



"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TLALNEPANTLA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**"ANÁLISIS MICROESTRUCTURAL Y ELECTRICO
DEL CONDUCTOR DE COBRE
MODIFICADO PARA MOTOR ELECTRICO INDUSTRIAL"**

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

PRESENTA:

FRANCISCO HERNANDEZ VELÁZQUEZ

DIRECTOR DE TESIS: DR BENJAMIN VARGAS ARISTA

TLALNEPANTLA DE BAZ, ESTADO DE MÉXICO, a 07 de Junio del 2019.





SEP
SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Tlalnepantla

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE
TLALNEPANTLA

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada con especial cariño y amor a:

Leticia Medina Saldaña

Daniel Francisco Hernández y José Alfredo Jiménez Hernández

Sandra y Omar Hernández Medina

Danny

A mis padres

Dionisio y Dolores, por darme la vida y amor, por ser la luz, que guio mi camino.

A mis hermanos

Angélica, Mario, Graciela, Dionisio, Manuel, Margarita, Guadalupe, Esther y Enrique

**A LA MEMORIA DE MIS HIJOS, QUE FUERON MIS COMPAÑEROS Y
AMIGOS**

Daniel Francisco y José Alfredo

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a:

Dr. Benjamín Vargas Arista: Por su asesoría, apoyo y sus comentarios que enriquecieron este trabajo, así como la paciencia y amistad brindada.

Dra. María Verónica Estrella Suarez: Por su apoyo, dedicación y esmero en abrirnos puertas para el logro este trabajo

Dra. Laura Nadxieli Palacios Grijalva: Por sus consejos, dedicación y su pasión para realizar este humilde trabajo,

Dr. Anatolio Martínez Jiménez: Por sus consejos, e interés en este humilde proyecto

Dra. Miriam Aguilar Sánchez: Por todas sus atenciones, consejos, interés y por las facilidades otorgadas para llevar a cabo la parte experimental de este trabajo en la **UAM**.

Dra. María de la Luz Olvera Amador: Por las facilidades para el uso de sus instalaciones en el **Cinvestav del IPN** en la consecución experimental con el equipo a su digno cargo.

A mis maestros de posgrado que me entregaron sus conocimientos con paciencia y esmero.

A mi alma mater Instituto Tecnológico de Tlalnepantla por darme la oportunidad de alcanzar mis objetivos de investigación.

Al personal de la biblioteca del ITTLA por el apoyo brindado

A la **Universidad Autónoma de México** por las facilidades de utilizar sus instalaciones.

A **CONACYT** por el apoyo económico mediante la beca crédito

Y en general a todos los maestros que me han nutrido de sus conocimientos para alcanzar este hermoso objetivo.

INDICE

	Pag.
Listado de figuras	<i>i</i>
Listado de tablas	<i>iv</i>
Resumen	<i>v</i>
Abstract	<i>vi</i>
CAPITULO 1. INTRODUCCION	
1.1. Estado del arte	1
1.1.1 Efecto del tamaño del grano en el comportamiento de alto esfuerzo, alta tasa de deformación	1
1.1.2 Estructura cristalina del cobre, propiedades microscópicas, mecánicas y de procesamiento	2
1.1.3 Relación microestructura y propiedades de cobre sometido a deformación plástica y severa mediante presión en canal angular de sección constante	3
1.1.4 Recristalización de cobre puro analizado por calorimetría y microdureza	4
1.1.5 Revisión de la microestructura y variaciones de las propiedades de los metales inducidas por el tratamiento con corriente eléctrica	5
1.1.6 Análisis microestructural no destructivo por conductividad eléctrica: comparación con mediciones de dureza en diferentes materiales.	6
1.2. Problema de estudio	6
1.3. Objetivos	7
1.3.1 Objetivo general	7
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4. Justificación	8
1.5. Alcance y limitaciones	9
CAPITULO 2. MARCO TEORICO	
2.1. Cobre	10
2.2. Motor eléctrico	12
2.2.1 Partes del motor	13
2.2.2 Funcionamiento del motor	17
2.2.3 Parámetros eléctricos	19
2.2.4 Perdidas en motores eléctricos,	22
2.2.5 materiales aislantes	24
2.3. Envejecimiento térmico	26
2.4. Caracterización metalúrgica	32
2.4.1 Pruebas eléctricas	34
2.4.2 Análisis microestructural	37
2.4.2.1 Microscopia Óptica	38
2.4.2.2 Microscopia electrónica de barrido	40
2.4.3 Difracción de Rayos X	42
2.4.4 Ensayos de tensión	44
2.4.5 Ensayo de dureza Vickers	48
CAPITULO 3. DESARROLLO EXPERIMENTAL	
3.1. Materiales	51
3.2. Envejecimiento artificial	51
3.2.1 Envejecimiento del aislante en bobinas de 42 espiras de Cu	52
3.2.2 Envejecimiento del aislante en láminas de Cu	52
3.3. Pruebas metalúrgicas	54
3.3.1 Microscopia óptica	55
3.3.2 Microscopia electrónica de barrido	56
3.3.3 Ensayo de conductividad	57
3.3.4 Difracción de rayos X	59
3.3.5 Ensayo de tensión	59

3.3.6	Prueba de dureza Vickers	58
-------	--------------------------	----

CAPITULO 4. ANALISIS DE RESULTADOS Y DISCUSION

4.1	Análisis microestructural para alambre de Cu	60
4.1.1	Microscopía óptica	62
4.1.2	Diámetro de grano promedio	63
4.1.3	Microscopia electrónica de barrido	64
4.2.	Análisis metalúrgico	68
4.2.1	Conductividad eléctrica	68
4.2.2	Ensayo de tensión	69
4.2.3	Dureza Vickers	70
4.2.4	Pruebas del dieléctrico	71
4.3	Correlación de resultados	71

CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	Conclusiones	73
5.2	Recomendaciones	73

Bibliografía		75-77
--------------	--	-------

Listado de figuras		Pag.
1.1	Grafica esfuerzo-deformación en probeta longitudinal	3
1.2	Conductividad eléctrica en función del esfuerzo máximo para dos materiales procesados por ECAP.	4
1.3	Curva de microdureza en función del tiempo de recocido	5
2.1	Estructura cristalina fcc del cobre: a) vista frontal, b) vista lateral, espacio tetragonal: c) vista frontal, y d) vista lateral	11
2.2.	Motor eléctrico: a) partes principales, y b) motor desarmado mostrando el rotor y estator.	13
2.3.	Estator del motor: a) tipos, b) embobinado, y c) integrado a la carcasa.	14
2.4.	Tipos de rotor: a) integrado a motor eléctrico trifásico marca WEG, y b) componentes principales	15
2.5.	Rodamiento: a) recto tipo bolas, y b) elementos internos	15
2.6.	Ventiladores de enfriamiento integrados al motor eléctrico (ambos casos)	16
2.7.	Carcasa de motor Weg de alta eficiencia	17
2.8.	Principio de operación del motor eléctrico: a) imán en movimiento pasando sobre la escalera conductora, y b) escalera enrollada para formar jaula de ardilla	19
2.9.	Sistema de medición de la conductividad	27
2.10.	Mecanismos de degradación del aislamiento principal: a) inclusiones gaseosas, b) delaminación o separación de las cintas, c) arborización eléctrica, y d) caminos de carbonización	37
2.11.	Dimensiones y características microestructurales de partícula desde subatómicas hasta macroestructuras	38
2.12.	Microscopio óptico con partes principales.	39
2.13.	a) Microscopio electrónico de barrido (MEB), y b) esquema de la trayectoria del haz de electrones	42
2.14.	Difractómetro D8 Discover marca Bruker	44
2.15.	Representación esquemática de ensayos a carga estática: a) compresión, b) tracción, flexión de c) tres puntos, y d) cuatro puntos.	45
2.16.	Máquina de prueba universal electromecánica de tensión, flexión, fatiga, b) esquema de estructura mecánica básica.	46
2.17.	Tipos de indentadores, a) piramidal Vickers, b) Brinell con relación $d = 0.375$	49
3.1.	Diagrama de flujo experimental	50
3.2	a) Horno eléctrico con capacidad de 1100 °C, y b) probetas envejecidas	52
3.3	a) Horno eléctrico, y b) alambre conductor original tipo magneto de 0.912 mm de condumex	52
3.4	Bobinas envejecidas mostrando el deterioro del dieléctrico	53
3.5	Láminas de Cu envejecidas con deterioro del dieléctrico por efecto del calor	54
3.6	Metalografía a) probetas con desbaste, y b) microscopio óptico	54
3.7	a) Micrografía de cobre envejecida a 240 °C, y b) imagen del método intersección de tres círculos de Abrams.	56
3.8	Microscopio electrónico de barrido, y b) cámara de vacío.	57
3.9	.a) Arreglo de conexiones resistencia y probeta en serie, y b) nanovoltmetro Keithler mostrando lectura de canal sobre pantalla	59
3.10	a) Máquina universal Instron 1125, y b) preparación de probetas.	60
3.11	Prueba de tensión con esfuerzo de tensión axial, elongación o deformación, encuellamiento y fractura tipo dúctil	60
3.12	a) Durómetro Wilson y b) caratula indicando la dureza alcanzada	61
4.1	Micrografías mediante microscopia óptica a 500X de Cu envejecidas por 720 h a diferentes temperaturas: a), b), c), d) y e)	63

4.2	Gráfica temperatura-número de tamaño de grano G ASTM del cobre envejecido por 720 h.	64
4.3	Gráfica: diámetro promedio de grano - temperatura de envejecimiento del cobre	65
4.4	Micrografía por MEB, mostrando las líneas de maclado en microestructura	66
4.5	Micrografías y difractogramas de SEM para cada temperatura, obtenidas por electrones secundarios, y retrodifundidos, de las diferentes zonas	67
4.6	Gráfica de la resistividad en función de la temperatura de envejecimiento.	68
4.7	Gráfica de la conductividad contra la temperatura de envejecimiento.	69
4.8	Gráfica curvas esfuerzo - deformación de la probeta de cobre a 26 °C de temperatura.	69
4.9	Curvas esfuerzo-deformación de la probeta de cobre envejecido a 105,155, 200,240 °C.	70
4.10	Gráfica Vickers: Dureza en función de Temperatura incrementó de dureza, en el rango de temperatura de 20 -240 °C	70
4.11	micrografías de la morfología superficial de las láminas de Cu, envejecimiento del dieléctrico; a) 150, 250, 300, y 400°C	71

Listado de tablas

	Pag.	
1.1	Mediciones de tamaño de grano por intercepción lineal de las probetas de alambre de Cu de alta pureza	2
2.1	Propiedades mecánicas del cobre	12
2.2	Materiales aislantes del cobre para devanados de máquinas eléctricas	25

Resumen

En este proyecto se estudió el efecto del envejecimiento térmico del conductor de cobre electrolítico tipo magneto de 4.1 mm de diámetro al 99.97% de pureza, envejecido a 105, 155, 200 y 240 °C por un periodo de 720 h sobre las propiedades microestructurales, mecánicas y eléctricas mediante microscopias ópticas (MO) y electrónica de barrido (MEB), dureza, tensión, y conductividad eléctrica, respectivamente. Los resultados de microscopia óptica indicaron que al ser evaluado el cobre envejecido por medio de las ecuaciones de número de tamaño de grano que relacionaron las intersecciones e interceptos medidos con el número de tamaño de grano G ASTM, señalaron una disminución del número G con el incremento de temperatura, así como un crecimiento de grano en fase sólida, al ser evaluados por el procedimiento de tres círculos de Abrams. El análisis microestructural por MEB mostró defectos intersticiales (porosidades) en la red cristalina conteniendo partículas de silicio, además se observaron líneas de deformación referidas a límites de macla. El ensayo de dureza mostro un aumento progresivo entre el cobre original con respecto al incremento de la temperatura de envejecimiento, alcanzando un aumento de 16% a 240 °C. Los resultados del ensayo de tensión muestran un efecto negativo por el envejecimiento del cobre, por lo que la resistencia máxima a la tensión disminuyendo hasta 92 % con respecto al cobre original. Por consecuencia, el cobre envejecido modifico la resistividad, disminuyendo de 2.8×10^{-7} (Ωm) del cobre original a 1.45×10^{-7} (Ωm) del cobre envejecido a 240 °C, como consecuencia se favoreció la conductividad eléctrica al aumentar de 2.35×10^5 del cobre original a 3.25×10^5 para cobre envejecido a 240 °C.

Abstract

In this project the effect of the thermal aging of the magneto electrolytic copper conductor from 4.1 mm in diameter to 99.97% purity, aged at 105, 155, 200 and 240 ° C for a period of 720 h over the microstructural properties, was studied. mechanical and electrical by optical microscopy (MO) and scanning electronics (MEB), hardness, voltage, and electrical conductivity, respectively. The results of optical microscopy indicated that when aged copper was evaluated by means of the grain size number equations that related intersections and intercepts measured with the grain size number G ASTM, they indicated a decrease in the number G with the increase of temperature, as well as a grain growth in solid phase, to be evaluated by the procedure of three circles of Abrams. The microstructural analysis by MEB showed interstitial defects (porosities) in the crystalline network containing silicon particles, and deformation lines referring to twin limits were observed. The hardness test showed a progressive increase between the original copper with respect to the increase in aging temperature, reaching an increase of 16% at 240 ° C. The results of the stress test show a negative effect due to the aging of the copper, so that the maximum tensile strength decreases up to 92% with respect to the original copper. As a consequence, aged copper modified the resistivity, decreasing from 2.8×10^7 (Ωm) of the original copper to 1.45×10^7 (Ωm) of the aged copper at 240 ° C, as a consequence the electrical conductivity was favored when increasing by 2.35×10^5 from the original copper to 3.25×10^5 for copper aged at 240 ° C.

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 Estado del arte

1.1.1 El efecto del tamaño del grano en el comportamiento de alto esfuerzo, alta tasa de deformación

El cobre utilizado en esta investigación fue adquirido en la forma de una placa y una barra cilíndrica compacta, reportando un contenido de 99.97 % Cu, clasificado como libre de oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, contenido de carbono y alta conductividad, en ambos materiales, según se estableció a partir de productos en el análisis químico el nivel de impureza ha sido mostrado para tener un efecto significativo sobre la recristalización cinética (tabla 1.1).

A Meyers et al. [1] mencionan que los dos cobres tenían un nivel muy bajo (menos de 10 ppm) de impurezas intersticiales y sus composiciones pueden considerarse idénticas. Ordenadas para obtener varios tamaños de grano, se llevaron a cabo una serie de tratamientos térmicos: 394, 500, 600 y 900 °C para el recocido con tiempos de 4, 20, 60 y 100 min; con un flujo constante de argón para proteger el material de oxidación.

La intercepción lineal de medidas de tamaño de grano de las condiciones elegidas se realizaron con la ayuda de un programa de procesamiento de imágenes para esta condición, se tomaron 40 intercepciones para garantizar un nivel de confianza del 95 % y un margen de error del 5 %, encontrando que el tamaño de grano tanto para la placa como para el alambre fue de 9.5 ± 0.3 , 25 ± 0.7 , 117 ± 2 , y 315 ± 12 respectivamente, la conclusión es que el calor tiene alto impacto en la recristalización del cobre [1].

Tabla 1.1 Mediciones de tamaño de grano por intercepción lineal de las probetas de barra redonda de Cu de alta pureza [1].

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Tamaño de grano (μm)	(ppm)
400	240	9.5	O: 6
500	1200	25	N: 3
600	6000	117	C < 10
800	6000	315	H: 0.5

1.1.2 Estructura cristalina del cobre, propiedades microscópicas mecánica y de procesamiento

Allen S et. al. [2] trabajaron en este estudio para lograr una mejor comprensión de los comportamientos y las características que ofrece material de cobre, se hizo necesario evidenciar la relación entre la estructura cristalina, las propiedades mecánicas y el procesamiento del mismo para explicar el comportamiento macroscópico del material con relación a su estructura cristalina. El cobre es un material apropiado para aplicaciones en los procesos de deformación plástica, en nano sistemas microestructurales, como una alternativa viable, en base a estudios realizados por medio de las técnicas de microscopia óptica y de transmisión electrónica.

J.D. Jaramillo et. al. [3] refieren que en el estudio de pruebas mecánicas de resistencia en una placa y un alambre de cobre electrolítico por microscopia electrónica de transmisión (MET), la placa de cobre alcanzó 200 μm en un régimen electrónicamente transparente con una inclinación de +/- 10° respecto a la horizontal a 18 °C en ambiente de vacío de 10 torr, la evaluación de propiedades mecánicas (figura1.1), a tensión se llevó a cabo a una velocidad de 12.5 mm/min, donde se evidenciaron en las micrografías a 17000X, algunos granos con diferente orientación y se observaron estructuras a nivel de jerarquía del orden de micras (figura 1.1) en el espectrograma cualitativo se pudo apreciar que, aunque el cobre analizado es 99.97 % que es un alto grado de pureza, se encontraron otras impurezas (Fe, Mg) en su estructura que pueden ser seleccionadas para fines diversos.

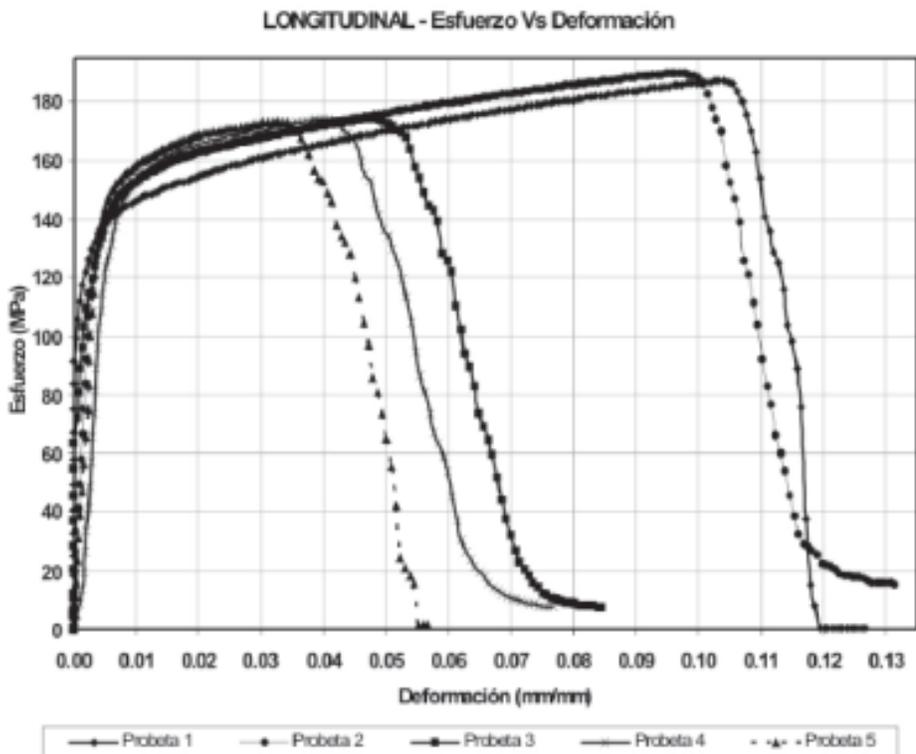


Figura 1.1 Grafica esfuerzo-deformación en probeta longitudinal [3].

1.1.3 Relación microestructura y propiedades de cobre sometidos a deformaciones plásticas severas mediante presión en canal angular de sección constante.

Adam et.al [4] refieren que muestras de cobre electrolítico y refinado al fuego previamente recocidas durante 30 minutos a una temperatura de 600 °C, fueron sometidas a presión en canal angular de sección constante a temperatura ambiente hasta un máximo de 16 pases, siguiendo la ruta Bc en una matriz con un ángulo interno de 90° y un ángulo exterior de 37°. La caracterización microestructural se determinó mediante la técnica de difracción de electrones retrodispersados (EBSD).

O. F. Higuera et. al. [5] mencionan que las propiedades mecánicas después de cada pase que evaluaron por ensayos de tracción, microdureza y fatiga. y utilizar la calorimetría de barrido diferencial (CBD) para estimar la energía almacenada durante

la deformación y la temperatura de recristalización después de cada pase por prensado angular de igual canal o sección constante (figura 1.2).

Se correlacionaron las propiedades eléctricas con la energía asociada a los defectos inducidos durante el proceso y con el comportamiento microestructural observado en la conductividad, se observó que disminuye con el aumento de la deformación, reduciéndose aproximadamente 2.5% IACS en ambos cobres (para las muestras después de 16 pases por ECAP) sin embargo, los valores de la conductividad se mantuvieron dentro de los rangos de aplicación industrial para el cobre la concentración de vacancias, este es el término que mejor explica las ligeras variaciones en la conductividad para el cobre deformado por ECAP, ya que la energía asociada a las dislocaciones y la del límite de grano, parecen afectarla muy levemente [5].

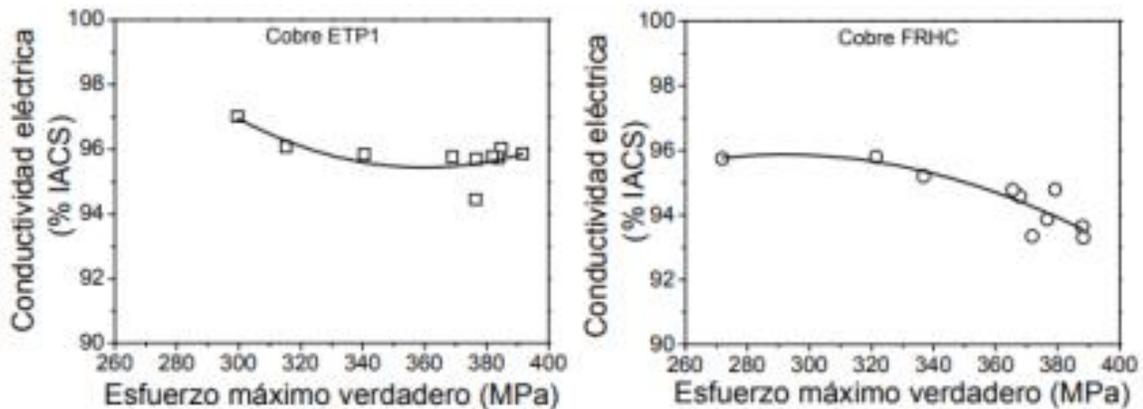


Figura 1.2 Conductividad eléctrica en función del esfuerzo máximo para dos materiales procesados por (ECAP), [5].

1.1.4 Recristalización de cobre puro investigado por calorimetría y microdureza

G. Benchabanea, et al. [6] emplearon la cinética de recristalización del cobre laminado en frío fue seguido por el método de microdureza Vickers, estas mediciones se obtuvieron a partir de muestras de cobre laminadas en frío del recocido isotérmico al vacío a diferentes temperaturas (TR = 250, 300 y 380 °C) por varias veces, hasta que la recristalización fue completa, por cada muestra se

realizaron en diez puntos, midieron utilizando una carga de 100 gf además, la recristalización fue estudiada por técnica de microdureza se realizaron las mediciones en función del tiempo de recocido.

Para diferentes temperaturas de recocido isotérmico, mostró la evolución cinética de la microdureza del laminado en frío tras los tratamientos de recristalización isotérmica, realizados a 250, 300 y 380 °C durante el tiempo de incubación (figura 1.3), se obtiene una leve disminución de la microdureza debido al proceso de recuperación, una gran caída de HV = 100 (en el estado de laminado en frío inicial) a HV = 50 (en el estado completamente recristalizado) [6].

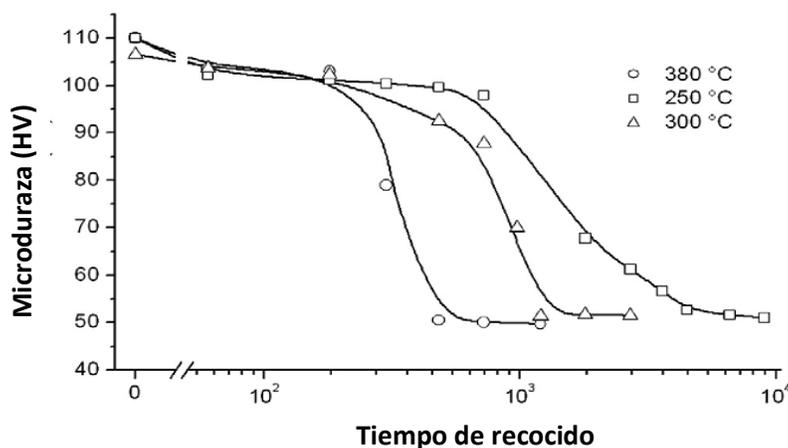


Figura 1.3 Curva microdureza en función del tiempo de recocido

1.1.5 Revisión a la microestructura y las variaciones de las propiedades de los metales inducidas por el tratamiento con corriente eléctrica.

Chien-LungLian et.al. [7] refieren que el tratamiento térmico se aplicó ampliamente para manipular la microestructura y las propiedades de los metales con energía térmica. La energía térmica desencadenó la difusión atómica acompañada de un movimiento de dislocación y da como resultado variaciones de propiedad posteriores en los metales uno de los esfuerzos atractivos en las últimas décadas es el desarrollo de un tratamiento directo de metales con tensión de corriente eléctrica como método alternativo para el tratamiento térmico convencional.

El resultado del tratamiento con la corriente eléctrica proporciona energía térmica de calor en Joules (efecto térmico) y energía cinética del momento electrónico (efecto

térmico), se revisó las prácticas del tratamiento con corriente eléctrica, las variaciones de la propiedad de la microestructura y la metalurgia física involucrada en una variedad de metales tanto los efectos térmicos como eléctricos, una manipulación adecuada del tratamiento de la corriente eléctrica permite el control de ambos efectos y, por lo tanto, de la microestructura y las propiedades de los metales [7].

1.1.6 Análisis microestructural no destructivo por conductividad eléctrica: comparación con mediciones de dureza en diferentes materiales.

L, Sorgera et,al. [8] usaron las técnicas de evaluación no destructiva (END) para evaluar cambios microestructurales en materiales procesados es de particular importancia se puede usar para evaluar cualitativamente, la integridad del material / estructura, entre las diversas técnicas de END disponibles, las mediciones de conductividad eléctrica que utilizan corrientes de Foucault [9] atraen gran atención debido a su simplicidad y confiabilidad, por medio de arco soldado con tungsteno se determinaron mediante corriente de Foucault y sonda de cuatro puntos en paralelo, aunado a esto se realizaron mediciones de dureza.

Los perfiles combinaron bien con las micrografías ópticas de los materiales, en paralelo se ingresó en la región procesada, se observó una variación en ambos perfiles se evidenció una ventaja particular de los perfiles de conductividad eléctrica sobre la dureza, ésta proporcionó una mejor resolución de las alteraciones microestructurales en los materiales procesados además, cuando el procesamiento termo mecánico indujo cambios que modificaron las propiedades magnéticas de un material, se pudo usar la prueba de corrientes de Foucault para determinar cualitativamente la fracción de fase en una región dada del material. Se observó una relación cualitativa entre las mediciones de conductividad eléctrica y la dureza [8].

1.2. Problema de estudio

Actualmente existen pérdidas de energía en los motores eléctricos que producen perdidas mecánicas y eléctricas, todos los motores operan con algún tipo de corriente, ya sea ca o cc para su funcionamiento.

Las pérdidas mecánicas se debe a la fricción en las escobillas, la fricción con el aire, el desgaste de rodamientos, la velocidad de las máquinas, al diseño, alimentación inadecuada, pero lo que impacta y es motivo del presente estudio son las pérdidas de energía en el alambre de cobre que forman los devanados del estator y rotor, significando entre ambos hasta el 65 % del total lo que significa un gasto considerable de energía, y una reducción en la vida útil del equipo.

El presente trabajo está dirigido al análisis del alambre de cobre de tipo magneto al 99.97% de pureza, en su microestructura, y conductividad eléctrica, y cómo influye en los bobinados de los motores eléctricos. Se analizarán los efectos nocivos del calor que genera una alta temperatura que se refleja en el envejecimiento del alambre de cobre y del dieléctrico protector del bobinado, que reduce la vida útil del motor, se considera su trabajo en óptimas condiciones de 10 años. Idealmente se disminuyen pérdidas eléctricas, utilizando conductores de mejor calidad con menor resistencia eléctrica, con un diámetro adecuado y/o mayor cantidad de conductor eléctrico.

El valor de la eficiencia en el pasado fue de menor importancia, hoy en día existe un interés profundo en la conservación de la energía sustentable, por lo tanto, la industria de los motores eléctricos en general busca alternativas en el aumento de eficiencia, en los estándares existentes actualmente [9].

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Generar la caracterización de las propiedades experimentales mecánicas y de conductividad eléctrica del conductor de cobre tipo magneto utilizado en los devanados de los motores eléctricos de tipo industrial, a través del envejecimiento térmico a diferentes temperatura, sometidas al calor por 720 h, para realizar pruebas de microscopia estructural y de composición con microscopio óptico y electrónico de barrido, el ensayo de dureza del conductor envejecido con un durómetro electrónico , el ensayo de tensión en maquina universal, y las pruebas de conductividad eléctrica con el nanovoltmetro Keithler. Para determinar las características y comportamiento

de los cambios sufridos a nivel microestructural en y de conductividad eléctrica en conductor de utilizado en el bobinado de los motores eléctricos

1.3.2. Objetivos Específicos

- Envejecer el conductor de cobre redondo, a través del calor a temperaturas de 105, 155, 200, 240 °C por 720 h continuas
- Generar mediciones experimentales no destructivas en el cobre tipo magneto, usando equipo de microscopia óptica y electrónica y de barrido, de conductividad, y de dureza.
- Generar mediciones experimentales destructivas en el ensayo de tensión en el cobre, usando maquina universal
- Establecer propiedades mecánicas y eléctricas del cobre, resultantes de la investigación
- Establecer correlaciones de medición de propiedades mecánicas y eléctricas

1.4 Justificación

Para el sector industrial de motores eléctricos es de interés científico, tecnológico e industrial para poder reducir costos sin afectar la calidad en sus productos y poder competir en un mercado cada día más globalizado. Los motores siendo las maquinas eléctricas más ampliamente utilizados en la industria de cualquier país, representa el mayor gasto de energía eléctrica.

El presente estudio se realizará tendiente a determinar el efecto del calor en las propiedades del conductor, el comportamiento del material, a nivel microestructural de dureza, esfuerzos a la tensión y conductividad eléctrica. Siendo una parte importante los bobinados donde las pérdidas son mayores, significando en el estator y rotor el 65% de ellas, estas pérdidas de energía se traducen en fuentes de calor no aprovechables, y que paulatinamente llegan a dañar el dieléctrico protector de los conductores, reduciendo la eficiencia y acortando vida útil de los motores.

En consecuencia son energía y recurso no aprovechables en detrimento del medio ambiente y la economía de la industria.

1.5 Alcance y limitación

El alcance de este trabajo analizará bajo diferentes temperaturas tomando de referencia alambre nuevo tipo magneto de 4.15 mm de diámetro de condumex, dos probetas sin envejecimiento térmico, y ocho probetas del mismo material con temperaturas de 105, 155, 200 y 240 °C, se tratará por metalografía las diez probetas con envejecimiento en mufla eléctrica y muestra original, para su análisis, por microscopia óptica las características del tamaño de grano y el cambio microestructural, por microscopia electrónica de barrido así como la composición de elementos que la conforman también se obtendrá la morfología, dureza Vickers, resistencia a la tensión, resistividad y conductividad eléctrica del alambre.

El presente análisis se limita al estudio del conductor de cobre, por efectos del calor y se determinaran las propiedades microestructurales, mecánicas, eléctricas de la conductividad eléctrica, a diferentes temperaturas, y la resistencia del dieléctrico protector en el alambre de cobre.

CAPITULO 2

MARCO TEORICO

2.1. El cobre

El cobre es un recurso natural no renovable extraído de la corteza terrestre fue el primer metal utilizado por el hombre, bajo la forma de cobre nativo o natural de alta pureza, en la fabricación de herramientas y productos de ornamentación, pero no es hasta el comienzo del siglo XX, con la instalación de grandes generadores eléctricos, líneas de transmisión, y distribución de energía, en el mundo debido al aumento de la demanda de electricidad, posteriormente se adoptó el cobre como referencia estándar de la conductividad eléctrica, por la Comisión Electrotecnia Internacional (CEI) en 1913.

El cobre es un elemento de transición de la tabla periódica; es un metal importante no ferroso, su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia en la naturaleza. Su átomo tiene la estructura electrónica $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1 3d^{10}$. El bajo potencial de ionización del electrón $4s^1$ da por resultado una remoción fácil del mismo para obtener Cu (I) o ion cuproso, Cu^+ , Cu(II), o ion cúprico, Cu^{2+} , se forma sin dificultad por remoción de un electrón de la capa 3d el peso atómico del cobre es 63.546 tiene dos isótopos naturales estables ^{63}Cu y ^{65}Cu . También se conocen nueve isótopos inestables (radiactivos).

El cobre puro tiene una red de Bravais del tipo cubico, mostrando una estructura cubica centrada en la cara ccc, figura 2.1 en la que se distinguen espacios tetraédricos (figura 2.1b) los parámetros de red característicos son $a = 3.6151 \text{ \AA}$ y $\alpha = 90^\circ$ su simetría dominante es cubica axial los planos de deslizamiento preferenciales en este tipo de estructura pertenecen a la familia de planos $\{1,1,1\}$ en las direcciones $\langle 1, 1, 0 \rangle$ que corresponden a la dirección más compacta en este tipo de empaquetamiento.

De acuerdo con esta estructura cristalina y las imperfecciones presentes en este medio, se generan comportamientos típicos de los materiales por esta razón que establecer relaciones apropiadas entre estructura.

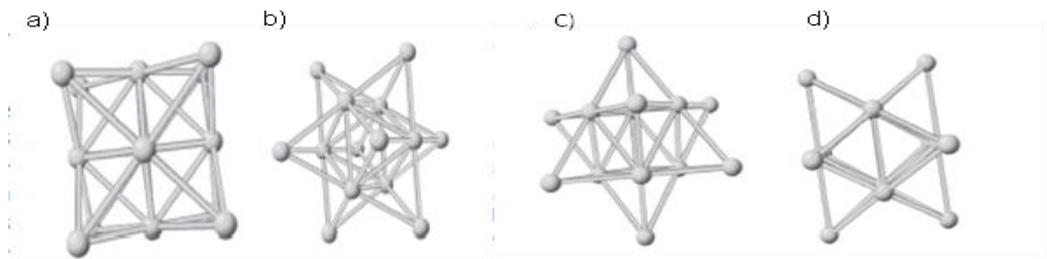


Figura 2.1. Estructura cristalina ccc del cobre: a) vista frontal, b) vista lateral; c) vista frontal, y d) vista lateral del espacio tetragonal.

Propiedades mecánicas y eléctricas del cobre: tiene una gran variedad de aplicaciones en la industria eléctrica debido a sus ventajosas propiedades, como son su elevada conductividad del calor y electricidad, resistencia a la corrosión, su maleabilidad y ductilidad debido a su extraordinaria conductividad, sólo superada por la plata su ductilidad permite transformarlo en cables de cualquier diámetro, la resistencia a la tracción del alambre de cobre estirado hace que puede usarse en cables para maquinaria eléctrica en general: generadores, motores, reguladores, equipos de señalización, aparatos electromagnéticos y sistemas de comunicación etc.

Las propiedades mecánicas y eléctricas de un metal dependen en gran medida de las condiciones físicas, temperatura y tamaño de grano del metal, es uno de los metales que puede tenerse en estado más puro, su color es de un brillo rojizo, no es magnético, o más exactamente, es poco paramagnético, es un metal comparativamente pesado, tiene una densidad (ρ) de 8.96 g/cm^3 a $20 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que el del tipo comercial varía con el método de manufactura, oscilando entre 8.90 y 8.94 g/cm^3 .

El punto de fusión del cobre es $1083 (+/-) 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ su punto de ebullición normal es de $2595 \text{ }^\circ\text{C}$. Su conductividad térmica (K_c) 385 W/mK y eléctrica es $58,108 \times 10^6 \text{ S/m}$, punto de comparación de conductividad eléctrica frente a otros metales, alta ductilidad 60% de alargamiento, cuyo límite elástico es 33.3 , su módulo elástico (E) es 110 MPa , resistencia a la tracción 210 MPa (tabla 2.1), en general sus

propiedades mejoran con bajas temperaturas, lo que permite utilizarlos en aplicaciones criogénicas [2].

La conductividad eléctrica del cobre al puro fue adoptada por la Comisión Electrotécnica Internacional en 1913 como la referencia estándar para esta magnitud, estableciendo el I.A.C.S. o Estándar Internacional del Cobre Recocido (International Annealed Copper Standard) según esta definición, la conductividad eléctrica del cobre recocido medida a 20 °C es igual a $58,108 \times 10^6$ S/m a este valor de conductividad se le asigna un índice 100 % IACS y la conductividad del resto de los materiales se expresa en porcentaje la mayoría de los metales tienen valores de conductividad inferiores a 100 % IACS, pero existen excepciones como la plata o los cobres especiales de muy alta conductividad designados C-103 y C-110 [9].

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas del cobre

condiciones	Resistencia a la tracción,(Kg/mm ²)	Limite elástico (Kg/mm ²)	Alargamiento en la fractura (mm/mm)
Fundido	15 -22		25 -15
Recocido	21 - 24	9	46 -47
Templado	37 - 41	36	5 -6

2.2. Motor eléctrico

Es una maquina eléctrica rotativa, cuya función es transformar la potencia eléctrica que absorbe energía de la red hacia su devanado inductor, y la transforma en potencia mecánica rotacional suministrada a través de su rotor y el eje, del motor de esta forma puede accionar cualquier tipo de carga mecánica es tan generalizado su uso, que puede sustituir la fuerza del hombre, las máquinas antiguas de vapor, motores de gas, u otras formas de máquinas motrices en talleres, fabricas pequeñas y/o plantas industriales, comercios, artículos y equipo doméstico. Sus partes principales son: carcaza, estator, rotor, rodamientos, ventilador, y eje o flecha (Figura 2.2) [9].

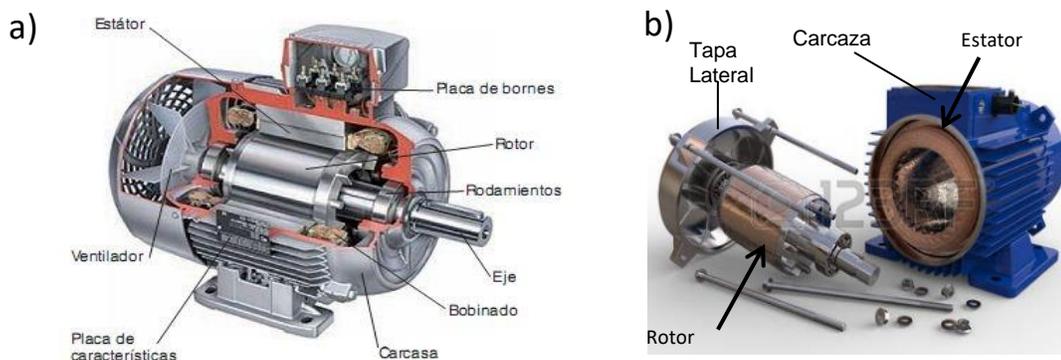


Figura 2.2 Motor eléctrico, a) partes principales, y b) Motor desarmado mostrando el rotor y estator

2.2.1 Partes del motor eléctrico

I) El estator es considerado como la parte estacionaria del motor de inducción, el estator consta de un armazón compuesto de láminas de acero al silicio circular apiladas (llamadas paquetes), que tienen la habilidad de permitir que pase a través de ellas el flujo magnético con facilidad, con ranuras equidistantes a lo largo de su periferia interior, proporcionando el espacio para el devanado del estator, los lados de las bobinas se localizan en estas ranuras, las formas de las ranuras varían de acuerdo al tamaño o tipo de motor.

Este elemento no se mueve mecánicamente, pero si magnéticamente, en un motor de inducción es el encargado de crear el campo magnético, y está formado por dos circuitos estos son: circuito magnético y circuito eléctrico (figura 2.3).

El circuito magnético es el paquete o tambor con forma cilíndrica con ranuras aisladas entre sí con Carlite (material inorgánico similar al barniz), para reducir las pérdidas por corrientes parasitas, la misión de las ranuras es alojar los conductores de los devanados.

El circuito eléctrico está formado por tres devanados monofásicos que al conectarlos en estrella o triángulo, forman un devanado trifásico, en su concepción más elemental, estos devanados son tres bobinas desfasadas 120° eléctricos. Cada

bobina está formada por dos conductores diametralmente opuesto (bobina de paso diametral) la parte metálica del estator y los devanados proveen los polos magnéticos de un motor, siempre son pares (2, 4, 6, 8,10...) por ello el mínimo de polos que puede tener un motor para funcionar son dos (polo norte y polo sur).

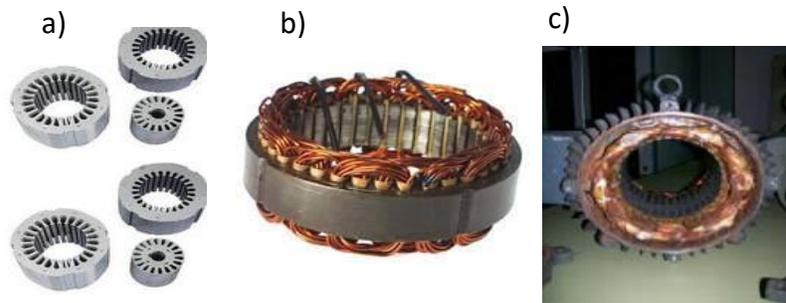


Figura 2.3. Estator del motor; a) Tipos, b) embobinado, y c) integrado a la carcasa.

II) Rotor se compone de una armazón de laminaciones ranuradas estas están apiladas cuidadosamente para crear una serie de ranuras para el devanado del rotor, se utilizan dos tipos de devanados del rotor: 1) devanados trifásicos convencionales hechos de alambre aislado tipo magneto y 2) devanado de jaula de ardilla. El tipo de devanado da lugar a dos clases principales de motores: motor de inducción de jaula de ardilla (motor de jaula) y motor de inducción de rotor devanado (figura 2.4).

El rotor es la parte del motor que gira a gran velocidad, debido a la acción de los campos magnéticos del estator que inducen una corriente, su velocidad de rotación expresada en revoluciones por minuto (r.p.m.) depende de numero de polos magnéticos del estator, el rotor está montado sobre un eje apoyado en cojinetes de rozamiento también denominados baleros, el eje está atravesado por barras de cobre o aluminio en caso de motor jaula de ardilla el estator encapsula al rotor y genera el campo magnético, el rotor mecánicamente es la parte móvil, debido a esto también se le conoce como inducido, que por la ley de Faraday-Lenz se opone a las causas que lo genera entonces se establece el par motor [9].

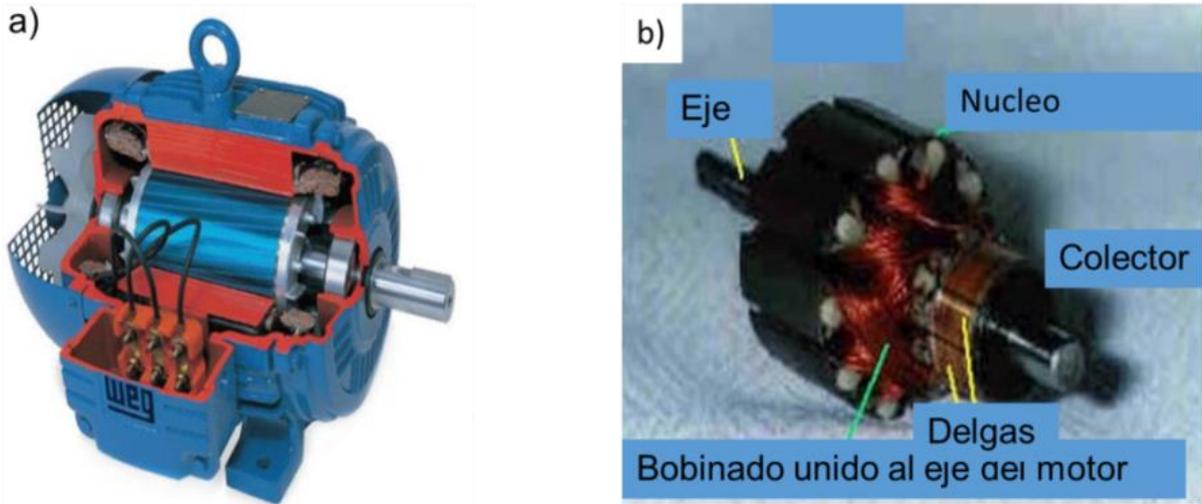


Figura 2.4. Tipos de rotor, a) integrado a motor eléctrico trifásico marca weg, y b) componentes principales [11]

III) Rodamientos (cojinetes o baleros) son elementos mecánicos que reduce la fricción entre un eje y las piezas conectadas a este por medio de la rodadura que queda entre ellos, y este sirve de apoyo y facilita su desplazamiento radialmente, permitiendo el libre giro del rotor montado sobre las tapas de la carcasa o envoltura del motor (figura 2.5.), el rodamiento o cojinete de rodadura es un elemento mecánico que se sitúa entre dos componentes de una máquina rotatoria, con un eje de rotación común, de forma que un componente pueda girar respecto a otro". Se utiliza en las maquinas rotativas como apoyo o soporte de los elementos portadores [10].

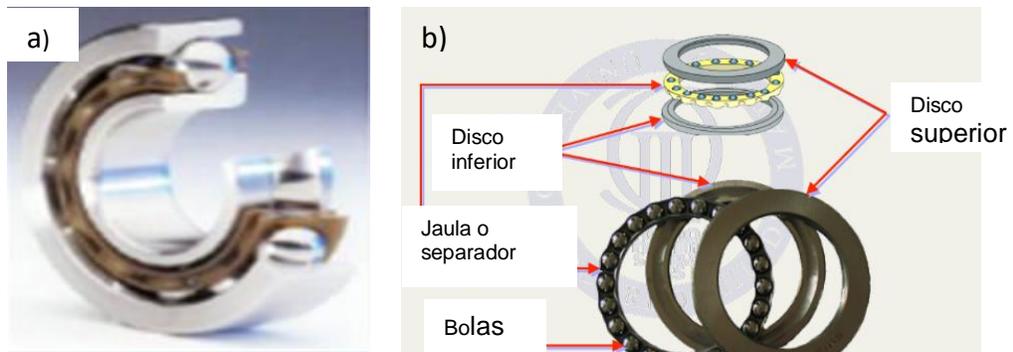


Figura 2.5. Rodamiento, a) recto tipo bolas; b) elementos internos [10].

IV) Ventilador es un dispositivo que tiene como objetivo principal la generación de una corriente de aire fresco permanente para suministrar y permitir el enfriamiento o refresco de un motor eléctrico, tomando el aire (refrigerante) del medio ambiente con el fin de aumentar la velocidad del aire en espacios muy reducidos retirando el calor generado, (figura 2.6), evitando posibles daños al motor eléctrico, la solución más viable es el uso de un ventilador de accionamiento directo es decir, en el mismo eje del rotor, donde se coloca el rodete o hélice del ventilador

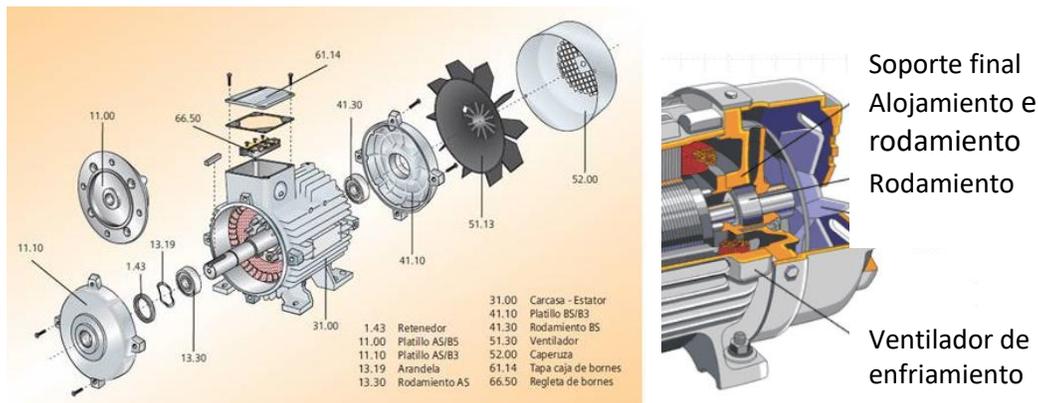


Figura 2.6. Ventiladores integrados al motor eléctrico (ambos casos) [11].

V) Carcasa se define como la estructura exterior su función es: aislar, proteger, sustentar e incluso participar de la acción propia de una máquina, instrumento o alguna de sus componentes [4].

La carcasa de los motores para aplicaciones especiales y/o dedicadas (alta eficiencia) son elaborados en hierro gris FC-200 para proveer altos niveles de robustez mecánicas y resistir a las aplicaciones más críticas las aletas de refrigeración son diseñadas para evitar acumulación de líquidos y polvo sobre el motor, (figura 2.7) [11].



Figura 2.7. Carcasa de motor WEG para motor de alta eficiencia [11].

2.2.2 Funcionamiento del motor eléctrico

El estator suele estar conectado a las líneas de alimentación, y recibe corriente eléctrica de tipo alterna (a.c.) y/o corriente directa (c.d.) que crea un campo magnético rotativo alrededor del devanado del estator. Este flujo rotativo corta las barras o los devanados del rotor, induciendo en ellos una corriente secundaria, y la reacción entre el flujo de las corrientes del rotor y del campo rotativo del estator producen el par motor que hace girar el rotor.

La operación de un motor de inducción está basada en ley de Faraday y la fuerza de Lorentz. La ley de Faraday revelo la relación fundamental entre el voltaje y el flujo en un circuito donde establece que:

1. Si el flujo que vincula un lazo (o vuelta) varía como una función del tiempo, se induce un voltaje entre sus terminales.
2. El valor del voltaje inducido es proporcional a la velocidad de cambio del flujo.

La fuerza de Lorentz establece que un conductor que transporta corriente y se coloca en un campo magnético, este se somete a una fuerza llamada fuerza electromagnética, cuya magnitud de la fuerza depende de la orientación del conductor con respecto a la dirección del campo, la fuerza es mayor cuando el conductor es perpendicular al campo, y cero cuando el conductor es paralelo a él cuando está entre los dos extremos, la fuerza tiene valor intermedio [9].

El principio de operación está basado en la aplicación de los dos conceptos de Faraday – Lorentz, al considerar una serie de conductores de longitud l cuyos extremos se ponen en corto circuito mediante dos barras (tipo escalera) A y B. Un imán permanente colocado sobre estas barras conductoras se mueve con rapidez hacia la derecha a una velocidad v para que su campo magnético B pasa a través de los conductores, se presenta la siguiente secuencia:

- Se induce un voltaje (V) en cada uno de los conductores mientras el flujo pasa por ellos (ley de Faraday).
- El voltaje inducido produce de inmediato una corriente (I) la cual fluye por el conductor debajo de la cara del polo, a través de las barras extremas y regresa a través de los demás conductores.
- Como el conductor que transporta corriente queda en el campo magnético del imán permanente, experimenta una fuerza mecánica (fuerza de Lorentz).
- La fuerza siempre actúa en una dirección para arrastrar el conductor junto con el campo magnético.

Si la escalera conductora está libre para moverse se acelerará hacia la derecha, sin embargo conforme esta adquiere velocidad, el imán móvil pasará con menos rapidez por los conductores, por lo que el voltaje inducido E y la corriente I disminuirán, en consecuencia, la fuerza que actúa en los conductores también disminuirá, si la escalera tuviera que moverse a la misma velocidad que el campo magnético, el voltaje inducido E la corriente I y la fuerza que arrastra la escalera será cero en un motor de inducción la escalera se cierra a sí misma para formar una jaula de ardilla (figura 2.8) [9].

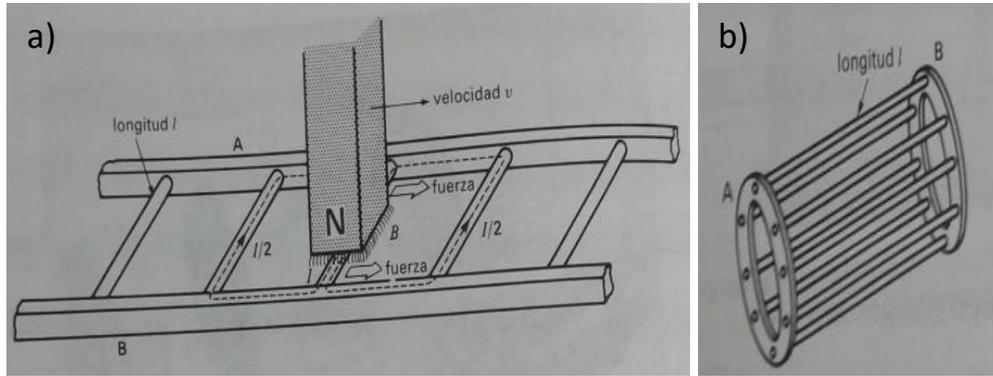


Figura 2.8. Principio de operación del motor eléctrico: a) imán en movimiento pasando sobre la escalera conductora, y b) escalera enrollada para formar una jaula de ardilla [9].

2.2.3 Parámetros eléctricos

Potencia es la rapidez con la que se realiza un trabajo; en física la Potencia = Trabajo/tiempo, la unidad del Sistema Internacional para la potencia es el joule por segundo, y se denomina watt (W) sin embargo, estas unidades tienen el inconveniente de ser demasiado pequeñas para propósitos industriales.

Por lo tanto, se usan el kilowatt (kW) y el caballo de fuerza (HP) que se definen como:

$$1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$$

$$1 \text{ HP} = 747 \text{ W} = 0.746 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW} = 1.34 \text{ HP}$$

Corriente eléctrica es el flujo neto de cargas eléctricas que circulan en forma ordenada de un punto a otro cuando existe una diferencia de potencial entre ambos puntos, en un medio material, este puede ser sólido, líquido y gaseoso su ecuación matemática es:

$$I = \frac{V}{R} \quad (\text{A}) \quad (1)$$

Dónde:

V es el voltaje y R es la resistencia que se opone al flujo de la corriente (electrones) de forma general, la corriente eléctrica produce tres tipos de efectos:

a) Cuando circula una corriente por un conductor, este aumenta su temperatura.

- b) Si la corriente eléctrica circula por un conductor iónico, dicha corriente es capaz de producir un cambio químico en él.
- c) El paso de la corriente a través de un conductor crea un campo magnético similar al que produce un imán este es el fundamento de los motores eléctricos, dispositivos de televisión, radio, amperímetros, voltímetros etc.

Por lo que se establece que, el efecto calorífico y el magnético son inherentes a la corriente eléctrica que viaja a través de los conductores eléctricos.

Voltaje es una magnitud física también conocida como tensión eléctrica o diferencia de potencial.

Es la fuerza que impulsa a los electrones a través de un conductor entre dos puntos de un circuito cerrado, la unidad de medida del voltaje o diferencia de potencial está dada en el sistema internacional en Voltios o Volts, a través de la ley de Ohm:

$$V = IR \quad (V) \quad (2)$$

Resistencia es la oposición que presentan los materiales para que fluya la corriente eléctrica, a través de ellos esta dificultad que se encuentra al circular, se debe a la coalición que se encuentra entre los electrones en movimiento y los átomos del material, la resistencia eléctrica de una determinada muestra del material conductor, depende del tamaño y forma del conductor, del material que está compuesto, y de su temperatura, en el sistema internacional, la resistencia eléctrica se mide en Ohm, su símbolo es (Ω), y su ecuación es.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (\Omega) \quad (3)$$

Resistividad eléctrica es una propiedad física, específica de la materia que mide la dificultad que presenta una sustancia para conducir la corriente eléctrica, entre mayor sea la resistividad de un material menor será la capacidad de conducir la corriente eléctrica a diferencia de la resistencia, que depende de la forma del

conductor, la resistividad solo depende del material del que está hecho y no de su forma; por lo anterior se designa por la letra griega ρ y su unidad en el sistema internacional es ohm por metro ($\Omega \cdot m$).

Teóricamente el cobre tiene una resistividad de $1.72 \times 10^{-8} \Omega/m$ a $20^\circ C$, su ecuación es:

$$\rho = \frac{RA}{L} \quad (\Omega \cdot m) \quad (4)$$

Conductancia eléctrica cuyo símbolo es (G) de un conductor se define como la inversa de su resistencia es la ecuación (2.6):

$$G = \frac{1}{R} \quad (1/\Omega) \quad (5)$$

Conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de un material de dejar fluir la corriente eléctrica, su aptitud para dejar circular libremente las cargas eléctricas (σ) la conductividad depende de la estructura atómica y molecular del material, los metales son buenos conductores porque tienen una estructura con muchos electrones con vínculos débiles y esto permite su movimiento la conductividad también depende de otros factores físicos del propio material y de la temperatura, siendo este el recíproco de la resistividad [12], cuya ecuación en su ecuación más simple es:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (1/\Omega \cdot m) \quad (6)$$

Del estándar ASTM B193-02 la conductividad de los metales sometidos a pruebas cuya característica geométrica es cilíndrica (varilla o redondo macizo) y la corriente continua (cc) y la diferencia de voltaje a lo largo de la longitud L de la muestra del metal su ecuación es: [18]

$$\sigma = \frac{4L}{\pi d^2} \frac{1}{R} \frac{v_r}{v_m} \quad (1/\Omega \cdot m) \quad (7)$$

Dónde:

L = longitud de la probeta

d = diámetro de la varilla o redondo macizo

R = resistencia de comparacio.

v_r = voltaje reflejado en la resistencia comparativa

v_m = voltaje reflejado en metal de la probeta

2.2.4 Pérdidas en motores eléctricos

Fenómeno que se traduce en una disminución de la energía útil, las pérdidas pueden producir la disipación de energía a través de los campos eléctricos y magnéticos engendrados; o puede ser de tipo térmico, por ejemplo: perdidas por histéresis, por corrientes parasitas, perdidas armónicas y de tipo eléctrico. Todos los sistemas tienden por naturaleza, a buscar una situación de reposo o calma “entendemos reposo, como la situación en la que el movimiento de sus partículas sea el menor posible”.

Por ello cuando este estado de relativa calma se altera, los sistemas intercambian energía con los que le rodea, para tratar de aproximarse lo máximo posible a dicho estado. En el caso de la taza de café, esta emite calor al exterior para tratar de enfriarse y reducir sus niveles energéticos, este intercambio de energía es a lo que llamamos calor, termodinámicamente, es una forma de energía en movimiento debida a una diferencia de potencial entre la fuente o cuerpo caliente de donde procede la energía y el cuerpo frio al cual se desplaza y a la diferencia de potencial se le denomina temperatura [13].

Las consideraciones de las pérdidas de las maquinas rotativas (motor) es importante por tres razones:

1. Las perdidas determinan la eficiencia de la maquina e influye apreciablemente en sus costos operativos.
2. Las perdidas determinan el calentamiento de la máquina, y por tanto la calificación o potencia de salida que puede ser obtenido sin un deterioro indebido del aislamiento.
- 3.

4. El voltaje cae a los componentes actuales asociados con el suministro de energía. las pérdidas deben ser contabilizados adecuadamente para una representación de la máquina. El rendimiento de la maquina o cualquier dispositivo de transformación de energía está dado por su eficiencia [14].

Perdidas en los conductores

Las pérdidas en un conductor dependen de su resistencia y del cuadrado de la corriente que transporta la resistencia, a su vez, depende de la longitud, sección transversal, la resistividad y la temperatura del conductor la siguiente ecuación nos permite determinar la resistividad de cualquier material a cualquier temperatura [13].

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (\Omega \cdot m) \quad (8)$$

Dónde:

ρ = resistividad del conductor a la temperatura t ($\Omega \cdot m$)

ρ_0 = Resistividad del conductor a 0°C ($1/^\circ\text{C}$)

t = Temperatura del conductor

α =coeficiente de temperatura

La vida útil de un motor está principalmente en su devanado si la refrigeración es insuficiente, el devanado se debilita y sufre daños severos, por norma todos los motores están diseñados para operar en un ambiente con temperatura no superior a 40°C y en una altura no superior a 1000 metros sobre el nivel del mar, la combinación de altitud y temperatura no siempre es desfavorable, pues en lugares en donde exista una altitud de 2600 m, a una temperatura ambiente de 20°C , podemos prácticamente decir que se compensa el efecto.

Entre todos los factores, el más importante es, sin duda la temperatura de trabajo de los materiales aislantes empleados, un aumento de 10 grados por encima del límite de la clase térmica, en la temperatura del sistema de aislamiento, puede reducir la vida útil del devanado a la mitad, cuando hablamos en disminución de la vida útil del motor, no nos referimos únicamente a las temperaturas elevadas, cuando el aislante se daña, el devanado es destruido otro tema a considerar son las condiciones propias del ambiente como la contaminación, presencia de agentes químicos,

humedad, vibración, utilización en lugares abiertos o cerrados, grado de protección, características principales de la red eléctrica la tensión (voltaje), frecuencia (50 y/o 60 Hz), [16].

2.2.5 Materiales aislantes

Dos factores principales motivaron el desarrollo de nuevos y mejores materiales aislantes en primer lugar, los materiales aislantes naturales mostraron deficientes propiedades térmicas y de resistencia a la tensión, y de ahí que su vida útil fuera muy reducida, y en segundo lugar, las restricciones en la economía global, los cambios a nivel mundial presionaron un rápido incremento de la potencia de salida de las máquinas rotativas para satisfacer el fuerte crecimiento en la demanda energética.

Actualmente, estas restricciones en la economía global, implican asegurar la confiabilidad en el servicio y la extensión de la vida útil de las máquinas rotativas el mayor impacto de estos factores en el diseño de las máquinas ha sido el incremento del esfuerzo eléctrico (kV/mm) que el aislamiento principal a la tierra tiene que soportar.

El esfuerzo eléctrico de las máquinas rotativas actuales está en el rango de 3 kV/mm, tres veces mayor que el de las máquinas rotativas construidas hace 100 años por el otro lado, la vida útil de las máquinas rotativas modernas ha experimentado una disminución importante en contraste con máquinas antiguas, que en condiciones favorables fácilmente podían alcanzar cincuenta años de servicio.

La expectativa de vida de los aparatos eléctricos está limitada por la temperatura de su aislamiento; mientras más alta es la temperatura, más corta es su vida útil. pruebas realizadas en muchos materiales aislantes han demostrado que la vida útil de los aparatos eléctricos, disminuye aproximadamente a la mitad cada vez que la temperatura aumenta cada 10 °C. Esto significa que si un motor tiene una expectativa normal de 8 años a una temperatura de 105 °C tendrá una vida útil de solo 4 años a una temperatura de 115 °C. [9]

Desde el punto de vista de los mecanismos de polimerización, todas las resinas de poliéster se producen de tres componentes básicos: el primer componente es la base, que podría ser un monómero o un conjunto de monómeros formando una

molécula más grande (base de poliéster), el segundo componente son los monómeros reactivos necesarios para disolver la base de poliéster a temperatura ambiente y para reaccionar con ella o con otros monómeros durante las reacciones de curado, el tercer componente es el catalizador el cual con la adición de calor inicia y facilita las reacciones de curado [19].

Los factores que contribuyen más al deterioro son: el calor, la humedad la vibración, la acidez, la oxidación y el tiempo, el aislamiento comienza a cristalizarse lentamente, y ocurre con más rapidez conforme se incrementa la temperatura.

Clasificación térmica de los aislantes los comités y organizaciones que establecen estándares (IEEE, Underwrites Laboratories y la Canadian Standards Association) han agrupado a los aislantes en cinco clases, según su capacidad de soportar calor, estas clases corresponden a los niveles máximos de temperatura de 105, 130 , 155 , 180 y 220 °C, representados por las letras A, B, F, H y R (tabla 2.2) piedra angular en el diseño y fabricación de motores eléctricos.

Las organizaciones de estándares han establecido una temperatura ambiente máxima que en general es de 40 °C esta temperatura estandarizada fue establecida por las siguientes razones: Permite que los fabricantes de motores eléctricos prevean las peores condiciones de temperatura y les permita estandarizar el tamaño de sus máquinas y dar garantías de desempeño [9].

Tabla 2.2 Materiales aislantes del cobre para devanados de máquinas eléctricas [9].

Clase de aislamiento	Productos empleados	Materiales aglomerados o impregnados	Temperatura máxima de empleo(°c)
A	Esmaltes de acetato de polivinilo. Poliuretano. Aglomerado de celulosa, Algodón, Seda y Papel	Melamina con formaldehído. Formol con formaldehído	105
B	Fibras de vidrio. Producto de mica. Esmaltes de politeraftalatos. Films de policarbonato	Goma. Laca. Compuestos asfálticos o bituminosos, resinas alkideas, resinas de poliéster, metamina, y formaldehídos	130
F	Fibras de vidrio, amianato. Productos de mica. Fibras de poliamidas aromáticas. Films de poliéster-imida	Resina epoxi Resina de poliuretano Resina de silicona	155

H	Fibras de vidrio, amianato. Productos de mica. Fibras de poliamidas aromáticas. Polietraflouretileno, caucho de silicona.	Resina de silicona	180
N	Porcelana, mica, cuarzo, vidrio u otro material cerámico, politraflouroetileno	Resina de silicona	200
R	Materiales o combinación de materiales que por experiencia o pruebas aceptadas se puede demostrar que tienen la vida térmica requerida a 200 °C	Resina de silicona	220
S	Materiales o combinación de materiales que por experiencia o pruebas aceptadas se puede demostrar que tienen la vida térmica requerida a 200 °C	Resina de silicona	240
C	Materiales compuestos totalmente de mica, porcelana, vidrio, cuarzo y materiales inorgánicos similares. Pueden incluir en esta clase otros materiales o combinaciones de materiales, si por experiencia o pruebas aceptadas se pueden demostrar que tienen la vida térmica requerida a temperaturas de más de 240 °C.	Resina de silicona	240

2.3. Envejecimiento térmico

Envejecimiento del aislamiento durante la operación de las maquinas rotativas de alto voltaje el aislamiento principal del estator es sometido a esfuerzos térmicos, eléctricos, ambientales y mecánico. en régimen de funcionamiento nominal estos esfuerzos deterioran las propiedades eléctricas, y mecánicas del sistema del aislamiento llevándolo eventualmente a la falla cuando en los materiales, el proceso de fabricación y el diseño son elegidos correctamente, los sistemas de aislamiento pueden alcanzar una vida útil de aproximadamente de 20 años o más es decir, la velocidad de degradación es lenta en condiciones normales de operación, pero aumenta vertiginosamente ante problemas de diseño o si los modos de operación

elevan los esfuerzos más allá de su límite permitido problemas como una irregular impregnación, zonas con una acumulación de resina y un volumen de inclusiones gaseosas producto de un deficiente proceso de fabricación reduce el desempeño del sistema de aislamiento.

El mecanismo de degradación más simple y subsecuente falla del sistema de aislamiento comienza con los inevitables “espacios de aire” sometidos a actividades de descargas parciales durante la operación de la máquina, dejados por el proceso de fabricación hasta ciertos puntos las descargas parciales en inclusiones gaseosas no suponen un peligro inminente para el funcionamiento de la máquina.

El proceso de impregnación no es perfecto así que se espera un pequeño volumen de inclusiones gaseosas virtualmente todos los sistemas de aislamiento si los esfuerzos de operación superan los límites del diseño por un tiempo prolongado, las inclusiones gaseosas presentes comienzan a crecer rápidamente creando puentes entre ellas e incluso se forman nuevas inclusiones motivadas por la actividad de descargas parciales, con más descargas parciales, pronto las inclusiones gaseosas se esparcirán logrando en casos severos el desprendimiento de las capas individuales del aislamiento formando lo que se conoce como “delaminación” (figura 2.9).

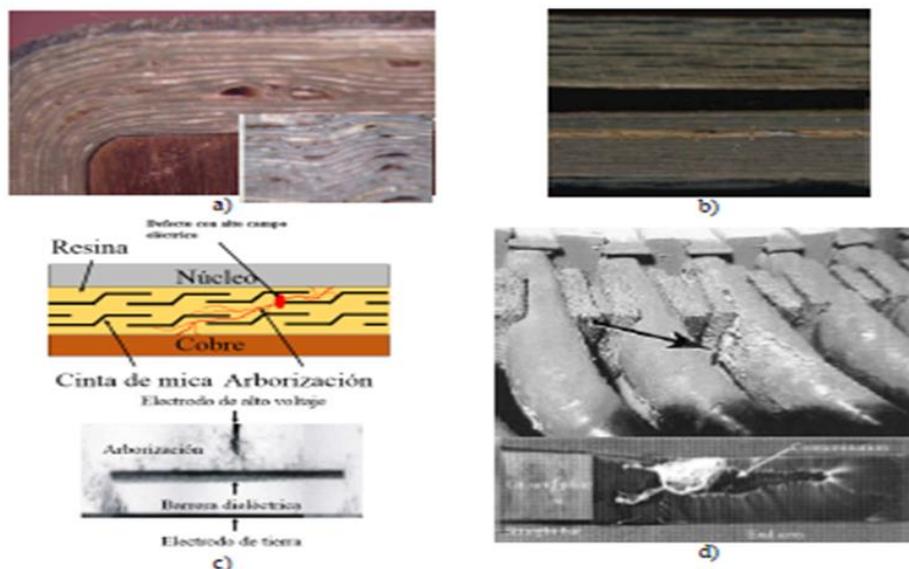


Figura 2.9. Mecanismos de degradación del aislamiento principal: a) inclusiones gaseosas; b) delaminación; c) arborización eléctrica; d) caminos de carbonización [19].

Las descargas parciales son el principal mecanismo de degradación causada por el esfuerzo eléctrico, ellas ocurren en zonas o puntos de alto campo eléctrico tales como en cavidades gaseosas en el interior del aislamiento o en zonas sobre su superficie, sin embargo, las degradaciones del aislamiento por el ataque de las descargas parciales se clasifican en dos categorías, una debida al bombardeo de iones y electrones y otra debida a las reacciones químicas que se desencadenan.

La generación de calor que ocurre en el proceso de conversión de energía en un motor eléctrico aumentará su temperatura, la excesiva temperatura de trabajo reducirá el rendimiento del motor y acorta su tiempo de vida. se necesita un sistema de gestión térmica para reducir la temperatura de trabajo del motor eléctrico la generación de calor dentro del motor eléctrico se traduce en pérdidas como: pérdidas de hierro, pérdidas mecánicas y pérdidas de carga.

Las pérdidas por carga, son pérdidas menores que incluyen pérdidas relacionado con el efecto piel y las frecuencias altas, que son difíciles de evaluar se ha estudiado el desarrollo de modelos térmicos de motores de inducción basado en densidad de pérdida, precisa, distribución para predecir el aumento de temperatura de una máquina antes de su construcción, este estudio tiene en cuenta los diferentes tipos de materiales y geometrías complicadas dentro de la máquina, así como los diferentes modos de transferencia de calor.

El método convencional de enfriamiento del motor eléctrico es típicamente mediante el uso de aletas montadas en la superficie exterior de la carcasa del motor, las aletas sirven para expandir el área de superficie de la carcasa del motor al aumentar la tasa de transferencia de calor desde el motor eléctrico al aire del medio ambiente por convección, la instalación de las aletas suele ir acompañada por la instalación del ventilador en un extremo del eje del motor [17].

Calentamiento y materiales aislantes en los motores

La temperatura ambiente juega un papel importante en la capacidad y selección del tamaño de un motor, ya que la temperatura ambiente influye en la elevación permisible de temperatura por sobre los 40° C normales, lo cual depende en gran medida en el tipo de aislamiento.

Por ejemplo, un motor que trabaje a una temperatura ambiente de 75° C empleando aislamiento clase B tiene un aumento permisible de temperatura de 55° C si trabajara a su temperatura ambiente normal de 40 ° C, se podría permitir un aumento de temperatura de 90° C, sin dañar su aislamiento, el aumento de temperatura por efecto de las pérdidas eléctricas y mecánicas está ligado a las condiciones de servicio del motor bajo condiciones normales de operación, la máquina puede recalentarse por funcionamiento ininterrumpido, hasta alcanzar en su carcasa 40 ó 50 °C por sobre la temperatura ambiente.

En el interior de la máquina, los devanados están sometidos a temperaturas mucho mayores producto del confinamiento, ya que en ellos se produce la fuente de calor que se disipa hacia el ambiente, esta temperatura puede superar fácilmente los 140°C y debe ser soportada sin problemas el aislamiento de los devanados, típicamente barnices que, aplicados en una o dos capas, resisten elevadas temperaturas en algunos puntos localizados del devanado (figura 2.14).

Aunque todos los motores incorporan sistemas de ventilación, por medio de ventiladores adosados al rotor que producen ventilación forzada de aire al interior de la máquina, éstos producen intercambio de calor hacia al ambiente por efectos de radiación, eliminando el exceso de calor en su interior y manteniendo la temperatura del motor dentro de parámetros de diseño. Las variaciones de temperatura influyen directamente sobre la temperatura de funcionamiento del motor.

Existen materiales aislantes, y diseños que permiten que los motores puedan alcanzar hasta 90°C en las superficies de las carcasas esto queda limitado, en general, a las siguientes condiciones:

Temperatura ambiente sea de hasta 40°C, variaciones de tensión en la red sea menores a $\pm 10\%$ respecto de su tensión nominal, Variaciones de frecuencia menores a $\pm 5\%$ de su valor nominal.

- Variaciones simultáneas de tensión y frecuencia limitadas.
- Que el motor eléctrico opere a menos de 1.000 metros sobre el nivel del mar [19].

Envejecimiento por esfuerzos eléctricos, las descargas parciales son el principal mecanismo de degradación causada por el esfuerzo eléctrico, ellas ocurren en zonas o puntos de alto campo eléctrico tales como en cavidades gaseosas en el interior del aislamiento, en zonas sobre su superficie, las descargas parciales implican la producción y el movimiento a alta velocidad de electrones e iones en un espacio reducido, algunos de ellos con suficiente energía para producir radicales e interacción molecular con la superficie del material que rodea la atmósfera de descarga. La descarga parcial ocurre como una avalancha de carga eléctrica con producción de subproductos y gases reactivos.

La degradación del aislamiento por al ataque de las descargas parciales puede clasificarse en dos categorías: debida al bombardeo de iones y electrones y debida a las reacciones químicas que desencadenan. La degradación de la superficie de la mica es un claro ejemplo de degradación por bombardeo iónico a su vez, la avalancha de electrones actúa como una fuente de calor que activa reacciones químicas de degradación en los materiales poliméricos del aislamiento, el mecanismo de bombardeo de iones es un proceso bastante complejo en el que la colisión entre un electrón y una superficie molecular dependerá de la estructura y el estado energético de las especies impactadas y de la energía de los electrones. Alguna de las posibles formas de interacción/colisión es:

- Un electrón transfiere parte de su energía cinética a las moléculas, sin unirse a ella. La molécula excitada puede emitir un fotón o chocar con otra molécula y el electrón continua su trayectoria con una velocidad más baja.
- Un electrón choca con una molécula y se une a ella.
- Un electrón con suficiente energía colisiona con una molécula y extrae un electrón de ella. La molécula se convierte en especie iónica (con carga positiva) y ahora hay dos electrones capaces de colisionar con otras especies moleculares.
- Un electrón se une a una molécula y provoca su división en subespecies cargadas y neutras [19].

Envejecimiento por esfuerzo térmico en el sistema de aislamiento se producirán diversas reacciones químicas dada la aplicación de suficiente energía térmica. Las fuentes de calor son múltiples, a nivel macroscópico la principal fuente de energía térmica proviene del efecto Joule en los conductores, a nivel microscópico la energía térmica es suministrada localmente por la actividad de descargas parciales, por la reestructuración de enlaces químicos incluso por la energía inyectada en el sistema por vibraciones mecánicas, la energía térmica inyectada en las inclusiones gaseosas por la descarga parcial proviene del impacto de partículas las cuales transfieren su energía cinética al material impactado y por la absorción de energía de fotones liberados en el proceso de descarga.

El incremento de la temperatura del gas será máximo en la vecindad del canal de descarga y en la superficie impactada del aislamiento, se afirma que a pesar del aumento de la temperatura local debido a una descarga parcial, esta es generalmente insuficiente para la descomposición térmica de la resina pero suficiente para producir las reacciones termo oxidativas las pérdidas eléctricas se disipan en forma de calor y aumentan la temperatura global de toda la máquina, si existen problemas en el sistema de refrigeración o de contaminación excesiva en las cabezas de bobina pueden surgir puntos calientes en el aislamiento que contribuyen aún más a la distribución no uniforme de la temperatura.

Subproductos de degradación del envejecimiento termoeléctrico

Las reacciones químicas que tienen lugar bajo el ataque de las descargas parciales producen especies químicamente activadas y subproductos de descomposición de los materiales aislantes sometidos a dichas reacciones químicas, la composición del gas de la atmósfera de descarga influye fuertemente en las especies reactivas y los subproductos formados, en máquinas refrigeradas por aire, la composición de la atmósfera es una mezcla de varios gases, cuyos principales componentes son el nitrógeno y el oxígeno con una menor concentración de argón, vapor de agua y óxidos de carbono, por lo tanto, la composición más probable de iones y especies moleculares formadas por las descargas parciales en esta atmósfera son combinaciones de nitrógeno, oxígeno, óxidos de carbono e hidrógeno.

2.4 Caracterización metalúrgica

La metalografía es la ciencia que estudia la estructura y las propiedades de los metales, aleaciones y establece la relación que existe entre su composición, estructura y propiedades, para revelar y evaluar la estructura interna. El examen microscópico en las probetas es uno de los métodos más importantes de investigación de los materiales los nuevos materiales especiales como aleaciones metálicas para alta tecnología, materiales cerámicos, compuestos y polímeros han hecho que la metalografía se convierta en una parte cada vez más vital de la industria moderna a través de los procesos de corte, montaje, desbaste y pulido, se obtiene una superficie lisa que revela la estructura del material. Para obtener resultados óptimos y de calidad es necesaria una combinación de “Equipos adecuados, método de preparación correcto, fungibles y apropiados” lo que denominamos “solución total de la preparación”.

Pasos de metalografía

La preparación de probeta, consiste en general, obtener primero una superficie plana y semipulida, mediante el empleo de papel, esmeril de finura de grano creciente o realzado, este desbaste con papel abrasivo terminado con un pulido fino y finaliza en la pulidora mecánica provista con discos de paño de billar, requerida para obtención de una superficie que al efectuar el ataque se pueda observar adecuadamente la estructura del cobre

uno de los factores más esenciales que influyen sobre la técnica de la preparación de las probetas es el cuidado en que se les maneja en todas las fases de la operación de igual importancia es el trabajo con limpieza, porque una partícula del esmeril o de una materia extraña puede inutilizar una probeta a intervalos frecuentes, durante el transcurso de la preparación, tanto la probeta como la mano del laborante deben lavarse con agua y jabón y es esencial cuando se pasa de un papel de esmeril a otro más fino para evitar el deterioro del anterior y que la probeta se raye.

1). Toma de muestra, la elección de la muestra debe ser examinada al microscopio ya que ha de lograrse una probeta representativa del material a examinar.

2). Desbaste a mano, la superficie que haya de observarse se debe hacer primero plana, mediante un desbaste grueso, cuando se usa agua como refrigerante, se puede terminar en un tiempo muy corto si se le gira 90°, constantemente mientras se desgasta la probeta.

Ni durante el desbaste grueso ni durante los posteriores intermedio y final no se debe aplicar mucha fuerza a la probeta contra el medio abrasivo para eliminar posible ralladura.

3)Desbaste intermedio el papel esmeril se coloca sobre una placa o sobre cualquier superficie bien plana y limpia la probeta se mueve longitudinalmente de un lado a otro del papel comprimiéndola con una fresa suave; la dirección del movimiento se mantiene constante, para que todas las rayas producidas sean paralelas el final de la operación sobre un papel está determinado por la desaparición de las rayas producidas por el desbaste grueso o el papel anterior, y para poder reconocerlo fácilmente se opera en forma que las nuevas rayas sean perpendiculares a las anteriores; así es más fácil ver cuando estas nuevas rayas sustituyen totalmente a las anteriores más gruesas.

4) Desbaste final o fino se realiza de la misma forma que el desbaste intermedio pasando el papel de esmeril empleado al número 2000; en general se utilizó dos papeles que son el número 2000 y el 2400. Cada vez que se cambió el papel se opera de la forma descrita anteriormente.

5). Desbastadora con papel de esmeril fino (Desbaste Mecánico)

Un desbaste muy eficaz se puede realizar mecánicamente empleado un disco giratorio que se cubre con papel de esmeril número 2400 sujetándolo mediante un anillo de fijación apropiada, el disco debe girar a un 100 rpm para el papel más grueso y a velocidad de preferencia más pequeñas con los papeles más finos.

6). Disco con parafina es sencillamente un disco de pulidora cubierto en una capa de parafina de alto punto de fusión o con un paño de billar o lona que se ha impregnado con parafina los discos para el desbaste se cargan antes y durante la operación con suspensiones, de una solución acuosa de jabón de polo abrasivo.

7) Pulido final esta operación tiene por objeto eliminar las rayas producidos en el pulido preliminar y dar lugar, por último, a una superficie pulida uniformemente y libre

de rayas. Según el metal o aleación que se pule se emplea uno de los abrasivos siguientes: Al_2O_3 Lebigada, MgO , Cr_2O_3 . Para la mayoría de abrasivo que tiene mayor éxito es la Al_2O_3 , da un resultado magnifico y se reconoce como el abrasivo de empleo más universal.

8). Ataque Químico es un proceso de corrosión controlada de la muestra, se realiza sumergiendo la superficie en algún tipo de solución adecuada la solución química usada depende del material que compone la muestra, la temperatura y tiempo del ataque, el efecto deseado en la superficie.

Para el cobre, se procede a realizar el ataque químico con los siguientes reactivos: 80 ml H_2SO_4 , 20 ml HNO_3 , 1ml HCl , 55-60 g CrO_3 , 200 ml de agua, trabajar de 20 °C a 40 °C, sumergiendo la probeta de 1 a 3 minutos, y posteriormente se realiza un enjuague para evitar la oxidación [20].

2.4.1 Pruebas eléctricas

Durante más de cien años, los físicos han intentado describir los fenómenos de conducción eléctrica en metales a principios de la década de 1900, se desarrolló la teoría clásica basado en el concepto de un gas de electrones libres aunque esta teoría tiene limitaciones porque ignora el comportamiento cuántico del electrón, el modelo clásico presenta algunos útiles conocimiento de la conducción eléctrica y cálculo de la conductividad eléctrica.

El modelo clásico asume que el metal consiste en iones positivos inmóviles y electrones negativos que se mueven libremente y que se distribuyen al azar en el metal algunos de estos electrones permanecen unidos a los iones positivos mientras que restantes electrones de valencia son libres de moverse lejos de los iones positivos a los que estaban originalmente unidos el movimiento de estos electrones de valencia se modela utilizando la teoría cinética clásica de gases, bajo los siguientes supuestos.

Primero, el modelo asume que los electrones de valencia experimentan colisiones con el ion positivos inmovil. Sin embargo, los detalles precisos sobre cómo se dispersa el electrón no están especificados se supone que el intervalo promedio entre colisiones para un solo electrón es (τ) , esta constante de tiempo τ tiene varios

nombres: tiempo de relajación, tiempo de colisión o media libre a través de cada colisión, la velocidad y la dirección del electrón se cambian entre colisiones, el modelo asume que el electrón no interactúa con los iones positivos (aproximación de electrones libres) o los otros electrones de valencia (aproximación de electrones independientes).

Con estas suposiciones en su lugar, el modelo clásico de electrones libres se utiliza para modelar la conductividad eléctrica de un metal un electrón de valencia con carga: choca con uno de los iones metálicos positivos inmóviles en el momento, dando al electrón una velocidad, cuando un electrón es afectado por un externo aplicado el campo eléctrico E , su aceleración resultante es $-eE / m$. La velocidad del electrón es ahora una suma de la velocidad después de la colisión más la velocidad debida a la interacción del electrón con el campo eléctrico (A), [17].

Procedimiento de medición de conductividad de metales

Se ensambla el sistema de medición, como se muestra en la figura 2.10, en paralelo, se pondrá a funcionar a los dos nanovoltímetros, y obtener un precalentado, lo suficiente para minimizar el error posible en la medición.

Previamente se realizará la medición de conductividad, se limpiará el alambre de cobre midiendo su longitud y diámetro, tomando muchos puntos a lo largo de la longitud de la probeta para asegurar que la sección transversal es uniforme. Luego se colocara la muestra de cobre en el sistema de medición y se conecta la sonda de borde de cuchilla, asegurándose de que los contactos de la sonda estén limpios y sujetar firmemente contra la superficie del metal con la fuente de alimentación de c.c. que proporcionará corriente cero, cuidando que este en cero tanto el nanovoltímetro conectado a la resistencia estándar como a la sonda de filo de cuchillo.

En un sistema de medición de conductividad calibrada de metales redondos (alambre conductor), se suministra la corriente por la fuente de c.c. y se leen los voltajes resultantes tanto en la resistencia estándar como en la probeta. Es importante recopilar los datos de voltaje tan pronto como sea posible pues la temperatura en el alambre comienza a aumentar tan pronto como la corriente comienza a fluir a través de él, calentándolo óhmicamente.

Como la conductividad es una función de la temperatura, esto es un punto importante, dado el diámetro de la barra de metal, la longitud L entre los contactos del borde de la cuchilla sonda, resistencia R_r del resistor estándar y las diferencias de voltaje a través del estándar de Resistencia K y sonda Kn -Knife, se podrá calcular la conductividad de la barra de metal.

Verificación del sistema de medición, con el fin de verificar que el sistema de medición de conductividad dc está funcionando correctamente, se medirá un material de referencia estándar para la medición de la resistividad eléctrica en función de la temperatura en virtud de que la conductividad eléctrica es meramente la inversa de la resistividad, ASTM B 193 es una Estándar apropiado para verificar el sistema de medición.

Entre nuestras mediciones de conductividad dc y los datos enumerados en el certificado, los valores certificados de conductividad fueron escasos cerca de la temperatura ambiente, por lo que se utiliza un polinomio se ajusta a varios de los puntos de datos certificados para comparar con nuestras conductividades medidas, dentro del rango de temperatura de, nuestras mediciones de conductividad están en acuerdo con los valores certificados.

Se debe utilizar algún método para examinar las características eléctricas del conductor eléctrico de tipo metálico, partiendo del modelo clásico que asume que el metal consiste de iones positivos inmóviles, y electrones negativos en libre movimiento de forma aleatoria que se encuentran distribuidos en el metal, donde los electrones de valencia experimentan colisiones con los iones positivos inmóviles, en su fabricación a menudo son para una temperatura específica, generalmente para caracterizar la resistividad se emplea el método de kelvin o método de las cuatro puntas para metales planos y para una forma geométrica distinta (redonda o cilíndrica) se podrá medir la conductividad mediante el método de "prueba por resistencia de un material conductor eléctrico" [17].

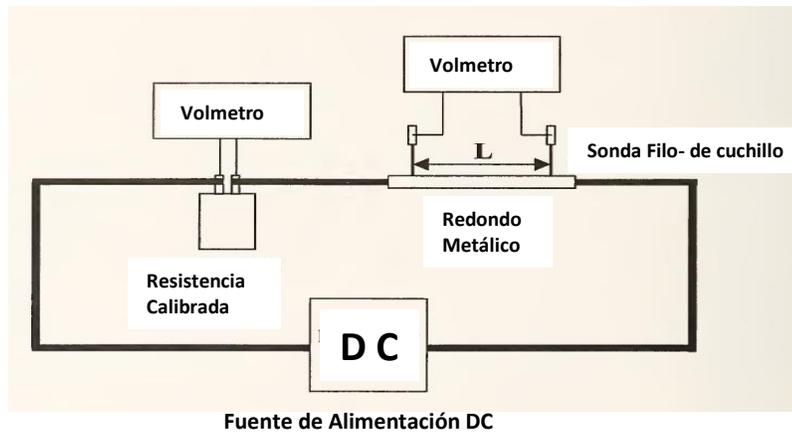


Figura 2.10. Sistema de medición de la conductividad [17]

2.4 2 Análisis microestructural

El análisis metalográfico es un estudio de alto valor para la caracterización del material, es la ciencia que estudia las características microestructurales del metal esta va relacionada con las propiedades químicas y mecánicas.

Este importante análisis consiste en dos pasos: Preparación y Análisis. La preparación consiste a su vez en tres procesos: corte, montaje y desbaste/ pulido, el montaje es para un mejor manejo de muestra, en estos procesos de preparación el objetivo es limpiar el material y dejar acabado espejo. El paso de análisis consiste de dos procesos: ataque químico para la revelación de la estructura y análisis de la muestra en el microscopio.

Análisis microscópico es aquel tipo de análisis que no se puede realizar a simple vista, (menor a 10^{-3} mm), al observar las estructuras microscópicas en materiales ayuda a comprender el comportamiento de los mismos, el análisis microscópico se puede usar en: Tamaño de grano, límites de grano y dislocaciones, análisis microestructural, y distribución de fases en aleaciones, como se puede apreciar en la figura 2.11, [9].

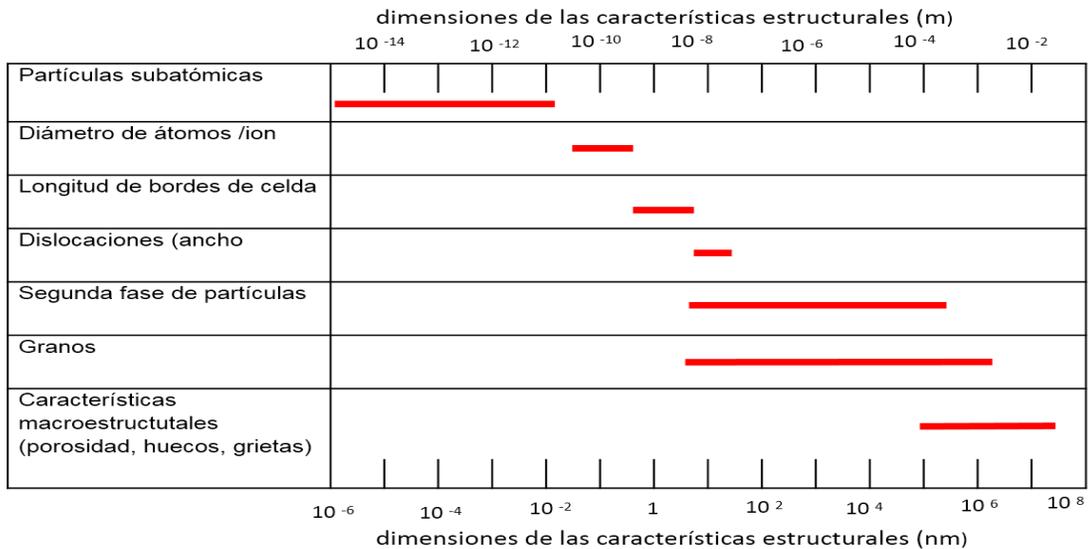


Figura 2.11. Dimensiones características microestructurales de partícula desde subatómicas hasta macroestructuras

2.4.2.1 Microscopia Óptica

Es una técnica empleada para ver de cerca una muestra con el aumento de una lente con la luz visible

El microscopio óptico es un instrumento que permite observar objetos que no son perceptibles al ojo humano esto se logra mediante un sistema óptico compuesto por lentes, que forman y amplifican la imagen del objeto que se está observando. Se distinguen dos tipos de microscopio, que están basados en el número de lentes y su posición, estos son:

- Microscopio simple: conocido comúnmente como lupa, o un sistema de lentes que actúan como si fuera una lente simple.
- Microscopio compuesto: se constituye por la combinación de dos o más sistemas de lentes convergentes: uno próximo al ojo del observador, el ocular y el otro próximo al objeto, denominado objetivo.

El microscopio compuesto: consta de dos partes, una parte mecánica que tiene la finalidad de sostener la preparación a examinar y soportar todo el sistema óptico del microscopio. Y la parte óptica que considera los dos sistemas de lentes convergentes

centrados sobre un eje óptico común, denominado ocular y objetivo. También ésta parte integra un sistema de iluminación que facilita la observación microscópica.

Partes del microscopio:

1. Interruptor de encendido.
2. Perilla control de iluminancia: Controla la cantidad de lux que iluminan la muestra.
3. Tubo de observación binocular u objetivo.
4. Platina: Sobre ella se arreglan las probetas.
5. Portador del espécimen: Base sobre la que se encuentra la platina
6. Puente giratorio: Contiene el objetivo (lentes de aumento). En total son 4 lentes con aumento de 5x, 10x, 50x y 100x.
7. Control de movimiento en Y: Posiciona el portador del espécimen en el eje Y
8. Control de movimiento en X: Posiciona el portador del espécimen en el eje X
9. Perilla de ajuste fino: Ajuste de imagen fino.
10. Perilla de ajuste grueso: Ajuste de imagen grueso. [21].

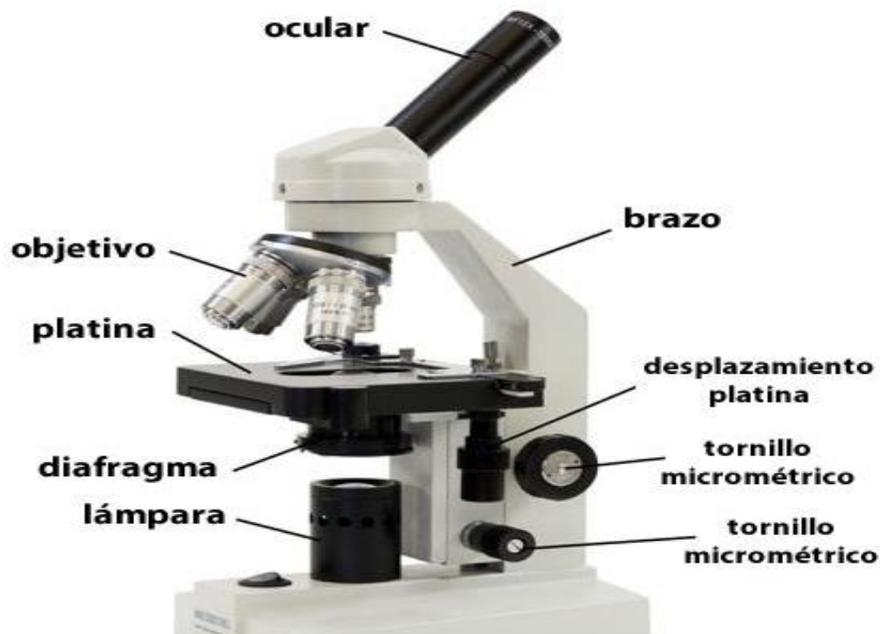


Figura 2.12. Microscopio óptico, partes principales [21]

2.4.2.2 Microscopia electrónica de barrido

Es la técnica de observación y análisis de materiales, del orden de 10^{-10} que emplea un haz de electrones que inciden sobre la superficie de la muestra.

El microscopio electrónico de barrido se basa en el principio de la microscopia óptica en la que se sustituye el haz de luz (microscopio óptico) por un haz de electrones, con esto se consiguen hasta los 100 \AA , resolución muy superior a cualquier instrumento óptico, su funcionamiento consiste en hacer incidir un barrido de haz de electrones sobre la muestra. La muestra (salvo que ya sea conductora) está generalmente recubierta con una capa muy fina de oro o carbón, lo que le otorga propiedades conductoras.

La técnica de preparación de las muestras se denomina pulverización catódica, al alcanzar el haz la superficie de la muestra se generan principalmente las siguientes partículas: electrones retrodispersados (e1), electrones secundarios (e2), además de radiación electromagnética (rayos X) y otras partículas menos significativas, el microscopio se encuentra internamente equipado con detectores que recogen la energía y la transforman en imágenes y datos

El MEB cuenta con una serie de innovaciones como la adición de un condensador que orienta, concentra y acelera la marcha del haz de electrones emitidos, esto permite alcanzar imágenes con un poder de resolución cercano a los 10 nanómetros, la longitud de onda de los electrones emitidos por el electrodo metálico (cátodo), depende del voltaje aplicado, es decir, a mayor voltaje utilizado menor será la longitud de onda del haz de electrones.

La relación con el poder de resolución del microscopio electrónico se efectúa con 10 (kV) de aceleración, se produce una longitud de onda (λ) de 0.001nm que genera, a su vez, una resolución (λ) de 10 nm, con 100 kV, (λ) es igual a 0.0004 nm y el poder de resolución es de 4 nm, con 1000 kV, la (λ) es igual a 0.0001 nm y el poder de resolución es de 1 nm.

Este tipo de microscopio electrónico funciona con los mismos principios electrónicos del microscopio electrónico de transmisión: una fuente generadora de electrones, campos electromagnéticos que actúan como “lentes” concentradoras (λ) de los

haces de electrones o como ampliadoras de imágenes la diferencia estriba en que los electrones no atraviesan el espécimen para formar las imágenes.

Los electrones se aceleran y concentran hasta formar un haz sumamente delgado de más o menos 5 nm de diámetro que rastrea o “barre” la superficie de la muestra. Los electrones son reflejados por los componentes de la misma o al chocar con ellos generan electrones secundarios

En ambos casos los electrones se envían e inciden en la superficie de un detector localizado en las cercanías de la muestra, este aditamento está conectado a un amplificador que envía señales en forma de rayos catódicos a la pantalla de un monitor de televisión para registrar la imagen formada se utiliza una cámara fotográfica.

El MEB, ofrece imágenes con una resolución que alcanzan de 10 a 20 nm. El aumento efectivo es de 15,000 a 50,000 diámetros. Otra ventaja de este microscopio es que forma imágenes con una gran profundidad de foco; de aproximadamente 500 veces que la del microscopio fotónico esta propiedad le confiere a la imagen su aspecto tridimensional. (Figura 2.16)

Los haces de electrones emitidos por el cátodo se desplazan en todas las direcciones del espacio, por lo tanto, es necesario reorientarlos y acelerar su desplazamiento. Esto se consigue con un ánodo colocado en las cercanías de la emisión que genera un alto potencial eléctrico positivo, los electrones se aceleran y concentran hasta formar un haz sumamente delgado de más o menos 5 nm de diámetro que rastrea o “barrer” la superficie de la muestra, los electrones son reflejados por los componentes de la misma al chocar con ellos generan electrones secundarios.

En ambos casos los electrones se envían e inciden en la superficie de un detector localizado en las cercanías de la muestra [21].

a)



b)

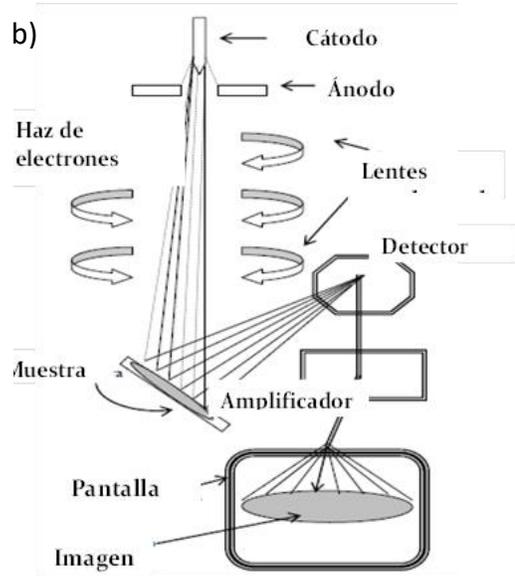


Figura 2.13. a) Microscopio electrónico de barrido (MEB), y b) Esquema de la trayectoria del haz de electrones

2.4.3 Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos x (DRX) se ha utilizado para analizar la composición de suelos e identificar minerales, aleaciones, metales, materiales catalíticos, ferroeléctricos y luminiscentes entre otros, este tipo de análisis se ha incorporado al estudio de materiales en el área de nanociencias, debido a que la información que arroja un difractograma ayuda a determinar la estructura cristalina y la composición de un material, e incluso, a partir de un difractograma se pueden calcular los tamaños de grano. El difractograma está formado por reflexiones (picos) que corresponden a las distancias de dimensiones nanométricas entre familias de planos de átomos las dimensiones se tornan relevantes en las nanociencias cuando aparece una nueva propiedad en los materiales asociada a esa dimensión y esto es objeto de estudio

La difracción de rayos X es una técnica ampliamente usada en caracterización estructural de materiales, los usos más comunes son principalmente determinar estructuras cristalinas, composición e identificación de las fases de un material y en los últimos años la determinación de tensiones en materiales aplicados en ingeniería

una de las características más importantes es que se trata de una técnica no destructiva y que permite analizar desde la superficie del material hasta el interior del mismo.

Fuentes y generación de rayos X. Los rayos X son en esencia radiación electromagnética, resultado de fenómenos extranucleares y producidos esencialmente por la desaceleración de electrones, tradicionalmente los rayos X son producidos por el bombardeo de ánodos de materiales con electrones que son acelerados por medio de potenciales generalmente mayores a 30 kv, la colisión de los electrones acelerados produce una serie de líneas superpuestas a un espectro continuo llamado (Bremsstrahlung) término alemán que significa radiación de frenado; adicionalmente, el espectro de líneas generado es característico del ánodo bombardeado.

Por otro lado, las transiciones de energía en los átomos pueden ocurrir sólo si el átomo es perturbado por alguna fuente “externa” de energía, normalmente los átomos están en su estado de menor energía o estado basal. Ahora, si un átomo es excitado al hacer incidir energía sobre él mismo, éste se volverá termodinámicamente inestable y responderá a las transiciones electrónicas que da lugar a una disminución en la energía del átomo. En particular, la excitación de los átomos es el resultado del bombardeo del ánodo con los electrones altamente energéticos del haz incidente [22].

Equipo de difracción de Rayos X (figura 2.17) para microdifracción y estudio de capas y superficies el difractómetro permite, a través de distintas técnicas, el estudio de fases cuantitativo y cualitativo, análisis de estructura de cristal, alta resolución, reflectometría, mapeo de espacio recíproco, difracción de Rayos X a incidencia rasante en plano (IP-GID), dispersión de Rayos X a bajo ángulo e incidencia rasante (GI-SAXS), tensión residual y estrés, análisis de textura, análisis mediante capilares y microdifracción.



Figura 2.14. Difractómetro D8 DISCOVER de la marca BRUKER

2.4.4 Ensayos de tensión

Estos ensayos son utilizados para medir la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente, estas pruebas consisten en alargar y/ fracturar una probeta de ensayo por fuerza de tensión y/o golpeo, ejercida gradualmente, con el fin de conocer ciertas propiedades mecánicas de materiales en general su resistencia, rigidez y ductilidad.

Sabiendo que los resultados del ensayo para un material dado son aplicables a todo tamaño y formas de muestra, se ha establecido una prueba en la cual se aplica una fuerza sobre una probeta de forma cilíndrica y tamaño normalizado, que se maneja universalmente entre los ingenieros, este ensayo se lleva a cabo a temperatura ambiente entre 10 y 35°C. (Figura 2.19)

Como ya se mencionó anteriormente, el área de aplicación de los materiales depende, en gran parte, de sus propiedades mecánicas tales como resistencia, dureza, ductilidad, etc, es posible obtener valores numéricos que describan estas propiedades con las siguientes pruebas:

- Prueba de tensión o compresión: Da la capacidad de un material para soportar una carga estática, en la (figura 2.15) se puede observar un esquema de la aplicación de la carga (p) en algunos ensayos a carga estática.
- Prueba de dureza: Resistencia a deformarse permanentemente.
- Cargas de choque: Determina la tenacidad del material.
- Prueba de fluencia y ruptura: Evalúa el comportamiento de un material sometido a una carga elevada [23].

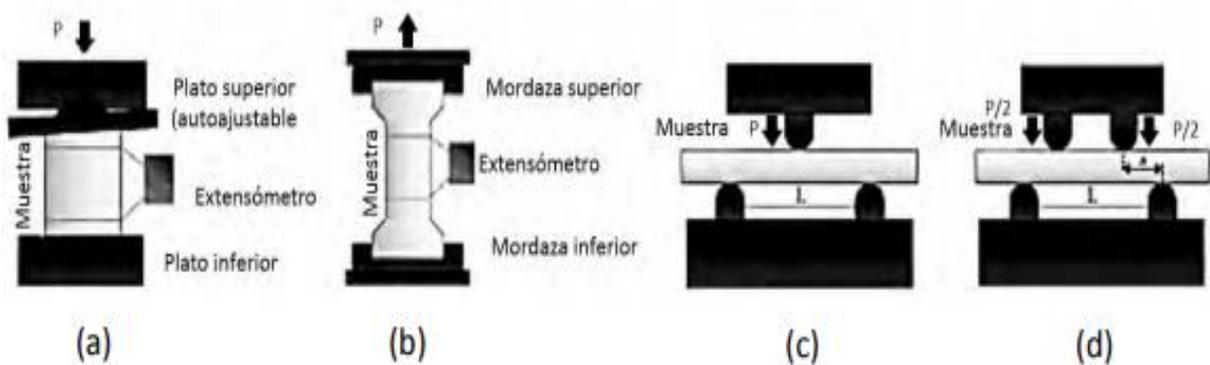


Figura 2.15. Representación esquemática de ensayos a carga estática: a) compresión, b) tracción, flexión de c) tres puntos, y d) cuatro puntos.

Una máquina universal es semejante a una prensa, pero a diferencia de esta, posee la facultad para realizar diversos tipos de ensayos mecánicos, tales como ensayo de compresión, tensión, torsión, etc. (es por ello que se denomina universal), mientras que una prensa sirve principalmente para el ensamble de piezas. La máquina universal (Figura 2.19) es utilizada en la caracterización de nuevos materiales y es considerada como el estándar industrial.

La máquina universal está compuesta por una cruceta que se desplaza verticalmente hacia arriba o hacia abajo, aplicando una fuerza controlada de tracción o compresión sobre la probeta a evaluar y la cual es leída mediante una celda de carga.

Dependiendo del rango de la fuerza aplicada a la probeta, las máquinas universales se clasifican en hidráulicas y electromecánicas. Las máquinas electromecánicas pueden aplicar una fuerza de 0.135 a 106 lbf, mientras que las máquinas hidráulicas permiten aplicar fuerzas de 1 a 106 lbf. Para realizar una prueba mecánica es necesario colocar aditamentos en la máquina como mordazas para la prueba de tensión, soportes de apoyo en el caso de la prueba de compresión [23].

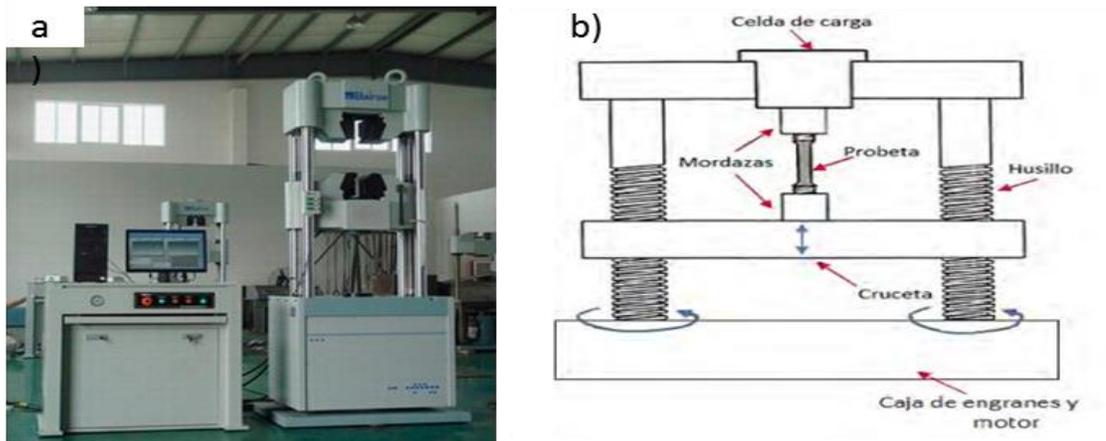


Figura 2.16. a) Máquina de prueba universal electromecánica de tensión, flexión, fatiga, b) esquema de estructura mecánica básica

Métodos de prueba estándar para ensayos de tensión de materiales metálicos

Esta norma está emitida bajo la designación E 8M-04 estos métodos de prueba cubren la prueba de tensión de metales, materiales en cualquier forma a temperatura ambiente, específicamente, los métodos de determinación de la resistencia del rendimiento, elongación del punto de rendimiento, resistencia a la tracción, alargamiento y reducción de área la temperatura ambiente se considerará de 10 a 38 °C a menos que se especifique de otra manera.

Las pruebas de tensión proporcionan información sobre la fuerza y ductilidad de los materiales bajo esfuerzos de tracción uniaxial, esta información puede ser útil en comparaciones de materiales, aleaciones, desarrollo, control de calidad y diseño en determinadas circunstancias.

Los resultados de las pruebas de tensión de probetas maquinadas para dimensiones estandarizadas de porciones seleccionadas de una parte o el material pueden no representar totalmente la resistencia y la ductilidad, propiedad de todo el producto final o su comportamiento en servicio en diferentes ambientes.

Máquinas de prueba: máquinas utilizadas para la prueba de tensión se ajustarán a los requisitos de las prácticas, las fuerzas utilizado para determinar la resistencia a la tracción y la resistencia de elasticidad dentro del rango de aplicación de fuerza verificada de la prueba.

Dispositivos de agarre: varios tipos de dispositivos pueden ser utilizados para transmitir la fuerza medida aplicada por la prueba, máquina para las muestras de prueba, para asegurar la tensión de tracción axial dentro de la longitud del calibre, el eje de la muestra de prueba debe coincidir con la línea central de los estándares de pruebas de la máquina, cualquier desviación de este requisito puede introducir estrés de flexión que no está incluido en el estrés habitual, cómputo (fuerza dividida por área de sección transversal).

El procedimiento consiste en la preparación de la máquina de prueba: en el arranque o tras un período prolongado de inactividad de la máquina, la prueba la máquina debe ser ejercitada o calentada al funcionamiento normal, para determinar el área de la sección transversal de una muestra de prueba, se deberán medir las dimensiones de la sección transversal en el centro, de la sección reducida. Para ensayos arbitrarios de especímenes bajo 5 mm en su dimensión menor, mida las dimensiones donde se encuentra el área de menor sección transversal, medir y registrar las dimensiones de sección transversal de muestras de ensayo de tensión de 5 mm y más cerca de 0.02 mm; Las dimensiones de la sección transversal, menos de 5 mm y no menos de 2,5 mm al 0,01 más cercano. mm; Las dimensiones de la sección transversal menos de 2,5 mm y no menos de 0,50 mm al más cercano 0,002 mm; y cuando sea práctico, las dimensiones de la sección transversal menos de 0.50 mm hasta al menos el 1% más cercano, pero en todos los casos hasta al menos 0.002 mm más cercano [24].

2.4.5 Ensayos de dureza Vickers

La prueba de dureza mide la resistencia a la penetración de la superficie de un material por un objeto duro, resistente a los rayones o a la indentación y es una medida cualitativa de la resistencia del material. La prueba Vickers usa un penetrador en forma de pirámide de diamante (figura 2.21) puede llevarse a cabo como una prueba de macro o microdureza, debido a que son del orden de milímetros o micrones (micras), y son relativamente, fáciles y rápidas y económicas.

La dureza es una condición de la superficie del material, no representa ninguna propiedad de la materia y está relacionada con las propiedades elásticas y plásticas del material. Si bien, es un término que nos da idea de solidez o firmeza, no existe una definición única acerca la dureza y se la suele definir arbitrariamente en relación al método particular que se utiliza para la determinación de su valor. De esta manera algunas definiciones son:

- 1) Resistencia a la indentación permanente bajo cargas estáticas o dinámicas (dureza por penetración)
- 2) Absorción de energía bajo cargas de impacto o dinámicas (dureza por rebote)
- 3) Resistencia a la abrasión (dureza por desgaste)
- 4) Resistencia al rayado (dureza por rayado).

En este sentido definiremos dureza como la resistencia de un material a la deformación

La determinación de la dureza Vickers es similar a la Brinell ya que se obtiene del cociente de la carga aplicada por la superficie de la impronta, sin embargo, en este caso se utiliza una carga pequeña y el penetrador es un diamante en forma de pirámide el ángulo del penetrador se adoptó de tal manera que los números Vickers coincidan con los Brinell, para relacionar ambos métodos es necesario considerar la condición de semejanza y los límites a partir de los cuales la esfera metálica no experimenta deformaciones y se obtienen impresiones nítida, de esta manera resulta una impronta en el que las tangentes a la bola forman un ángulo de 136° , que resulta el ángulo adoptado para la construcción del penetrador piramidal, véase (figura 2.21) sin embargo la coincidencia entre los valores de dureza que arrojan ambos métodos solo se cumple hasta aproximadamente 350 unidades [25].

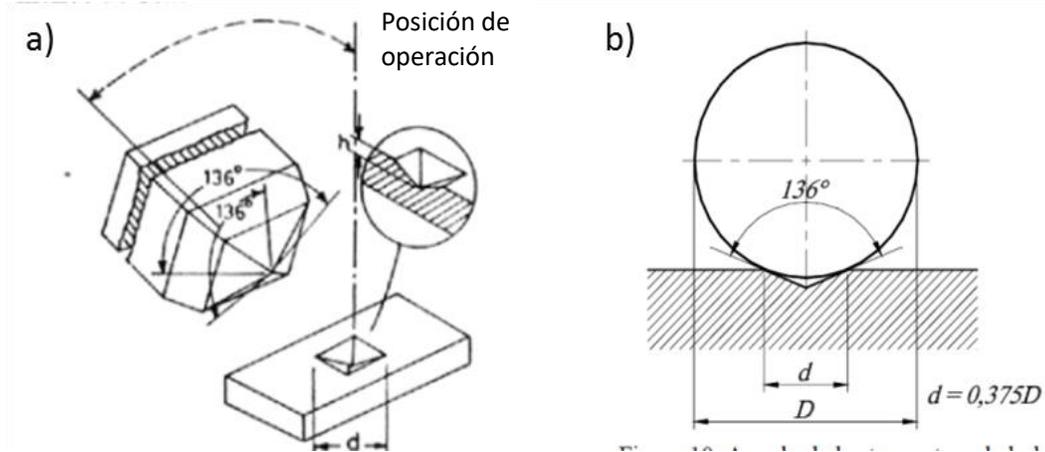


Figura 2.17. Tipos de indentadores: a) indentador de tipo piramidal Vickers; y b) Indentador Brinell, ángulo de las tangentes a la bola para la relación $d = 0.375 \cdot D$

Este método de prueba cubre la determinación de la dureza Vickers de los materiales metálicos mediante los principios de dureza de indentación, proporcionando los requisitos para las máquinas de dureza, y los procedimientos para realizar las pruebas de dureza Vickers cubriendo la determinación de la dureza de los materiales de microindentación, la verificación de las máquinas de prueba de dureza y la calibración de bloques de prueba estandarizados. Además de las pruebas realizadas con indentadores bajo fuerzas de prueba en el rango de 1 a 1000 gf (9.8×10^{-3} a 9.8 N) [26].

CAPITULO 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

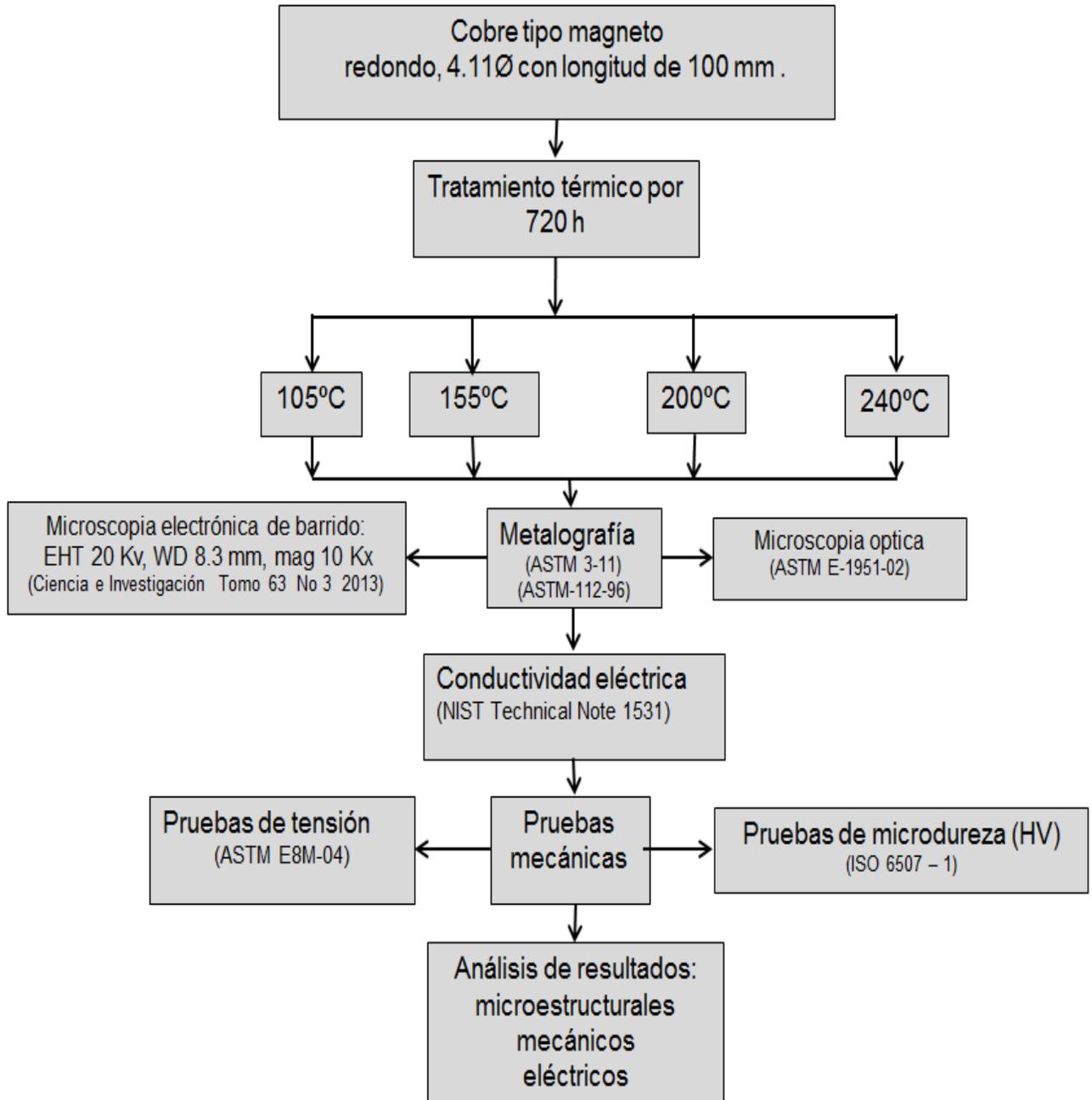


Figura 3.1 Diagrama de flujo experimental

3.1 Materiales

En este trabajo se utilizó alambre de cobre suave tipo magneto de Condumex con diámetro de 4.11 mm, el cual es un conductor electrolítico con pureza de 99.97 % requerida para la fabricación de conductores eléctricos, peso de 1.82 Kg/100 m, con aislamiento de resina poliéster modificada y sobrecapa de resina amida-amida modificada [27].

Este conductor tiene excelente estabilidad térmica, adecuadas propiedades dieléctricas y mecánicas, muy buena resistencia química a solventes comunes y refrigerantes, mejor deslizamiento en la inserción de bobinas en las ranuras (coeficiente de fricción reducido), alta resistencia a la abrasión, es químicamente resistente al freón 22 y ecológicos como el freón 134-A, 141-B, 404-A, 407-C, 410-A y 507, conductor tipo clase térmica N (200 °C), fabricado bajo estándares ANSI MW-1000 y NMX-J-489-ANCE [26, 28], respectivamente.

3.2. Envejecimiento artificial del conductor de cobre

El envejecimiento de diez probetas de 100 mm de longitud por 4.1 mm de diámetro del alambre de cobre suave tipo magneto [28], se realizó a 105, 155, 200, y 240 °C por un periodo de 720 h en mufla marca Sola Basic con capacidad de 1100 °C propiedad de la UAM y enfriadas al medio ambiente cada una (figura 3.2). La probeta que no se sometió a tratamiento de envejecimiento se identificó como 26 °C como medida de comparación. Este envejecimiento simuló las condiciones de trabajo y temperaturas extremas por confinamiento, nulo mantenimiento y/o variaciones en la acometida de las líneas suministradoras de energía.

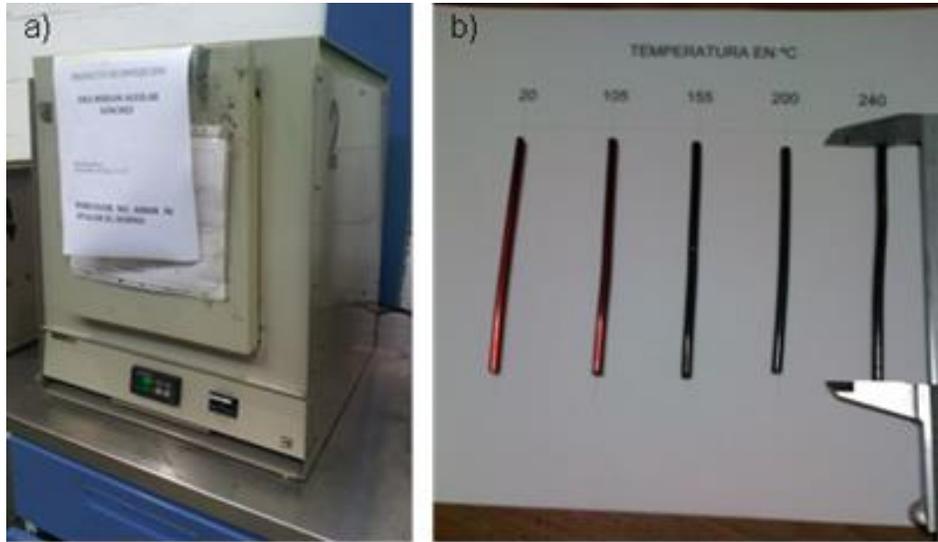


Figura 3.2. a) Mufla capacidad 1100 °C, y b) probetas con tratamiento térmico.

3.2.1 Envejecimiento de bobinas de conductor de cobre

El envejecimiento de bobinas con diámetro de 12 cm de cobre electrolítico formado con 42 espiras, de alambre tipo magneto con diámetro de 0.912 mm, [28], se realizó a temperaturas de 150, 250, 300 y 400 °C por 24 h figura 3.3, en mufla con capacidad de 1100 °C propiedad del Cinvestav del IPN, utilizando una bobina sin envejecimiento como patrón de referencia.

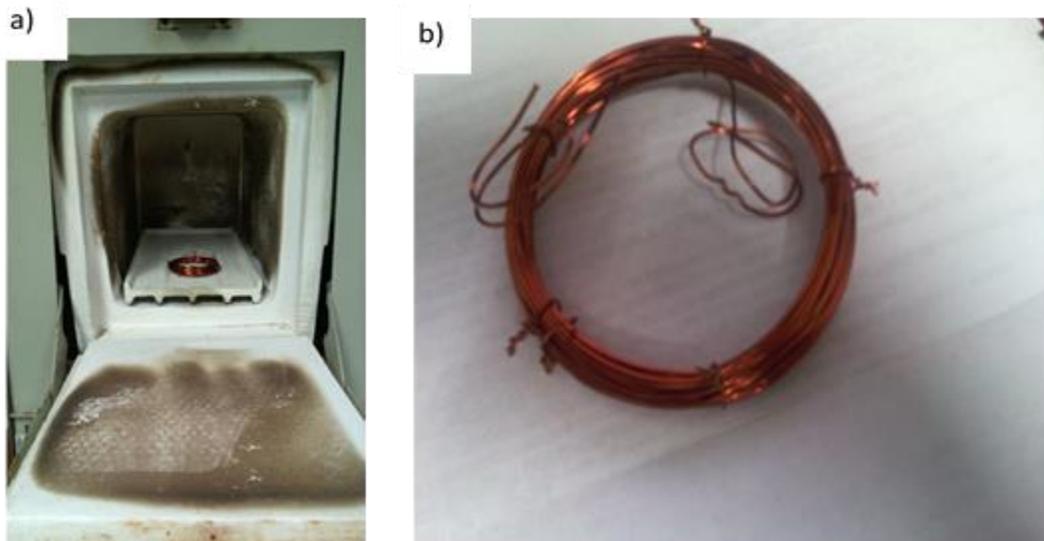


Figura 3.3, a) mufla, y b) Alambre conductor original

Se envejecieron cuatro bobinas como se muestra en la figura 3.4, a) bobina sin tratamiento térmico se utilizó como patrón de comparación de su aislante, b) a 150 °C en apariencia el dieléctrico no sufre ningún cambio en el aislante o dieléctrico, c) a la temperatura de 250°C la capa protectora del dieléctrico comienza a ceder y comienza a sufrir daños, manteniendo la protección y resistencia del dieléctrico normal, d) en la bobina con tratamiento térmico de 300 °C la capa protectora del dieléctrico sufre daños, con peligro de causar corto circuito en el bobinado, e) 400 °C con daños severos la bobina, sufrió daños severos que indica que la capa protectora deja de cumplir su función de dieléctrico y no opone resistencia óhmica, dejando fluir libre el flujo de electrones, dañando todo el sistema.



Figura 3.4. Bobinas envejecidas por 24 h, mostrando deterioro dieléctrico, a) conductor original, b) 150, c) 250, d) 300, e) 400 °C

3.2.2. Envejecimiento del aislante en láminas diminutas de cobre

Estas pruebas de rigidez del barniz se realizaron bajo el estándar ASTM D 149 2004, sobre diminutas láminas de 1.27 x 1.27 x 1.2 mm de espesor, recubiertas con barniz tipo dieléctrico [28], las láminas fueron previamente lavadas con sustrato de

cobre, en baño sónico (ciclónico Bran-Sun 2510), y enjuagadas con acetona y agua destilada, secadas con gas Ar.

Se cubrió una cara con el dieléctrico con barniz líquido elaborado a base de resina fenólica clase N, 200°C, disueltos en mezclas de hidrocarburos aromáticos (alcohólicos y cetónicos), secado por 2 h al medio ambiente, se introdujeron a la mufla eléctrica marca Sola Basic, con capacidad de 1100 °C, propiedad del Cinvestav del IPN, las probetas se envejecieron por 24 h cada una, junto a una placa testigo a), c), e), g) y una placa recubierta con barniz b), d), f), h) a temperaturas de 150, 250, 300 y 400 °C (figura 3.5)

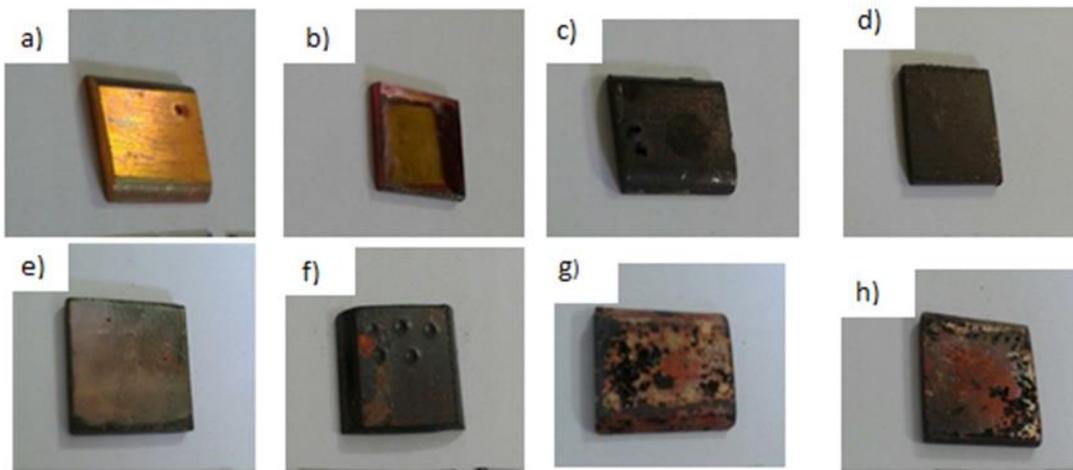


Figura 3.5 Láminas de cobre envejecidas, mostrando deterioro dieléctrico por efecto del calor, a) placa testigo, b) 150, c) 250, d) 300, y 400°C

3.3 Pruebas metalúrgicas

En el ensayo se prepararon probetas de cobre envejecido de 25 mm, de las probetas envejecidas de 4.115 de diámetro por 100 mm de longitud, se montaron en moldes metálicos conteniendo baquelita en forma granular, se aplicó calor al molde hasta fundir la baquelita, bajo una presión de 0.4413 MPa, estas se enfriaron al medio ambiente.

Se desbastaron manualmente sobre un cristal las probetas con papel abrasivo de diferentes tamaños de grano en el rango de malla del número 120 hasta 2000, en secuencia ascendente en número y descendente en tamaño de las partículas del abrasivo, para darle planicidad a superficies irregulares eliminando bordos y

escorias, usando como lubricante y/o refrigerante agua para minimizar la saturación (carga) hasta dejarla pulida a espejo.

Se concluyó el pulido con la pulidora mecánica marca Buehler con velocidad de 100 r.p.m propiedad del Instituto Tecnológico de Tlalnepantla usando discos de paño de billar con pasta de diamante y polvo de Al_2O_3 eliminando en lo posible, rayones debido al desbaste en los pasos anteriores. Se finalizó, atacando con solvente HCl como reactivo por 7 s y lavando con 10 ml de alcohol, agua destilada para evitar la corrosión y revelar su microestructura y en seguida realizar el análisis en el microscopio óptico (figura 3.3),trabajado a temperatura ambiente (26 °C) [29].

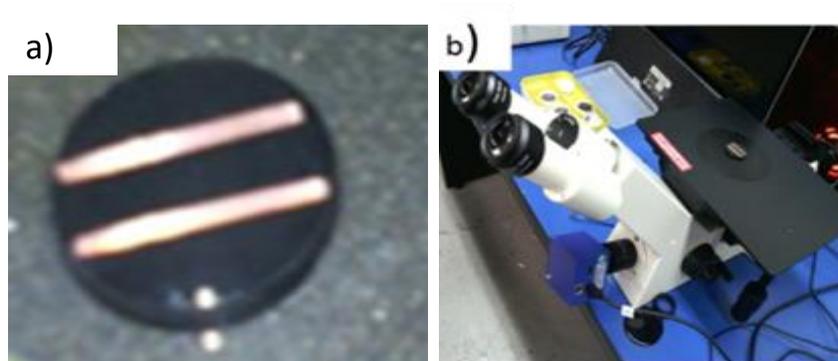


Figura 3.6. Metalografía de probetas: a) con desbaste, y b) microscopio óptico

3.3.1 Microscopia óptica

El análisis de microscopia se llevó a cabo con probetas de alambre de cobre nuevo tipo magneto con diámetros: 4.115 mm, y envejecidas térmicamente se observan en un microscopio marca Carl Zeiss con magnificaciones de 500X (figura 3.6), con escala de 10 μ m bajo el siguiente procedimiento ,las probetas se secan y se colocan sobre la platina con la cara que fue atacada químicamente hacia arriba frente a la luz del microscopio regulando la intensidad de luz hasta tener una vista clara de la imagen a ser fotografiada por el computador que contiene el programa de software Axion 64 se tomaron 15 micrografías de cada una de las temperaturas trabajadas (20,105,155,200,240 °C), una vez hechas las impresiones se procede a obtener el promedio para calcular el número de

tamaño de grano de cada una por el método de los tres círculos de Abrams, bajo el estándar ASTM E-112-96 y calculadas por las ecuaciones.

$$G = (6.643856 \log_{10} \tilde{N}_L) - 3.288 \quad (9)$$

$$G = (6.643856 \log_{10} P_L) - 3.288 \quad (10)$$

Donde:

\tilde{N}_L = número de interceptos por unidad de longitud de línea de prueba

P_L = número de intersecciones de límite de grano por unidad de longitud de línea de prueba

Por interpolación de los números de tamaño de grano y haciendo la interpolación de la tabla 4 del estándar [30], arriba anotado encontramos el diámetro de grano, correspondiente a cada temperatura.

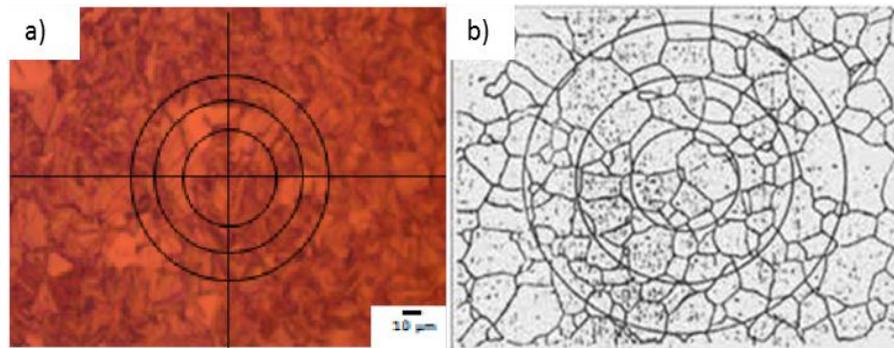


Figura 3.7 a) Micrografía cobre envejecido a 240 °C, y b) imagen del método intersección de tres círculos de Abrams [30].

3.3.2 Microscopia electrónica de barrido

Las pruebas se llevaron a cabo en un microscopio óptico de barrido [21] de la marca Zeiss modelo Supra 55VP (figura 3.8), propiedad de la UAM. Se devastaron las probetas en ambas caras, y se pulió a espejo solo la cara que se expuso al ataque químico, numerando cada una de ellas, se limpiaron en un baño sónico durante 10 min cada una, se secaron con aire caliente.

Posteriormente se colocó sobre la cara sin ataque químico cinta de carbono para fijarla y colocarlas sobre el porta muestras e ingresarlas a cámara de vacío del MEB una vez dentro se hizo alto vacío, se reguló la diferencia de potencial (20 Kv), con

una distancia de trabajo de 8.5 mm, una señal del electrón secundario (SE2) y magnificación de 1000X, una vez regulada la distancia entre el haz óptico y la muestra, se aplicó la descarga del haz de electrones y comenzó el barrido de la muestra mostrando la morfología de la superficie y los elementos que se encuentran agregados al cobre.

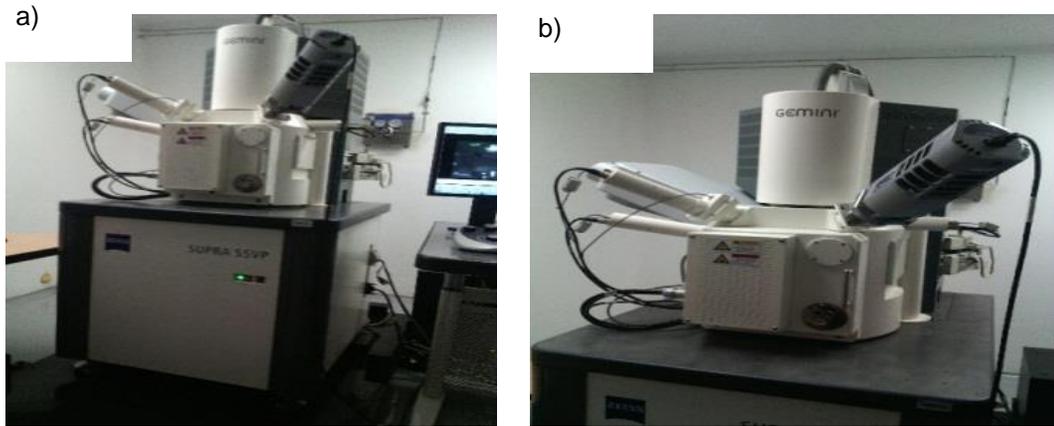


Figura 3.8 Microscopio electrónico de barrido, y b) Cámara de vacío.

3.3.3 Ensayos de conductividad eléctrica

Se utilizó el método de prueba estándar para resistividad de materiales de conductores eléctricos “medición de conductividad eléctrica de metales en c.d.” [17], utilizando las cinco probetas de 100 mm de longitud por 4.1 mm de diámetro, cuatro con las diferentes temperaturas de envejecimiento (105, 155, 200, 240 °C), y la quinta sin tratamiento térmico (considerada a 20 °C), se utilizó un arreglo de alambre conductor de cobre, en serie con una resistencia de 14.7 Ω , que fueron soldadas entre sí, una fuente de alimentación de c.d., y dos nanovolmetros marca Keithler modelo 2162 de dos canales (figura 3.6), un regulador de suministro de energía marca Escort modelo EPS-3030D propiedad de la UAM.

Se midieron la longitud y diámetro de los alambres, a continuación, se limpiaron los extremos, de cobre, se soldaron a un extremo alambre, resistencia y dos cables que fueron el común para cada una de las terminales de los canales del nanovolmetro y se soldó un cable en cada extremo que completó el circuito para utilizar los dos canales (figura 3.9) se tomó el registro de puntos a lo largo de la longitud de la probeta para asegurar que en la sección transversal fueran uniformes.

Al ensamblar en paralelo el sistema de medición, permitimos que en los dos equipos circule una corriente para que se calienten previamente lo suficiente para minimizar la posible falla de medición, aplicando una corriente de calentamiento, una vez caliente el sistema, colocamos el sistema de medición y se conectó la sonda de borde de cuchilla, asegurándose de que los contactos de la sonda estuvieran limpios y establecer contacto firme contra la superficie del metal.

La fuente de alimentación aplicó corriente de 0.002 mA, se pulsó a cero tanto el nanovoltmetro conectado a la resistencia estándar como al otro conectado a la sonda de filo de cuchillo, se procedió a registrar las cuarenta lecturas en diferentes puntos a lo largo de las probetas para obtener su promedio y elaborar la gráfica, mostrando la conductividad de cada una de las probetas, y corroborando con las ecuaciones de conductividad eléctrica y resistividad [17].

$$\sigma = \frac{4L}{\pi d^2} \frac{1}{R_r} \frac{V_r}{V_m} \quad (\text{S/m}) \quad (11)$$

$$\rho = \frac{\pi d^2}{4L} R \frac{V_m}{V_r} \quad (\Omega\text{m}) \quad (12)$$

Donde:

σ = conductividad eléctrica

ρ = resistividad eléctrica

L = longitud de probeta

V_r = voltaje en resistencia de comparación

V_m = voltaje sobre probeta

R_r = resistencia de comparación

d = diámetro del conductor

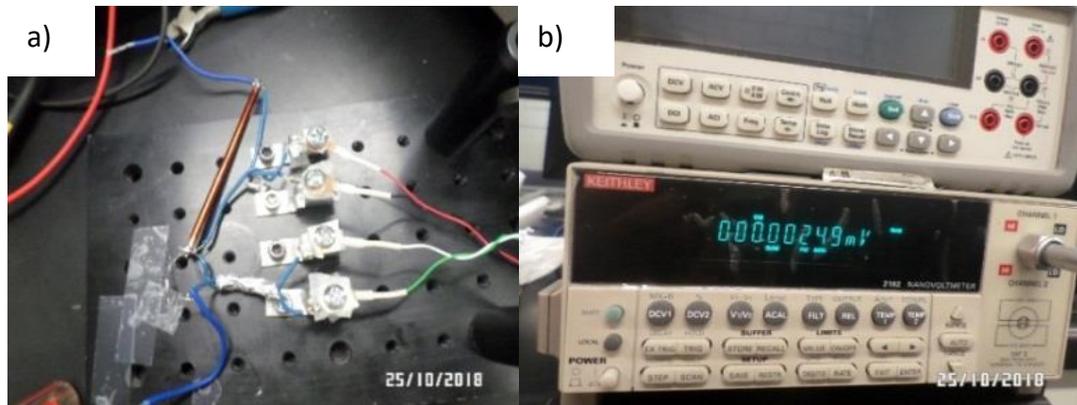


Figura 3.9 a) Arreglo de conexiones resistencia y probeta en serie, y b) nanovoltmetro Keithler mostrando lectura de un canal sobre la pantalla [17].

3.3.4 Difracción de rayos X

Las pruebas se llevaron a cabo en un difractómetro D8 DISCOVER de la marca BRUKER, propiedad de la UAM. Se hizo la metalografía correspondiente, se pulió solo la cara que se expuso al ataque químico. Posteriormente se colocó sobre la cara sin ataque químico cinta de carbono para poder fijarla y colocarlas sobre el porta muestras e ingresarlas a cámara de vacío del microscopio electrónico de barrido, se hizo alto vacío, se reguló la diferencia de potencial (20 Kv), con una distancia de trabajo de 8.5 mm, una señal de electrón secundario (SE2) y magnificación de 10KX.

3.3.5 Ensayos de tensión

Pruebas de tensión se efectuaron bajo el estándar ASTM-E8M-00 Metric en maquina universal marca Imstrom 550R modelo 1125 (figura 3.10), propiedad de la UAM. Se prepararon las cuatro muestras con tratamiento térmico y una sin tratamiento, se sometieron a tensión de forma axial sujetas en sus extremos bajo una carga de 2.65 MPa en las probetas con tratamiento y 30.69 MPa sin tratamiento respectivamente con una rapidez de 2 mm/min, registrando la curva de esfuerzo en la pantalla digital del equipo de medición.

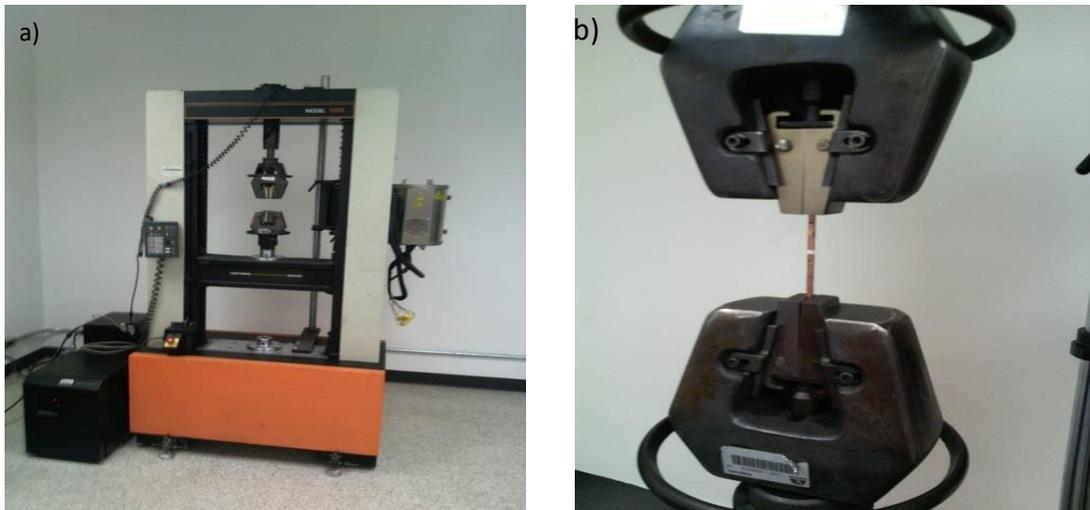


Figura 3.10 a) Máquina universal Instron mod. 1125, y b) preparación de probetas.

En la prueba de tensión efectuada al aplicar la carga se manifestó fractura de tipo dúctil en las cinco probetas, después que se aplicó una carga de 30.69 MPa de forma axial a la probeta testigo la en la maquina universal, dando como resultado la gráfica de la figura 4.8

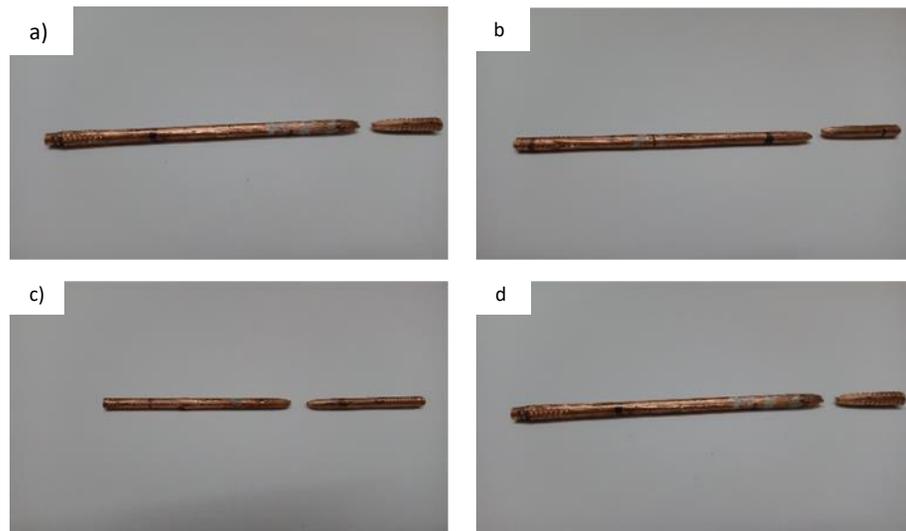


Figura 3.11. Prueba de tensión, esfuerzo de tensión axial, elongación o deformación, el encuellamiento y fractura, a) 150, b) 250, c) 300, y d) 400 °C

3.3.6 Pruebas de dureza Vickers

La prueba de dureza se llevó a cabo bajo el estándar ASTM E 384 en probetas hechas en alambre de cobre suave tipo magneto, de 2.5 cm. de longitud por 4.15 mm de diámetro montadas en baquelita, a 20 °C (probeta testigo), y con tratamiento térmico de 105 °C, 155 °C, 200, y 240 °C, ensayos hechos en un durómetro marca Wilson (fig 3.12), propiedad de la UAM, realizando 24 ensayos con cada una de las probetas bajo el siguiente procedimiento.

Se pulió una sola cara a espejo, se atacó con HNO₃ al 68%, se calibro la intensidad de luz, así como la proximidad hacia la probeta y los centros del durómetro, se hicieron pruebas para ajustar la lente a 50X magnificaciones y una carga de 50 gr, por un tiempo de 12 s, cada una, se miden las dos diagonales de la marca que ha dejado el indentador, sobre la superficie del material donde se posicionaron las líneas tanto horizontal como vertical, automáticamente el durómetro indicó la dureza Vickers correspondiente de cada ensayo en la pantalla (figura 3.12b), se dejaron espacios entre una y otra indentacion 2.5 veces la dimensión de la diagonal mayor [32], se realizó un promedio de los 24 ensayos por probeta para encontrar su promedio.



Figura 3.12 a) Durómetro Marca Wilson, y b) Caratula del durómetro indicando la dureza alcanzada

CAPITULO 4

ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Análisis microestructural para alambre de cobre envejecido

4.1.1. Microscopia óptica

Podemos precisar que el cobre puro es un material policristalino con una gran cantidad de límites de grano en su etapa original y a temperatura ambiente (20 °C) forman núcleos de granos nuevos generalmente chicos del orden de 5.5 μm en su recristalización primaria, el envejecido térmicamente dio lugar a una segunda recristalización en la que se disminuyeron los límites de grano produciéndose granos más grandes de 9.5 μm provocados por una disminución del límite de grano.

Podemos precisar que el cobre en su forma original de fábrica, a temperatura ambiente (20 °C), genera áreas de alta energía por el empaquetamiento ineficiente de los átomos, al envejecer el material a 105 °C, 155 °C, 200 °C, y 240 °C, y realizamos el análisis de 15 micrografías, al efectuar los cálculos por medio de la ecuación de tamaño de grano que relacionan parámetros medidos a el tamaño de grano G ASTM determinado microscópicamente a medida que la temperatura aumenta el número de tamaño de grano disminuye.

Se obtuvo un crecimiento de grano debido al calor que crea un movimiento en estas áreas, disminuyendo los límites de grano, que fueron reducidos por la temperatura, provocaron, que el crecimiento del grano fuera a expensas de los granos más pequeños, esto generó una difusión de los átomos a través de los límites de grano, formándose granos con mayor diámetro: a) 20 °C con 6.25 μm diámetro, b) 105 °C con 6.67 μm , c) 155 °C con 7.2 μm , d) 200 °C con 8.72 μm , y e) 240 °C con 9.37 μm diámetro, apoyado en el estándar ASTM E-112-96 [30] figura 4.1, muestra un comportamiento de crecimiento directamente proporcional a la temperatura como se observa en las micrografías obtenidas del análisis del microscopio óptico, revelando el cambio en la topografía superficial de las probetas de alambre de cobre que muestra aumento paulatino para las diferentes temperaturas de envejecimiento.

-

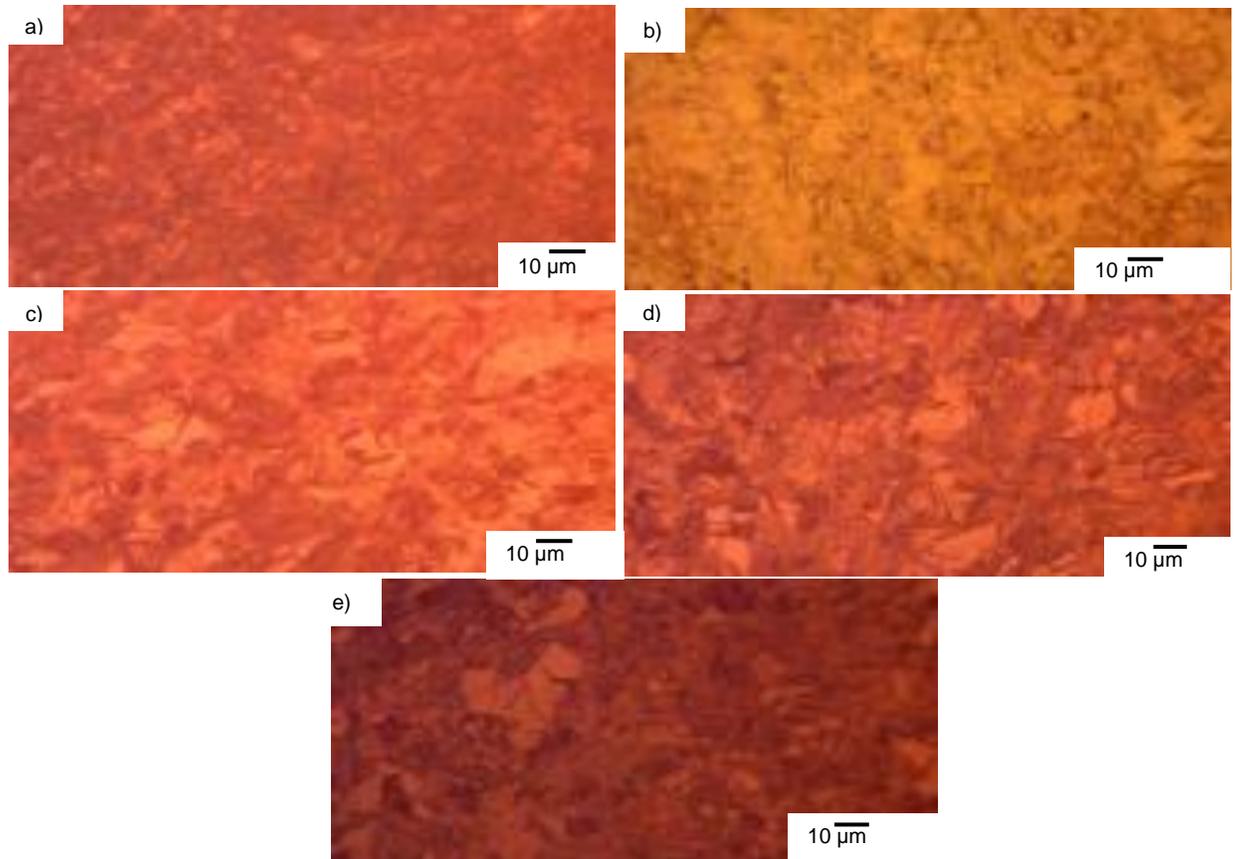


Figura 4.1 Micrografías por M.O. a 500X de Cu envejecidas por 720 h, granos con crecimiento equiaxial, a) Cu original sin envejecer, b) 105, c) 155, d) 200, y e) 240 °C.

4.1.2 Numero de tamaño de grano G ASTM

Como se describió, el efecto del calor afecta la microestructura del cobre afectando el límite de grano reflejándose en el número de tamaño de grano G ASTM, correspondiente de cada una de las probetas en estudio, el resultado del análisis de las quince micrografías empleando el método de Abrams y calculadas por las ecuaciones de tamaño de grano que relacionan parámetros medidos a el tamaño de grano ASTM determinado microscópicamente, muestran una disminución en número de tamaño de grano G en relación a la probeta original; a) 20 °C -11.83, b) 105°C con 11.42, c) 155-11.30, d) 200-10.92, e) 240 °C-10.35 (figura 4.2), esto determina una reducción los límites de grano de las probetas envejecidas , que permite un mayor volumen de grano

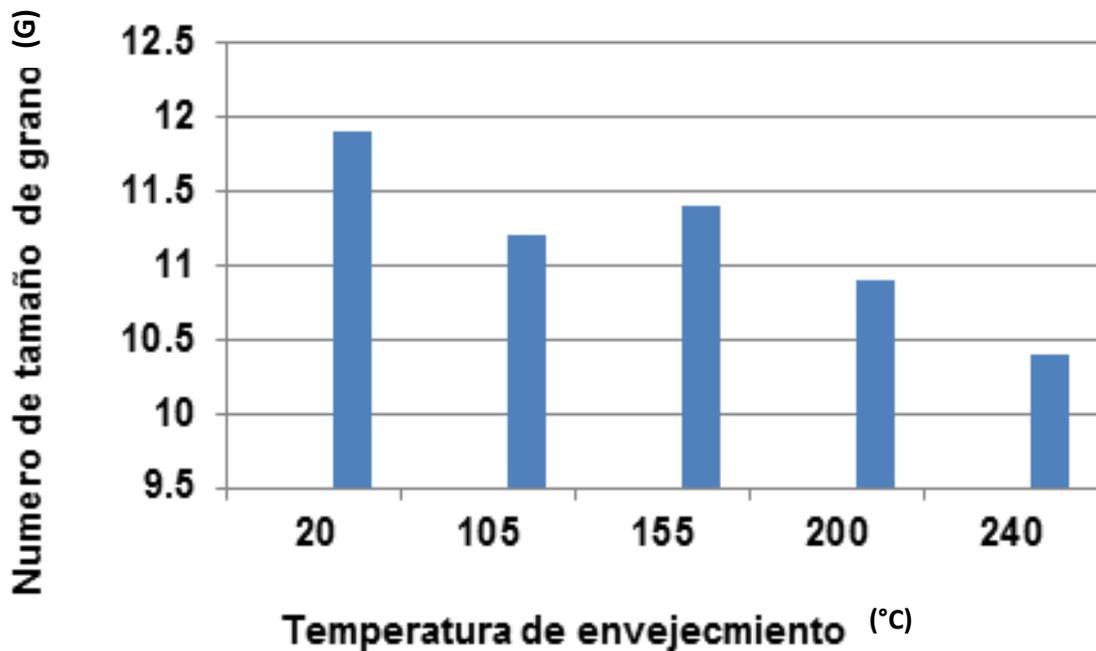


Figura 4.2 Grafica temperatura-número de tamaño de grano (G ASTM) del cobre envejecido por 720 h.

4.1.2 Diámetro promedio de grano

Para determinar el diámetro de grano promedio, se realizó el análisis de las 15 micrografías y previamente obtener el número de tamaño de grano G figura 4.2 y por interpolación de la tabla 4 [28] (Relaciones de tamaño de grano calculadas para determinar numéricamente el aumento del diámetro de grano promedio). El diámetro promedio de grano se obtuvo de la interpolación en la tabla 4 del estándar ASTM E-112-96; (2004); “Métodos de prueba estándar para determinar el diámetro promedio de grano”, con el siguiente resultado para el cobre original a) 20 °C el tamaño del diámetro promedio de grano 6.25 μm , b) para 105 °C, 6.67 , para c) 155 °C, con 7.20 , para d) 200 °C con 8.72, y para e) 240 °C, con 9.73 μm por un tiempo de 720 h para todas, se puede observar que el tamaño diámetro promedio de grano es directamente proporcional a la temperatura suministrada figura 4.3

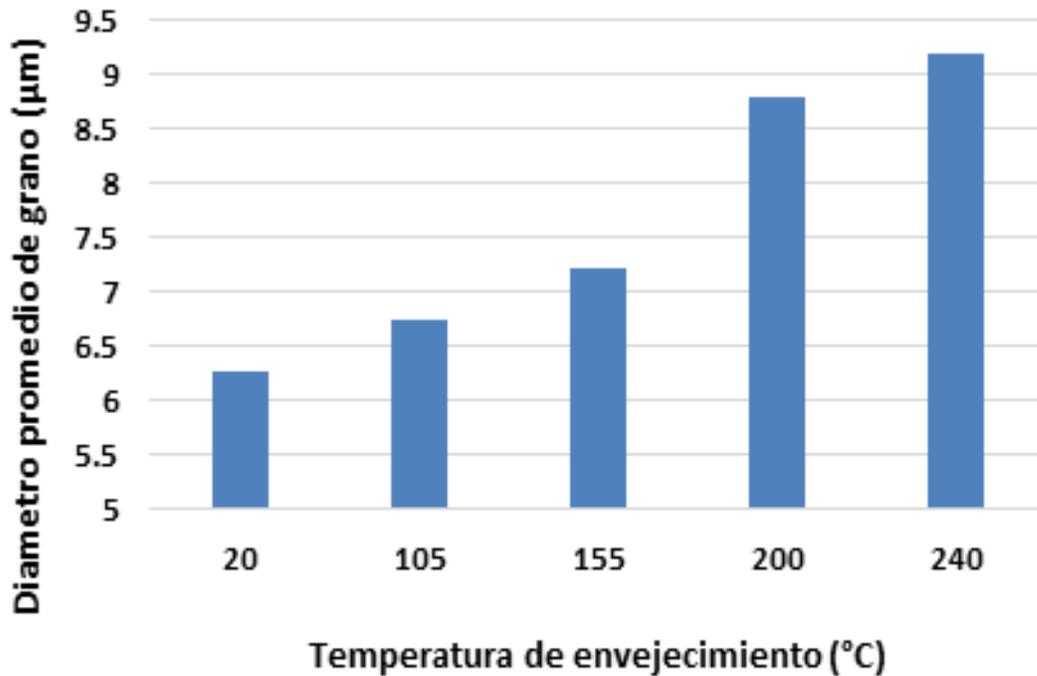


Figura 4.3 Grafica: diámetro promedio de grano - temperatura de envejecimiento del cobre

4.1.3 Microscopía electrónica de barrido

El análisis de las micrografías del microscopio electrónico de barrido (MEB), se obtuvieron a través de la detección, procesamiento y visualización de señales como resultado de las interacciones entre el haz de electrones de alta energía con el cobre. Las micrografías obtenidas por MEB con una diferencia de potencial de 20 Kv y magnificación de 10KX mostraron los mecanismos de deformación formadas por los planos de dislocaciones que modifica la orientación de la red cristalina provocando maclado que formaron escalones en la estructura del Cu (figura 4.4), correspondiendo a las diferentes temperaturas: a) 20, b) 105, c) 155, d) 200, e) 240 °C

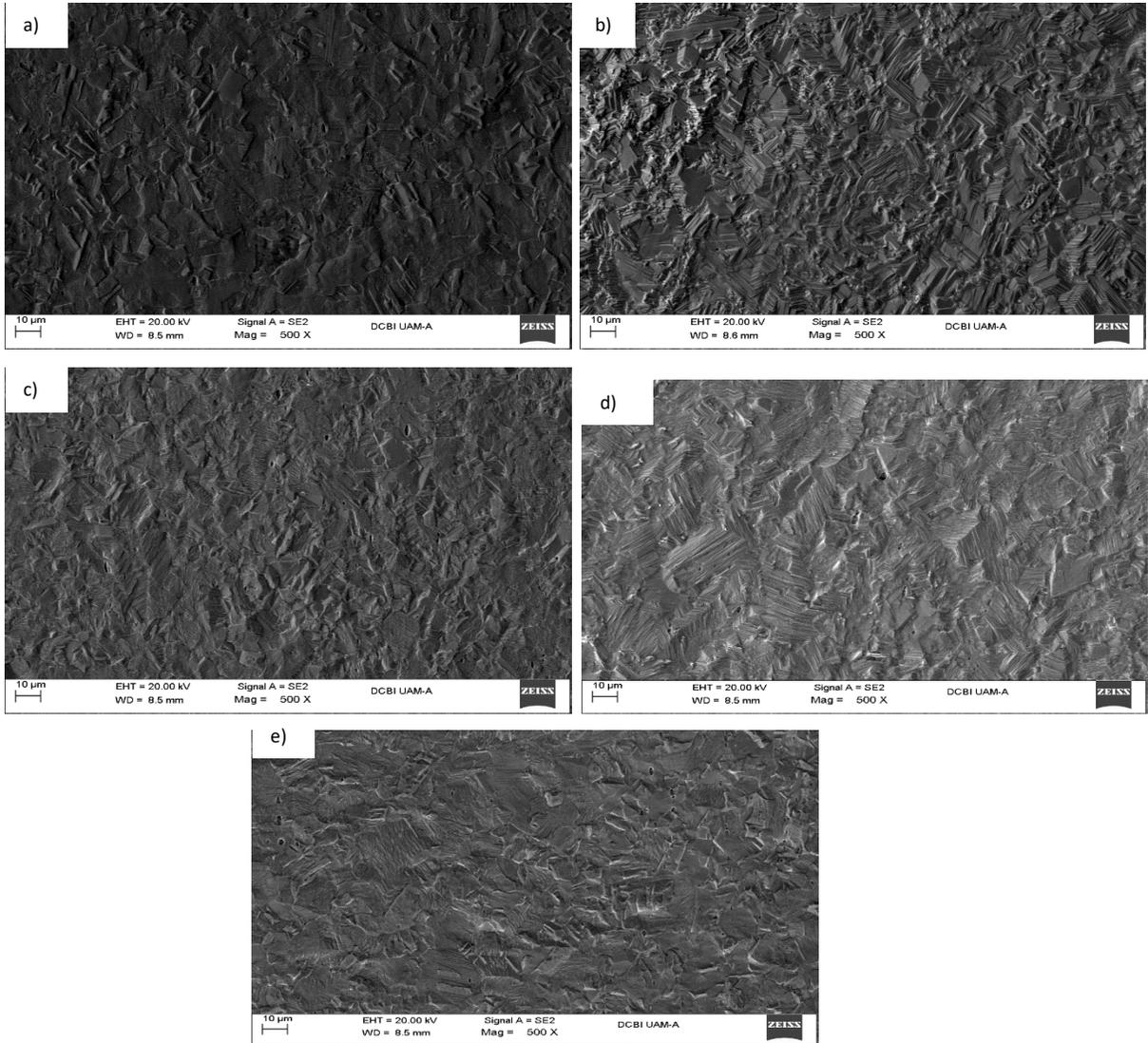


Figura 4.4 Micrografía por MEB, mostrando las líneas de maclado en la microestructura

El MEB también reveló microcavidades en la microestructura del cobre revelando su composición química de cada una de las probetas, mostrando uniformidad en su composición del 99.97 % puro, que se complementa con O_2 . Estas interacciones por dispersión de energía (EDS) indican los picos característicos del cobre y sus componentes adicionales, proporcionaron información sobre su topografía, composición y estructura del cobre, este análisis mostró, los espectros y composición (figura 4.5) que se obtuvieron por electrones secundarios, y por espectrometría los componentes adicionales, de O_2 .

Mostrando difractograma cualitativo de composición del cobre electrolítico con 99,7% de pureza, las probeta sin envejecimiento, con inclusiones, patrones de DRX con inclusiones en probeta sin envejecimiento considerada, a) 20 °C, Cu 67.01 % peso, O₂, b) 32.99% ; Cu 76.66 % O₂, c) 19.73 % , N 3.61%, d)a 200 °C; Cu 74.50 %, O₂, 21.26%, e), y f) a 240 °C, f) Cu 74.50 %, O₂, 21.26%, N 4.20% figura 4.5.

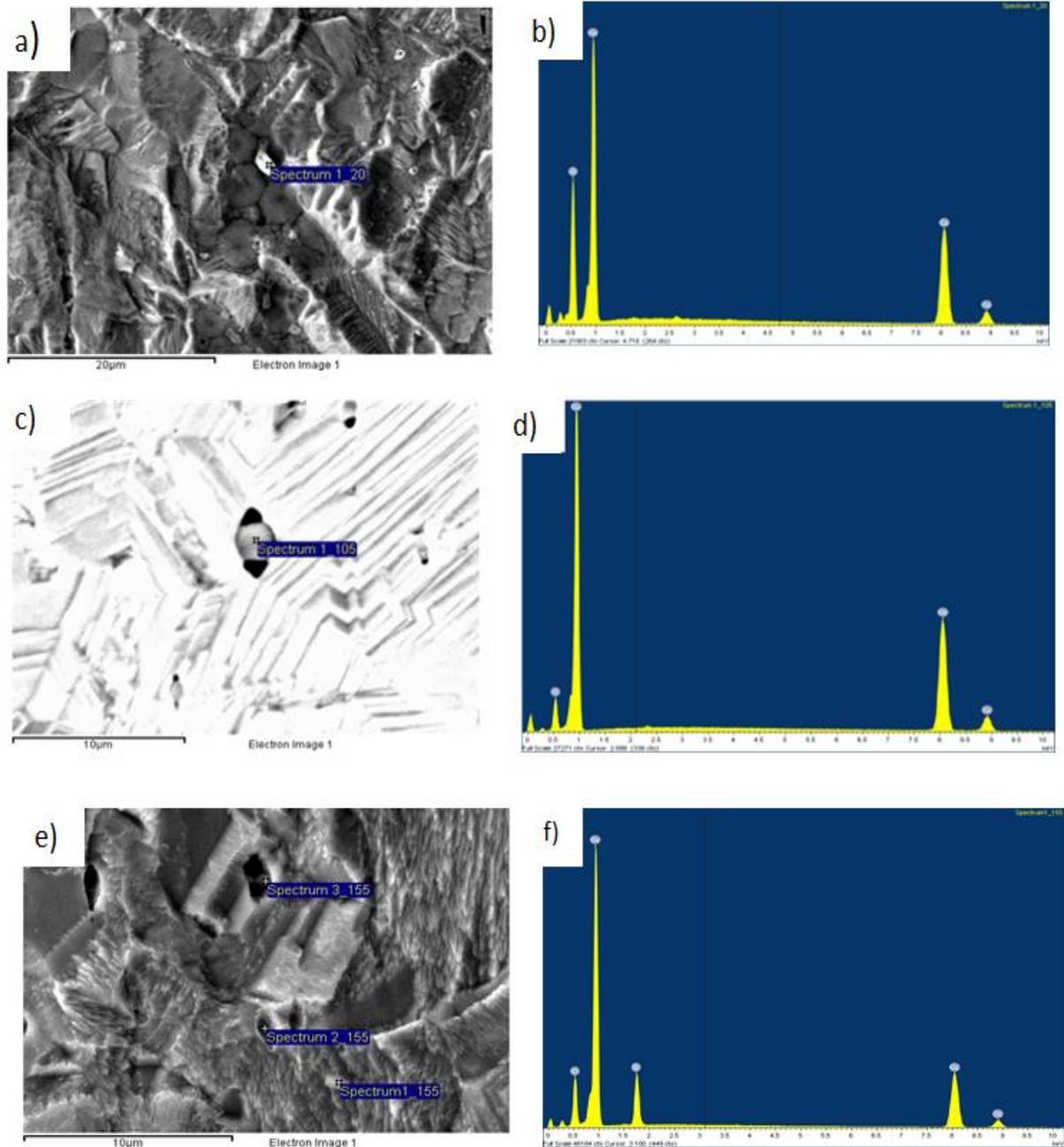


Figura 4.5. Micrografías y difractogramas de SEM para cada temperatura, obtenidas por electrones secundarios, y retrodifundidos, de las diferentes zonas

4.2 Análisis metalúrgico

4.2.1 Conductividad eléctrica del alambre de Cu

En esta prueba se utilizó la técnica de “medición de conductividad eléctrica de metales en c.d.”, después de haber sido tratadas térmicamente y enfriarse al medio ambiente, se aplicó una carga de 0.002 mA, se tomaron 40 lecturas en diferentes puntos de la probeta se manifestó en forma de pendiente, formada por las lecturas de microvoltajes en la probeta testigo de 26 °C, como en las probetas envejecidas (105, 155, 200, y 240 °C).

El resultado para la resistividad, demuestra que esta es inversamente proporcional a la temperatura, efectuando los cálculos sugeridos en el estándar; NIST Technical Note 1531; 2004 [17]. La resistividad obtenida por la gráfica de la figura 4.6 demuestra que la temperatura es inversamente proporcional a la resistividad para el material previamente envejecido térmicamente.

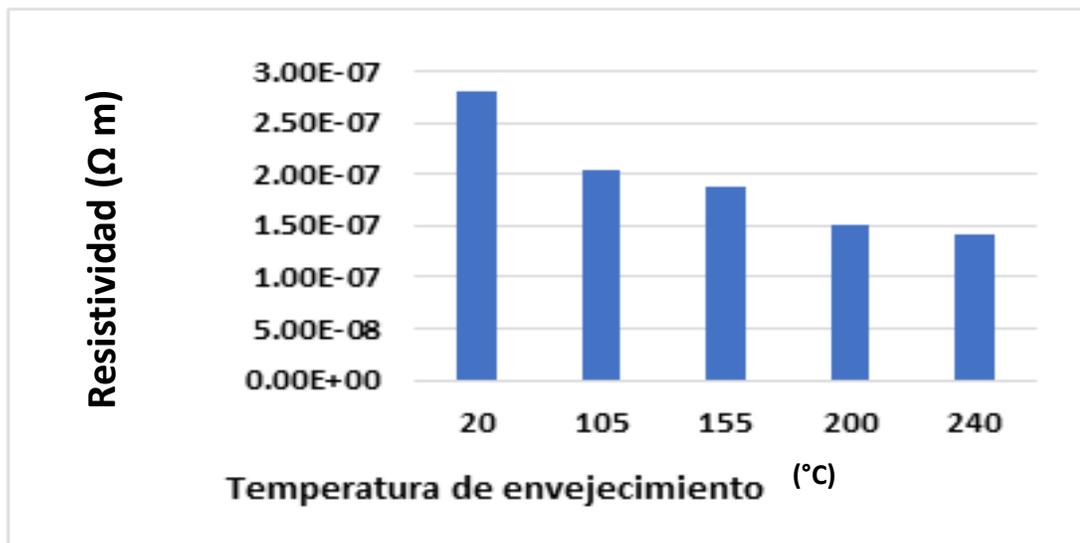


Figura 4.6. Gráfica resistividad en función de la temperatura de envejecimiento,

El efecto en la conductividad para el material envejecido muestra un comportamiento directamente proporcional a la temperatura como lo demuestra la gráfica de la figura 4.7 esto es debido al menor límite de grano y mayor volumen, donde el viaje del electrón tiene menor resistencia a su paso, propiciando mayor conductividad

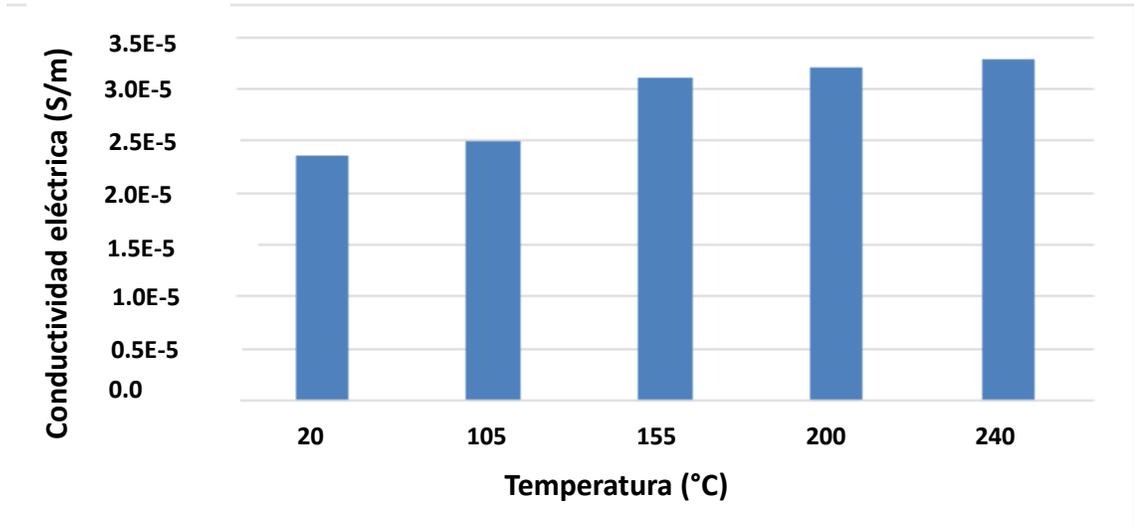


Figura 4.7 Grafica de conductividad en función de la temperatura de envejecimiento.

4.2.2 Ensayo de tensión

El ensayo proporciona el cambio de longitud en el material sin envejecimiento y a través de la gráfica de carga-deformación en la probeta considerada a 26°C la fractura ocurre con una carga de 30.69 MPa y una deformación de 2.6 mm (figura 4,8), considerada como una fractura de tipo dúctil.

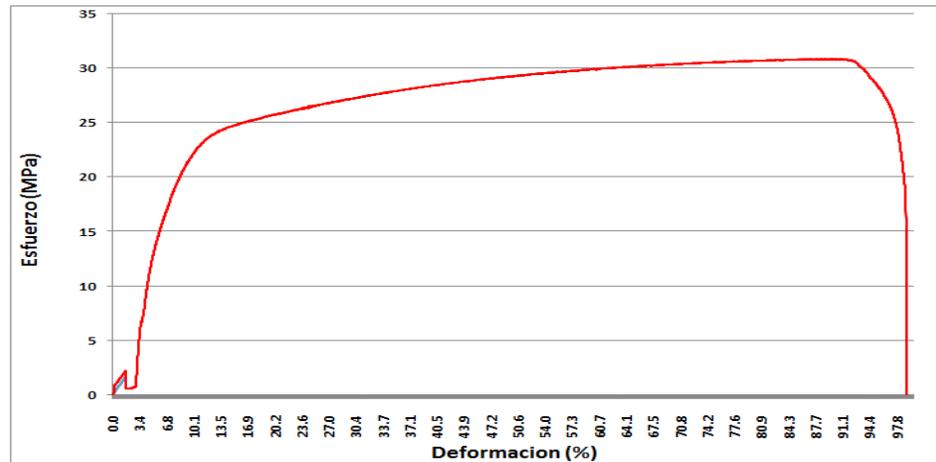


Figura 4.8 Grafica curvas esfuerzo - deformación de la probeta de cobre a 26 °C de temperatura.

Las curvas de esfuerzo-deformación en las probetas envejecidas térmicamente a 105 °C, 155 °C, 200 °C, y 240 °C se produjeron las fracturas en un promedio de 2.65 MPa, y por consiguiente su deformación es muy baja, se hace evidente un

comportamiento de fractura dúctil debido al envejecimiento por calor de las probetas

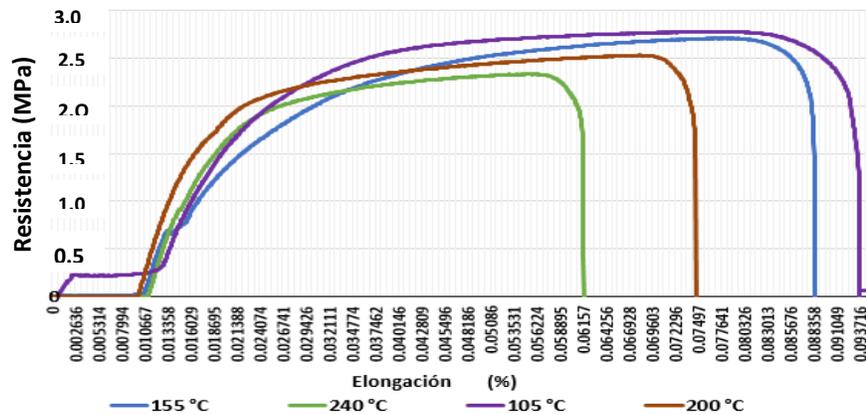


Figura 4.9 Curvas esfuerzo-deformación de la probeta de cobre envejecido a 105,155, 200,240 °C.

4.2.3 Dureza Vickers de alambre de cobre

Se realizó el ensayo en un durómetro universal con indentador de diamante de forma de pirámide se efectúan veinte indentaciones con una distancia de 2.5 veces la longitud mayor diagonal entre cada una de las marcas. Entre el cobre testigo (26 °C), y el cobre con tratamiento térmico a 240 °C, hay un aumento de dureza, correspondiente al 16 % figura 4.10

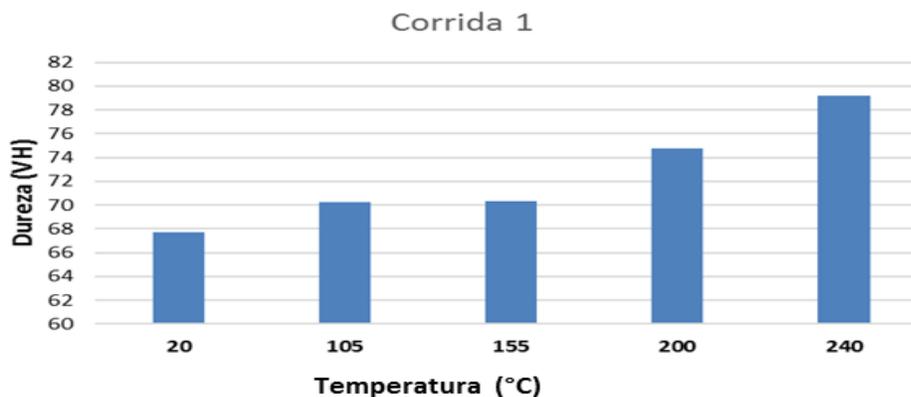


Figura 4.10. Grafica Vickers: Dureza en función de Temperatura incrementó de dureza, en el rango de temperatura de 20 -240 °C

4.2.4 Pruebas del Dieléctrico

Degradación del dieléctrico sobre laminillas de cobre: durante la aplicación de calor que fueron sometidas las probetas con el dieléctrico como aislamiento principal del conductor fue sometido a esfuerzos térmicos de 150, 250, 300 y 400 °C, simulando: esfuerzos eléctricos, ambientales y mecánicos, las micrografías del microscopio electrónico de barrido (MEB) mostraron componentes de O₂ y N y Si, en las láminas de Cu, analizadas, mostrando el efecto paulatino de degradación de dieléctrico aislante propicio para vibración tendiente a separar las bobinas y una fuga de corriente, tendientes a un daño irreversible de las bobinas del motor eléctrico Figura 4.11.

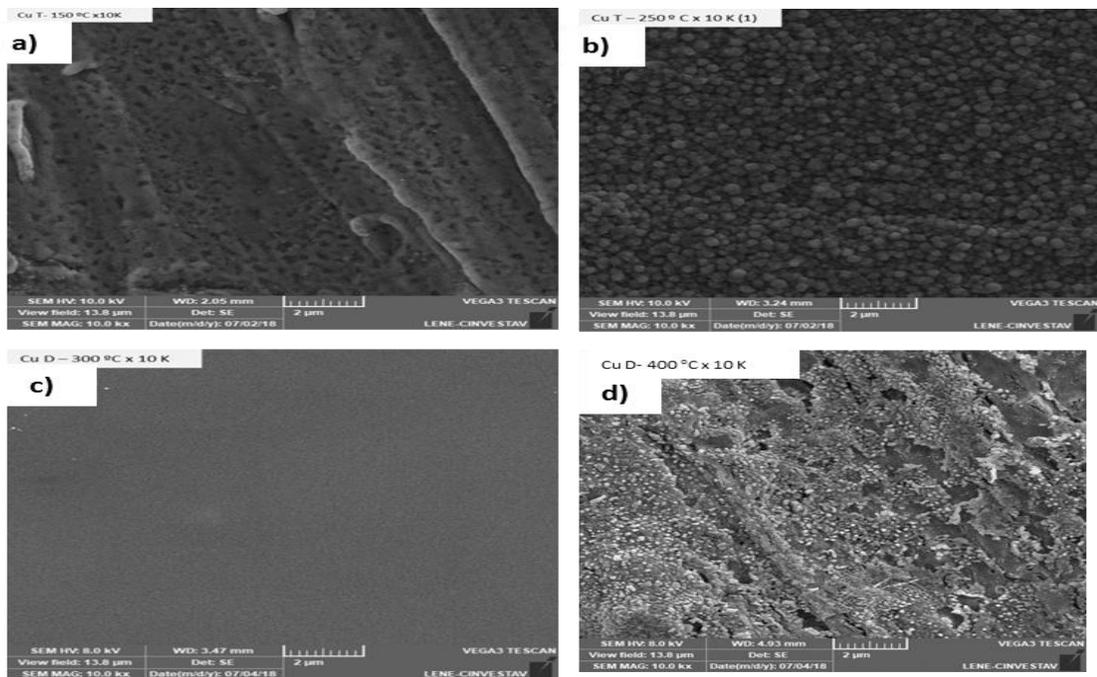


Figura 4.11 micrografías de la morfología superficial de las láminas de Cu, envejecimiento del dieléctrico; a) 150, b) 250, c) 300, y d) 400°C

4.3 Correlación de resultados

El trabajo realizado se enfocó al estudio del conductor de cobre en forma de alambre de Cu tipo magneto de diámetro 4.15 mm envejecido térmicamente a 105, 155, 200, y 240 °C comparándolo con alambre de las mismas características sin tratamiento térmico

El trabajo realizado en el proceso térmico al que fue sometido el Cu tipo magneto utilizado en el bobinado de los motores eléctricos mostro un cambio en su microestructura al aumentar un 31.88 % en su diámetro promedio de grano, de 6.26 μm (probeta condición original) a 9.16 μm (probeta envejecida térmicamente a 240 °C).

Esto dio origen a un cambio en sus propiedades mecánicas: aumento en su dureza (vickers) de 58.7 HV en condición original a 73.9 HV en probeta con 240 °C, y resistencia a la tensión paso de 30.8 MPa a 2.86 MPa en el esfuerzo máximo de ruptura respectivamente. Así como aumento en su conductividad eléctrica.

CAPITULO 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

Las muestras del conductor de cobre tipo magneto de 4.15 mm de diámetro al 99.97 % de pureza con aislamiento de resina poliéster modificado y sobrecapa de resina amida-amida modificada se envejecieron a 105, 155, 200, y 240 °C por 720 h, afectando la microestructura, reduciendo la resistencia mecánica bajo tensión y mejorando la conductividad eléctrica

Se evidencio una diferencia notable en la microestructura con cuatro temperaturas de envejecimiento térmico, encontrando disminución en el número de tamaño de grano G ASTM del 13 % a 240 °C y aumento en el diámetro de grano del 47 % a 240 °C en comparación con el cobre original, debido a la reducción en la cantidad de límite de grano. La microcopia electrónica de barrido reveló que los granos presentaron el mecanismo de la deformación plástica de tipo maclado con líneas paralelas que muestran el movimiento de los planos de átomos que modificaron la orientación de la red cristalina del cobre.

También se representó una reducción drástica en la resistencia a la tensión conforme aumento la temperatura de envejecimiento, alcanzando una disminución de 92 % a 240 °C, lo cual se asoció con el crecimiento térmico de grano alcanzando un tamaño promedio de 9.37 μm . Además, el efecto del envejecimiento sobre la conductividad fue un aumento de la corriente eléctrica, por lo que la resistividad disminuyo debido a la reducción del límite de grano, como consecuencia de su crecimiento.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda, continuar el estudio en la microestructura del conductor de cobre para obtener de forma natural un mayor flujo de energía sin provocar altas concentraciones de calor que afecten el bobinado.

Así como llevar a cabo un estudio profundo de los rangos de temperaturas de envejecimiento del cobre, que beneficien la conductividad eléctrica sin alterar considerablemente las propiedades mecánicas

Revisar continuamente la calidad del dieléctrico como aislante para lograr un control eficiente del flujo de energía, que garantice que no haya fugas de corriente que pueda dañar el funcionamiento de los bobinados de los motores eléctricos, para que alcancen una vida útil con mayor duración.

Bibliografía

- [1] M A, Meyers, A, Andrade, A. H, Chokshi; *The Effect of Grain Size on the High-Strain, High-Strain-Rate Behavior of Copper*; Department of Applied Mechanics and Engineering Sciences,
- [2] ALLEN S, THOMAS E. "The Structure of materials". MIT series in materials science and engineering; Wiley, New York, 1998. niversity of California, San Diego; vol 26A; November 2008;
- [3] J, Duque Jaramillo; L.E. Llano Sánchez; H, Villazón Amaris; Estructura cristalina del cobre, propiedades microscópicas mecánicas y de procesamiento; Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Universidad Militar Nueva Granada Bogotá, Colombia; vol. 16, núm. 2, agosto-diciembre, 2006, pp. 96-103
- [4] ADAM, J. S. and MUKUL, K. Electron Backscatter Diffraction in Materials Science. Cap 3. New York: Ed. Plenum Publishers, 2000. 339 p
- [5] O. F. Higuera Cobos, J. M. Cabrera Marrero; Relación microestructura y propiedades de cobre sometidos a deformaciones plásticas severas mediante presión en canal angular de sección constante; Tesis doctoral; Universidad Politécnica de Catalunya, Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica; Barcelona; 2013
- [6] G. Benchabanea, Z. Boumerzouga, I. Thibonb, T. Gloriantb; Recrystallization of pure copper investigated by calorimetry and microhardness; Materials caracterizacion 59(2008) 1 4 2 5 – 1 4 2 8
- [7] Chien-LungLian, Kwang-LungLin; The microstructure and property variations of metals induced by electric current treatment: A review; Materials Characterization; Volume 145, November 2017, Pages 545-555 (Conseguir elarticulo)
- [8] G. L, Sorgera, P.Oliveirabc, Linacioc Norbert Enzinger; Non-destructive microstructural analysis by electrical conductivity: comparison with hardness measurements in different materials; Journal of Materials Science & Technology; September 2018 (conseguir articulo)
- [8] ASTM B2-13(2018), Standard Specification for Medium-Hard-Drawn Copper Wire, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018
- [9] Wildi T (2007), *Maquinas eléctricas y sistemas de potencia*, Pearson Educación; sexta edición; pp 264-265
- [10] Catalogo general SKF (2016); *Aplicaciones automotrices*; NKE Austria
- [11] Catálogo Técnico (2017) *Motor Eléctrico Trifásico*; pp 8
- [12] A.F. González, R.M. Cesari, *Materiales eléctricos*; Departamento de electrónica; Universidad Tecnológica Nacional, 2009; pp 3-5
- [13] A journet, Ángel L.Orille; *Pérdidas adicionales que se originan en los motores eléctricos de inducción asíncronos alimentados con convertidor de frecuencia*; Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya;

- [14] M. A. Rodríguez Pozueta; *Potencia, calentamiento, rendimiento y caracterización de las máquinas eléctricas*; Departamento de energía eléctrica y energética; Universidad de Cantabria (España); Edición 2011; pp 20-24.
- [15] PROY-NOM-016; 2016; Eficiencia energética de motores de corriente alterna; DOF: 02/05/2016
- [16] WEG (2016); *Guía de especificaciones de Motores Eléctricos*; pp 35-36
- [17] M.D. Janezic, R F Kaiser, j backer; DC Conductivity measurements of metals; NIST Technical Note 1531; 2004
- [18] ASTM B193-02; Standard test method for resistivity of electrical conductor materials; Standard, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA 2002
- [19] L.C. Castro Heredia; *Diagnostico del aislamiento principal de bobinas estatoricas sometidas a esfuerzos termoeléctricos en laboratorio*, Tesis doctoral, Universidad del Valle; Colombia; 2014;pp 36-39
- [20] J. Garavito; Metalografía: *Protocolo curso de materiales*; Facultad de Ingeniería Industrial Escuela Colombiana de Ingeniería; edición 2011
- [21] C. Montalvo; (2010); *Microscopia*; Facultad de medicina UNAM
- [22] M. E. Aparicio Ceja, y G. G. Carbajal Arizaga; *Utilidad de la difracción de rayos x en las nanociencias*; Mundo Nano; Artículos; Vol. 3, No. 2; 2010
- [23] M. F. González Rodríguez, M. H. De la Torre Ibarra; *Análisis de fractura en ensayos de compresión para materiales compuestos utilizando pruebas ópticas no destructivas*; Tesis de maestría en optomecatronica; Centro de investigaciones optométrica A.C.; Guanajuato 2017; pp 6-7
- [24] *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]*¹; ASTM standard E 8M – 04; pp. 2-18
- [25] D.R. Askeland, W.J. Wright; *Ciencias e ingeniería de materiales*; editorial CENEGE Learning; 7a edición 2004. I
- [26] ASTM E92; 2017; *Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials*; Book of Standards Volume: 03.01; pp.
- [27] NMX-J489-ANCE; (2007); Conductores – alambre magneto de cobre redondo esmaltado con poliéster (amida) (amida)
- [26] NEMA –MW- 1000; (2016) Especificaciones para productos y procedimientos de pruebas para la fabricación de embalaje de alambre magneto; Approved American National Standard.
- [27] Catalogo de Alambre magneto; Edición 2015; pp 52
- [28] ASTM E-112-96; (2004); Métodos de prueba estándar para determinando el tamaño promedio de grano;

[29] M. Pascher; *Efficient Sample Preparation and Analysis of Ferrous Materials*; Buehler, a division of Illinois Tool Works; division of Illinois Tool Works; Volume 6, publicación 1;2012; pp. 1-2

[30] ASTM E 112-96; 2004; Standard Test Methods for Determining Average Grain Size;pp. 7-15

[31] ISO 6507-1; (2005); Pruebas materiales metálicos _Dureza Vickers-; tercera edición

[32] ASTM E 92; 2017; Standard test methods for Vickers microhardness, and Knoop hardness of metallic materials; pp. 3-4