativa del aire y temperatura.

Material	Valor de ρ , en $\Omega \cdot m$, siendo la humedad relativa del aire del		
	70% ($t = 20^\circ C$)	0% ($t = 100^\circ C$)	0% ($t = 20^\circ C$)
Mármol	$10^6 - 10^8$	$10^{10} - 10^{12}$	$10^{12} - 10^{14}$
Madera	$10^6 - 10^7$	$10^{10} - 10^{11}$	$10^{11} - 10^{12}$
Fibra	$10^6 - 10^7$	$10^8 - 10^9$	$10^{11} - 10^{12}$

Fuente: N. P. Bogoróditski, V. V. Pásinkov, and B. M. Taréiev, *Materiales electrotécnicos*. 1979.[1]

La conductividad superficial es tanto más baja mientras menor es la polaridad de la substancia y más limpia y mejor pulida está la superficie del dieléctrico.

Figura 7. Dependencia de la resistividad superficial, con respecto a la humedad relativa, en diversos dieléctricos (1. Ceresina; 2. Cera de abejas; 3. Vidrio alcalino; 4. Fenoplasto; 5. Mármol).



Fuente: N. P. Bogoróditski, V. V. Pásinkov, and B. M. Taréiev, *Materiales electrotécnicos*. 1979.[1]

La superficie del dieléctrico y su adsorción de humedad depende estrechamente de la humedad relativa del medio ambiente. **La humedad relativa es un factor importante, determinante de la conductividad superficial del dieléctrico.** Una disminución brusca de la resistencia superficial se observa cuando la humedad relativa sobrepasa el 70-80%.

Tabla 2. Resistividad superficial de algunos materiales cuando la humedad relativa es del 70%

Dieléctrico	ρ_s , con la superficie sucia [Ω]	ρ_s , con la superficie limpia [Ω]
Vidrio de ventana	$2 \cdot 10^8$	10^{11}
Cuarzo fundida	$2 \cdot 10^8$	10^{13}
Micalex	10^9	10^{13}

Fuente: N. P. Bogoróditski, V. V. Pásinkov, and B. M. Taréiev, *Materiales electrotécnicos*. 1979.[1]

A pesar de tener modelos para conocer la conductividad de los materiales, existen casos particulares donde dichos modelos cambian un poco, esto por supuesto, depende de cada material bajo estudio, pero en términos generales pueden ser usados. Cuando las intensidades del campo eléctrico son superiores a $10\text{-}100 \text{ MV/m}$, existen materiales donde la dependencia de la conductividad con respecto a la intensidad del campo puede ser expresada de manera distinta a como se mostró anteriormente (1.11) por ejemplo en los dieléctricos cristalinos se produce polarización electrónica que crece rápidamente al aumentar la intensidad del campo presentándose divergencias de la ley de Ohm, en estos casos la representación de la dependencia es expresada por medio de la fórmula empírica de Poole:

$$\gamma_E = \gamma \exp \beta E \quad (1.13)$$

E representa la intensidad del campo; γ , la conductividad en la región en que γ no depende de E ; β , un coeficiente que caracteriza el material.

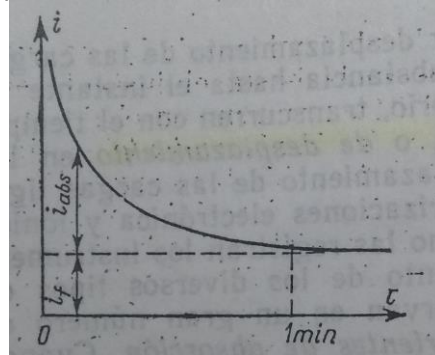
Cuando las intensidades del campo se aproximan a los valores de disrupción, la fórmula más exacta para describir este suceso es la fórmula e Ya. I. Frénkel:

$$\gamma_E = \gamma \exp(\beta_1 \sqrt{E}) \quad (1.14)$$

La Figura 8 es una muestra de la corriente en función del tiempo, una vez que la corriente debida a los fenómenos de polarización pasa por el dieléctrico vemos que, a dependencia del tiempo, la única corriente presente es la de fuga, se aprecia que las corrientes de polarización es un aspecto importante en la medición de la conductividad del dieléctrico, por ejemplo en casos donde se realizan análisis de la resistencia de aislamiento por medio de un megóhmetro se debe mantener la prueba durante 1 minuto para eliminar el efecto capacitivo, otro ejemplo es en la prueba del índice de polarización (PI) donde se deben tomar las mediciones de resistencia del aislamiento al minuto y a los diez minutos, y la prueba de absorción dieléctrica (DAR), en la cual se deben tomar las mediciones de resistencia del aislamiento al minuto y a los tres minutos, demostrando que en las pruebas de diagnóstico, al mantener poco tiempo bajo tensión la muestra de dieléctrico, la medición arrojará valores erróneos, evidenciando valores grandes, al tener en cuenta las corrientes de polarización y de fuga.

La conductividad de los dieléctricos cuando la tensión es constante está determinada por la corriente de fuga, teniendo en cuenta el desprendimiento y la neutralización de las cargas en los electrodos, en caso de que la tensión sea variable no sólo está determinada por la corriente de fuga, sino también por las componentes activas de las corrientes de polarización.

Figura 8. Variación de la corriente que pasa a través del material dieléctrico en función del tiempo. i_{abs} (Corriente de absorción-de polarización); i_f (corriente de fuga).



Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

La resistencia verdadera de un dieléctrico conocida como resistencia de aislamiento (R_{ais}) está determinada teóricamente por:

$$R_{aisl} = \frac{U}{i - \sum i_p} = \frac{U}{i_f} \quad (1.15)$$

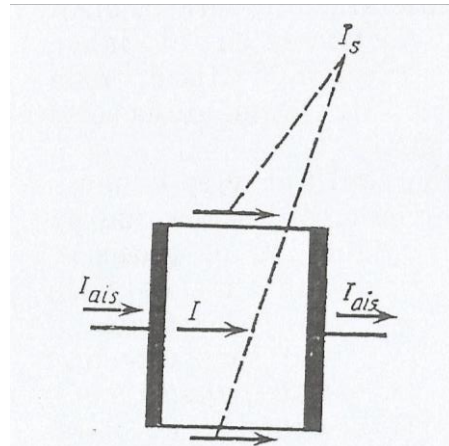
Donde i es la corriente; U , es la tensión aplicada; $\sum i_p$ es la suma de las corrientes de polarización e i_f , corriente de fuga. Sin embargo, como se analiza en el presente capítulo, el valor de resistividad de todo dieléctrico, así como los demás valores eléctricos no es exactamente determinado y mucho menos constante, depende de varios factores del ambiente, entre ellos la presencia de impurezas, la humedad, la temperatura, el valor y el tiempo de la tensión aplicada, etc.

Como fue comentado anteriormente, las corrientes de polarización son difíciles de medir, con lo cual la resistencia de aislamiento se calcula generalmente como el cociente entre la tensión y la corriente, medida al cabo de un minuto de haber sido conectada la tensión, la cual se toma como la corriente de fuga.[1]

En especial, en los materiales aislantes solidos debe de distinguirse entre la conductancia volumétrica o transversal y la conductancia superficial, siendo la conductancia total del dieléctrico sólido G_{aisl} , correspondiente a la magnitud inversa R_{aisl} , igual a la suma de las conductancias volumétrica y superficial.

Cabe resaltar que la conductancia volumétrica del aislamiento G determina cuantitativamente la posibilidad del paso de la corriente por el espesor del aislamiento, y la conductancia superficial G_s , como su nombre lo indica, determina la posibilidad del paso de la corriente por la superficie del aislamiento y caracteriza la presencia de humectación y contaminación en la capa superficial del dieléctrico.

Figura 9. Corrientes volumétrica (I) y superficial (I_s) de escape que pasa por el sector de aislamiento (esquemáticamente).



Fuente: B. M. Taréiev, *Física de los materiales dieléctricos*. 1978. [4]

Así como la resistividad, la conductancia de los materiales aislantes depende del estado de la sustancia, la humedad y temperatura del medio ambiente e incluso la intensidad del campo. Cuando los dieléctricos se encuentran bajo tensión durante un largo periodo, la corriente que pasa por ellos puede disminuir o aumentar con el tiempo de exposición, la disminución de la corriente con el tiempo muestra que la conductancia era debido a impurezas extrañas en el material y a la absorción de humedad del ambiente, por el contrario, cuando la corriente aumenta con el tiempo, quiere decir que en ella participan cargas pertenecientes a elementos estructurales del material dieléctrico en consideración y producto de la tensión aplicada se desarrolla un proceso irreversible de envejecimiento, presentándose una disminución de la constante dieléctrica donde poco a poco se causa la rotura del material, o en otras palabras, la perforación del dieléctrico.

1.5. PÉRDIDAS DIELECTRICAS:

Es la energía que se disipa en el dieléctrico en el tiempo cuando sobre él un campo eléctrico provoca su calentamiento, estas pérdidas se manifiestan tanto si la tensión es alterna como si es continua, ya que se pone en manifiesto la corriente de fuga debido a la conductancia del material. Cuando la corriente es continua y no existe una polarización periódica, la calidad del material dieléctrico se caracteriza por los valores de resistividad, tanto volumétrica como superficial. En cambio, si la tensión

es alterna se debe utilizar otras características para medir la calidad del material ya que además de la corriente de fuga aparecen una serie de causas adicionales que se traducen en pérdidas de energía.

Las pérdidas de energía producidas en tensión alterna se caracterizan en términos de la potencia disipada referida a la unidad de volumen, también es conocido como **pérdidas específicas**, donde en conjunto con el ángulo de pérdidas dieléctricas y la tangente de este ángulo se puede conocer el estado del dieléctrico.

El ángulo de pérdidas dieléctricas δ se conoce como el ángulo complementario al desfase φ entre la corriente y la tensión en el circuito del dieléctrico, en el caso de un dieléctrico perfecto, el vector de la corriente adelantará al vector de a tensión en 90° y el ángulo δ tendrá un valor de 0. Mientras mayor sea el ángulo de pérdidas dieléctricas δ y su función $\tan \delta$, y menor sea el ángulo de desfase φ , mayor será la potencia disipada en el dieléctrico en forma de calor. Si las pérdidas dieléctricas en el material aislante son excesivamente grandes, se provoca un calentamiento intenso del mismo y pueden ocasionar su destrucción térmica.

En los materiales dieléctricos además de las pérdidas por corrientes de fuga y a la polarización retardada, se producen pérdidas que influyen mucho en las propiedades del material, estas pérdidas se originan por la presencia de inclusiones extrañas, conductoras y semiconductoras, aisladas entre sí, impurezas de carbono, óxidos de hierro, entre otras, importantes incluso siendo muy pequeñas. Por ejemplo, en caso de tensiones altas, las pérdidas en los materiales dieléctricos son debidas a la ionización de inclusiones gaseosas que hay en él, desarrolladas con mayor intensidad cuando las frecuencias también son altas[1].

En dispositivos donde la tensión y la frecuencia del campo aplicado son altos, las pérdidas dieléctricas adquieren un valor importante, ya que la magnitud de las pérdidas es proporcional al cuadrado de la tensión y de la frecuencia aplicada. Los materiales que deben utilizarse para este tipo de condiciones, deben tener valores pequeños del ángulo de pérdidas y de la constante dieléctrica, porque de lo contrario, la potencia disipada en el dieléctrico puede tomar valores superiores a las tolerables.

Las pérdidas dieléctricas pueden dividirse en cuatro tipos principales (teniendo en cuenta sus particularidades y la naturaleza física) expuestos en la siguiente tabla:

Tabla 3. Clasificación de las pérdidas en los dieléctricos.

Clasificación de las pérdidas en los dieléctricos		
Pérdidas dieléctricas	Peculiaridades principales	Tipos de dieléctricos
Por polarización: de relajación (dipolares y iónicas)	Existencia de un máximo de la tangente del ángulo de pérdidas, dependiente de la	Dieléctricos dipolares líquidos y sólidos, iónicos con empaquetamiento no denso

Clasificación de las pérdidas en los dieléctricos		
Pérdidas dieléctricas	Peculiaridades principales	Tipos de dieléctricos
	temperatura y de la frecuencia	
Por resonancia	Existencia de un máximo muy acusado a una frecuencia determinada (superior a 10^{13} Hz) cuya posición no depende de la temperatura	Todos los tipos de dieléctricos
Por polarización espontánea	Las pérdidas son grandes: Por encima del punto de Curie se observa una disminución brusca.	Ferroeléctricos
Debidas a la conductancia	Las pérdidas son independientes de la frecuencia (la tangente del ángulo de pérdidas disminuye con la frecuencia siguiendo una hipérbola) y aumentan considerablemente con la temperatura	Dieléctricos líquidos y sólidos con gran conductancia
Por ionización	Se observan cuando las tensiones son mayores que la de ionización.	Dieléctricos gaseosos y sólidos con inclusiones gaseosas
Debidas a la homogeneidad de la estructura	Las pérdidas dependen de un modo complejo de los componentes del dieléctrico y de las impurezas casuales	Dieléctricos no homogéneos.

Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

Las sustancias sólidas tienen composiciones y estructuras muy diversas y en ellas son posibles todos los tipos de pérdidas dieléctricas, para analizar fácilmente las pérdidas en los sólidos, se pueden dividir en cuatro grupos principales:

- Dieléctricos de estructura molecular.
- Dieléctricos de estructura iónica.
- Ferroeléctricos.
- Dieléctricos de estructura no homogénea.

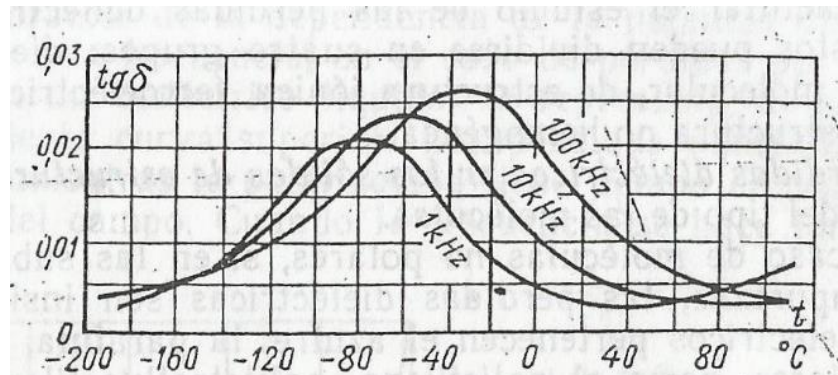
Los dieléctricos de estructura molecular difieren en sus pérdidas dependiendo del tipo de las moléculas.

En el caso de moléculas no polares, y en la no existencia de impurezas, las pérdidas dieléctricas son insignificantes, ejemplos de este tipo de dieléctricos son el azufre, la parafina, los polímeros no polares como el polietileno, politetrafluoroetileno, poliestireno, entre otros que se emplean como dieléctricos para alta frecuencia por sus virtudes con respecto a pérdidas.

En el caso de moléculas polares, son principalmente sustancias orgánicas, materiales basados de celulosa (papel, cartón, etc.), polímeros polares como el polimetacrilato de metilo (Vidrio orgánico), poliamidas (caprón y otras) y poliuretanos, materiales derivados del caucho (ebonita), resinas fenolformaldehído (baquelita y otras), ésteres de celulosa (acetato de celulosa), todos estos materiales con un tipo de polarización dipolar de relajación con grandes pérdidas.

Las pérdidas en estos tipos de dieléctricos dependen mucho de la temperatura, a ciertas temperaturas se manifiestan un máximo y un mínimo de pérdidas, el crecimiento luego del mínimo se debe por la conductancia transversal del material. En la siguiente figura se representan las curvas de $\tan \delta$ en función de la temperatura para el papel [1], [4].

Figura 10. Valores de $\tan \delta$, en función de la temperatura, para el papel seco sometido a distintas frecuencias.



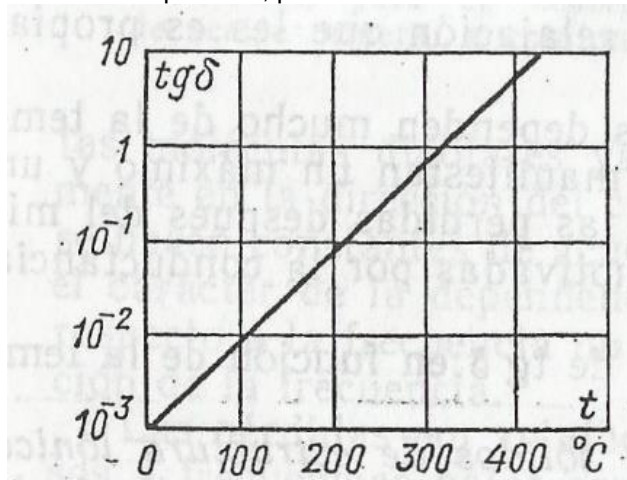
Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

Las pérdidas dieléctricas de los sólidos con estructura iónica están relacionadas con el empaquetamiento de los iones en la red. Las sustancias con estructura cristalina como el corindón (Al_2O_3) usado para la fabricación moderna de cerámica electrotécnica y en la ultraporcelana, tienen un empaquetamiento denso, donde en ausencia de impurezas que deformen la red, las pérdidas dieléctricas son muy pequeñas, otro ejemplo de este tipo de sustancias es la sal gema, donde los cristales puros tienen pérdidas insignificantes, pero a la menor impureza aumentan de 2 a 3 órdenes.

Para sustancias con empaquetamiento no denso de los iones pertenecen materiales cristalinos caracterizados por polarización de relajación, eso significa que se elevan las pérdidas dieléctricas, ejemplo de este tipo de sustancias son la mullita utilizada para la producción de porcelana para aisladores; la cordierita o yolita, componente de la cerámica con coeficiente de dilatación pequeño; varios elementos que se utilizan para la composición de la cerámica refractaria, entre otras. Al tener la polarización de relajación como característica principal, dicha polarización aumenta

en dependencia con la temperatura, no existe un máximo de $\tan \delta$ teniendo un carácter exponencial [1], [4].

Figura 11. $\tan \delta$ en función de la temperatura, para la cerámica a base de titanio, siendo $f = 50\text{Hz}$



Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

Las pérdidas dieléctricas en los vidrios inorgánicos (substancias amorfas de estructura iónica) van relacionadas al fenómeno de polarización y existencia de conductividad.

Para el caso de los vidrios se deben distinguir dos tipos de perdidas:

Las pérdidas que dependen poco de la temperatura y que aumentan de modo directamente proporcional a la frecuencia ($\tan \delta$ no depende de la frecuencia), perdidas dependientes de la polarización de relajación y característica en todos los vidrios técnicos.

Y las pérdidas que aumentan considerablemente con la temperatura según la ley de función exponencial y dependen poco de la frecuencia ($\tan \delta$ disminuye al crecer la frecuencia), éstas se originan por el movimiento de los iones débilmente enlazados y son consideradas pérdidas causadas por la conductividad, apareciendo a temperaturas superiores a 50-100 °C.

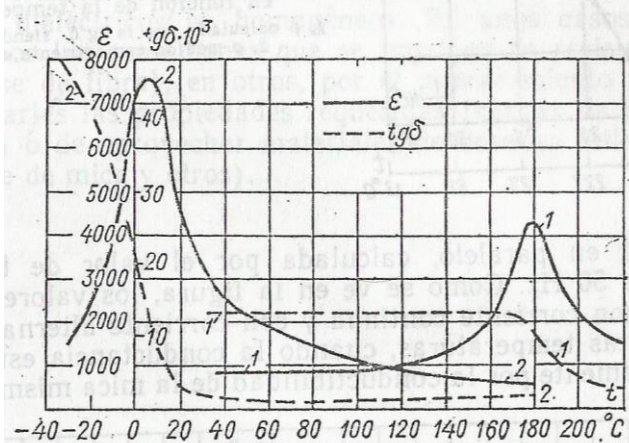
Cuanto mayor sea la conductancia transversal del vidrio, más baja es la temperatura a la que se observa el aumento de $\tan \delta$.

El tratamiento térmico (también llamado como recocido o temple) influye considerablemente en el ángulo de pérdidas dieléctricas del vidrio porque cambia su estructura interna.

En el caso de los ferroeléctricos, son substancias que se caracterizan por tener polarización espontánea, dicha polarización se manifiesta en un intervalo de

temperatura determinado que llega hasta el punto de Curie, el cual es la temperatura en la cual la permitividad dieléctrica tiene su punto máximo, luego del punto de Curie se pierden las propiedades ferroeléctricas del material, es especial la dependencia de ϵ con respecto a la intensidad del campo eléctrico, desapareciendo la polarización espontánea.

Figura 12. Variación de $\tan \delta$ y la constante dieléctrica, en función de las temperatura, para probetas de titanata de bario con distintos aditivos (1 y 2 son los números de las probetas)



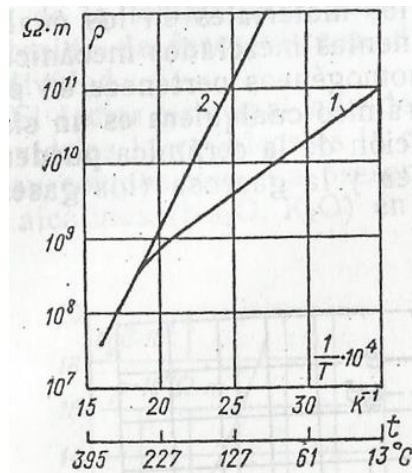
Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

Las sustancias sólidas de estructura no homogénea son aquellas en las cuales intervienen por lo menos dos componentes mezclados mecánicamente entre si, por ejemplo y en primer lugar se tiene a la cerámica, un material complejo, en su composición se puede distinguir una fase cristalina, vítrea y gaseosa por los gases que hay en los poros cerrados.

En el caso de la cerámica, las pérdidas dieléctricas dependen de la relación entre las fases cristalina y vítrea, la fase gaseosa solo motiva la elevación de las pérdidas cuando las intensidades de campo son altas, debido a la ionización. Todo depende de su proceso de fabricación, si se formaron inclusiones semiconductoras, de la humedad adsorbida y de la existencia de porosidades abiertas.

Otro ejemplo de sustancias no homogéneas es la mica, que posee una estructura laminada, el uso de intercalaciones semiconductoras en las láminas produce un aumento de $\tan \delta$ cuando la tensión es alterna y de baja frecuencia. La siguiente grafica muestra la dependencia de la resistividad volumétrica de la mica moscovita con respecto a la temperatura, para una medición de corriente continua y la resistividad óhmica equivalente para corriente alterna a 50 Hz.

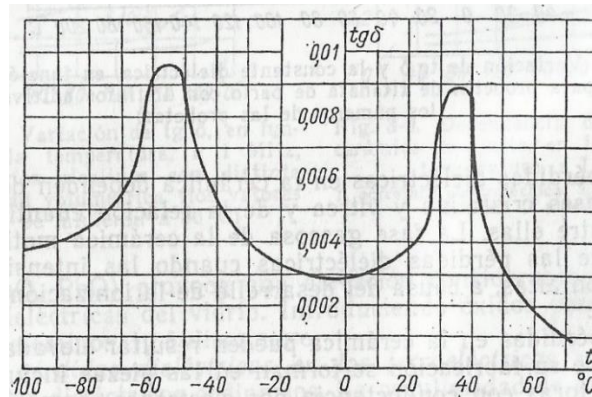
Figura 13. Valores de la resistividad volumétrica de la mica moscovita en función de la temperatura (1. ρ calculado por la $\tan \delta$, siendo $f = 50\text{Hz}$; 2. ρ medido con corriente continua)



Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

El papel impregnado también es considerado como sustancia no homogénea, las pérdidas dieléctricas del papel dependen de las propiedades de ambos componentes, de la relación cuantitativa entre ellos y de las inclusiones de aire.

Figura 14. Dependencia de $\tan \delta$, con respecto a la temperatura, en el papel para condensador impregnado (80% de colofonia y 20% de aceite para transformador).



Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

Como puede apreciarse en la Figura 14, la curva tiene dos máximos, el primero a bajas temperaturas caracteriza las pérdidas de tipo dipolar radial del papel mismo, de la celulosa, y el segundo a temperaturas más altas se debe a las pérdidas por relajación dipolar del compuesto impregnante.

1.6. PERFORACIÓN DE LOS DIELECTRICOS:

Cuando un dieléctrico está situado en un campo eléctrico, sus propiedades aislantes se pierden si la tensión del campo supera cierto valor crítico, a este fenómeno se le conoce como perforación o ruptura del dieléctrico, es la alteración de su rigidez eléctrica y está relacionado con procesos eléctricos que ocurren en el dieléctrico en presencia de un campo intenso, ocasionando el aumento local e intenso de la densidad de corriente en el instante de la disrupción [4].

La tensión a la cual se produce la perforación se le conoce como tensión disruptiva U_{disr} y suele medirse en kilovoltios, el valor de la intensidad del campo a la cual se produce la perforación se llama rigidez dieléctrica E_{disr} y se define como la tensión disruptiva referida al espesor del dieléctrico en el punto de la perforación media en kV/mm o en MV/m .

$$E_{disr} = U_{disr}/h \quad (1.16)$$

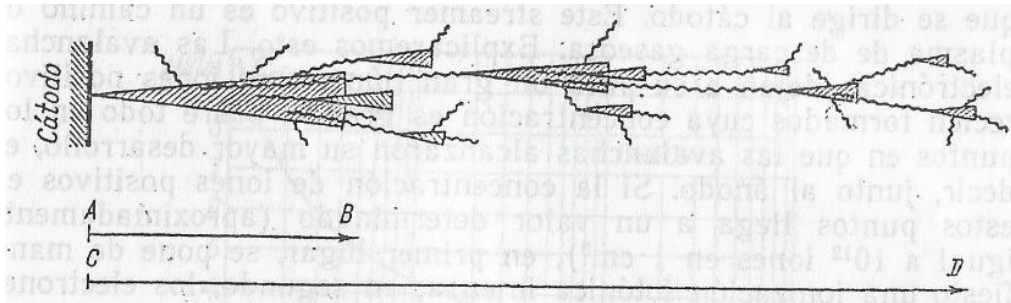
(h es el espesor del dieléctrico).

La perforación en caso de un gas se determina por los fenómenos de ionización por choque y fotónica, esto quiere decir un fenómeno puramente eléctrico, en el caso de los dieléctricos líquidos se produce como resultado de procesos térmicos de ionización y presencia de impurezas, y en el caso de los sólidos puede deberse tanto a procesos eléctricos como térmicos que se producen bajo la influencia del campo al cual están sometidos.

Las perforaciones térmicas son consecuencia de la disminución de la resistencia óhmica del dieléctrico debido a la influencia del calentamiento en el campo, de esta manera se aumenta la corriente activa y continúa calentándose el dieléctrico hasta producirse la ruptura térmica, en el caso que la tensión actúe durante mucho tiempo, la perforación puede ser provocada por procesos electroquímicos desarrollados bajo la influencia del campo.

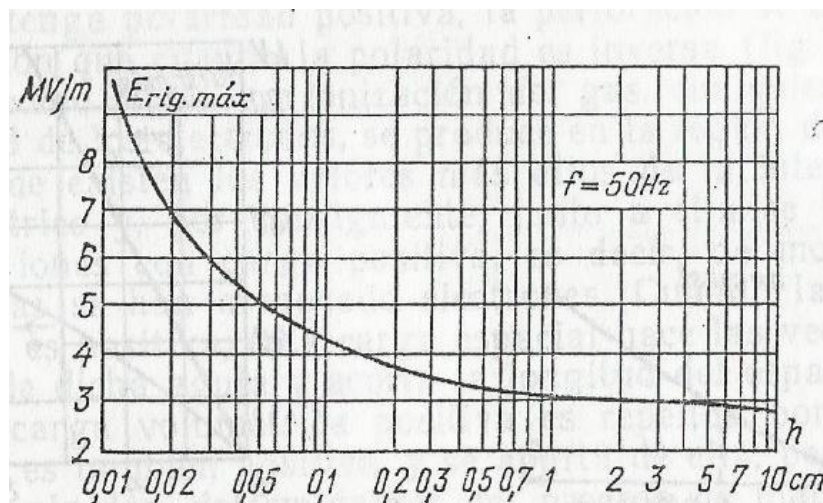
Al aplicarse tensión alterna se refiere a los valores numéricos de la tensión de disrupción como eficaz o efectiva.

Figura 15. Representación esquemática de la propagación en la perforación de un gas.



Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

Figura 16. Variación de la rigidez dieléctrica del aire en dependencia de la distancia entre los electrodos en un campo homogéneo.



Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

Figura 17. Variación de la tensión disruptiva del aire, en función de la distancia entre los electrodos, para distintas frecuencias.

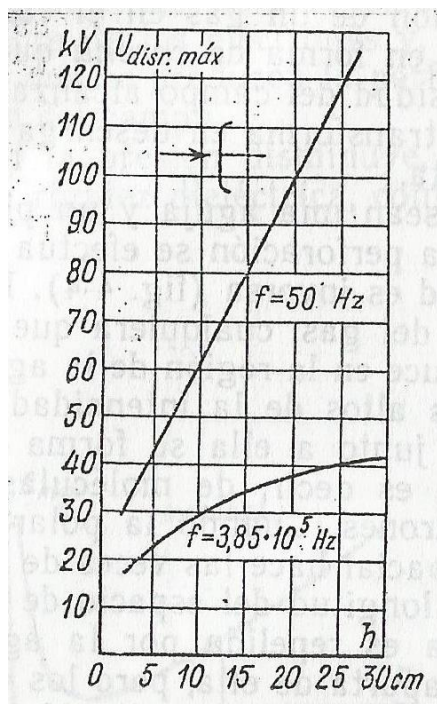
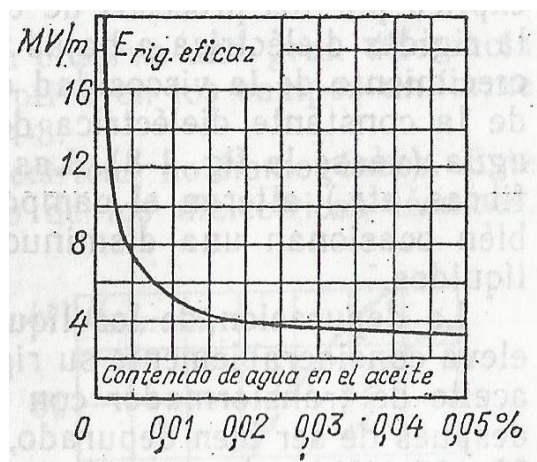
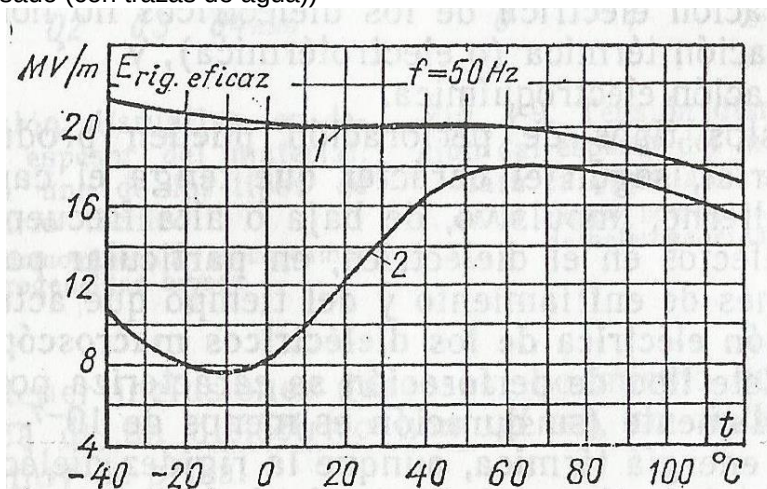


Figura 18. Dependencia de la rigidez dieléctrica con respecto al contenido de agua que hay en el aceite. (Ensayo realizado con $h = 2,5 \text{ mm}$).



Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

Figura 19. Rigidez dieléctrica del aceite para transformadores en función de la temperatura (1. Aceite seco, 2. Aceite usado (con trazas de agua))



Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

Centrando la atención en los dieléctricos sólidos, existen cuatro tipos de perforación:

- Perforación eléctrica de los dieléctricos macroscópicamente homogéneos.
- Perforación eléctrica de los dieléctricos no homogéneos.
- Perforación térmica (electrotérmica).
- Perforación electroquímica.

Todos los tipos de perforación se pueden producir en un mismo material bajo estudio, esto depende mucho del carácter del campo eléctrico, bien sea continuo, alterno, impulsivo, de baja o de alta frecuencia, la existencia de defectos en el dieléctrico, las condiciones de enfriamiento y el tiempo que actúe la tensión.

Tabla 4. Valores de la rigidez dieléctrica de algunos materiales sólidos en un campo homogéneo de 50 Hz de frecuencia.

Material	$E_{disr.eficaz} \text{ MV/m}$	Peculiaridades de la estructura
• Vidrio • Sal gema • Mica • Papel impregnado • Películas orgánicas (poliestireno, triacetato de celulosa)	100 – 300 100 – 150 100 – 300 100 – 300 90 – 120	Dieléctricos homogéneos densos y laminados, si el campo es perpendicular a las capas.
• Cerámica • Micalex • Plásticos con carga (de fenol-formaldehido, aminoplásticos)	10 – 30 10 – 15 10 – 15	Dieléctricos de estructura no homogénea con capilares cerrados o en muta comunicación.
• Mármol • Cerámica porosa • Madera • Papel para cables no impregnado	4 – 5 1,5 – 2,5 4 – 6 7 – 10	Dieléctricos con grandes poros abiertos.

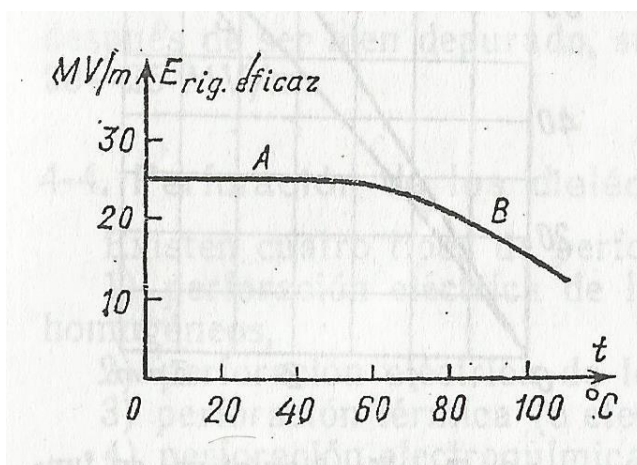
Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

La perforación eléctrica en general se caracteriza por desarrollarse muy rápidamente, su duración es de menos de $10^{-7} - 10^{-8} \text{ s}$ y no se debe a la energía térmica, aunque la rigidez dieléctrica durante la perforación depende en cierto grado de la temperatura. La perforación eléctrica es un proceso puramente electrónico, en dicho proceso algunos electrones iniciales crean en el material una avalancha electrónica. Los electrones disipan la energía de su movimiento, excitando vibraciones elásticas a su alrededor, los electrones que alcanzan una velocidad crítica determinada arrancan nuevos electrones produciendo en el sólido una ionización por choque con los electrones. La perforación eléctrica pura sucede

excluyendo la influencia de la conductancia y de las pérdidas dieléctricas que determinan el calentamiento del material.

Aquí es donde se diferencian los dieléctricos macroscópicamente homogéneos de los dieléctricos no homogéneos, en los primeros las inclusiones gaseosas deben ser mínimas, en los segundos sí que suelen tener inclusiones, tienen varios puntos débiles y su rigidez dieléctrica desciende, incluso cuando el material tiene porosidad abierta su rigidez dieléctrica es menor que cuando sus poros están cerrados, los poros abiertos funcionan como inclusiones de aire volviéndose peligrosas especialmente cuando las frecuencias son altas.

Figura 20. Variación de la rigidez dieléctrica de la porcelana electrotécnica, en función de la temperatura siendo $f = 50\text{Hz}$ (A. Región de la perforación eléctrica; B. Región de la perforación térmica)



Fuente: Materiales electrotécnicos. (N.P. Bogoróditski, V.V. Pásinkov, B.M. Taréiev), editorial MIR MOSCÚ-1979.[1]

La rigidez dieléctrica de los sólidos no depende prácticamente de la temperatura hasta cierto valor de esta, cuando se pasa por encima de este valor se observa un descenso apreciable de la rigidez dieléctrica, evidenciando la existencia del mecanismo de perforación térmica.

La perforación térmica o también llamada electrotérmica consiste en el calentamiento del material en el campo eléctrico hasta temperaturas donde sus propiedades aislantes se pierden debido al aumento de la conductividad transversal y de las pérdidas eléctricas [5], en este tipo de perforación la tensión de disrupción depende de factores como la frecuencia del campo, condiciones de refrigeración, temperatura del medio ambiente, estabilidad térmica del material, entre otros. Para hacer los cálculos de la tensión de perforación térmica se debe tener en cuenta el valor de $\tan \delta$ del dieléctrico y la dependencia con la temperatura y la constante dieléctrica del material, por eso es muy importante la refrigeración de los materiales, por ejemplo en máquinas eléctricas la temperatura de calentamiento no debe

superar cierto valor dado porque es peligroso desde el punto de vista de la estabilidad térmica del material.

La perforación electroquímica tiene especial importancia cuando las temperaturas son elevadas y la humedad del aire es alta, se observa con tensiones continuas o alternas de baja frecuencia cuando se desarrollan procesos electrolíticos que terminan en una disminución irreversible de la resistencia de aislamiento, a este proceso se le conoce como **envejecimiento** del dieléctrico en el campo eléctrico que ocasiona una disminución de la rigidez dieléctrica que termina como una perforación incluso bajo una tensión mucho menor a la tensión disruptiva en ensayos de corta duración.

En la historia del estudio de los materiales [1] se creía que el proceso de envejecimiento solo sucedía a dieléctricos orgánicos, en donde el proceso de ionización de las inclusiones de aire hace que se desprendan ozono y óxidos de nitrógeno provocando la destrucción química poco a poco del aislamiento, pero también se ha demostrado que en dieléctricos inorgánicos como por ejemplo la cerámica a base de titanio y en materiales con presencia de óxidos de metales alcalinos se presenta también dicho proceso de envejecimiento, la perforación electroquímica requiere de mucho tiempo debido a que está relacionada con el fenómeno de conductividad eléctrica y el desprendimiento lento de pequeñas sustancias químicas. Por ello tiene muchísima importancia el material del electrodo, las condiciones de temperatura elevada y la alta humedad del ambiente.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROCEDIMIENTO TÉCNICO.

SISTEMA DE AISLAMIENTO

La IEEE STD. 1-2011 define el envejecimiento como el cambio irreversible de las propiedades de un material, aislante eléctrico o sistema de aislamiento eléctrico, debido a la acción de uno o más factores de influencia [6]. En operación real las máquinas se ven sometidas a esfuerzos de carácter térmicos, eléctricos, ambientales y mecánicos [7]. Dichos esfuerzos producen tanto defectos internos en el aislamiento (inclusiones gaseosas, huecos, grietas, delaminaciones, etc.) como externos a él (contaminación, degradación de la cinta gradiente o semiconductora) que terminan en falla del aislamiento.

El sistema de aislamiento de una máquina eléctrica comprende los materiales aislantes de tres componentes principales, el aislamiento de las bobinas con sus accesorios, la conexión y soporte aislante del devanado, y las partes estructurales asociadas [8].

El primero comprende todos los materiales aislantes que rodean los conductores que transportan la corriente, tanto para los hilos como para las espiras, el aislamiento entre estos y la estructura de la máquina. Esto incluye las cintas de blindaje y protección, las amarras, los rellenos de ranuras, el aislamiento básico de la bobina, el aislamiento básico del cuerpo del polo y el anillo de retención del aislamiento rotórico.

La conexión y el soporte aislante del devanado incluye los materiales aislantes que cubren las conexiones, entre bobina y bobina o entre barras, los materiales aislantes desde los terminales del campo y bobinas de armadura hasta los circuitos externos y también el aislamiento de los soportes metálicos para el devanado.

Las partes estructurales asociadas incluyen los collares de campo, las cuñas de ranuras, los rellenos bajo el anillo del soporte aislante, el soporte no metálico para el devanado, los bloques espaciadores utilizados para separar cabezas de bobina, las conexiones y las bornas terminales.

Cada componente del sistema de aislamiento debe ser diseñado de tal manera que cumpla con los requerimientos térmicos, eléctricos y mecánicos para el correcto funcionamiento continuo del sistema.

Este trabajo de grado tiene su enfoque en el primer componente principal, más exactamente en el aislamiento de las bobinas.

Como se dijo anteriormente, las pérdidas de energía eléctrica y mecánica en las máquinas eléctricas se dan como resultado de la transformación de estos tipos de

energía en calor: para el funcionamiento fiable de sus partes debe estar reducido el calentamiento a unos límites determinados [9]. Los materiales aislantes se deterioran y a medida que pasa el tiempo los nuevos diseños de máquinas eléctricas necesitan aislamientos más fiables y que ocupen menos espacio en función de la potencia de trabajo, por ello la carga admisible de una máquina se determina, ante todo, por la temperatura admisible de los materiales aislantes que en ella se utilizan. La calidad del aislamiento suele determinar la fiabilidad del servicio de la máquina, ya que es el elemento más sensible, en especial a temperaturas elevadas [10].

Los sistemas de aislamiento eléctrico utilizados como referencia se dividen por su resistencia al calor en las siguientes clases según la IEEE STD-1-2000 con revisión del 2011 en [6]:

Tabla 5. Referencias de clasificación térmica de sistemas de aislamiento eléctrico

Clasificación térmica	Temperatura de clasificación [°C]
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180
N	200
R	220
S	250
C	>250

Fuente: IEEE Power Engineering Society, "IEEE Std. 1 - 2000. IEEE Recommended Practice—General Principles for Temperature Limits in the Rating of Electrical Equipment and for the Evaluation of Electrical Insulation," 2011. [6]

La norma europea IEC 60085 [11] es un poco más específica al brindar la resistencia térmica evaluada o también llamada relativa de los materiales de aislamiento eléctrico correspondientes a una letra asignada similar al estándar IEEE:

Tabla 6. Clasificación térmica según IEC 60085

Resistencia térmica °C		Clasificación térmica °C	Letra asignada
≥ 90	< 105	90	Y
≥ 105	< 120	105	A
≥ 120	< 130	120	E
≥ 130	< 155	130	B
≥ 155	< 180	155	F
≥ 180	< 200	180	H
≥ 200	< 220	200	N

Resistencia térmica °C		Clasificación térmica °C	Letra asignada
≥ 220	< 250	220	R
≥ 250	< 275	250	-

Fuente: International Electrotechnical Commission, "IEC 60085- Electrical insulation-Thermal evaluation and designation," IEC, 2007. [11].

A la clase Y pertenecen los materiales fibrosos de celulosa y de seda que no están impregnados con material dieléctrico líquido, la clase A pertenecen los materiales fibrosos de celulosa y de seda que están impregnados con material aislante líquido, la clase E pertenecen algunas películas sintéticas orgánicas, la clase B incluye en sí los materiales a base de mica, de asbesto y de fibra de vidrio utilizados con compuestos orgánicos impregnados y otros materiales semejantes, la clase F están hechos a base de mica, asbesto y fibra de vidrio con compuestos sintéticos impregnados, la clase H pertenecen los materiales a base de mica, asbesto y fibra de vidrio impregnados con compuestos orgánicos de silicio y aglutinantes, a la clase C se componen de materiales hechos de mica, cerámica, vidrio y cuarzo impregnados de compuestos orgánicos y aglutinantes [9].

Además de la resistencia térmica del material, a cada una de las clases de aislamiento le corresponde una temperatura límite admisible de calentamiento ϑ_{lim} , en la cual el aislamiento puede trabajar fiablemente durante un plazo de tiempo bastante largo y bajo condiciones de explotación de la máquina. Por ejemplo, para los materiales aislantes clase A:

$$t_{ais} = Ae^{-\alpha\vartheta} = 7,15 \cdot 10^4 e^{-0,088\vartheta} \quad (2.1)$$

En la anterior ecuación el tiempo t_{ais} se mide en años, los coeficientes $A = 7,15 \cdot 10^4$ y $\alpha = 0,088$ son coeficientes establecidos experimentalmente y ϑ es la temperatura del aislamiento en °C.

De la ecuación anterior se puede decir que el aislamiento de la clase A puede trabajar fiablemente durante 16-20 años a una temperatura límite de $\vartheta_{lim} = 95 - 90^\circ\text{C}$, con un aumento en la temperatura de servicio de 8°C su servicio se reduce a la mitad, a 110°C constituiría un plazo de tan solo 4 años y a 150°C hasta de varios días, he aquí la importancia de una correcta ventilación y refrigeración de la máquina y sobre todo el correcto diseño de la misma para el rendimiento adecuado según su régimen de trabajo.

En el caso de las demás clases de materiales aislantes el problema de encontrar su tiempo de trabajo se vuelve mucho más complicado, como se observa en el marco teórico del presente trabajo de grado, el uso de aislantes heterogéneos hace que cada elemento se comporte de manera distinta dependiendo de la composición de la mezcla, al utilizar materiales como la mica mezclados o más bien impregnados

con aglutinantes como lo son barnices, compuestos, resinas, etc., al verse sometidos a temperatura muchas veces se reduce el plazo de servicio del aislamiento.

Figura 22. Sección de barra tipo Roebel - aislamiento

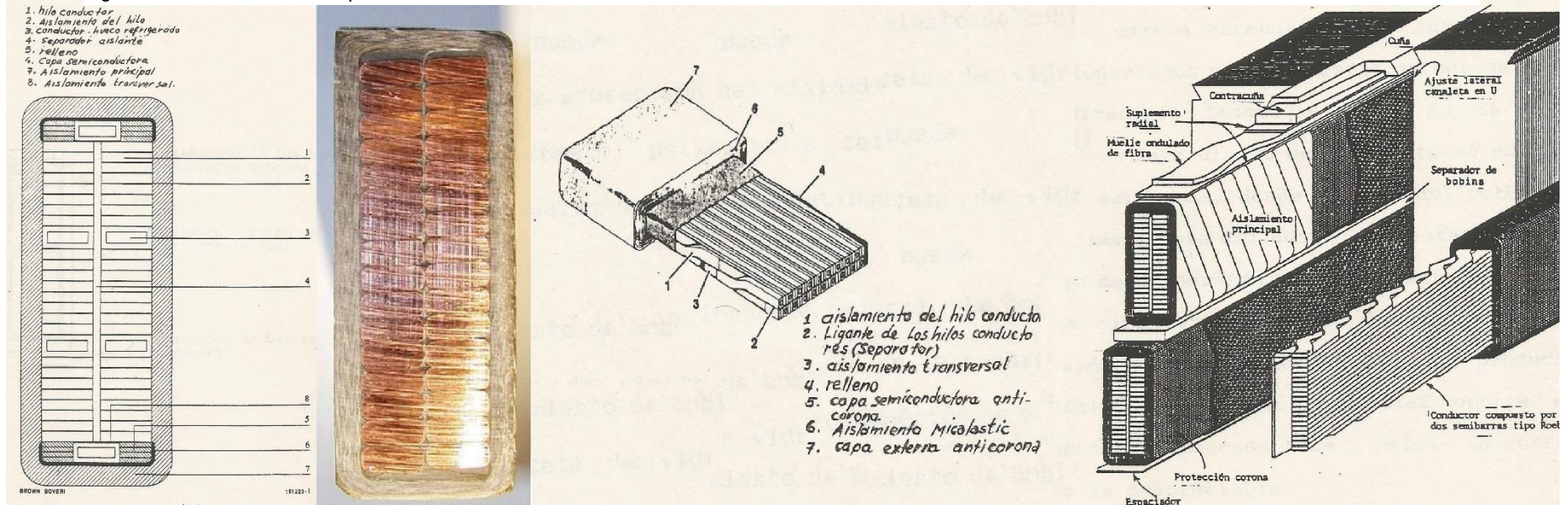
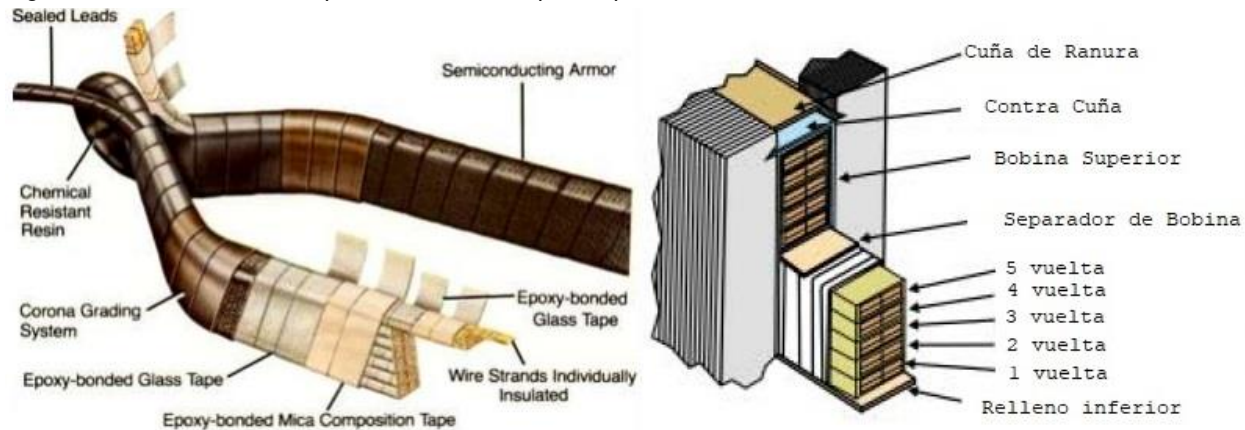


Figura 21. Sección de bobina preformada de múltiples espiras

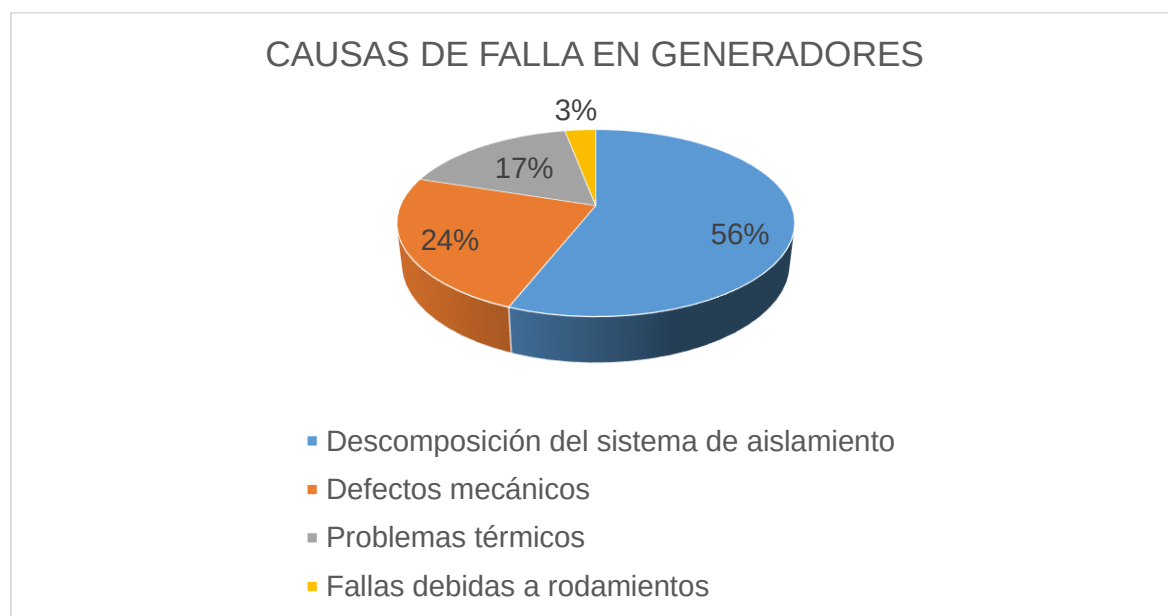


Fuentes: C. Sumeder, "Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 3, pp. 678-685, 2008.- L. F. Posso Buritica, "Descargas superficiales en las cabezas de bobinas de los generadores hidroeléctricos-Tesis de maestría," 1998.- Kato Engineering, "Form-Wound Coils and Random-Wound Coils, Engineering Report," pp. 1-5, 2001. [7][8][12]

2.1. FALLAS EN GENERADORES, REPERCUSIONES ECONÓMICAS DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO E HISTORIA

En una encuesta internacional realizada por el CIGRE (Consejo Internacional de Grandes Sistemas Eléctricos) [13] presentada en la referencia [7] “Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis” se observaron y analizaron las causas de las fallas de los generadores hidroeléctricos durante 10 años, más de 20 empresas en 5 países de todo el mundo recogieron datos de 1200 generadores, donde las principales causas de fallas se clasifican de la siguiente manera:

Figura 23. Principales causas de fallas en generadores hidroeléctricos.

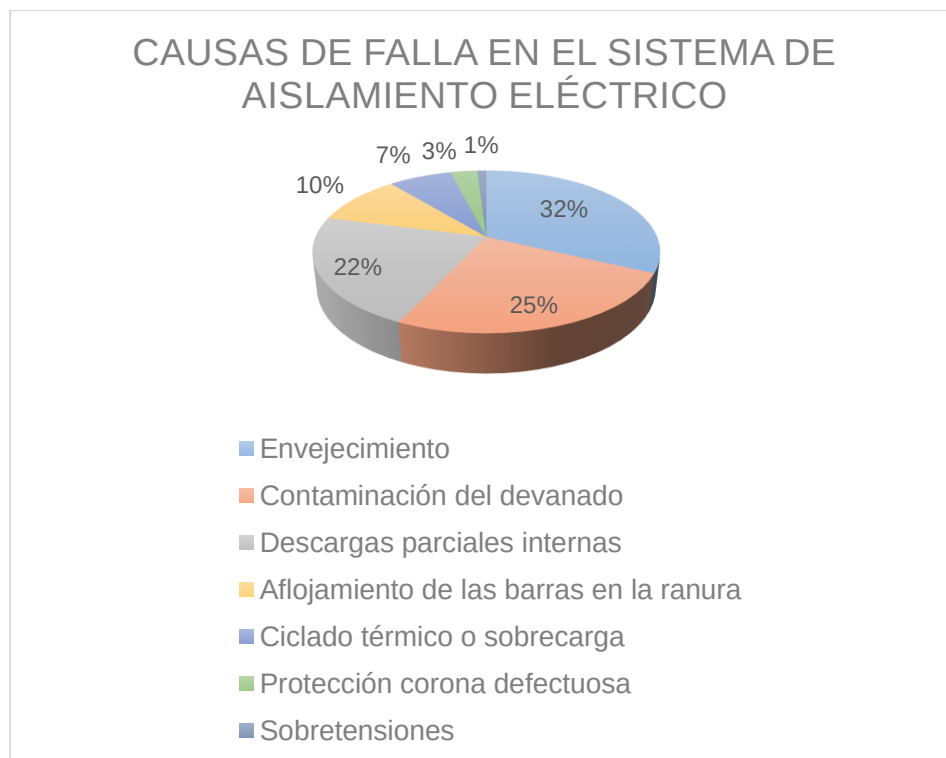


Fuente: C. Sumnereder, “Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 3, pp. 678–685, 2008. [7]

Las fallas más frecuentes son causadas por los efectos del envejecimiento y la contaminación del devanado por el polvo y la humedad. El sistema de aislamiento eléctrico del bobinado del estator desempeña el papel más importante en la construcción general de un generador, la mayoría de los defectos del aislamiento ocurren en esta parte de la máquina y son causados por el envejecimiento y la carga eléctrica, térmica y mecánica [7].

En un análisis de fondo sobre la descomposición del sistema de aislamiento, causal del 56% de las fallas presentadas en el estudio anteriormente citado se presentan los siguientes datos:

Figura 24. Causas de falla en el Sistema de aislamiento eléctrico.



Fuente: C. Sumeder, "Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 3, pp. 678–685, 2008.[7]

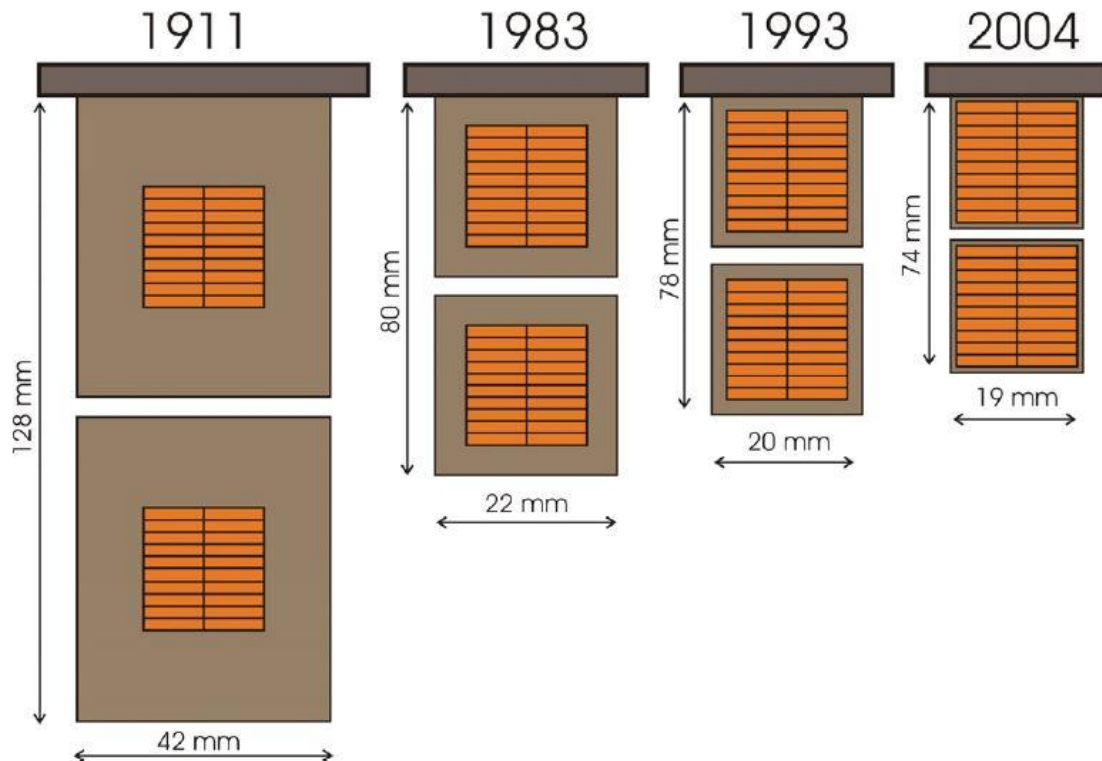
Los sistemas de aislamiento eléctrico comúnmente utilizado en los generadores eléctricos han cambiado mucho en los últimos 100 años, como se pudo apreciar en el marco teórico del presente trabajo de grado. El estudio de los aislamientos ha llevado a que cada vez se encuentren mejores materiales para desarrollar una construcción óptima del sistema de aislamiento de las máquinas, los primeros sistemas de aislamiento eran bastante robustos y sobredimensionados para los diferentes niveles de tensión de trabajo, esto provocaba que el envejecimiento del aislamiento (al ser mucho más paulatino a comparación de los sistemas actuales) no fuera un problema común en el funcionamiento de los generadores [7].

Los sistemas de aislamiento en su forma más básica utilizada durante muchos años consistía de mica colocada sobre tela de fibra de vidrio y fijada con un aglutinante, también se utilizaba sistemas de mica de asfalto con bajas intensidades de campo eléctrico las cuales fueron reemplazadas por resinas naturales. Hoy en día los actuales sistemas de aislamiento de última generación están hechos de resina epoxica.

En la Figura 25 se puede apreciar como las dimensiones del sistema de aislamiento de las barras estáticas han reducido su tamaño con el pasar de los años, así mismo, la intensidad de campo eléctrico paso de valores alrededor de 0.75kV/mm

para sistemas asfálticos de hace 100 años a 3.5 kV/mm para los sistemas de resina modernos que se construyen hoy en día, en términos de espacio y desde el punto de vista económico, la relación entre el espesor del sistema de aislamiento y su capacidad nominal es de suma importancia.

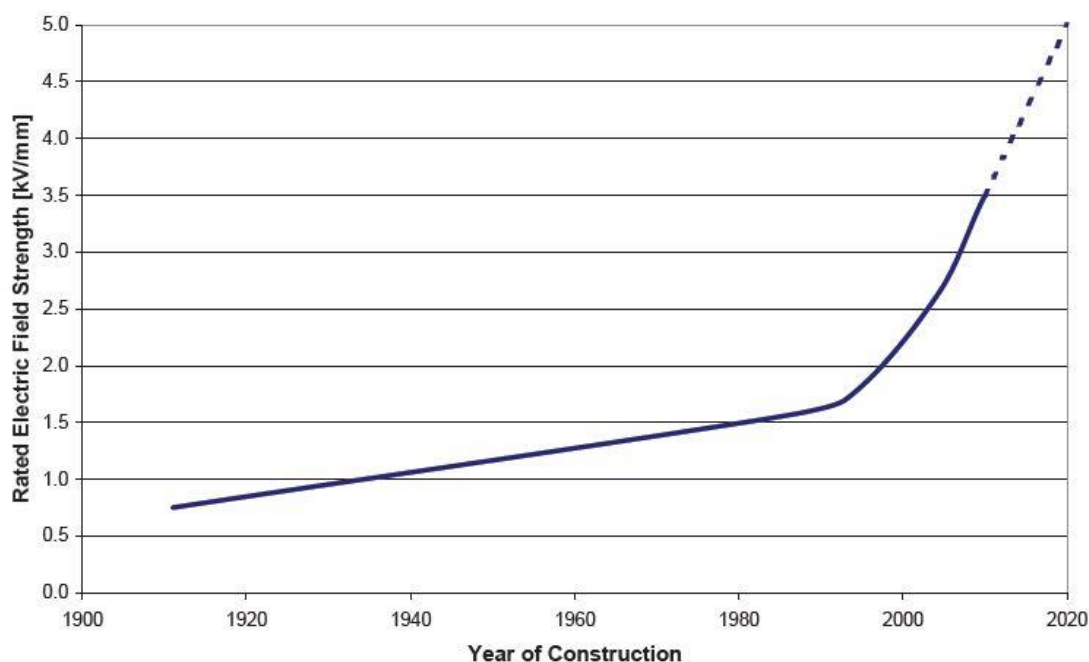
Figura 25. Desarrollo de sistemas de dimensionamiento de aislamiento de alta tensión para máquinas rotativas desde sus inicios.



Fuente: C. Sumnereder, "Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 3, pp. 678–685, 2008. [7].

En la Figura 26 se observa la línea de tiempo de la intensidad nominal de campo eléctrico para sistemas de aislamiento de alta tensión para máquinas rotativas, donde en los últimos años existe un crecimiento en el desarrollo tecnológico y la demanda de materiales cada vez mejores, cada año que pasa la exigencia al sistema de aislamiento es mayor lo cual representa también un aumento en la posibilidad de falla.

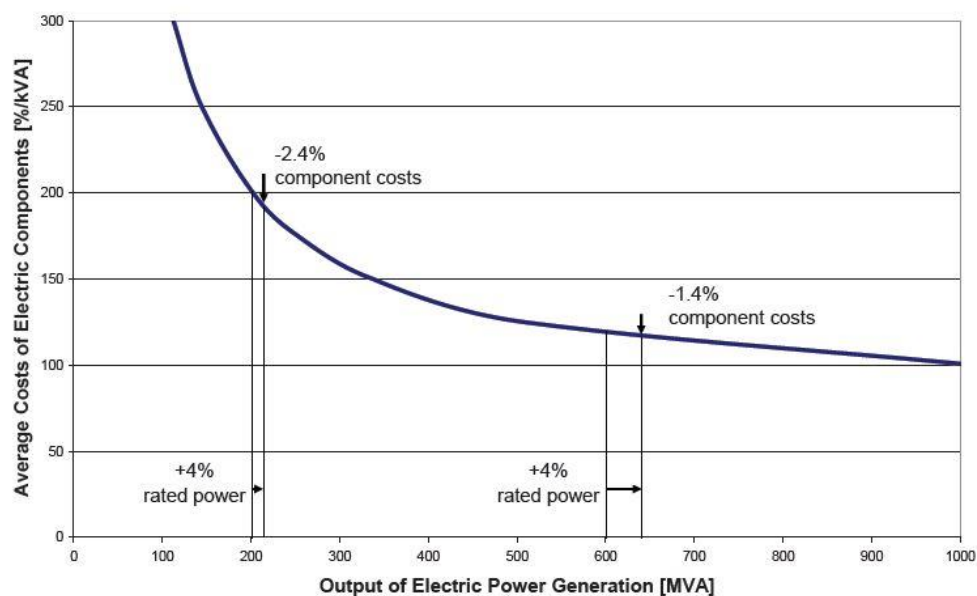
Figura 26. Línea de tiempo de la intensidad nominal de campo eléctrico para sistemas de aislamiento de alta tensión para máquinas rotativas.



Fuente: C. Sumnereder, "Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 3, pp. 678–685, 2008. [7].

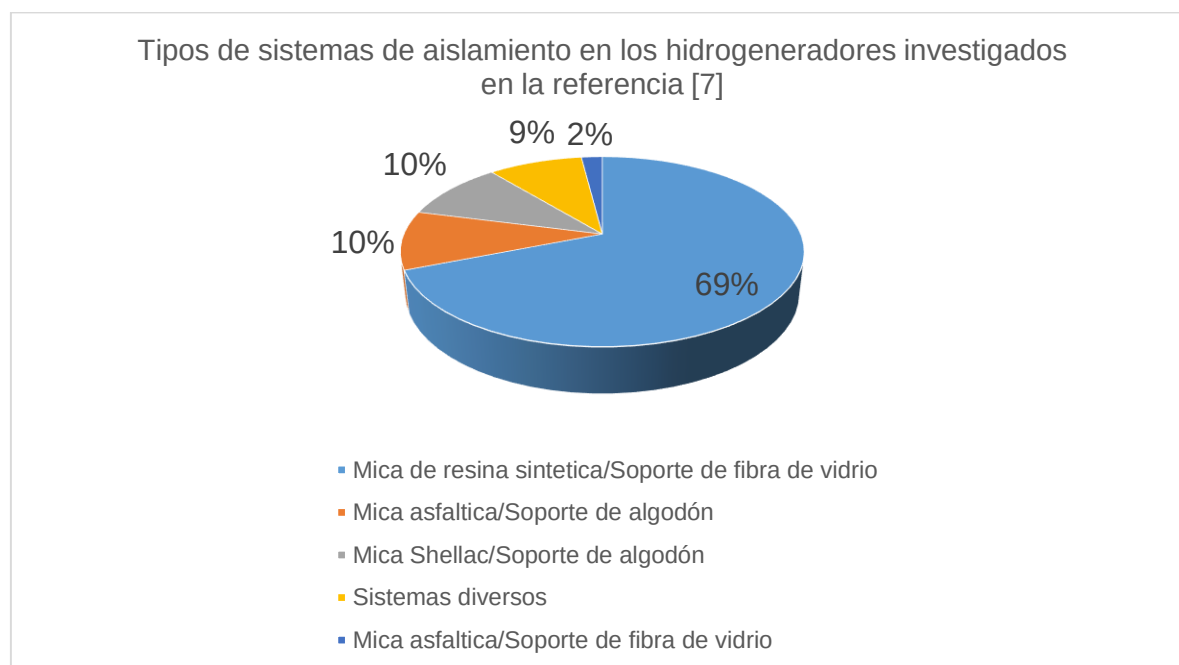
En el estudio presentado en [7] un aspecto muy importante a resaltar es que tomando los costos promedio de los componentes eléctricos de las centrales hidroeléctricas presentadas en [14] se encontró una relación % / kVA y potencia instalada en MVA ilustrada en la Figura 27. Se denota que reduciendo el 15% del espesor del sistema de aislamiento en las ranuras estatóricas, la sección transversal del cobre puede aumentar un 16% y la eficiencia puede mejorar en un 4%, además para máquinas con potencia nominal de 200 MVA, los costos de los componentes eléctricos se pueden reducir en un 2.4% y para máquinas mayores a 600 MVA se pueden encontrar beneficios de un 1.4%.

Figura 27. Curva de costo promedio de componentes eléctricos para centrales hidroeléctricas según [14]



Fuente: C. Sumereder, "Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 3, pp. 678–685, 2008. [7] - W. D. Blecken, "Applying new technology in the upgrading or uprating of generators," *Int. J. Hydropower Dams*, vol. 4, no. 6, pp. 26–32, 1997. [14].

Figura 28. Tipos de sistemas de aislamiento en los hidrogeneradores analizados en la referencia [7]



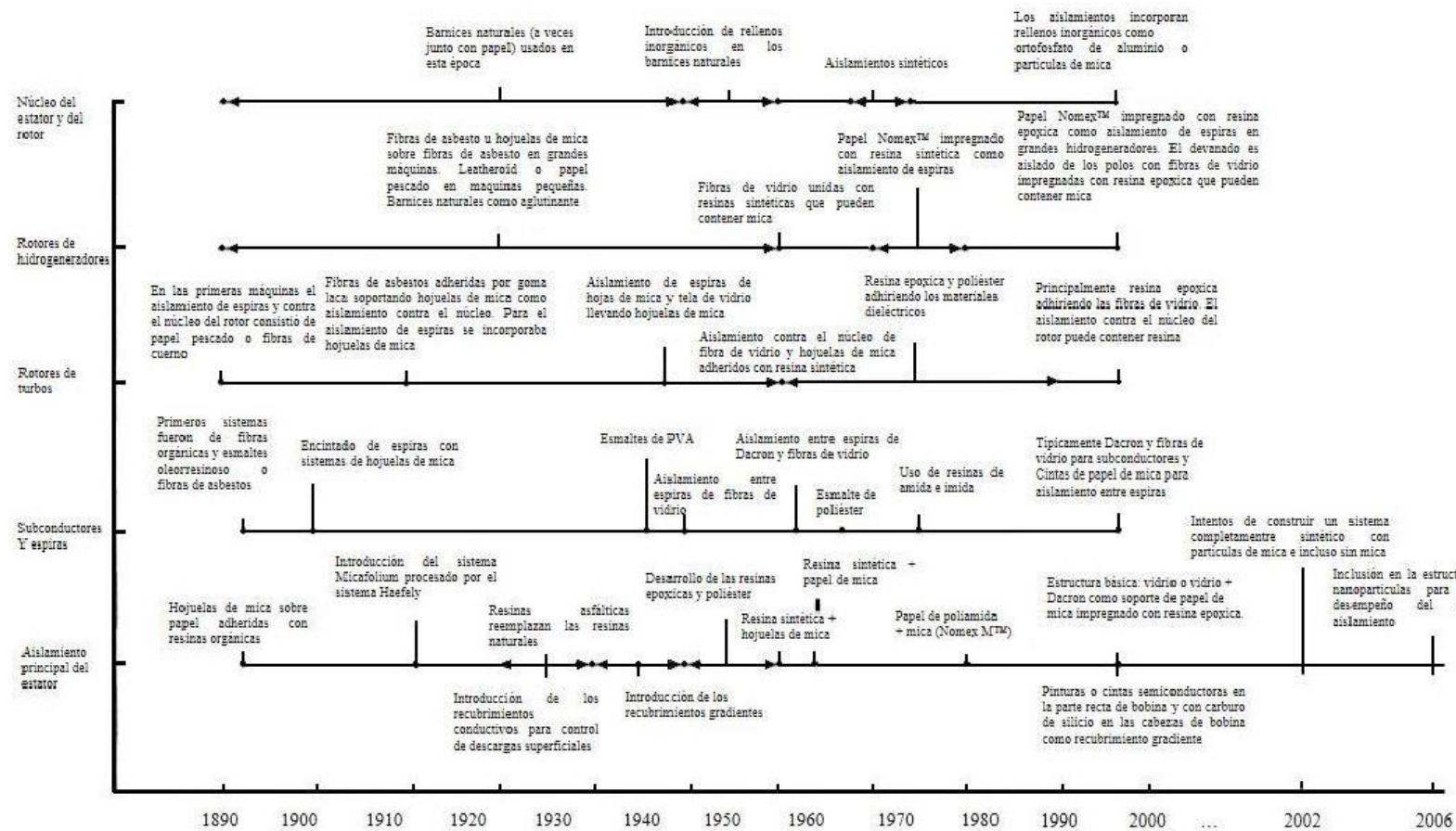
Fuente: C. Sumereder, "Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 3, pp. 678–685, 2008. [7].

A través de la historia de los sistemas de aislamiento el componente principal en el sistema dieléctrico es la mica, un componente natural procesado de diferentes maneras (muskovita y flogopita) (calcinada o no calcinada) en forma de papel de mica el cual es muy inestable mecánicamente, por dicha razón el papel se fija a un soporte, en un inicio este soporte era fabricado de algodón, actualmente está compuesto de fibra de vidrio.

Debido a la necesidad de un agente que uniera la mica a su soporte, se desarrollaron dos tipos diferentes de tecnología. La primera fue el uso de cintas con un alto porcentaje de resina ($\geq 30\%$) también llamado “Resin Rich – RR ” o rico en resina. La segunda tecnología fue inventada en la década de 1960 y desarrollada para cintas con menos del 20% de resina, llamada impregnación por presión de vacío – VPI, el objetivo de este sistema es producir sistemas de aislamiento sin huecos, como se examinó en el marco teórico del presente trabajo de grado dichos huecos son donde se producen la disrupción dieléctrica, las descargas parciales que aceleran el envejecimiento del material.

Los sistemas de aislamiento más nuevos tienen una protección de corona interna (IPC). El objetivo del IPC es la prevención de descargas parciales internas, una capa con alta conductividad específica se encuentra en el lado interno del aislamiento, esta capa está conectada al conductor de cobre para obtener el mismo potencial eléctrico en toda la superficie.

Figura 29. Desarrollo y principales mejoras en los sistemas de aislamiento de máquinas eléctricas rotativas que llevaron a los sistemas disponibles en la actualidad.



Fuente: L. C. Castro Heredia, "Diagnóstico del aislamiento principal de bobinas estáticas sometidas a esfuerzos termoelectrónicos en laboratorio," Universidad del Valle, 2014 [15].

2.2. AISLAMIENTO EN BARRAS ESTATÓRICAS – TIPOS DE BOBINA DEL ESTATOR

Dentro del amplio abanico de tecnologías de producción de aislamiento se distinguen las siguientes más importantes:

- Muskovita/Flopogita – Calcinada/no calcinada.
- Asfáltica / Resina natural / Resina epoxi.
- Rica en resina (RR) / Impregnación por presión al vacío (VPI).
- Protección de corona interna (IPC) / Sin IPC.

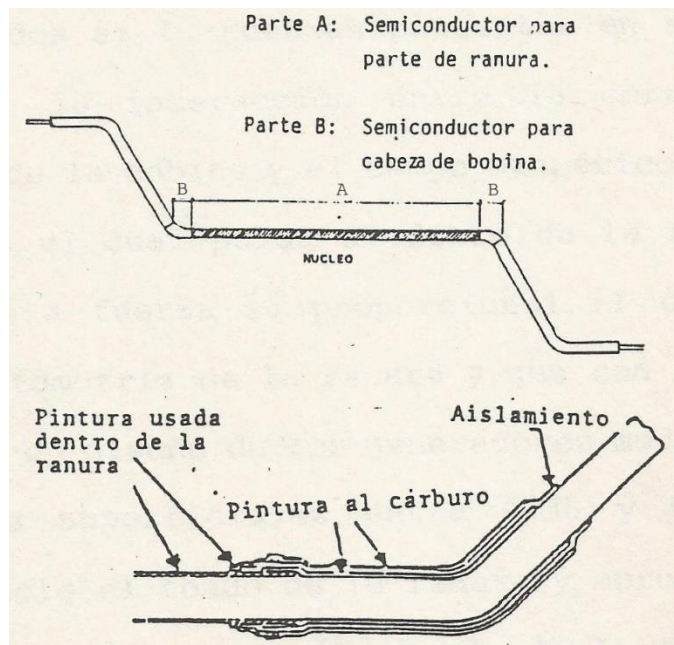
En tecnologías de producción hay una distinción entre los sistemas de bobinas individuales y globales, dependiendo si se trata de barras individuales o si se producen bobinas completas.

Se emplean dos tipos básicos de estructuras de bobinado del estator para generadores en rangos de potencia que van desde 1kW hasta 2000 MW [16][12]:

- Estatores con bobinados preformados de múltiples espiras. (Form-wound stators using multi-turn coils).
- Estatores con bobinados de barras tipo “Roebel”. (Form-wound stators using Roebel bars).

Los bobinados de manera general consisten en bobinas aisladas fabricadas antes de la inserción en las ranuras del núcleo del estator, los devanados están formados por varias bobinas conectadas y distribuidas de manera tal que el campo magnético fluya por una trayectoria establecida según el criterio de diseño de cada máquina. Existen dos secciones importantes a distinguir en una bobina, la primera es la sección de ranura que corresponde a la parte de la bobina insertada en el estator y de la cual el estándar IEEE 1043 como práctica recomendada para la prueba de “Voltage-Endurance” y guía en el presente trabajo de grado hace gran hincapié (como se verá en el capítulo 3), y la segunda hace referencia a las cabezas de bobina que conectan las secciones de ranura entre sí y cuyas formas pueden variar según el tipo de máquina.

Figura 30. Sección de ranura y cabeza de bobina - Barra tipo Roebel



Fuente: L. F. Posso Buritica, "Descargas superficiales en las cabezas de bobinas de los generadores hidroeléctricos-Tesis de maestría," 1998 [8].

Cabe resaltar que, de acuerdo a múltiples casos a nivel mundial referenciados dentro de la bibliografía del presente documento ([8], [16]–[22]), entre otros, las descargas en la cabeza de bobina son un problema con gran relevancia en los bobinados de grandes generadores y en general un problema actual en el sector eléctrico.

En general, los devanados preformados de múltiples espiras se utilizan en la mayoría de motores grandes y en muchos generadores con potencias que van desde 50 MVA a 100 MVA, este tipo de bobinas se moldean y se aíslan antes de insertarlas en el estator. Su forma física se puede apreciar en la Figura 31.

Las barras tipo "Roebel" se usan generalmente para grandes generadores, aunque dependiendo del fabricante, se ha llegado a construir sistemas híbridos que no se ajustan fácilmente a ninguna de las dos categorías. El tamaño de la máquina crece significativamente para generadores de más de 100 MVA, de manera tal que las bobinas preformadas ya no pueden ser manipuladas sin riesgo de daño. Las bobinas de tipo Roebel se fabrican en mitades o barras, una vez que cada mitad es insertada en el estator se conectan para formar una sola bobina, su forma física se puede apreciar en la Figura 32 [15].

Figura 31. Tipos de bobinas que forman el devanado del estator (Bobinas preformadas de múltiples espiras).



Fuente: L. C. Castro Heredia, "Diagnóstico del aislamiento principal de bobinas estatóricas sometidas a esfuerzos termoeléctricos en laboratorio," Universidad del Valle, 2014 [15].

Figura 32. Tipos de bobinas que forman el devanado del estator (Barras tipo Roebel).



Fuente: L. C. Castro Heredia, "Diagnóstico del aislamiento principal de bobinas estatóricas sometidas a esfuerzos termoeléctricos en laboratorio," Universidad del Valle, 2014 [15].

Sean bobinas de tipo preformada o tipo Roebel, el cobre se divide en subconductores que se aíslan entre sí con el fin de reducir el efecto piel y las corrientes circulantes. [12], [23]

2.3. MEDICIÓN DE TEMPERATURA:

La elevación excesiva de la temperatura no solo influye negativamente sobre las condiciones del aislamiento, sino también sobre las condiciones mecánicas de la máquina. Esto puede conllevar a que se deforme la forma geométrica del colector, deteriorarse las soldaduras del devanado, deteriorarse los cojinetes, entre otras. Las condiciones de refrigeración son muy importantes y el estado de servicio de la máquina influye mucho en la potencia que puede brindar sin poner en riesgo su aislamiento.

Teniendo en cuenta este último punto, los regímenes de funcionamiento que se pueden encontrar en el entorno industrial son prácticamente ilimitados, pero según la norma NTC 2805 de 2011 [24] se puede definir 8 clases principales:

- S1: Servicio continuo: La máquina trabaja a carga constante, de modo que alcanza la temperatura de régimen permanente.
- S2: Servicio temporal o de corta duración: La máquina trabaja en régimen de carga constante un tiempo breve, de tal manera que no se llega a alcanzar una temperatura estable. Permanece entonces parada hasta alcanzar de nuevo la temperatura ambiente. En la placa de características se especifica el tiempo de funcionamiento en carga.
- S3, S4 y S5: Servicios intermitentes: Consisten en una serie continua de ciclos iguales, compuestos por periodos de carga constante (S3), incluyendo tiempo de arranque (S4) o arranques y frenados (S5), seguidos de periodos de reposo sin que se alcance nunca una temperatura constante.
- S6, S7 y S8: Servicios ininterrumpidos: Similares respectivamente a S3, S4 y S5, pero sin periodos de reposo.

En todas las clases de servicio se define el factor de marcha como la relación entre el tiempo de funcionamiento en carga y el total de un ciclo de trabajo. Los valores normalizados son 15, 25, 40 y 60%.

Cinco métodos fundamentales para realizar una determinación de temperatura son los siguientes:

Termómetro: Por lo general proporcionan una precisión baja, se debe tener cuidado con el método de fijación a la superficie, se debe utilizar el termómetro para aplicaciones donde se requiera información general por su sistema dudoso en relación a la fijación con la superficie de prueba.

Termopar: Tienen la facultad de utilizarse para lugares normalmente inaccesibles para el método del termómetro, se debe tener en cuenta que dependiendo del grosor del aislamiento que separa los termopares de los conductores de corriente las temperaturas pueden compararse con el método de resistencia o marcar

considerablemente más bajas similares al método del termómetro, es un procedimiento viable solo si los termopares se aplican directamente a los conductores o está separados de los mismos solo por el aislamiento integral del propio conductor.

Termopares de contacto: Este método consiste en la determinación de la temperatura mediante el uso de termopares hechos de metales diferentes que hacen contacto directamente con la superficie del conductor expuesta, de tal manera que la muestra a ser medida forme parte del circuito del termopar.

Resistencia: Este método consiste en la determinación de la temperatura promedio del devanado comparando la resistencia del mismo a la temperatura de prueba con la resistencia inicial a una temperatura ya conocida.

Medición de temperatura por sensores colocados desde fabrica: Como su nombre lo indica, este método utiliza termopares o sensores integrados al generador desde su fabricación ya sea de forma permanente o para la realización de pruebas en ubicaciones específicas.

El método de medición de temperatura debe seleccionarse teniendo en cuenta los factores de construcción de la maquina como por ejemplo el método de enfriamiento de la misma, estos factores por lo general no son planteados en las prácticas recomendadas para los ensayos de envejecimiento, pero es la experticia del ingeniero la que hace que se valore dentro de las pruebas a realizar y mucho más importante dentro de los métodos de monitoreo de los generadores durante su funcionamiento normal.

De Igual manera, los límites de temperatura para el sistema de aislamiento no deben justificarse solo por las capacidades del material del cual está realizado, se deben elegir los límites de temperatura indicados, teniendo en cuenta las propiedades eléctricas y mecánicas del aislamiento.

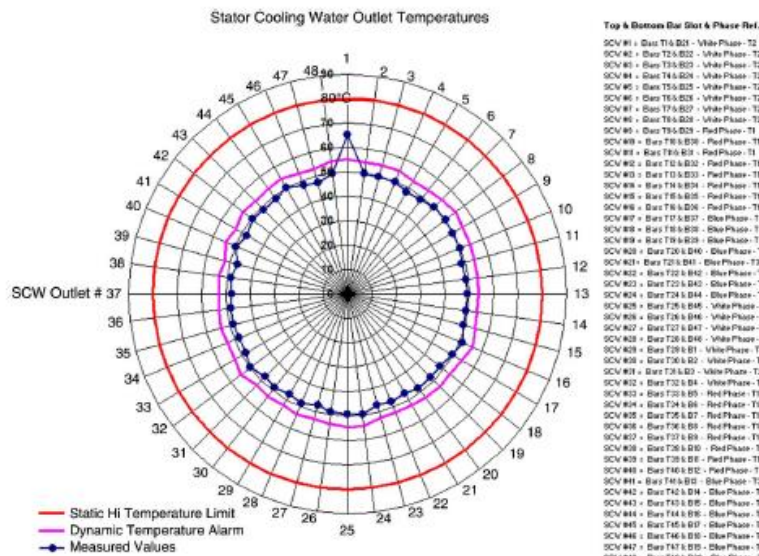
Como se observó en el primer capítulo del presente trabajo de grado, el efecto de la alta temperatura sobre estas propiedades, como por ejemplo: la deformaciones mecánicas del material por la temperatura, la transición del material a estado cristalino -viscoso o carbonización a medida que va aumentando la temperatura y el aumento de las pérdidas dieléctricas en función de las condiciones de servicio a la temperatura de trabajo conducen al deterioro gradual del sistema de aislamiento qué con el tiempo, teniendo en cuenta:

- las condiciones ambientales particulares
- los ciclos de carga a los cuales el generador está trabajando
- la temperatura ambiente
- la tasa de deterioro

- el envejecimiento por estrés de tipo térmico, eléctrico, ambiental, mecánico
- y los problemas operativos en cuanto a la fabricación, el transporte, el almacenamiento, la instalación y mantenimiento durante la operación del generador.

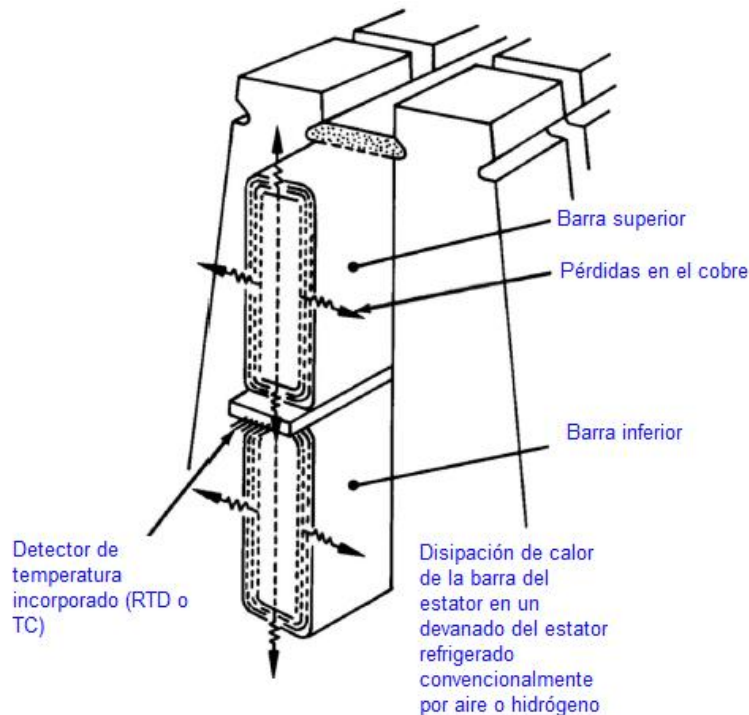
Hacen que, en síntesis, los criterios para la especificación, selección y monitoreo del aislamiento vayan mucho más allá que los límites de temperatura per se del material con el que se fabrica el sistema de aislamiento.

Figura 33. Grafico polar de las temperaturas de refrigeración con las alarmas de temperatura estática y dinámica para cada barra.



Fuente: G. Klempner and I. Kerszanbaum, *Handbook of large Turbo-Generator operation and maintenance*, Third Edit. 2018 [25].

Figura 34. Ilustración de un RTD de ranura instalado en la cuña separadora y ubicada en la ranura entre la barra del estator superior e inferior.



Fuente: G. Klempner and I. Kerszanbaum, *Handbook of large Turbo-Generator operation and maintenance*, Third Edit. 2018 [25], R. Machinery and P. Engineering, *IEEE Guide for Operation and Maintenance of Hydro-Generators*, vol. 2005, no. May. 1999. [26].

El estándar IEEE Std-1-2000 con revisión en el 2011 (“Principios generales para límites de temperatura en la clasificación de equipos eléctricos y para la evaluación de aislamiento eléctrico”) [6] define la vida útil de servicio como el periodo de tiempo, generalmente medido en horas durante el cual un material de aislamiento eléctrico, sistema de aislamiento, o equipo eléctrico se desempeña de manera adecuada o especificada.

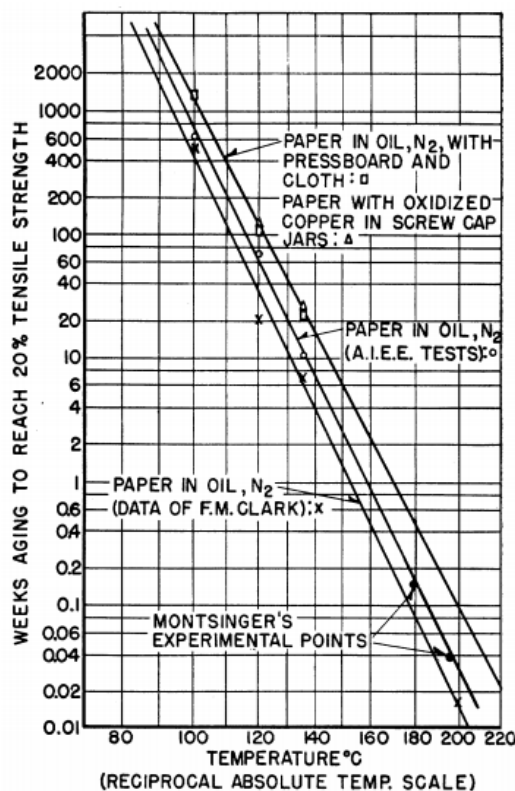
En las especificaciones de diseño de toda máquina eléctrica, ya sea generador o motor, la temperatura de trabajo debe seleccionarse con el fin de satisfacer las condiciones normales de operación, teniendo en cuenta límites permisibles de temperatura de emergencia, incluida las duraciones y frecuencias de la operación con carga máxima a los que se aplica esta clase de límites, reconociendo los ciclos de carga exigentes para la máquina y las fluctuaciones de la temperatura ambiente. La capacidad de un sistema de aislamiento, como anteriormente se ha indicado, se ve afectada por la presencia de otros factores además del aspecto térmico, las tensiones de tipo eléctrico, mecánico y ambiental son de gran importancia y todos estos factores deben tenerse en cuenta para establecer los límites de temperatura para cada máquina (Esfuerzos tipo TEAM-Térmico, eléctrico, ambiental y mecánico).[6][15]

El enfoque de este trabajo de grado es el envejecimiento termoeléctrico, cabe resaltar que las propiedades eléctricas y mecánicas de los materiales aislantes pueden verse influenciados de diferentes maneras y en diferentes grados en función de la temperatura y el envejecimiento térmico.

En un inicio las propiedades eléctricas y la resistencia mecánica de los materiales mejoran a medida que avanza el envejecimiento térmico, pero progresivamente con el envejecimiento, la fragilidad del material aislante conduce a un agrietamiento del mismo que puede llegar a provocar una falla eléctrica. La duración del aislamiento no depende solo de los materiales utilizados sino también del soporte mismo del aislamiento y la gravedad de las contracciones y expansiones térmicas que pueda llevar el ciclo de carga de la máquina sobre la que se trabaja. (esto último solo observando el fenómeno de envejecimiento sobre el enfoque térmico, hay que tener en cuenta todo el estrés de tipo TEAM).

El deterioro físico del aislamiento bajo envejecimiento térmico aumenta rápidamente con el aumento de la temperatura. Bajo la revisión técnica, el logaritmo de la vida útil del aislamiento es una función (a menudo lineal) del recíproco de la temperatura absoluta [6], este método es bastante preciso para determinar la vida útil del aislamiento a una temperatura elevada, una gráfica en línea recta de los datos de envejecimiento indica que la naturaleza y orden de la reacción química causal del envejecimiento normal o esperado de la máquina permanece sin cambios, sin embargo la desviación de la linealidad significa que ha existido un cambio en la reacción química, una alerta para la muestra analizada.

Figura 35. el tiempo de envejecimiento de semanas a temperaturas elevadas para que el papel manila disminuya en diversas condiciones al 20 por ciento de la resistencia a la tracción original, representado en una escala logarítmica frente a la temperatura absoluta recíproca.



Fuente: T. W. Dakin, "Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon," vol. 67, 1948. [27]

Cuando los logaritmos de las horas de vida encontrados por las pruebas de evaluación térmica a tres o más temperaturas diferentes se grafican contra los recíprocos de las temperaturas absolutas, generalmente, pero no siempre, forman una línea recta, estas curvas de vida (tiempo-temperatura) deben determinarse mediante pruebas de evaluación térmica, he aquí la importancia de la prueba de "Voltage-Endurance".

2.4. MODELOS DE ENVEJECIMIENTO

Frente al proceso de envejecimiento la pregunta más importante en las estadísticas de vida es, ¿en qué punto de la vida se produce el colapso del aislamiento?, enfocando el análisis del aislamiento a los devanados del estator, los mecanismos de envejecimiento y falla se encuentran en el comienzo del cambio de las propiedades del material debido al impacto del estrés de tipo TEAM. En las pruebas de envejecimiento artificial por lo general se utiliza la combinación de tensiones eléctricas, térmicas y mecánicas, en el caso de la prueba de "Voltage-Endurance", sobre la cual se realiza énfasis, se hace uso de tensión de tipo eléctrica y térmica

sobre muestras de bobinas del devanado del estator, existen numerosos modelos para el análisis de los datos de envejecimiento pero dos de los más importantes son el modelo de potencia inversa y el modelo exponencial para la simulación y descripción matemática del mecanismo de envejecimiento eléctrico y la ley de envejecimiento fundamental de Dakin utilizando la ecuación de Arrhenius para el envejecimiento de tipo térmico ([12], [28], [29]).

El punto débil de todas las pruebas de envejecimiento es la elección del modelo que estime de manera más eficaz el mecanismo de envejecimiento, las pruebas de envejecimiento acelerado pueden ser tan buenas como el modelo y la disposición de la prueba lo sea. Existen estándares y prácticas recomendadas como es el caso de la IEEE 1043 para la prueba de Voltage-Endurance, pero seguir estas recomendaciones van ligadas con intervalos de confianza específicos según las condiciones en las que se realicen el envejecimiento además de las características iniciales de las muestras a envejecer.

La ecuación de Arrhenius plantea la determinación de la constante de la velocidad de reacción en función de la energía de activación y de la temperatura.[30]

$$k = A * e^{-E_a/(R*T)} \quad (2.2)$$

Donde:

k = Constante de la velocidad de reacción.

A = Constante característica para la reacción.

E_a = Energía de activación.

R = Constante de gas ideal (Constante de Boltzman que relaciona la temperatura absoluta y la energía).

T = Temperatura.

La ecuación (2.2) muestra la dependencia entre la temperatura y la energía de activación. El factor $e^{-E_a/(R*T)}$ es la parte de la ecuación que indica cuándo se ha pasado la barrera de activación. Un pequeño aumento de la temperatura puede suponer una modificación considerable de la velocidad de reacción debido a que la constante de la velocidad crece exponencialmente, esta característica del envejecimiento térmico es lo que explica la posibilidad de acelerarse artificialmente.

Thomas W. Dakin [27] utiliza la ecuación de Arrhenius para expresar la vida residual debido al envejecimiento térmico del material, sintetizando la ecuación (2.2) como tasa de envejecimiento se presenta de la siguiente manera [29]:

$$R_t = A e^{-B/T} \quad (2.3)$$

Y hallando el inverso de la tasa de envejecimiento correspondiente a la vida residual del material L [31]:

$$L_t = \frac{1}{A} e^{\left(\frac{B}{T}\right)} \quad (2.4)$$

Es posible expresar la ecuación (2.4) en función de la temperatura ambiente, evaluando L_t en $T = T_0$, encontrando el valor de L_0 al despejar $1/A$ y reemplazándolo en la ecuación:

$$L_t = L_0 e^{\left(\frac{-B}{T}\right)} * e^{\left(\frac{B}{T_0}\right)} \quad (2.5)$$

$$L_t = L_0 e^{(-B*\Delta T)} \quad (2.6)$$

Siendo $\Delta T = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}$

Permitiendo encontrar la vida residual del material de prueba utilizando como temperatura mínima de referencia la temperatura ambiente.

El modelo de envejecimiento térmico se basa en la teoría de reacción química, según esta teoría, el envejecimiento térmico es debido a la aceleración de reacciones químicas causadas por un aumento de temperatura ([27],[28]), todo el marco teórico del presente trabajo de grado sustenta dicha teoría.

Para el esfuerzo de tipo eléctrico al igual existen numerosos modelos para la estimación de vida del aislamiento, pero son dos modelos los mayormente utilizados, el modelo exponencial y el modelo de potencia inversa [32]–[34]. Ambos modelos obedecen al hecho que la vida de un aislamiento decrece drásticamente a medida que se incrementa el esfuerzo que está siendo aplicado.

Para el envejecimiento por estrés eléctrico se puede expresar de una manera general la vida del aislamiento como:

$$L_e = L_0 F(E) \quad (2.7)$$

$F(E)$ = Función decreciente con valor máximo de 1 para un valor de campo eléctrico límite $E = E_0$ donde el envejecimiento eléctrico no ocurre.

L = Vida del sistema de aislamiento siendo L_0 la vida inicial sin sufrir ningún tipo de envejecimiento y L_e la vida residual del aislamiento.

El modelo exponencial está basado en el fenómeno de avalancha de electrones teniendo un soporte físico, donde existe la dependencia exponencial entre el campo eléctrico E y el tiempo de ruptura dieléctrica dado por la siguiente ecuación:

$$F(E) = e^{-h(E-E_0)} \quad (2.8)$$

Representado este modelo exponencial como:

$$L_e = \kappa e^{-\zeta E} \quad (2.9)$$

Donde:

L_e = Vida remanente (horas).

E = Estrés eléctrico en kV/mm.

$\kappa; \zeta$; =Constantes características del material analizado encontradas a partir de datos experimentales.

Si se nota bien, una anotación válida a resaltar es que la ecuación (2.9) es la misma ecuación (2.1) presentada en el libro de máquinas eléctricas II de M.P. Kostenko y L.M. Piotrovski [9] definida para aislamientos clase A.

Este modelo exponencial sigue las características del envejecimiento de material expuestas anteriormente, al graficar en escala logarítmica la vida remanente en función del estrés eléctrico en escala normal se obtiene una línea recta a no ser que ocurra una reacción diferente que afecte el material de otra manera.

El modelo de potencia inversa surge de consideraciones estadísticas experimentales. Las pruebas que utilizan un esfuerzo eléctrico aplicado tienen como consideración que, dicho esfuerzo, sea constante hasta la ruptura del aislamiento. Para cada valor de campo eléctrico la duración en tiempo de la ruptura dieléctrica es diferente. El modelo se puede expresar de la siguiente manera:

$$L_e = \frac{\gamma}{\left[\frac{E}{E_0}\right]^n} \quad (2.10)$$

L_e = Vida remanente(horas)

E = Estrés eléctrico en kV/mm.

E_0 = Valor de campo eléctrico límite donde el envejecimiento es despreciado.

$\gamma; n$; =Constantes características del material analizado encontradas a partir de datos experimentales

Al graficar en escala logarítmica-logarítmica, la vida remanente en función del estrés dieléctrico se presenta como una línea recta.

El estudio de los modelos para el análisis de envejecimiento de diferentes tipos de estrés como el eléctrico y el térmico por separado funcionan muy bien para una correcta estimación de la vida residual del sistema de aislamiento, pero como se expresó anteriormente, el funcionamiento de una máquina no solo conlleva a un solo tipo de esfuerzo, durante su vida los generadores tienen presentes múltiples esfuerzos lo que si bien no desacreditan los modelos presentados anteriormente, si ponen en jaque su comparación con el funcionamiento habitual que realmente tienen las muestras a probar, por ello para mejorar la precisión en la estimación de la vida de los sistemas de aislamiento existen modelos multi-esfuerzos que intentan acercarse más a la realidad. ([35]–[38])

Dentro de todos los modelos existentes se quiere hacer énfasis en el modelo de Luciano Simoni [31], debido a que su modelo expresa la estimación de la vida residual en función del esfuerzo térmico y eléctrico, ejes principales de la prueba de envejecimiento acelerado “Voltage-Endurance”.

La ecuación general de dicho modelo se presenta de la siguiente manera:

$$\frac{L}{L_0} = \left(\frac{E}{E_0} \right)^{(b-n)} (e)^{(-B \Delta T)} \quad (2.11)$$

L = Vida residual estimada.

L_0 = Vida estimada para valores de campo eléctrico menores a E_0 .

E = Esfuerzo eléctrico.

E_0 = Valor de campo eléctrico límite donde el envejecimiento es despreciado.

b = Constante del material bajo prueba.

n = Exponente del modelo de potencia inversa.

B = Constante del modelo de Arrhenius

ΔT = Delta de temperatura $\Delta T = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}$; T_0 = Temperatura ambiente y T = Temperatura absoluta

La vida útil de un equipo eléctrico depende además de sus condiciones térmicas, de la inversión inicial, el mantenimiento que se lleve a cabo, la confiabilidad necesaria, la obsolescencia, el tamaño, el peso, la correcta operación y condiciones externas de su funcionamiento que puedan afectarlo. Tener en cuenta las tensiones al aislamiento de tipos TEAM para la especificación y selección de generadores es de suma importancia para que el equipo solicitado cumpla con las expectativas de los proyectos a los cuales están asociados.

3. PRÁCTICA RECOMENDADA PARA PRUEBA DE SOPORTABILIDAD A LA TENSIÓN (VOLTAGE-ENDURANCE) DE BARRAS Y BOBINAS PREFORMADAS IEEE STD. 1043

La temperatura ambiente afecta directamente la temperatura alcanzada por el equipo en su funcionamiento, las temperaturas límites para el sistema de aislamiento debe establecerse a partir de los resultados de las pruebas de vida térmica y la experiencia de servicio.

Existen pasos ya definidos por normas como la IEEE STD-1 para determinar los límites en el aumento de temperatura para una estandarización según el sistema de aislamiento a probar [6]:

- Clasificar el sistema de aislamiento por experiencia o por pruebas de vida aceleradas.
- Seleccionar un valor para limitar la temperatura ambiente.
- Restar el valor límite de la temperatura ambiente de la temperatura límite de aislamiento para obtener el valor límite del aumento de temperatura,
- Decidir sobre una asignación de punto más caliente.
- Obtener un aumento de temperatura observable que se usará para asignar una clasificación en condiciones estándar de prueba.

La relatividad de este tipo de procesos según la experiencia es que permite que alternativamente, el valor límite del aumento de temperatura pueda ser seleccionado primero sobre una base de consideraciones económicas, además los 5 pasos anteriores pueden ser llevados a cabo en orden inverso para encontrar la temperatura del punto más caliente y determinar con los datos de la prueba de vida el aislamiento requerido para la expectativa de vida y de servicio deseada. Estos procesos de selección de temperaturas límites del sistema de aislamiento son parámetros de rendimiento que el fabricante debe cumplir a especificación del cliente.

Con el fin de asignar una clasificación a la temperatura ambiente se toma normalmente con 40°C como temperatura máxima, normalmente la temperatura promedio del aire durante un periodo de 24 horas suele ser de 5 °C a 10°C más baja que la temperatura ambiente máxima.

Para la selección del punto más caliente existen factores que hacen que el aumento de temperatura observable sea diferente:

- Inaccesibilidad del punto más caliente.
- No uniformidad del enfriamiento.
- Tipo y grosor del aislamiento.
- Forma del devanado.
- Tasa de flujo de calor.
- Lugares relativos de generación y disipación de calor.
- Método de medición de temperatura.
- Condiciones de carga variables.

Todos estos procesos de selección no suelen aplicarse a las normas que evalúan el sistema de aislamiento como lo es la IEEE STD 1043 [39], pero es la experticia a través de los años de trabajo de múltiples empresas ([16], [19], [23], [25], [30], [40]) y las guías que representan otras normas como la IEEE STD 1 [6] que conducen al usuario que realice una especificación adecuada según las características de servicio del generador o del equipo a utilizar, por ello se ha decidido escribir en el presente trabajo de grado esta clase de consejos que guían a un correcto proceso de especificación y realización de la prueba de envejecimiento termoeléctrico.

Tabla 7. Valores de aumento de temperatura aconsejables a seleccionar según IEEE std. 1

30	60	100	160
35	65	115	180
40	70	120	200
45	75	130	220
50	80	140	240
55	90	150	

Fuente: IEEE Power Engineering Society, —IEEE Std. 1 - 2000. [6].

Para la estandarización de las pruebas de envejecimiento para la evaluación térmica del sistema de aislamiento se deben preparar los procedimientos según el estándar IEEE 99 [41] :

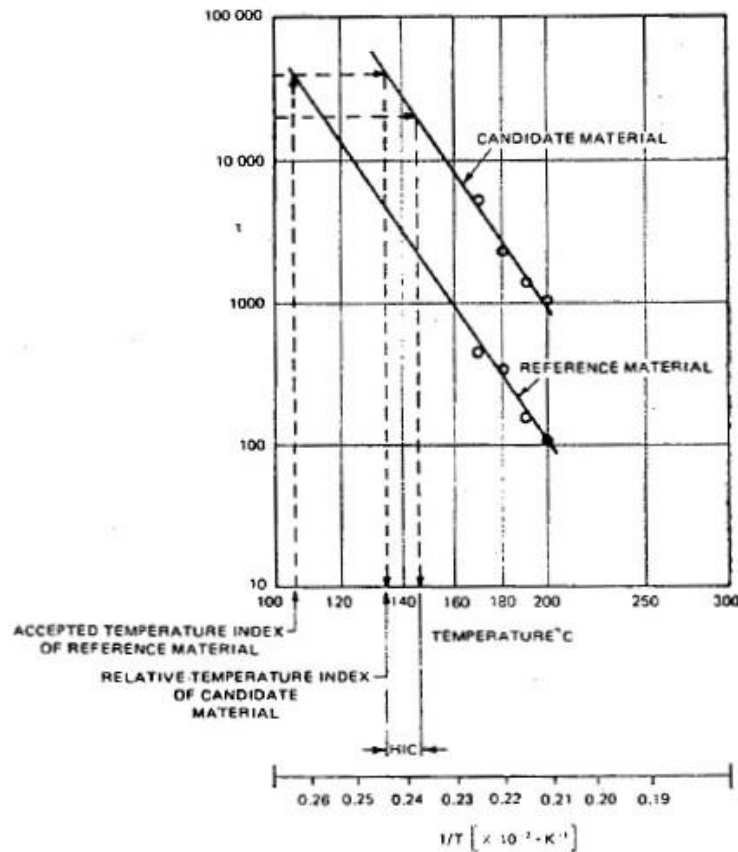
- Propósito de la prueba.
- Alcance.

- Definición del sistema de aislamiento de referencia o de las condiciones operativas de referencia.
- Modelo de envejecimiento.
- Humidificación.
- Materiales estructurales asociados.
- Tensión mecánica
- Tensión eléctrica.
- Ambientes especiales.
- Método de enfriamiento.
- Secuencia de prueba.
- Duración del ciclo de prueba.
- Criterios de falla.
- Tratamiento matemático de datos del envejecimiento.
- Interpretación de la esperanza de vida térmica.
- Especificación de la mínima esperanza de vida y variabilidad.
- Forma y método para informar los resultados.

De igual manera el informe de la prueba debe incluir lo siguiente:

- Descripción del estándar de evaluación aplicable.
- Descripción del candidato del sistema de aislamiento.
- Descripción del sistema de aislamiento de referencia con su clasificación térmica asignada y las condiciones de funcionamiento de referencia para la aplicación específica.
- Descripción del objeto de prueba.
- Descripción de cualquier preacondicionamiento.
- Temperatura de prueba y tiempo de ciclo a cada temperatura.
- Tratamientos de diagnóstico, pruebas y mediciones.
- Secuencia de prueba, duración y número de muestras.
- Criterios de punto final seleccionados.
- Curvas de envejecimiento y puntos finales.
- Análisis estadístico de resultados siguiendo el estándar IEEE std 101[42].
- Declaración de clasificación para el candidato del sistema de aislamiento.

Figura 36. Comparación de envejecimiento entre material de referencia y Sistema de aislamiento probado IEEE Std.1



Fuente: IEEE Power Engineering Society, 2011. [6]

La exposición prolongada a altas temperaturas es el factor de envejecimiento acelerado principal empleado en estas pruebas, se eligen otros factores, como la exposición a la humedad y el voltaje, para encontrar rápidamente cualquier debilidad o deterioro significativo del sistema de aislamiento. La idea es que en la medida de lo posible las condiciones atmosféricas y otras condiciones ambientales deben ser similares a las que generalmente se encuentran en el servicio habitual del aislamiento a probar.

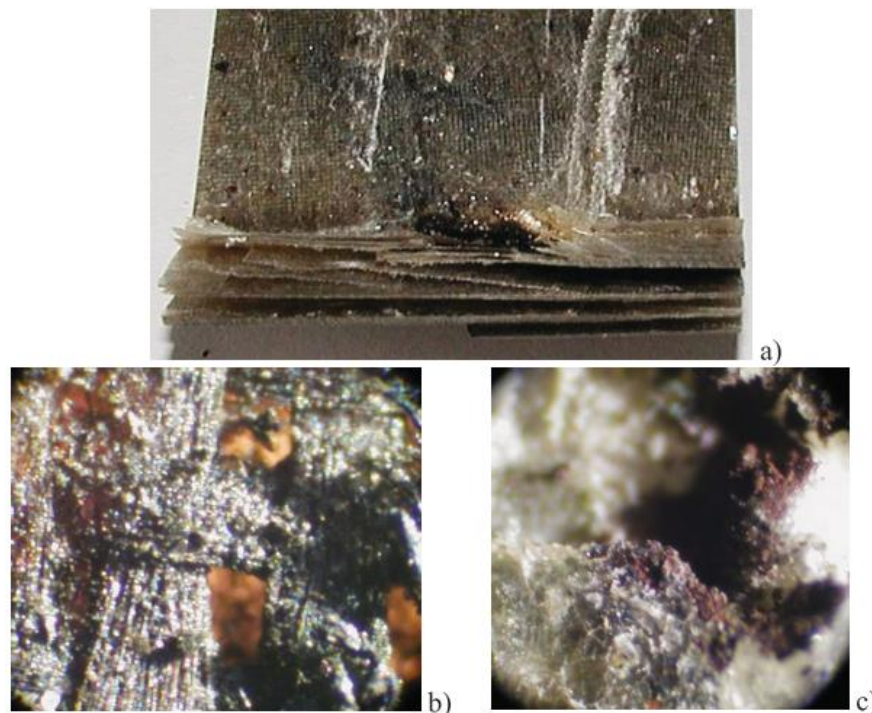
Cuando las condiciones se hacen más severas, queda en manos del realizador de la prueba considerar estas condiciones sobre el efecto de aceleración de la prueba a realizar.

La exposición a la cual la prueba se realiza sobre el aislamiento debe seleccionarse para que la aceleración del envejecimiento sea razonable o tenga una

determinación en la vida de la muestra a trabajar. Para evaluar los datos y realizar una comparación de las expectativas de vida se deben realizar los métodos de análisis de regresión de datos presentados en la IEEE std 101[42].

Las sobrecargas y cambios en la estructura física y química del material pueden desencadenar en falla como se analizó anteriormente, cabe resaltar que cuando la energía del impacto del estrés termoeléctrico sobre el aislamiento es lo suficientemente alta, el mecanismo de daños está presente en los puntos más débiles del aislamiento, en el caso del devanado del estator, siempre hay más de un punto débil debido a la estructura heterogénea del sistema de aislamiento, estos puntos débiles tarde o temprano colapsan.

Figura 37. Descomposición del Sistema de aislamiento de la pared a tierra. A. Canal de descarga y delaminación en los bordes de la barra, B. Carbonización del portador de fibra de vidrio, C. Resina



Fuente: C. Sumner, "Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 3, pp. 678–685, 2008. [7]

Dependiendo de las condiciones del devanado y de las estrategias de los operadores de las máquinas, se puede determinar la reparación del devanado del estator con avería, las empresas tienen algunas barras de repuesto para reemplazar la parte dañada, en caso de que el estado general del devanado sea muy malo, económicamente una reparación no es viable y el funcionamiento del generador a

posteriori no es seguro, en esos casos el remplazo del devanado se utiliza para mantener toda la máquina y a veces se procede a aumentar su potencia nominal utilizando un sistema de aislamiento de pared a tierra más delgado y más conductor de cobre, con el riesgo de que las condiciones de servicio tienen que ajustarse para no deteriorar el nuevo aislamiento.

El único procedimiento de prueba de resistencia al voltaje (Voltage-Endurance) detallado y estandarizado para barras preformadas y bobinas con frecuencia de trabajo 50/60 Hz es la práctica recomendada IEEE std 1043 [39], los parámetros de prueba están definidos en ella pero los criterios de aprobación y rechazo se describen ampliamente en el estándar IEEE std 1553 [43].

El estándar de “Voltage-Endurance” IEEE 1043 está basado en una prueba desarrollada por A.W.W Cameron y M. Kurtz en 1959 [44], las características clave la prueba son:

- Se prueban por lo general bobinas o barras de longitud completa.
- Las muestras deben tener el devanado final normal con los recubrimientos de alivio de tensión habituales en su operación, ya que muchos problemas de servicio se originan en el área.
- Se permite solo un método de aplicación de calor, placas calefactoras en la superficie de la muestra para desarrollar un gradiente térmico a través del grosor del muro de conexión a tierra.
- La frecuencia de alimentación permitida solo es de 50 o 60 Hz, el procedimiento de la prueba no especifica un voltaje de prueba o temperatura indicada, antes que se desarrollara el estándar de aceptación IEEE 1553 empresas habían publicado las temperaturas y voltajes que aplicaban [45][46].

El estándar IEEE 1553 especifica una barra o bobina de 13.8 kV como muestra que se prueba a 30 kV o 35 kV con un tiempo mínimo aceptable de falla de 400 o 250 horas respectivamente, la prueba a 35 kV representa un gasto mayor en equipos y operación, las barras o bobinas de prueba deben calentarse a la temperatura de operación de diseño, típicamente en un rango de 110-120°C.

El estándar IEEE 1043 ha sido ampliamente usado a nivel mundial como un criterio de selección de proveedores y prueba de control de calidad, IEC ha desarrollado procedimientos explicativos sobre la prueba de resistencia al voltaje como la IEC 61251 y para máquinas rotativas la IEC 60034-18-32 pero no ofrece detalles

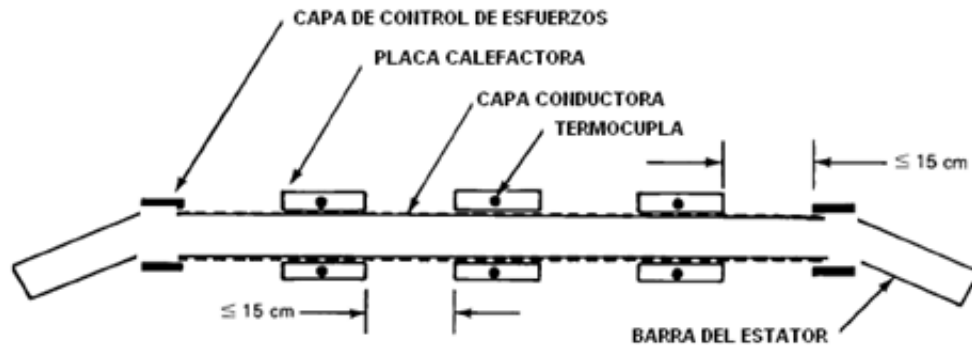
suficientes como los estándares IEEE, además los métodos de prueba utilizados por la serie IEC 60034-18 solo comparan un sistema de aislamiento de muestra con un sistema de aislamiento probado en servicio, en cambio los estándares IEEE 1553 dan un criterio de aprobación de las muestras.

La empresa holandesa KEMA [47][48] ha publicado métodos de pruebas guiándose en el estándar IEC, su procedimiento de prueba consiste en que dos barras sobrevivan a 1000 horas, alimentadas a 2 veces el voltaje nominal línea a línea, cabe resaltar que es un voltaje más bajo que el requerido por la IEEE 1553 pero con un tiempo de vida mucho más largo.

La prueba de resistencia al voltaje permite establecer el efecto del voltaje en la vida útil de la porción de ranura de la bobina o barra de prueba, pero deja por fuera de la prueba el sector de la cabeza de bobina donde pueden ocurrir problemas en el aislamiento y descargas parciales internas y entre bobinas.

Con relación a los ciclos de carga, existe una prueba similar al envejecimiento térmico y es la prueba de ciclado térmico (IEEE 1310 [49]), pero esta prueba no produce fallas por sí misma, se necesitan pruebas de diagnóstico para saber cuándo se produjo el deterioro, la mejor prueba de diagnóstico es la prueba de resistencia al voltaje, pero también representa un gasto mayor ya que se necesitan más muestras de prueba. La prueba de “Voltage-Endurance” establece tiempos de falla para barras vírgenes que no han sido sometidas a ciclado térmico, así que realizando la prueba a barras que han sido sometidas alrededor de 500 ciclos térmicos y comparando los resultados con las barras vírgenes podemos encontrar, si ha habido una disminución significativa de la vida útil que el ciclado térmico ha deteriorado el aislamiento o en su contrario, si cumple con los criterios de aceptación de la IEEE 1553 el ciclado térmico no es un factor de envejecimiento significativo.

Figura 38. Aplicación de temperatura por medio de placas calefactoras a una barra del estator según la práctica recomendada IEEE Std 1043.



Fuente: "IEEE std.1043-Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils," East, vol. 1996, 1989.[39]

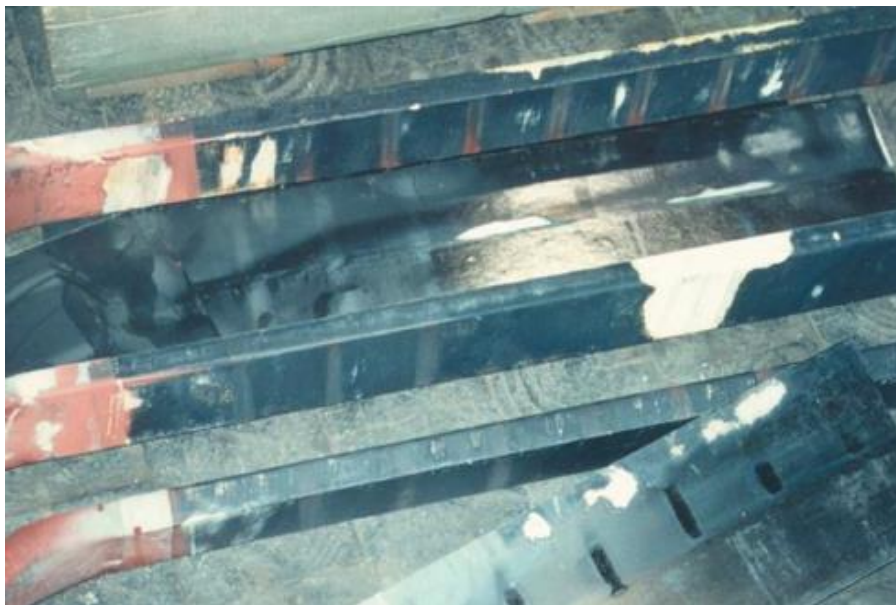
Durante la producción de una barra o bobina estatórica se deben cumplir una gran cantidad de requisitos para que proporcione un servicio confiable a largo plazo y en condiciones de operación exigentes, requisitos como las propiedades del material, el manejo y conformado del sistema de aislamiento, las temperaturas de procesamiento de la barra y el control de calidad de cada etapa son puntos básicos para la construcción de la barra, pero a lo largo del tiempo la barra/bobina construida tiene que pasar (además del proceso de fabricación per se) el almacenamiento y la distribución hasta llegar al uso por el cual fue creada, por ello la prueba de resistencia al voltaje es un método importante para detectar debilidades en cualquiera de las actividades involucradas de diseño y fabricación de las barras/bobinas eléctricas.

A nivel de proveedores, la prueba ayuda a reconocer posibles problemas y a evitar costos de rediseño y reorganización en la corrección de errores, como clientes, los usuarios se benefician de una garantía de servicio confiable.

La prueba de Voltage-Endurance puede revelar defectos de fabricación como:

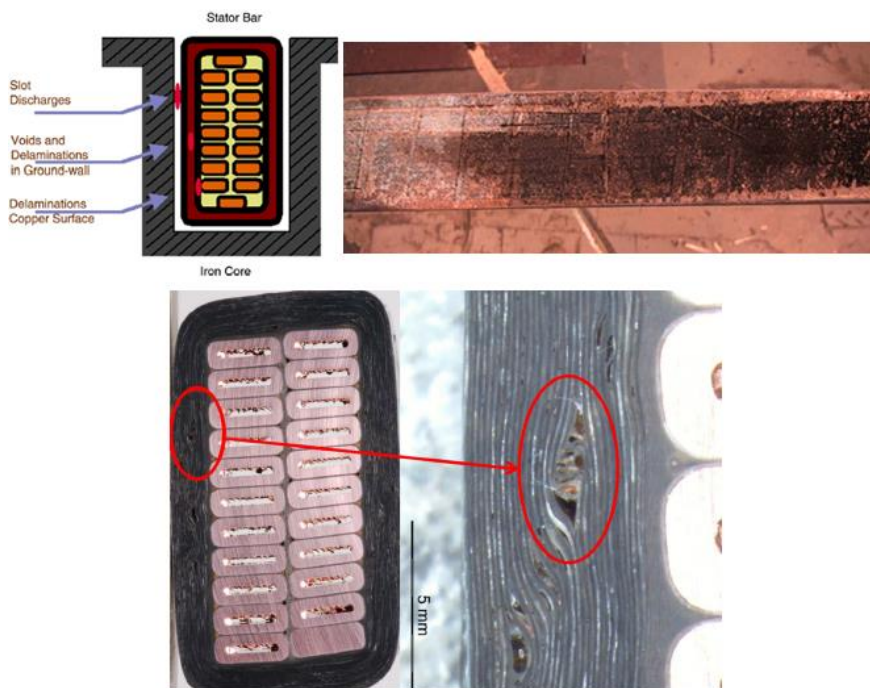
- Espesor del aislamiento reducido en las esquinas de bobina debido a una tensión de cinta demasiado alta durante la aplicación o en su defecto una capa de cinta omitida.
- Arrugas en el aislamiento.
- La mala aplicación de materiales semiconductores.
- Vacíos debido a una aplicación inadecuada de resina.

Figura 39. Barras conductoras del estator que muestran una importante erosión de la capa semiconductora y partes del aislamiento degradado debido a descargas parciales graves en un generador refrigerado por aire con una potencia de aproximadamente 80 MW.



Fuente: I. Kerszenbaum and G. Klempner, *Large Turbo-Generators*. 2016.[19]

Figura 40. Descargas internas de, huecos en el aislamiento y delaminación en el aislamiento principal de la pared a tierra.



Fuente: G. Klempner and I. Kerszanbaum, *Handbook of large Turbo-Generator operation and maintenance*, Third Edit. 2018.[25]

El método de la prueba IEEE 1043 consiste en al menos cuatro barras de prueba o dos bobinas equipadas con placas de acero o aluminio fijadas en cada lado de las secciones rectas, los calentadores eléctricos, separados entre sí no más de 15 cm y controlados termostáticamente se montan en el exterior de las placas para elevar la temperatura de la bobina al nivel deseado para la prueba, el voltaje que se aplica entre los conductores de la bobina y las placas de metal debe aumentarse gradualmente al valor requerido para evitar sobreimpulsos o picos significativos de voltaje en el proceso.

La fuente de alimentación debe ser variable y que pueda mantenerse en un mismo nivel de tensión para toda la prueba de tal manera que no ocurra una variación de más del 2% del nivel de tensión para las muestras a probar con una relación entre la tensión pico a pico y la tensión rms igual a $2\sqrt{2}$ en $\pm 5\%$, una diferencia mayor a este porcentaje puede representar un tiempo de vida más corto del aislamiento debido a la presencia de mayor número de armónicos de tensión, la carga del elemento de prueba puede afectar la forma de la onda lo que conlleva a que cada muestra es una condición distinta de la prueba, sin embargo existen elementos que permiten mejorar la forma de la onda, incluyendo filtros y ajustes capacitivos en el primario o el secundario del transformador.

La norma indica que la aplicación de la tensión se realiza mejor con un transformador variable alimentando un transformador elevador que es la disposición con la que la prueba se encontraba, sin embargo no existía manera hasta el momento de ofrecer una rampa suave de tensión, aplicación que se realizó durante el proceso de acondicionamiento de la prueba, dentro de la monitorización en el Dashboard y el proceso de control de voltaje por medio de la retroalimentación de información de voltaje del analizador de redes, como se encontrará en el siguiente capítulo.

La medición de tensión por el lado de baja puede ser acompañada de un osciloscopio para determinar mejor la cantidad de descargas parciales que se encuentran en el sistema, sin embargo, el laboratorio de ensayo de bobinas cuenta con la capacidad de realizar ensayo de descargas parciales con varios equipos certificados y de tecnologías diferentes como OMICRON, TECHIMP y Sparks Instruments, bajo los cuales ya se han realizado varias pruebas anteriormente.

El tiempo de prueba de los elementos debe ser medido con una resolución de 0.1 horas, en este caso, se adaptó el sistema de adquisición de datos para lograr el control absoluto desde el Dashboard de monitoreo, donde cada variable se

encuentra monitoreada y almacenada con resolución de segundos, además esta configuración puede ser fácilmente cambiada a la resolución deseada para el análisis de los datos y se detiene cuando la alimentación es apagada o disparada por una falla en el elemento de prueba.

Dentro de la preparación de la prueba, el propósito del procedimiento es probar la barra o bobina entera, pero esto muchas veces por su longitud no es posible, por ello, se pueden probar por separado longitudes de la barra de muestra, pero todas las piezas deben ser probadas, de manera tal que si una falla de cualquier pieza constituye la falla de la barra sin cortar.

Tabla 8. Longitudes recomendadas de prueba para barras o bobinas.

Longitud de la ranura (cm)	Longitud a probar
0-250	Probar la bobina o barra entera
250-350	Probar una sección con 250 cm de longitud de ranura efectiva
350-600	Cortar en dos longitudes iguales
>600	Cortar en dos o más secciones con al menos 250 cm de longitud de ranura efectiva

Fuente: "IEEE std.1043-Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils," East, vol. 1996, 1989. [39]

Las termocuplas para monitorear la temperatura de la barra bajo prueba deben ser colocadas en agujeros que están al menos a 4 cm de profundidad y localizadas en el centro de las placas calefactoras como se ve en la Figura 38, al menos una termocupla debe ser colocada por placa calefactora y debe usarse pasta o masilla de transferencia de calor para asegurar un buen contacto térmico entre la termocupla y la placa metálica, ya que la temperatura de la termocupla está definida como la temperatura de la placa de calefacción y por lo tanto como la temperatura de la prueba.

3.1.EVALUACIÓN DE LAS MUESTRAS ANTES DE LA PRUEBA DE ENVEJECIMIENTO

Como antesala para realizar la prueba de envejecimiento termoeléctrico se aconseja realizar las siguientes pruebas para tener datos claros de la situación y características iniciales de las barras/bobinas de muestra:

- Prueba de tensión aplicada en corriente alterna a la barra o sección preparada conforme con la IEEE std 4 [50], es recomendado un valor de 110% de la tensión seleccionada para la prueba de envejecimiento acelerado y mantener dicha tensión por 1 min.
- Medición del factor de disipación: medición de tangente delta, tip-up y capacitancia.
- Medición de resistencia de aislamiento conforme IEEE std 43[51].
- Medición de descargas parciales iniciales.

3.2.CONDICIONES DE SEGURIDAD

Las partes metálicas deben ser aterrizadas en un punto común, por un conductor para aterrizamiento de equipo y calculado para la corriente de falla del equipo de prueba asociado, las superficies conductoras de los elementos de prueba, el retorno de la fuente de alimentación, los circuitos de medición de tensión, las estructuras de soporte, las placas calefactoras, las vallas protectoras y el sistema de adquisición de datos.

Un conductor a tierra portátil debe ser usado para aterrizar sólidamente el elemento de prueba una vez que la alta tensión sea quitada y el elemento de prueba vaya a ser manipulado.

El área de prueba debe ser de acceso denegado de tal manera que con un enclavamiento se desenergice la prueba cuando alguien intente acceder al recinto, se deben tener señales publicadas, luces de faro rojas intermitentes, notificaciones de seguridad e instrucciones de desconexión de seguridad además de interruptores de llave para prevenir el re-arranque excepto por personal autorizado.

El personal que realice la prueba debe ser entrenado en el uso seguro del montaje de la prueba.

La prueba puede producir ozono, así que debe estar ventilada para prevenir riesgo en la salud.

Parámetros de la prueba a ser definidos:

Los siguientes parámetros deben ser definidos antes del comienzo de la prueba

- Temperatura de prueba.
- Tensión y frecuencia de prueba.
- Tiempo de falla aceptable.
- Mantenimiento de las capas semiconductora y de control de esfuerzos.
- Pruebas de diagnóstico requeridas antes y después de la prueba.
- Número de elementos a ser probados.
- Longitud de elementos de prueba.
- Disposición de las muestras falladas.
- Tratamiento de fallas del aislamiento en el área de control de esfuerzos.

4. MONITOREO DE LAS CONDICIONES DEL LABORATORIO, CONTROL DE LA PRUEBA, VALIDACIÓN DE LOS PROCEDIMIENTOS NORMALIZADOS Y ALMACENAMIENTO DE LOS DATOS A SER ANALIZADOS-RESULTADOS OBTENIDOS.

Todo el sistema de monitoreo y control fue programado a través de dos Raspberrys pi modelo 3 B+, placas base que tienen la posibilidad de trabajar como microcontroladores y microprocesadores, tienen conectividad Wi-Fi, puerto RJ45 para conexiones ethernet, conexión HDMI y puertos GPIO de 40 pines con los cuales se hace la entrega y recibo de información, el procesador es un Broadcom BCM2837B0, Cortex A53 (ARMv8) de 64 bit SoC, con una frecuencia de trabajo de 1,4GHz y una memoria ram de 1 GB, conectividad bluetooth 4.2, es un mini pc de bajo costo que puede prestar múltiples servicios a través del sistema operativo Raspbian, un sistema operativo de distribución Debian para equipos ARM.

Figura 41 Raspberry PI modelo 3B+



Fuente: Elaboración propia.

Una de estas Raspberrys (Raspberry #1) es usada para la comunicación con los equipos que manejan conectividad modbus, como es el caso del datalogger Fieldlogger NOVUS que tiene la finalidad de almacenar las temperaturas de prueba en su almacenamiento local y comunicar dichas temperaturas y el estado de los canales on/off que accionan las placas calefactoras, esta información se transmite a través de modbus TCP-IP por medio del mapa modbus que viene con el manual del equipo [52], el otro equipo que posee comunicación modbus, pero esta vez por protocolo RS-485 es el analizador de potencia CIRCUITOR CVM-96 [53], debido a que no se quiere utilizar los GPIO de la raspberry para la recepción de estos datos sino para el control de información por medio de una HMI táctil, se procede a transmitir la información del analizador de potencia por medio de un conversor

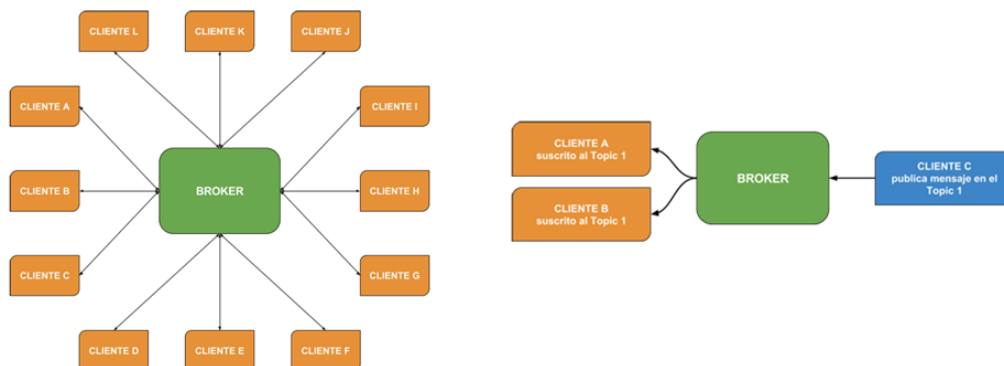
RS485 a puerto USB [54] realizando una conexión Half-Duplex la cual resiste hasta 64 dispositivos conectados, esto significa que podemos conectar 62 equipos más fácilmente por protocolo RS-485 para la transmisión de datos con la raspberry, además de la comunicación modbus, la Raspberry #1 se utiliza como servidor para alojar una página web local creada a través de WordPress [55] donde se realiza un manual de la prueba con las condiciones de trabajo en el laboratorio de ensayo de bobinas “CONVERGIA”, condiciones de seguridad necesarias, consideraciones del ensayo de envejecimiento acelerado presentado en el trabajo de grado y manuales de los equipos utilizados en la prueba. Otra aplicación de la cual se hace uso en la Raspberry #1 es sistema de seguridad y vigilancia de la prueba, por medio del servicio MOTION EYE que hace las veces de DVR para conectar cámaras IP que permitan realizar la visualización de la prueba las 24 horas, este servicio permite la grabación de la prueba, alarmas de movimiento, captura de evidencia de las muestras en fotos y la visualización de varias cámaras al mismo tiempo, actualmente se encuentra en uso una cámara infrarroja “noir” compatible con Raspberry pero se pueden conectar múltiples cámaras de vigilancia para la realización de la prueba.

Toda la adquisición de datos se realiza por medio de NODE-RED [56], una herramienta de desarrollo gratuita inventada por IBM basada en flujo para conectar dispositivos de hardware, API's y servicios en línea por medio de nodos que facilitan la conexión de múltiples protocolos, la centralización de datos, el monitoreo de información y el control de procesos. Node-red está construido en Node.js, pensado para el internet de las cosas (IOT) y soportado por equipos de bajo costo, es el administrador ideal para la automatización de la prueba de envejecimiento acelerado IEEE 1043, pero no solo se limita a prestar este servicio, es el usuario quien define dentro del centenar de posibilidades el uso que da a esta poderosa herramienta, lo cual abre la posibilidad de realizar múltiples funciones además del destinado en el presente trabajo de grado.

La información adquirida por medio de protocolo modbus en la Raspberry #1 es transmitida a la Raspberry #2 por medio de protocolo MQTT, un protocolo basado en eventos (Topics) donde cada mensaje se envía a los receptores que se hayan suscrito a una publicación concreta distribuyendo los mensajes a través del bróker o servidor central, más específicamente con el broker “mosquitto” instalado en la Raspberry #2, el cual es la parte central de la arquitectura y todos los mensajes pasan por él. El protocolo MQTT[57], Message Queue Telemetry Transport, es un protocolo máquina-máquina (M2M) basado mensajería publicación/suscripción, a diferencia de HTTP que es petición/respuesta, haciendo que sea simple y ligero,

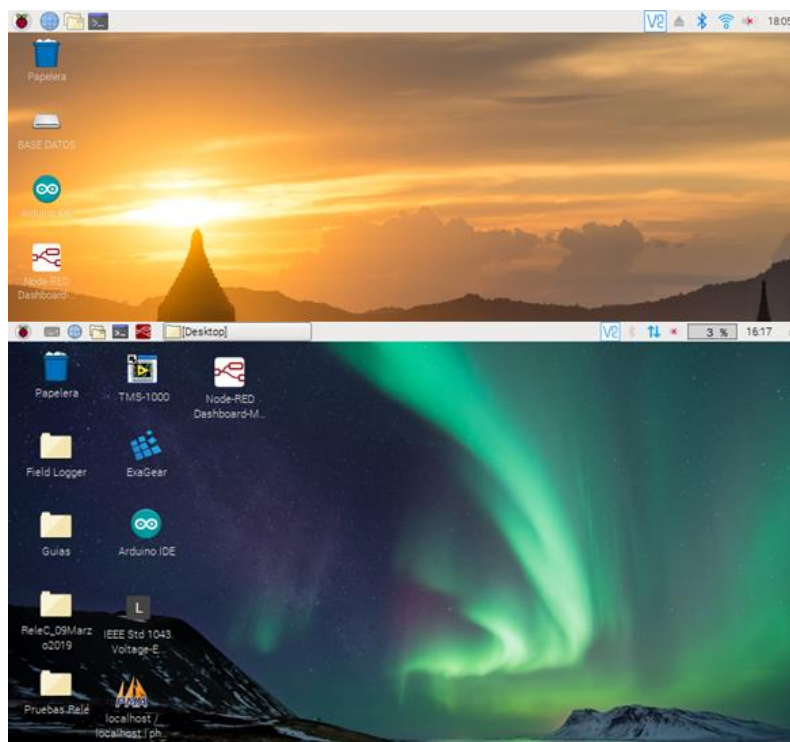
especializado para sistemas con poco ancho de banda, alta latencia y de poco consumo, garantizando fiabilidad y seguridad de los mensajes, desde el 2014 es un estándar de comunicación OASIS y a mi manera de ver es el protocolo perfecto para el internet de las cosas (IOT).

Figura 42. Funcionamiento protocolo MQTT



Fuente: Blog programar fácil MQTT [58]

Figura 43. Desktop Raspberry #1 (Inferior) y Raspberry #2 (Superior)



Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizada la adquisición de la información por protocolo modbus mediante Node-red, se procede a la transmisión de la información desde la Raspberry #1

hacia la Raspberry #2 utilizada para la centralización de los mismos, la visualización de los datos y control de la prueba por medio del Dashboard, la posibilidad del usar el servicio de DVR de vigilancia de la prueba por MOTION EYE, la visualización de la página web con el manual de la prueba alojado en la Raspberry #1, el estado de uso de la memoria ram de ambas Raspberrys, la adquisición de datos del sensor de temperatura y humedad ambiente DHT11 por medio de la lectura serial de arduino Leonardo, la publicación de notificaciones y correos electrónicos a intervalos de tiempo a cuentas y dispositivos asociados como celulares y tablets con las condiciones actuales de la prueba y alarmas de precaución y fallo de la misma y un soporte a la información presentada en el Dashboard de Node-red pero para dispositivos Android y IOS por medio de protocolo MQTT y de notificaciones por a través de una API conocida como Pushbullet [59] para cualquier dispositivo con permiso a conexión asociado a la prueba de envejecimiento acelerado.

Figura 44. Comparación de la medición de temperatura y humedad ambiente entre DHT11 (izquierda) y sensor SD700 EXTECH calibrado.



Fuente: Elaboración propia

Un aspecto adicional a resaltar es la creación de una base de datos en el servidor de la Raspberry #2 para la exportación de todos los datos monitoreados durante la prueba a formato .csv desde Node-red, dicha base de datos también cumple con la función de NAS (Network Attached Storage), tecnología de almacenamiento en la

nube dedicada a compartir la información referente a la prueba con los equipos conectados a la red local especialmente creada en este proceso del trabajo de grado para el laboratorio de ensayo de bobinas, con la conexión de los equipos de monitoreo Raspberry #1 y Raspberry #2 a un router TP-Link configurado para este propósito.

La conexión del router de la red local con internet permite la publicación de los datos en la red y la conexión desde cualquier parte del mundo al sistema del laboratorio por medio RealVNC [60], un software libre basado en la estructura cliente-servidor para observar las acciones del servidor remotamente a través de un cliente, sin restricciones de sistema operativo, pudiendo entrar al sistema los clientes autorizados desde un pc, una Tablet, un celular, otra Raspberry, etc.

Figura 45. Servicios utilizados en el monitoreo y control de la prueba de envejecimiento acelerado, a la izquierda protocolo MQTT y servicio de notificaciones a dispositivos móviles Pushbullet, en el centro el servicio de vigilancia DVR motion-eye y cámara infrarroja, a la derecha servicio VNC para escritorio remoto.



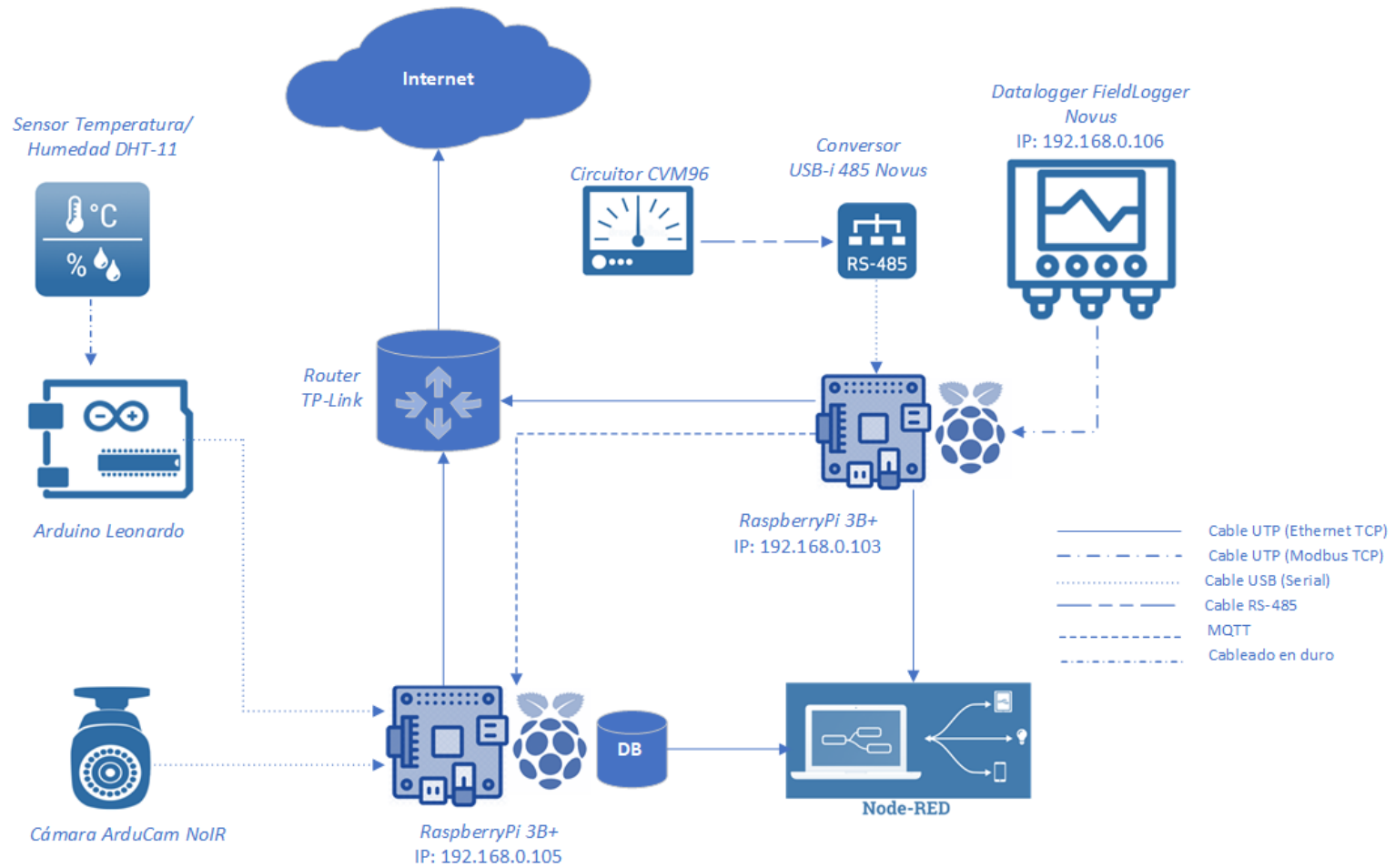
Fuente: Elaboración propia.

Registros de la prueba logrados a partir del Dashboard del sistema de control y monitoreo para la prueba de envejecimiento termoeléctrico acelerado IEEE std 1043:

- Temperatura ambiente y humedad del área de prueba.
- Tensión aplicada.
- Frecuencia en Hertz de la tensión aplicada.
- Tiempo total de soportabilidad de cada muestra.
- Resultados de cualquier prueba o medición diagnosticada preliminar o intermedamente.
- Observaciones de la localización de falla.
- Observaciones de la naturaleza de falla o daño de la capa de control de esfuerzos.

- Temperatura de la prueba de soportabilidad a la tensión, temperatura de las termocuplas entre las placas calefactoras.
- Mínima y máxima tensión de prueba y temperatura durante la prueba.
- Naturaleza de las muestras y electrodos.
- Notificaciones y alarmas sobre novedades de la prueba.
- Conexión remota a la prueba desde cualquier dispositivo.
- Vigilancia de la prueba por medio de cámaras conectadas al sistema DVR-motion eye instalado en las Raspberrys.
- Almacenamiento NAS entre equipos conectados a la red local como base de datos para la prueba.
- Monitoreo del estado de funcionamiento de las Raspberrys.

Figura 46. Arquitectura de red Sistema de monitoreo y control, prueba de envejecimiento termoelectrico acelerado IEEE std 1043



Fuente: Elaboración propia.

Figura 47. Múltiples sistemas de monitoreo posibles con la configuración realizada en el acondicionamiento del laboratorio de bobinas (Raspberry pi 3 B+ / Datalogger Fieldlogger novus

Fuente: Realización propia.

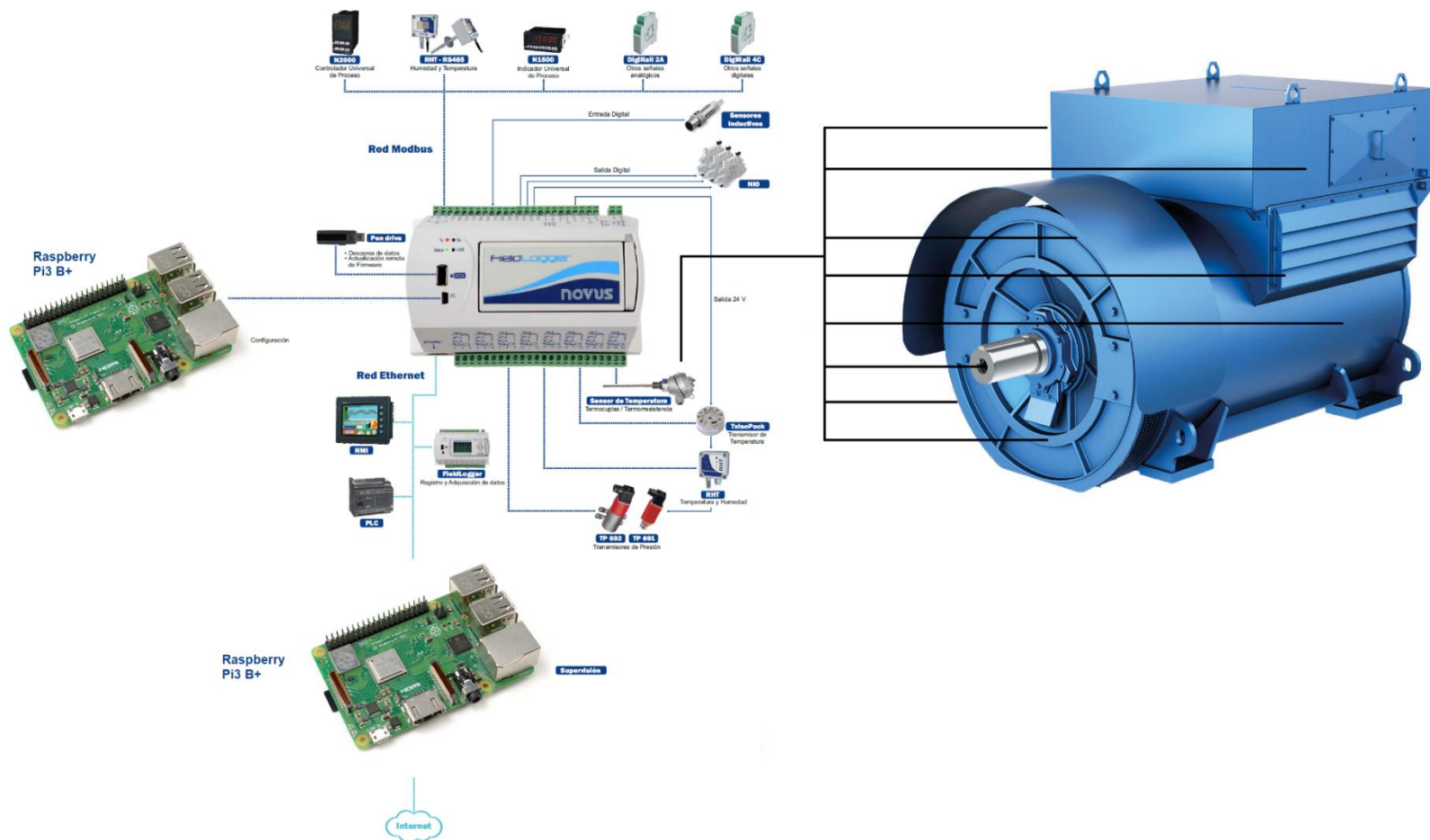
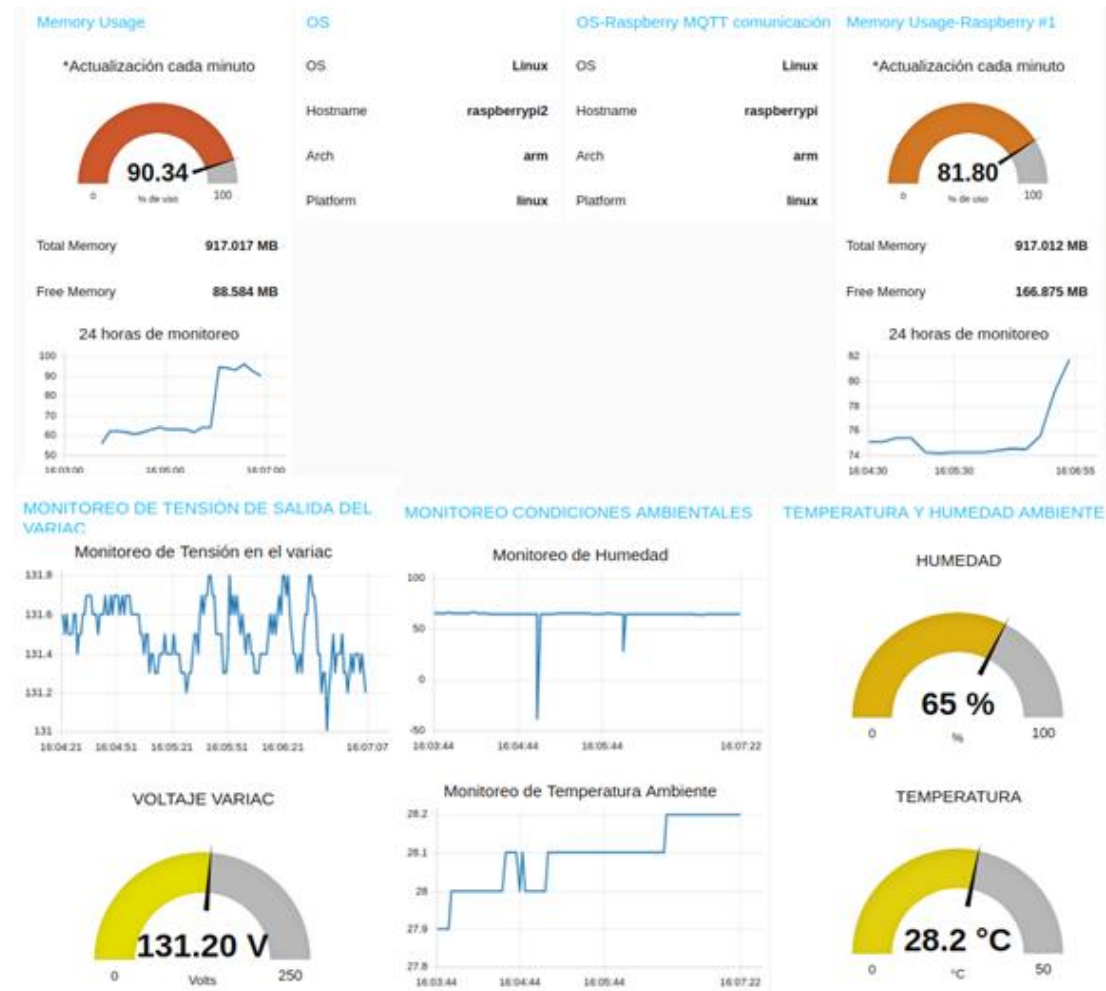


Figura 48. Dashboard de monitoreo y control – Prueba de envejecimiento termoeléctrico acelerado siguiendo práctica recomendada IEEE 1043.



Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES

- Se realizó el acondicionamiento técnico del laboratorio de ensayo de bobinas “Convergía” para el ensayo de envejecimiento termoeléctrico acelerado no solo cumpliendo con la práctica recomendada IEEE std 1043 teniendo en cuenta las limitaciones del laboratorio, sino logrando la automatización del proceso de control de temperatura y tensión, monitorización de los datos, comunicación con dispositivos móviles, servicio de escritorio remoto para el monitoreo de la prueba desde cualquier lugar y base de datos de los criterios primordiales de la prueba.
- Se realiza un planteamiento técnico de los requisitos necesarios para llevar a cabo la prueba de envejecimiento acelerado, explicando desde los aspectos más básicos de teoría hasta la automatización misma de la prueba, brindando información actualizada y detallada sobre empresas que realizan la prueba a nivel mundial, características adicionales no planteadas en la práctica recomendada y la explicación técnica a nivel de químico y de materiales sobre el proceso de envejecimiento, haciendo del presente trabajo de grado un manual per se para la realización de la prueba
- El proceso llevado a cabo en el presente trabajo de grado dio como resultado adicional una maleta de control y monitoreo de señales portátil que puede ser utilizada para múltiples servicios, es un insumo que sirve para próximos trabajos de grado e incluso para realizar procesos de monitoreo a nivel industrial.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] N. P. Bogoróditski, V. V. Pásinkov, and B. M. Taréiev, *Materiales electrotécnicos*. 1979.
- [2] W. H. Hayt Jr. and J. A. Buck, *Teoría electromagnética*, Séptima ed. 2006.
- [3] N. H. Malik, A. A. Al-Arainy, and M. I. Qureshi, *Electrical insulation in power systems*. CRC Press, 2018.
- [4] B. M. Taréiev, *Física de los materiales dieléctricos*. 1978.
- [5] H. Torres Sánchez, *Aislamientos Eléctricos*, Primera ed. Bogotá, D.C, 2011.
- [6] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Std. 1 - 2000. IEEE Recommended Practice—General Principles for Temperature Limits in the Rating of Electrical Equipment and for the Evaluation of Electrical Insulation," 2011.
- [7] C. Sumereder, "Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 3, pp. 678–685, 2008.
- [8] L. F. Posso Buritica, "Descargas superficiales en las cabezas de bobinas de los generadores hidroeléctricos-Tesis de maestría," 1998.
- [9] M.P.Kostenco and L.M.Piotrovski, *Máquinas Eléctricas II*. Moscow, 1976.
- [10] M. Fernández Cabanas, M. García Melero, G. Alonso Orcajo, J. M. Cano Rodríguez, and J. Solares Sariego, *Técnicas para el mantenimiento y diagnóstico de máquinas eléctricas rotativas*, Primera ed. Barcelona: Marcombo S.A., 1998.
- [11] International Electrotechnical Commission, "IEC 60085- Electrical insulation- Thermal evaluation and designation," *IEC*, 2007.
- [12] Kato Engineering, "Form-Wound Coils and Random-Wound Coils, Engineering Report," pp. 1–5, 2001.
- [13] SC11, "Hydrogenerator Failures-Results of the Survey," 2002.
- [14] W. D. Blecken, "Applying new technology in the upgrading or uprating of generators," *Int. J. Hydropower Dams*, vol. 4, no. 6, pp. 26–32, 1997.
- [15] L. C. Castro Heredia, "Diagnóstico del aislamiento principal de bobinas estáticas sometidas a esfuerzos termoeléctricos en laboratorio," Universidad del Valle, 2014.
- [16] G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, and H. Dhirani, *Electrical Insulation for Rotating Machines - Design, Evaluation, Aging, Testing, and Repair*, Second Edi. IEEE, 2014.
- [17] G. C. Stone, M. Sasic, D. Dunn, and I. Culbert, "Recent problems experienced with motor and generator windings," *2009 Rec. Conf. Pap. - Ind. Appl. Soc. 56th Annu. Pet. Chem. Ind. Conf. PCIC 2009*, pp. 1–9, 2009.
- [18] J. H. Dymond, N. Stranges, K. Younsi, and J. E. Hayward, "Stator winding failures: Contamination, surface discharge, tracking," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 2, pp. 577–583, 2002.
- [19] I. Kerszenbaum and G. Klempner, *Large Turbo-Generators*. 2016.
- [20] R. Tremblay, "Improved Requirements for Stress-Grading Systems at Hydro-Québec," no. June, pp. 1–6, 2007.
- [21] C. Hudon and M. Bélec, "Partial discharge signal interpretation for generator

- diagnostics,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 2, pp. 297–319, 2005.
- [22] C. Hudon and M. Belec, “Aging of stator bars exposed to end arm discharges,” *Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom. (CEIDP), Annu. Rep.*, vol. 2, pp. 829–832, 1996.
 - [23] Von Roll, “Sistemas aislantes para grandes generadores.” [Online]. Available: http://www.vonroll.com/media/files/downloads/brochures/large_gen_spa_WE B.pdf. [Accessed: 01-Aug-2019].
 - [24] Icontec Internacional, “NTC 2805-2011. Máquinas eléctricas rotatorias. Especificaciones nominales y características de funcionamiento.” 2011.
 - [25] G. Klempner and I. Kerszanbaum, *Handbook of large Turbo-Generator operation and maintenance*, Third Edit. 2018.
 - [26] R. Machinery and P. Engineering, *IEEE Guide for Operation and Maintenance of Hydro-Generators*, vol. 2005, no. May. 1999.
 - [27] T. W. Dakin, “Electrical Insulation Deterioration Treated as a Chemical Rate Phenomenon,” vol. 67, 1948.
 - [28] H. J. Reyno González, “Envejecimiento Acumulativo Acelerado de Aislamiento Sólido Sometido a Esfuerzos Eléctrico y Térmicos,” p. 123, 2012.
 - [29] A. Y. Caranton Muñoz, “Evaluación de vida útil residual de aislamiento compuesto de mica y resina con base en pruebas de envejecimiento acelerado,” pp. 19–21, 2012.
 - [30] BINDER, “Envejecimiento artificial Resumen,” pp. 1–16.
 - [31] L. Simoni, “A general approach to the endurance of electrical insulation under temperature and voltage,” *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-16, no. 4, pp. 277–289, 1981.
 - [32] W. Nelson, “Analysis of Accelerated Life Test Data– Least Squares Methods for the Inverse Power Law Model,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. R-24, no. 2, pp. 103–107, 1975.
 - [33] H. S. Endicott, B. D. Hatch, and R. G. Sohmer, “Application of the Eyring Model to capacitor aging data,” *Annu. Rep. 1962 Conf. Electr. Insul. CEI 1962*, pp. 47–50, 2016.
 - [34] J. Lawrence, “Conditioning on Life of Capacitors,” pp. 102–107, 1967.
 - [35] E. Insulation, “A General Phenomenological Life Model for,” vol. 6, no. 2, pp. 250–258, 1999.
 - [36] G. C. Montanari, “Life models for insulating materials and systems with electrical life lines tending to threshold,” *Conf. Rec. IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, vol. 1992-June, no. 1, pp. 40–43, 1992.
 - [37] J. P. Crine, “A model of solid dielectrics aging,” *Conf. Rec. IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, no. 4, pp. 25–26, 1990.
 - [38] P. Cygan and J. R. Laghari, “A review of electrical and thermal multistress aging models,” *Conf. Rec. IEEE Int. Symp. Electr. Insul.*, pp. 15–20, 1990.
 - [39] “IEEE std.1043-Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils,” *East*, vol. 1996, 1989.
 - [40] Von Roll, “MICA MAX®, Class H + , Catalyzed , 100 % reactive Epoxy system Distributed by : Vonroll.”

- [41] S. Coordinating and E. Insulation, "IEEE Std 99TM-2007, IEEE Recommended Practice for the Preparation of Test Procedures for the Thermal Evaluation of Insulation Systems for Electrical Equipment," vol. 2007, no. February, 2008.
- [42] A. American and N. Standard, "An American National Standard IEEE Guide for the Statistical Analysis of Electrical Insulation Voltage Endurance Data," *Analysis*, vol. 1987, 1987.
- [43] E. M. Committee, "IEEE 1553 Trial-Use Standard for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Coils and Bars for Hydrogenerators," no. March, 2002.
- [44] A. W. W. Cameron and M. Kurtz, "A Utility's Functional Evaluation Tests for High-Voltage Stator Insulation," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng. Part III Power Appar. Syst.*, vol. 78, no. 3, pp. 178–183, 1959.
- [45] B. E. Ward, G. C. Stone, and M. Kurtz, "Quality Control Test for High Voltage Stator Insulation," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, pp. 12–17, 1987.
- [46] S. E. Cherukupalli and G. L. Halldorson., "Using the Voltage Endurance Test to Ensure the Quality of Insulation in a Generator," *Hydro Rev.*, pp. 48–57, 1997.
- [47] K. Koga and H. Maeda, "A1-116 CIGRE 2016 Development of Larger Output Indirectly Hydrogen-cooled Turbine Generator with High Heat Transfer Main Insulation Mitsubishi Electric Corporation M . ONODA K . TANAKA Y . NAKAMURA Mitsubishi Hitachi Power Systems , LTD . Sako.Hiroshi@dp.," 2016.
- [48] J. H. Krieg, "KEMA Report No. S13/14 KEMA Specification for Hydrogen, Liquid and Air Cooled Synchronous AC Generators Rated 5 kV and Above."
- [49] E. Machinery and E. Society, "IEEE Recommended Practice for Thermal Cycle Testing of Form-Wound Stator Bars and Coils for Large Rotating Machines," *IEEE Electr. Mach. Comm.*, vol. 2012, no. May, 2012.
- [50] P. Ieee and S. Energy, *IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques IEEE Power and Energy Society, IEEE Std 4 - 2013*, vol. 2013, no. May. 2013.
- [51] IEEE Power and Energy Society, *Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*, vol. 2013. 2013.
- [52] NOVUS, "FieldLogger NOVUS." [Online]. Available: https://www.novusautomation.com/site/default.asp?TroncoID=621808&Secaoid=617290&Subsecaoid=0&Template=../catalogos/layout_produto.asp&PrdutoID=926054&Idioma=34.
- [53] CIRCUITOR, "CIRCUITOR CVM-NRG96." [Online]. Available: <http://circuitor.com/es/productos/medida-y-control/analizadores-de-redes-fijos/analizadores-de-redes/serie-cvm-nrg96-detail>.
- [54] NOVUS, "Conversor USB-i485." [Online]. Available: https://www.novusautomation.com/site/default.asp?TroncoID=621808&Secaoid=617290&Subsecaoid=0&Template=../catalogos/layout_produto.asp&PrdutoID=507081&Idioma=34.
- [55] WordPress, "WordPress." [Online]. Available: https://es.wordpress.com/create/?v=spain_go_to_market&sgmt=gb&utm_source=google&utm_campaign=google_wpcom_search_brand_desktop_co_es&utm_medium=paid_search&keyword=wordpress&creative=349301678632

- &campaignid=1886349108&adgroupid=70579368619&matchtype=e&dev.
- [56] IBM, "NODE-RED." [Online]. Available: <https://nodered.org>.
 - [57] OASIS, "MQTT.org." [Online]. Available: <http://mqtt.org>.
 - [58] Blog programar facil, "mqtt-esp8266-raspberry-pi." [Online]. Available: <https://programarfacil.com/esp8266/mqtt-esp8266-raspberry-pi/>.
 - [59] Pushbullet, "Pushbullet." [Online]. Available: <https://www.pushbullet.com>.
 - [60] real vnc, "VNC." [Online]. Available: <https://www.realvnc.com/es/>.

7. ANEXOS

7.1. CÓDIGO DE “TAKE PHOTO” PARA TOMAR EVIDENCIA FOTOGRÁFICA DE LAS MUESTRAS POR MEDIO DE LA CÁMARA INFRARROJA DE LA RASPBERRY PI 3B+:

```
from picamera import PiCamera
from time import sleep

camera = PiCamera()

camera.rotation = 180
camera.start_preview()
sleep(3)
camera.capture('/media/Base_Datos/Servidor Local RASPBERRY/Photos
Muestras de Bobinas/Muestra 3.jpg')
camera.stop_preview()
```

7.2. CLIPBOARD MÓDULO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD POR LECTURA A PARTIR DE NODE-RED:

```
[{"id":"387320df.55424","type":"tab","label":"DHT11","disabled":false,"info":"","":{"id":"47e69f4f.3da3a","type":"serial","in","z":"387320df.55424","name":"Arduino Leonardo","serial":"fcdd6e11.086e","x":190,"y":240,"wires":[["28f3aa0f.240716","78393a5b.22b764"]]}, {"id":"78393a5b.22b764","type":"function","z":"387320df.55424","name":"TEMP","func":"var temp1= msg.payload[6]-48;\nvar temp2= msg.payload[7]-48;\nvar temp3= msg.payload[9]-48;\nvar temp4= msg.payload[10]-48;\n\nvar result = (temp1*1000)+(temp2*100)+(temp3*10)+temp4;\nresult= result/100;\n\nvar result1= {payload:result};\n\nreturn [result1];","outputs":1,"noerr":0,"x":370,"y":60,"wires":[["6ae3353a.95067c","f246e5e9.317ed8"]]}, {"id":"28f3aa0f.240716","type":"function","z":"387320df.55424","name":"HUMIDITY","func":"var hum1= msg.payload[0]-48;\nvar hum2= msg.payload[1]-48;\nvar hum3= msg.payload[3]-48;\nvar hum4= msg.payload[4]-48;\n\nvar result = (hum1*1000)+(hum2*100)+(hum3*10)+hum4;\n\nresult = result/100;\nvar result1 = {payload:result};\n\nreturn [result1];","outputs":1,"noerr":0,"x":400,"y":400,"wires":[["fdb3cfa5.f80ee","6c343141.c2efd"]]}, {"id":"6ae3353a.95067c","type":"debug","z":"387320df.55424","name":"","active":true,"tosidebar":true,"console":false,"tostatus":false,"complete":"false","x":540,"y":40,"wires":[]}, {"id":"6c343141.c2efd","type":"debug","z":"387320df.55424","na
```

```

me":"","active":true,"tosidebar":true,"console":false,"tostatus":false,"complete":"false",
"x":560,"y":500,"wires":[],{"id":"f246e5e9.317ed8","type":"ui_gauge","z":"387320df.55424",
"name":"Temperatura","group":"485932.b3b3e6d","order":0,"width":0,"height":0,"gtype":"gage",
"title":"TEMPERATURA","label":"units","format":"{{value}} °C","min":0,"max":50,"colors":
["#00b500","#e6e600","#ca3838"],"seg1":"","seg2":"","x":560,"y":100,"wires":[],{"id":"fdb3cfa5.f80ee",
"type":"ui_gauge","z":"387320df.55424","name":"Humedad","group":"485932.b3b3e6d","order":1,
"width":0,"height":0,"gtype":"gage","title":"HUMEDAD","label":"units","format":"{{value}} %",
"min":0,"max":100,"colors":["#00b500","#e6e600","#ca3838"],"seg1":"","seg2":"","x":570,
"y":340,"wires":[],{"id":"fcdd6e11.086e","type":"serial-port","z":"","serialport":"/dev/ttyACM0",
"serialbaud":"9600","databits":"8","parity":"none","stopbits":"1","waitfor":"","newline":"0",
"bin":"bin","out":"time","addchar":"false","responsetimeout":""},{"id":"485932.b3b3e6d",
"type":"ui_group","z":"","name":"TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTE","tab":"877c96e8.c31a88",
"disp":true,"width":"6","collapse":false},{"id":"877c96e8.c31a88","type":"ui_tab","z":"","name":
"DASHBOARD LABORATORIO DE BOBINAS","icon":"dashboard","disabled":false,"hidden":false}]

```

7.3. CLIPBOARD DE ADQUISICIÓN DE DATOS DESDE NODE-RED DEL SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD TOMADO A PARTIR DE ARDUINO LEONARDO:

```

[{"id":"6f6c1492.acd97c","type":"tab","label":"Temperatura ambiente desde raspberry",
"disabled":false,"info":"",""},{"id":"a81c451e.34f858","type":"rpi-dht22","z":"6f6c1492.acd97c",
"name":"DTH11","topic":"rpi-dht11","dht":"11","pintype":"0","pin":4,"x":350,"y":60,"wires":
[["2055554.78199aa","38216bd5.607ce4","8a23cc96.03b56"]],{"id":"3a44aeb.5de9052","type":"inject",
"z":"6f6c1492.acd97c","name":"Repeat-signal","topic":"REPEAT-SIGNAL","payload":"","payloadType":
"date","repeat":"1","crontab":"","once":false,"onceDelay":0.1,"x":160,"y":60,"wires":
[["a81c451e.34f858"]],{"id":"2055554.78199aa","type":"debug","z":"6f6c1492.acd97c",
"name":"","active":false,"tosidebar":true,"console":false,"tostatus":false,"complete":
"true","targetType":"full","x":530,"y":60,"wires":[],{"id":"2aa96656.e6490a",
"type":"debug","z":"6f6c1492.acd97c","name":"","active":true,"tosidebar":true,
"console":false,"tostatus":false,"complete":"false","x":560,"y":180,"wires":
[[],{"id":"f8c42ba0.d755c8","type":"debug","z":"6f6c1492.acd97c","name":"","active":
true,"tosidebar":true,"console":false,"tostatus":false,"complete":"false",
"x":560,"y":360,"wires":[],{"id":"38216bd5.607ce4","type":"function","z":"6f6c1492.acd97c",
"name":"TEMPERATURA","func":"msg.payload = msg.payload\nreturn msg;","outputs":1,
"noerr":0,"x":330,"y":180,"wires":[["2aa96656.e6490a","cda8fcff.8

```

```
65c3"]]],{"id":"8a23cc96.03b56","type":"function","z":"6f6c1492.acd97c","name":"H
UMEDAD","func":"msg.payload          =          msg.humidity\nreturn
msg;","outputs":1,"noerr":0,"x":370,"y":360,"wires":[["f8c42ba0.d755c8","c153050d.
eeda18"]]],{"id":"cda8fcff.865c3","type":"ui_gauge","z":"6f6c1492.acd97c","name":"
TEMPERATURA","group":"50bf1ea4.f1044","order":0,"width":0,"height":0,"gtype":"
gage","title":"Temperatura","label":"units","format":"{{value}}
°C","min":0,"max":50,"colors":["#00b500","#e6e600","#ca3838"],"seg1":"","seg2":"
","x":580,"y":240,"wires":[]},{"id":"c153050d.eeda18","type":"ui_gauge","z":"6f6c149
2.acd97c","name":"HUMEDAD","group":"50bf1ea4.f1044","order":1,"width":0,"heigh
t":0,"gtype":"gage","title":"Humedad","label":"units","format":"{{value}}
%","min":0,"max":100,"colors":["#00b500","#e6e600","#ca3838"],"seg1":"","seg2":
","x":580,"y":420,"wires":[]},{"id":"50bf1ea4.f1044","type":"ui_group","z":"","name":"
Raspberry","tab":"f0148bde.c86b28","disp":true,"width":6,"collapse":false},{"id":"f0
148bde.c86b28","type":"ui_tab","z":"","name":"DASHBOARD  TEMPERATURA  Y
HUMEDAD          AMBIENTE          DESDE
RASPBERRY","icon":"dashboard","order":2,"disabled":false,"hidden":false}]}
```

7.4. CÓDIGO ARDUINO PARA LA LECTURA DEL SENSOR DE TEMPERATURA Y HUMEDAD DHT11:

```
include <DHT.h>

//Constants
#define DHTPIN 2    // what pin we're connected to
#define DHTTYPE DHT11 // DHT 11 (AM2302)
// Initialize DHT sensor for normal 16mhz Arduino
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

//Variables
int chk;
float hum; //Stores humidity value
float temp; //Stores temperature value

void setup()
{
    Serial.begin(9600);
    dht.begin();
}
```



```

String hum1;
String temp1;

void loop()
{
    //Read data and store it to variables hum and temp
    hum = dht.readHumidity();
    temp= dht.readTemperature();
    hum1 = String(hum);
    temp1 = String(temp);
    //Print temp and humidity values to serial monitor
    // Serial.print("Humidity: ");
    Serial.print(hum1);
    Serial.print(",");
    Serial.print(temp1);
    // Serial.println(" Celsius");

    delay(2000); //Delay 2 sec.
}

```

7.5. CLIPBOARD NODE RED LECTURA MODBUS (RS485-ETHERNET) A PARTIR DEL NODO MODBUS-READ:

```

[{"id":"91cbfca1.83034","type":"tab","label":"Modbus read (rs-485)","disabled":false,"info":"","z":"91cbfca1.83034","name":"","topic":"","showStatusActivities":true,"logIOActivities":false,"showErrors":true,"unitid":"","dataType":"InputRegister","adr":"0","quantity":"20","rate":"1000","rateUnit":"ms","delayOnStart":false,"startDelayTime":"","server":"2b166c76.d7ce04","useIOFile":false,"ioFile":"","useIOForPayload":false,"x":190,"y":140,"wires":[["bcfb9a4b.fd5498"],["ff13e8a1.62a248"]]}, {"id":"bcfb9a4b.fd5498","type":"debug","z":"91cbfca1.83034","name":"","active":true,"tosidebar":true,"console":false,"tostatus":false,"complete":false,"x":480,"y":100,"wires":[]}, {"id":"ff13e8a1.62a248","type":"modbus-response","z":"91cbfca1.83034","name":"","registerShowMax":20,"x":500,"y":180,"wires":[]}, {"id":"2b166c76.d7ce04","type":"modbus-client","z":"","name":"","clienttype":"simpleser","bufferCommands":true,"stateLogEnabled":false,"tcpHost":"127.0.0.1","tcpPort":"502","tcpType":"DEFAULT","serialPort":"/dev/ttyUSB0","serialType":"RTU-

```

```

BUFFERD","serialBaudrate":"9600","serialDatabits":"8","serialStopbits":"1","serialP
arity":"none","serialConnectionDelay":"100","unit_id":"1","commandDelay":"1","clien
tTimeout":"1000","reconnectTimeout":"2000"]}]

```

7.6. CLIPBOARD NODE RED LECTURA MODBUS (RS485-ETHERNET) A PARTIR DEL NODO MODBUS FLEX GETTER:

```

[{"ID":"9597A60D.E2BFC8","TYPE":"TAB","LABEL":"MODBUS FLEX GETTER (RS-
485)","DISABLED":FALSE,"INFO":""},{ID":"7EE0AC23.713BB4","TYPE":"INJECT",
"Z":"9597A60D.E2BFC8","NAME":"","TOPIC":"","PAYLOAD":"","PAYLOADTYPE":
"STR","REPEAT":"","CRONTAB":"","ONCE":FALSE,"ONCEDELAY":0.1,"X":150,"Y":
140,"WIRES":[["32D33AA6.FA6E26"]]},{"ID":"669D3C82.A7BEF4","TYPE":"MOD
BUS-FLEX-
GETTER","Z":"9597A60D.E2BFC8","NAME":"","SHOWSTATUSACTIVITIES":TRUE,
"SHOWERRORS":TRUE,"LOGIOACTIVITIES":FALSE,"SERVER":"2B166C76.D
7CE04","USEIOFILE":FALSE,"IOFILE":"","USEIOFORPAYLOAD":FALSE,"X":410,
"Y":360,"WIRES":[["BE58134C.1FBD7"],["2970FA53.9EECF6"]]},{"ID":"32D33AA6.
FA6E26","TYPE":"FUNCTION","Z":"9597A60D.E2BFC8","NAME":"","FUNC":"MSG
.PAYLOAD = { \N 'FC': 4,\N 'UNITID': 1,\N 'ADDRESS': 0 ,\N 'QUANTITY':
10
},\NRETURN
MSG;","OUTPUTS":1,"NOERR":0,"X":240,"Y":240,"WIRES":[["669D3C82.A7BEF4"
] ]}, {"ID":"2970FA53.9EECF6","TYPE":"MODBUS-
RESPONSE","Z":"9597A60D.E2BFC8","NAME":"","REGISTERSHOWMAX":20,"X":
680,"Y":420,"WIRES":[]}, {"ID":"BE58134C.1FBD7","TYPE":"DEBUG","Z":"9597A6
0D.E2BFC8","NAME":"","ACTIVE":TRUE,"TOSIDEBAR":TRUE,"CONSOLE":FALS
E,"TOSTATUS":FALSE,"COMPLETE":"FALSE","X":660,"Y":300,"WIRES":[]}, {"ID":"
2B166C76.D7CE04","TYPE":"MODBUS-
CLIENT","Z":"","NAME":"","CLIENTTYPE":"SIMPLESER","BUFFERCOMMANDS":
TRUE,"STATELOGENABLED":FALSE,"TCPHOST":"127.0.0.1","TCPPOINT":"502",
"TCPTYPE":"DEFAULT","SERIALPORT":"/DEV/TTYUSB0","SERIALTYPE":"RTU-
BUFFERD","SERIALBAUDRATE":"9600","SERIALDATABITS":"8","SERIALSTOP
BITS":"1","SERIALPARITY":"NONE","SERIALCONNECTIONDELAY":"100","UNIT
_ID":"1","COMMANDDELAY":"1","CLIENTTIMEOUT":"1000","RECONNECTTIME
OUT":"2000"}]}

```

7.7.CLIPBOARD DE NODE-RED DEL DASHBOARD FINAL, MONITOREO CENTRALIZADO DE DATOS:

```
[{"id":"b68197fa.d857c8","type":"tab","label":"Scada Lab.
Bobinas","disabled":false,"info":"","},{id":"8b8c692b.280998","type":"serial
in","z":"b68197fa.d857c8","name":"Arduino
Leonardo","serial":"823ee7dc.2df578","x":270,"y":400,"wires":[["8c18e313.12dbc","
8edbf2e7.7d61"]],{"id":"8edbf2e7.7d61","type":"function","z":"b68197fa.d857c8","n
ame":"TEMP","func":"var temp1= msg.payload[6]-48;\nvar temp2= msg.payload[7]-
48;\nvar temp3= msg.payload[9]-48;\nvar temp4= msg.payload[10]-48;\n\nvar result
= (temp1*1000)+(temp2*100)+(temp3*10)+temp4;\nresult= result/100;\n\nvar
result1=
{payload:result};\n\nreturn
[result1];","outputs":1,"noerr":0,"x":450,"y":220,"wires":[["9c62053d.a5c908","f0a8d7
5a.a43bf8","89410f7d.971d8","74558a45.7f6654"]],{"id":"8c18e313.12dbc","type":"
function","z":"b68197fa.d857c8","name":"HUMIDITY","func":"var
hum1=
msg.payload[0]-48;\nvar hum2= msg.payload[1]-48;\nvar hum3= msg.payload[3]-
48;\nvar
hum4= msg.payload[4]-48;\n\nvar
result =
(hum1*1000)+(hum2*100)+(hum3*10)+hum4;\n\nresult = result/100;\nvar result1 =
{payload:result};\n\nreturn
[result1];","outputs":1,"noerr":0,"x":480,"y":560,"wires":[["c779ecb3.b05f4","19d0c24
.ce2713e","ceb0a096.dcb15","6c62cd32.65dd14"]],{"id":"9c62053d.a5c908","type"
:"debug","z":"b68197fa.d857c8","name":"","active":true,"tosidebar":true,"console":fa
lse,"tostatus":false,"complete":"false","x":620,"y":200,"wires":[],{"id":"19d0c24.ce27
13e","type":"debug","z":"b68197fa.d857c8","name":"","active":true,"tosidebar":true,"
console":false,"tostatus":false,"complete":"false","x":640,"y":660,"wires":[],{"id":"f0a
8d75a.a43bf8","type":"ui_gauge","z":"b68197fa.d857c8","name":"Temperatura","gr
oup":"68045667.537f68","order":0,"width":0,"height":0,"gtype":"gage","title":"TEMP
ERATURA","label":"units","format":"{{value}}
°C","min":0,"max":50,"colors":["#00b500","#e6e600","#ca3838"],"seg1":"","seg2":
","x":640,"y":260,"wires":[],{"id":"c779ecb3.b05f4","type":"ui_gauge","z":"b68197fa.
d857c8","name":"Humedad","group":"68045667.537f68","order":1,"width":0,"height"
:0,"gtype":"gage","title":"HUMEDAD","label":"units","format":"{{value}}
%","min":0,"max":100,"colors":["#00b500","#e6e600","#ca3838"],"seg1":"","seg2":
","x":650,"y":500,"wires":[],{"id":"89410f7d.971d8","type":"ui_chart","z":"b68197fa.
d857c8","name":"TEMPERATURA","group":"dffcebf6.655c38","order":2,"width":0,
"height":0,"label":"Monitoreo de Temperatura
Ambiente","chartType":"line","legend":"false","xformat":"HH:mm:ss","interpolate":"li
near","nodata":"","dot":false,"ymin":"","ymax":"","removeOlder":1,"removeOlderPoin
ts":"","removeOlderUnit":"3600","cutout":0,"useOneColor":false,"colors":["#1f77b4",
```

```

"#aec7e8", "#ff7f0e", "#2ca02c", "#98df8a", "#d62728", "#ff9896", "#9467bd", "#c5b0d5
"], "useOldStyle": false, "outputs": 1, "x": 650, "y": 300, "wires": [], {"id": "587a47b2.f0d85
8", "type": "modbus-
read", "z": "b68197fa.d857c8", "name": "", "topic": "", "showStatusActivities": true, "logIO
Activities": false, "showErrors": true, "unitid": "", "dataType": "InputRegister", "adr": "0", "q
uantity": "2", "rate": "1", "rateUnit": "s", "delayOnStart": false, "startDelayTime": "", "server"
: "2b166c76.d7ce04", "useIOFile": false, "ioFile": "", "useIOForPayload": false, "x": 290, "y
": 1040, "wires": [{"e30bbbd3.38fe18", "c389fa01.33d568"}, {"3ed0372.35581c8", "e979
bf19.0a999"}]}, {"id": "e30bbbd3.38fe18", "type": "debug", "z": "b68197fa.d857c8", "nam
e": "", "active": true, "tosidebar": true, "console": false, "tostatus": false, "complete": "false",
"x": 580, "y": 1000, "wires": [], {"id": "3ed0372.35581c8", "type": "modbus-
response", "z": "b68197fa.d857c8", "name": "", "registerShowMax": "2", "x": 600, "y": 108
0, "wires": [], {"id": "e489b797.c12ce8", "type": "comment", "z": "b68197fa.d857c8", "na
me": "LECTURA CIRCUITOR", "info": "## Lectura valor de tensión.\n## Circuitor
CVM-NRG96.\n## COMUNICACIÓN MODBUS RTU.\n## USO DE FUNCIÓN
MODBUS          READ          DE          NODE-
RED", "x": 240, "y": 920, "wires": [], {"id": "cbf0c022.198ae", "type": "comment", "z": "b681
97fa.d857c8", "name": "SENSOR DHT11 DE TEMPERATURA Y
HUMEDAD", "info": "# Lectura del sensor DHT11 de humedad y temperatura
ambiente a traves de arduino leonardo.\n# Pin de datos utilizado: 2.\n# voltaje de
alimentación          del          sensor:          3.3
V", "x": 310, "y": 180, "wires": [], {"id": "671292cc.ca6d4c", "type": "comment", "z": "b68197
fa.d857c8", "name": "Codigo DHT11", "info": "# El siguiente es el codigo utilizado en la
programacion de arduino. Es posible utilizarlo en otro arduino al compilar el
programa desde el IDE de arduino y analizar los datos desde el monitor
serial.\n\n#include <DHT.h>\n\n//Constants\n#define DHTPIN 2    // what pin we're
connected to\n#define DHTTYPE DHT11    // DHT 11 (AM2302)\n\n// Initialize DHT
sensor    for    normal    16mhz    Arduino\nDHT    dht(DHTPIN,
DHTTYPE);\n\n//Variables\nint chk;\nfloat hum; //Stores humidity value\nfloat temp;
//Stores temperature value\n\nvoid setup()\n{\n    Serial.begin(9600);\n
dht.begin();\n    \n}\n\nString hum1;\nString temp1;\n\nvoid loop()\n{\n    //Read data
and store it to variables hum and temp\n    hum = dht.readHumidity();\n    temp=
dht.readTemperature();\n    hum1 = String(hum);\n    temp1 = String(temp);\n    //Print
temp and humidity values to serial monitor\n    // Serial.print("Humidity: ");\n
Serial.print(hum1);\n    Serial.print(",");\n    Serial.print(temp1);\n    // Serial.println("\
Celsius");\n
    \n    delay(2000);    //Delay 2
sec.\n\n}, {"x": 200, "y": 240, "wires": [], {"id": "cefaeabd.fcd728", "type": "comment", "z": "b
68197fa.d857c8", "name": "Take Photo", "info": "## Se puede utilizar la cámara de
vigilancia de la prueba de envejecimiento acelerado para tomar fotos de las

```

muestras en algún momento durante la prueba.", "x":200,"y":660,"wires":[],{"id":"6ec7d120.c879e","type":"comment","z":"b68197fa.d857c8","name":"CÓDIGO TAKE PHOTO","info":"## A través del siguiente código en PYTHON es posible tomar fotos desde consola, sin necesidad de utilizar el DASHBOARD en algún momento determinado\n\nfrom picamera import PiCamera\nfrom time import sleep\n\ncamera = PiCamera()\n\ncamera.rotation = 180\ncamera.start_preview()\nsleep(3)\ncamera.capture('/media/Base_Datos/Servidor Local RASPBERRY/Photos Muestras de Bobinas/Muestra 3.jpg')\ncamera.stop_preview()", "x":240,"y":700,"wires":[],{"id":"b9289f1a.11b9","type":"inject","z":"b68197fa.d857c8","name":"","topic":"","payload":"","payloadType":"str","repeat":"","crontab":"","once":false,"onceDelay":0.1,"x":270,"y":1200,"wires":[["2b9ed956.6a6da6"]],{"id":"387d00ae.25a83","type":"modbus-flex-getter","z":"b68197fa.d857c8","name":"","showStatusActivities":true,"showErrors":true,"logIOActivities":false,"server":"2b166c76.d7ce04","useIOFile":false,"ioFile":"","useIOForPayload":false,"x":530,"y":1420,"wires":[["7f760d8a.fe37a4"],["91d65f04.d947a"]],{"id":"2b9ed956.6a6da6","type":"function","z":"b68197fa.d857c8","name":"","func":"msg.payload = { \n 'fc': 4,\n 'unitid': 1,\n 'address': 0 ,\n 'quantity': 10 };\nreturn msg;","outputs":1,"noerr":0,"x":360,"y":1300,"wires":[["387d00ae.25a83"]],{"id":"91d65f04.d947a","type":"modbus-response","z":"b68197fa.d857c8","name":"","registerShowMax":20,"x":800,"y":1480,"wires":[],{"id":"7f760d8a.fe37a4","type":"debug","z":"b68197fa.d857c8","name":"","active":true,"tosidebar":true,"console":false,"tostatus":false,"complete":false,"x":780,"y":1360,"wires":[],{"id":"3cb0ddb.d285222","type":"comment","z":"b68197fa.d857c8","name":"Opción por solicitud de lectura modbus","info":"## Lectura del CIRCUITOR CVM-NRG96 a través de la función modbus flex getter por solicitud.\n## Esta función puede ser usada como prueba de comunicación o en su defecto para solicitar lectura de un nuevo equipo asociado a la prueba a realizar", "x":310,"y":1160,"wires":[],{"id":"37c0e8a4.329ba8","type":"camerapi-takephoto","z":"b68197fa.d857c8","filemode":"2","filename":"","filedefpath":"1","filepath":"","fileformat":"jpeg","resolution":"6","rotation":"180","fliph":"0","flipv":"0","brightness":"50","contrast":"0","sharpness":"0","quality":"80","imageeffect":"none","exposuremode":"auto","iso":"0","agcwait":"1.0","led":"0","awb":"auto","name":"Photo","x":510,"y":780,"wires":[["c25b8610.def418"]],{"id":"fdcbac59.444c9","type":"ui_button","z":"b68197fa.d857c8","name":"TAKE PHOTO","group":"ca60d54b.79a008","order":3,"width":0,"height":0,"passthru":false,"label":"Pulsa para tomar una foto","tooltip":"","color":"","bgcolor":"","icon":"","payload":"","payloadType":"str","topic":"","x":290,"y":780,"wires":[["37c0e8a4.329ba8"]],{"id":"c25b8610.def418","type":"

```

debug","z":"b68197fa.d857c8","name":"","active":true,"tosidebar":true,"console":false,
"tostatus":false,"complete":"payload","targetType":"msg","x":680,"y":780,"wires":[]
},{
  "id":"a532219c.4ee1c","type":"ui_text","z":"b68197fa.d857c8","group":"5ade956b.
  56e14c","order":3,"width":0,"height":0,"name":"","label":"Free
  Memory","format":"{{msg.payload}}","layout":"row-
  spread","x":749.0000076293945,"y":1925.7500076293945,"wires":[]},{
  "id":"281b69.c8458498","type":"function","z":"b68197fa.d857c8","name":"","func":"function
  formatBytes(bytes,decimals) {\n  if(bytes === 0) return '0 Byte';\n  var k = 1000; //
  or 1024 for binary\n  var dm = decimals + 1 || 3;\n  var sizes = ['Bytes', 'KB', 'MB',
  'GB', 'TB', 'PB', 'EB', 'ZB', 'YB'];\n  var i = Math.floor(Math.log(bytes) / Math.log(k));\n
  return parseFloat((bytes / Math.pow(k, i)).toFixed(dm)) + ' ' +
  sizes[i];\n}\n\nmsg.payload = formatBytes(msg.payload.freemem);\nreturn
  msg;","outputs":1,"noerr":0,"x":593.2500076293945,"y":1924.7500085830688,"wire
  s":["a532219c.4ee1c"]},{
  "id":"7d230bb0.f5a484","type":"ui_text","z":"b68197fa.d85
  7c8","group":"5ade956b.56e14c","order":2,"width":0,"height":0,"name":"","label":
  "Total Memory","format":"{{msg.payload}}","layout":"row-
  spread","x":763.7500076293945,"y":1884.0000047683716,"wires":[]},{
  "id":"25dfcab2.83ea16","type":"function","z":"b68197fa.d857c8","name":"","func":"function
  formatBytes(bytes,decimals) {\n  if(bytes === 0) return '0 Byte';\n  var k = 1000; //
  or 1024 for binary\n  var dm = decimals + 1 || 3;\n  var sizes = ['Bytes', 'KB', 'MB',
  'GB', 'TB', 'PB', 'EB', 'ZB', 'YB'];\n  var i = Math.floor(Math.log(bytes) / Math.log(k));\n
  return parseFloat((bytes / Math.pow(k, i)).toFixed(dm)) + ' ' +
  sizes[i];\n}\n\nmsg.payload = formatBytes(msg.payload.totalmem);\nreturn
  msg;","outputs":1,"noerr":0,"x":591.5000038146973,"y":1885.0000076293945,"wire
  s":["7d230bb0.f5a484"]},{
  "id":"d1d8eac.b5aa218","type":"ui_gauge","z":"b68197fa.
  d857c8","name":"Memory
  Usage","group":"5ade956b.56e14c","order":1,"width":0,"height":0,"gtype":"gage"
  ,"title":"*Actualización cada minuto ","label":"% de uso","format":"{{value |
  number:2}}","min":0,"max":100,"colors":["#00b500","#e6e600","#ca3838"],"seg1":
  "", "seg2":"","x":762.2500076293945,"y":1841.0000066757202,"wires":[]},{
  "id":"699c7883.52b578","type":"function","z":"b68197fa.d857c8","name":"","func":"msg.paylo
  ad = msg.payload.memusage;\nreturn
  msg;","outputs":1,"noerr":0,"x":587.0000038146973,"y":1844.5000066757202,"wire
  s":["d1d8eac.b5aa218"]},{
  "id":"39f19cbb.a6bff4","type":"ui_chart","z":"b68197fa.d8
  57c8","name":"Memory - 24
  Hours","group":"5ade956b.56e14c","order":0,"width":0,"height":0,"label":"24
  horas de
  monitoreo","chartType":"line","legend":"false","xformat":"HH:mm:ss","interpolate":"li
  near","nodata":"","dot":false,"ymin":"","ymax":"","removeOlder":1,"removeOlderPoin

```

```

ts":"","removeOlderUnit":"86400","cutout":"","useOneColor":false,"colors":["#1f77b4",
"#aec7e8","#ff7f0e","#2ca02c","#98df8a","#d62728","#ff9896","#9467bd","#c5b0d5"],
"useOldStyle":true,"outputs":1,"x":773.2500076293945,"y":1793.5000066757202,
"wires":[[]],{"id":"9aa1cf95.fd655","type":"function","z":"b68197fa.d857c8","name":
":"","func":"msg.payload = msg.payload.memusage;\nreturn
msg;","outputs":1,"noerr":0,"x":589.0000076293945,"y":1801.750005722046,"wires":
[["39f19cbb.a6bff4"]],{"id":"9ef1087b.a324a8","type":"ui_text","z":"b68197fa.d857
c8","group":"224aa1a1.0df7fe","order":0,"width":0,"height":0,"name":"arch","label":
"Arch","format":"{{msg.payload}}","layout":"row-
spread","x":757.0000076293945,"y":1729.500002861023,"wires":[[]],{"id":"f41415e0
.958be8","type":"function","z":"b68197fa.d857c8","name":"arch","func":"msg.payloa
d = msg.payload.arch;\nreturn
msg;","outputs":1,"noerr":0,"x":582.0000076293945,"y":1743.250002861023,"wires":
[["9ef1087b.a324a8"]],{"id":"b814c5a6.2bc618","type":"ui_text","z":"b68197fa.d85
7c8","group":"224aa1a1.0df7fe","order":0,"width":0,"height":0,"name":"platform","la
bel":"Platform","format":"{{msg.payload}}","layout":"row-
spread","x":764.5000076293945,"y":1685.750002861023,"wires":[[]],{"id":"f941096a
.8abcf8","type":"function","z":"b68197fa.d857c8","name":"platform","func":"msg.payl
oad = msg.payload.platform;\nreturn
msg;","outputs":1,"noerr":0,"x":589.5000076293945,"y":1700.750002861023,"wires":
[["b814c5a6.2bc618"]],{"id":"bac0c9f7.6f8a88","type":"ui_text","z":"b68197fa.d85
7c8","group":"224aa1a1.0df7fe","order":1,"width":0,"height":0,"name":"OS","label":
"OS","format":"{{msg.payload}}","layout":"row-
spread","x":755.7500076293945,"y":1644.5000009536743,"wires":[[]],{"id":"4e9dfe1
a.e9a0d","type":"function","z":"b68197fa.d857c8","name":"osType","func":"msg.payl
oad = msg.payload.type;\nreturn
msg;","outputs":1,"noerr":0,"x":590.7500076293945,"y":1652.000002861023,"wires":
[["bac0c9f7.6f8a88"]],{"id":"9d15fcd2.f44c","type":"ui_text","z":"b68197fa.d857c8",
"group":"224aa1a1.0df7fe","order":2,"width":0,"height":0,"name":"hostname","label":
"Hostname","format":"{{msg.payload}}","layout":"row-
spread","x":770.7500076293945,"y":1605.7500009536743,"wires":[[]],{"id":"c5d2b0
2c.efc35","type":"function","z":"b68197fa.d857c8","name":"hostname","func":"msg.
payload = msg.payload.hostname;\n\nreturn
msg;","outputs":1,"noerr":0,"x":588.2500076293945,"y":1605.7500009536743,"wire
s":[["9d15fcd2.f44c"]],{"id":"928eb795.011fb8","type":"OS","z":"b68197fa.d857c8","
name":"","x":395.25000762939453,"y":1633.0000009536743,"wires":[["c5d2b02c.ef
e35","4e9dfe1a.e9a0d","f941096a.8abcf8","f41415e0.958be8"]],{"id":"7aa6ba5c.7
a8614","type":"Memory","z":"b68197fa.d857c8","name":"","x":395.75000762939453
,"y":1758.2500047683716,"wires":[["9aa1cf95.fd655","699c7883.52b578","25dfcab

```

```

2.83ea16","281b69.c8458498"]],{"id":"b99d9ea3.b2312","type":"inject","z":"b68197
fa.d857c8","name":"update","topic":"","payload":"","payloadType":"date","repeat":"1
0","crontab":"","once":true,"onceDelay":"","x":206,"y":1671.2500009536743,"wires":
[["928eb795.011fb8","7aa6ba5c.7a8614"]],{"id":"f5cde4e3.48f308","type":"comment
t","z":"b68197fa.d857c8","name":"OS","info":"","x":176.25,"y":1627.2499990463257
,"wires":[]},{"id":"2ca9127a.f5d4ee","type":"comment","z":"b68197fa.d857c8","name
":"Uso de
memoria","info":"","x":394.50000762939453,"y":1706.0000019073486,"wires":[]},{"i
d":"b329f2ff.7caef","type":"comment","z":"b68197fa.d857c8","name":"Status
Raspberry","info":"Uso de la función de node-red OS\npara monitorear el estatus de
la raspberry\ncomo centro de control.\n\nMuestra las características técnicas de la
\nraspberry y el monitoreo de la
memoria.","x":200,"y":1540,"wires":[]},{"id":"dca000a8.b665e","type":"comment","z":
"b68197fa.d857c8","name":"MAGG- Miguel Angel González González-
1423351","info":"","x":410,"y":100,"wires":[]},{"id":"ceb0a096.dcb15","type":"ui_chart
","z":"b68197fa.d857c8","name":"HUMEDAD","group":"dffcebf6.655c38","order":2,"
width":0,"height":0,"label":"Monitoreo de
Humedad","chartType":"line","legend":"false","xformat":"HH:mm:ss","interpolate":"li
near","nodata":"","dot":false,"ymin":"","ymax":"","removeOlder":1,"removeOlderPoin
ts":"","removeOlderUnit":"3600","cutout":0,"useOneColor":false,"colors":["#1f77b4",
"#aec7e8","#ff7f0e","#2ca02c","#98df8a","#d62728","#ff9896","#9467bd","#c5b0d5
"],"useOldStyle":false,"outputs":1,"x":660,"y":460,"wires":[[]]},{"id":"48547ec6.3d922
","type":"comment","z":"b68197fa.d857c8","name":"Prueba de
notificación","info":"Bajo el siguiente sistema se puede realizar\nuna prueba de
comunicación con cada uno de los\nequipos de comunicación asociados con la
\ncuenta de pushbullet según el deseo del
usuario.","x":220,"y":2020,"wires":[]},{"id":"c29f8966.a48fd8","type":"delay","z":"b68
197fa.d857c8","name":"Notificación Temperatura
Ambiente","pauseType":"rate","timeout":"5","timeoutUnits":"seconds","rate":"1","nb
RateUnits":"5","rateUnits":"minute","randomFirst":"1","randomLast":"5","randomUnit
s":"seconds","drop":false,"x":820,"y":360,"wires":[["dbcdab79.75cb98","25aeb897.7
83a78"]],{"id":"dbcdab79.75cb98","type":"pushbullet","z":"b68197fa.d857c8","confi
g":"5642b403.f287fc","pushtype":"note","title":"Notificación
Temperatura","chan":"","name":"Pushbullet-
Temperatura","x":1110,"y":360,"wires":[]},{"id":"74558a45.7f6654","type":"function",
"z":"b68197fa.d857c8","name":"","func":"msg.payload = msg.payload +
'\nC';\nreturn
msg;","outputs":1,"noerr":0,"x":550,"y":360,"wires":[["c29f8966.a48fd8"]],{"id":"6c62
cd32.65dd14","type":"function","z":"b68197fa.d857c8","name":"","func":"msg.payloa

```



```

d          =          msg.payload          +          \'%\';\nreturn
msg;,"outputs":1,"noerr":0,"x":650,"y":560,"wires":[["50a498a.bc3d068"]],{"id":"50a
498a.bc3d068","type":"delay","z":"b68197fa.d857c8","name":"Notificación
Humedad","pauseType":"rate","timeout":"5","timeoutUnits":"seconds","rate":"1","nb
RateUnits":"5","rateUnits":"minute","randomFirst":"1","randomLast":"5","randomUnit
s":"seconds","drop":false,"x":880,"y":560,"wires":[["79a54622.224708"],"6c861ee1.b
aebd"]],{"id":"79a54622.224708","type":"pushbullet","z":"b68197fa.d857c8","config
":"5642b403.f287fc","pushtype":"note","title":"Notificación
Humedad","chan":"","name":"Pushbullet-
Humedad","x":1100,"y":560,"wires":[],{"id":"25aeb897.783a78","type":"ui_toast","z"
:"b68197fa.d857c8","position":"bottom
right","displayTime":"5","highlight":"","sendall":true,"outputs":0,"ok":"OK","cancel":"","
","topic":"","name":"Notificación
Temperatura","x":1130,"y":300,"wires":[],{"id":"6c861ee1.baebd","type":"ui_toast","
z":"b68197fa.d857c8","position":"bottom
right","displayTime":"5","highlight":"","sendall":true,"outputs":0,"ok":"OK","cancel":"","
","topic":"","name":"Notificación
Humedad","x":1100,"y":520,"wires":[],{"id":"e979bf19.0a999","type":"debug","z":"b6
8197fa.d857c8","name":"","active":true,"tosidebar":true,"console":false,"tostatus":fal
se,"complete":"false","x":620,"y":1160,"wires":[],{"id":"c389fa01.33d568","type":"fu
nction","z":"b68197fa.d857c8","name":"","func":"var          tension          =
msg.payload[1]*0.1;\nvar          msg1          =          {payload:          tension};\nreturn
msg1;,"outputs":1,"noerr":0,"x":570,"y":920,"wires":[["414d7e66.5b985"],"1b6b1031
.01037"],"95b9713a.f0dca","69293bb5.6aae44"]],{"id":"414d7e66.5b985","type":"de
bug","z":"b68197fa.d857c8","name":"","active":true,"tosidebar":true,"console":false,
"tostatus":false,"complete":"false","x":770,"y":900,"wires":[],{"id":"1b6b1031.01037"
,"type":"ui_gauge","z":"b68197fa.d857c8","name":"Tensión          en          el
variac","group":"8c859cd2.7e222","order":0,"width":0,"height":0,"gtype":"gage","title
":"VOLTAJE          VARIAC","label":"Volts","format":"{{value          |          number:2}}
V","min":0,"max":250,"colors":["#00b500","#e6e600","#ca3838"],"seg1":"","seg2":"
","x":750,"y":840,"wires":[],{"id":"95b9713a.f0dca","type":"ui_chart","z":"b68197fa.d
857c8","name":"Tensión          en          el
variac","group":"8c859cd2.7e222","order":2,"width":0,"height":0,"label":"Monitoreo
de          Tensión          en          el
variac","chartType":"line","legend":"false","xformat":"HH:mm:ss","interpolate":"linear
","nodata":"","dot":false,"ymin":"","ymax":"","removeOlder":1,"removeOlderPoints":"","
","removeOlderUnit":"3600","cutout":0,"useOneColor":false,"colors":["#1f77b4","#ae
c7e8","#ff7f0e","#2ca02c","#98df8a","#d62728","#ff9896","#9467bd","#c5b0d5"],"us
eOldStyle":false,"outputs":1,"x":770,"y":960,"wires":[[]],{"id":"90e65021.67bcb","typ

```

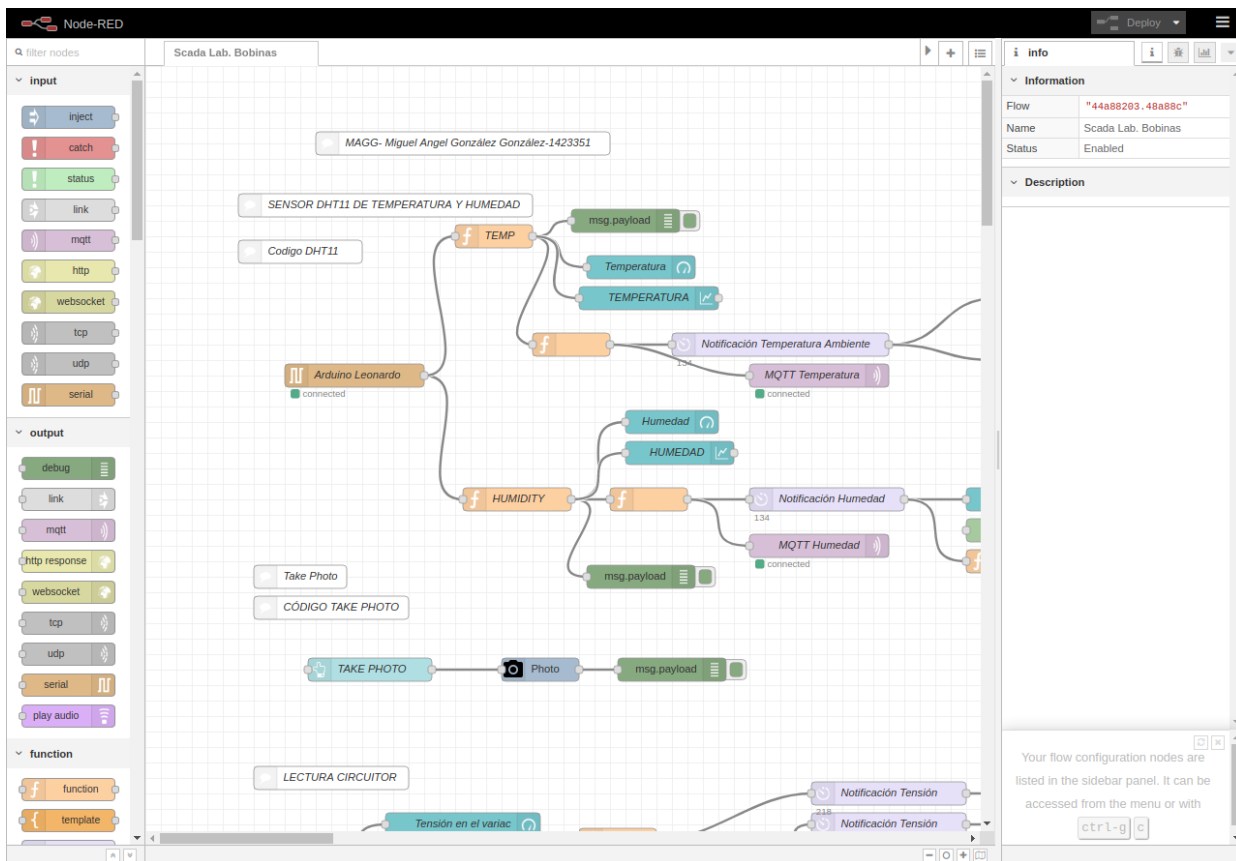
```

e":"pushbullet","z":"","b68197fa.d857c8","config":"5642b403.f287fc","pushtype":"note",
"title":"Notificación Tensión Variac","chan":"","name":"Pushbullet Tensión Variac",
"x":1030,"y":900,"wires":[],{"id":"69293bb5.6aae44","type":"function","z":"b68197fa.d857c8",
"name":"","func":"msg.payload = msg.payload + '\\\\';\\nreturn msg;","outputs":1,"noerr":0,
"x":950,"y":840,"wires":[["64733add.4d20e4"]]},{"id":"64733add.4d20e4","type":"delay",
"z":"b68197fa.d857c8","name":"Notificación Humedad","pauseType":"rate","timeout":"5",
"timeoutUnits":"seconds","rate":"1","nbRateUnits":"5","rateUnits":"minute",
"randomFirst":"1","randomLast":"5","randomUnits":"seconds","drop":false,
"x":1180,"y":840,"wires":[["90e65021.67bcb"]]},{"id":"823ee7dc.2df578","type":"serial-
port","z":"","serialport":"/dev/ttyACM0","serialbaud":"9600","databits":"8","parity":"no
ne","stopbits":"1","waitfor":"","newline":"0","bin":"bin","out":"time","addchar":"false",
"responsetimeout":"","id":"68045667.537f68","type":"ui_group","z":"","name":"TEM
PERATURA Y HUMEDAD AMBIENTE","tab":"76d1fb3a.5fad04","order":3,"disp":true,"width":"8",
"collapse":false},{"id":"dffcebf6.655c38","type":"ui_group","z":"","name":"MONITOREO
TEMPERATURA Y HUMEDAD AMBIENTE","tab":"76d1fb3a.5fad04","order":1,"disp":true,"width":"8",
"collapse":false},{"id":"2b166c76.d7ce04","type":"modbus-
client","z":"","name":"","clienttype":"simpleser","bufferCommands":true,"stateLogEn
abled":false,"tcpHost":"127.0.0.1","tcpPort":"502","tcpType":"DEFAULT","serialPort
":"/dev/ttyUSB0","serialType":"RTU-
BUFFERD","serialBaudrate":"9600","serialDatabits":"8","serialStopbits":"1","serialP
arity":"none","serialConnectionDelay":"100","unit_id":"1","commandDelay":"1","clien
tTimeout":"1000","reconnectTimeout":"2000"},{"id":"ca60d54b.79a008","type":"ui_g
roup","z":"","name":"Usuario","tab":"76d1fb3a.5fad04","order":4,"disp":true,"width":"
8","collapse":false},{"id":"5ade956b.56e14c","type":"ui_group","z":"","name":"Memo
ry Usage","tab":"1bb324ec.c6fc3b","order":2,"disp":true,"width":"6","collapse":false},{"i
d":"224aa1a1.0df7fe","type":"ui_group","z":"","name":"OS","tab":"1bb324ec.c6fc3b",
"disp":true,"width":"6","collapse":false},{"id":"5642b403.f287fc","type":"pushbullet-
config","z":"","name":"Laboratorio Bobinas"},{"id":"8c859cd2.7e222","type":"ui_group",
"z":"","name":"MONITOREO DE TENSIÓN","tab":"76d1fb3a.5fad04","order":2,"disp":true,
"width":"8","collapse":false},{"id":"76d1fb3a.5fad04","type":"ui_tab","z":"","name":
"DASHBOARD LABORATORIO DE BOBINAS","icon":"dashboard","disabled":false,"hidden":false},
{"id":"1bb324ec.c6fc

```

```
3b","type":"ui_tab","z":"","name":"Status
Raspberry","icon":"dashboard","order":2,"disabled":false,"hidden":false}]
```

7.8. ENTORNO GRAFICO NODE-RED.



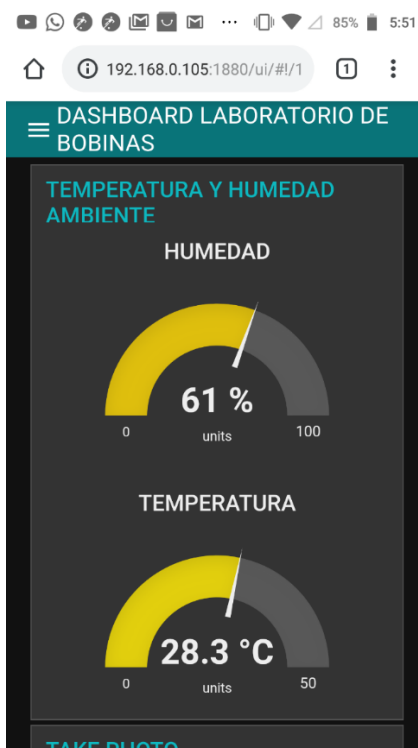
Fuente: Elaboración propia.

7.9. MALETA DE MONITOREO Y CONTROL PORTATIL



Fuente: Elaboración propia.

7.10. NOTIFICACIÓN EN DISPOSITIVO MOVIL- PUSHBULLET Y VISUALIZACIÓN DEL DASHBOARD PRINCIPAL:



Fuente: Elaboración propia.

