



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“ESTUDIO Y APLICACIÓN DEL MATERIAL
SUPERCONDUCTOR $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ EN LA CONVERSIÓN
DE ENERGÍA MECÁNICA A ELÉCTRICA”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

DOCTOR EN CIENCIAS DE LA ENERGÍA

PRESENTA

M. en C. JOSÉ MANUEL JUÁREZ LÓPEZ

DIRIGIDO POR

Dr. FRANCISCO DE MOURE FLORES

Dra. IRYNA PONOMARYOVA

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2021.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA ENERGÍA

“ESTUDIO Y APLICACIÓN DEL MATERIAL SUPERCONDUCTOR $YBa_2Cu_3O_{7-x}$
EN LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA A ELÉCTRICA”

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Doctor en ciencias de la energía

Presenta:

M. en c. José Manuel Juárez López

Dirigido por:

Dr. Francisco de Moure Flores
Dra. Iryna Ponomaryova

Dr. Francisco Javier De Moure Flores

Presidente

Dr. Iryna Ponomaryova

Secretario

Dra. José Santos Cruz

Vocal

Dra. José de Jesús Coronel Hernández

Suplente

Dr. María Lucero Gómez Herrera

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Querétaro.
Enero, 2021
México

ÍNDICE GENERAL

Índice de cuadros	6
Índice de figuras	7
Resumen	11
Absract.....	13
Agradecimientos	14
1. Introducción	16
2. Antecedentes.....	18
2.1. Tipos de energía.....	18
2.1.1. Energía potencial	18
2.1.2. Energía cinética	18
2.1.3. Conservación de la energía	19
2.2. Conversión de energía	19
2.3. Generadores eléctricos.....	20
2.3.1. Fuerza electromotriz inducida	21
2.3.2. Ciclo de generación eléctrica	22
2.3.3. Partes de un generador eléctrico	24
2.3.4. Clasificación de los generadores eléctricos	26
2.3.5. Pérdidas energéticas en los generadores eléctricos.....	29
2.4. Superconductividad	30
2.4.1. Teorías de la superconductividad	33
2.4.1.1. Teoría de Fritz and Heinz London	33
2.4.1.2. Teoría de Ginzburg – Landau.....	35
2.4.1.2.1. Tipos de superconductores.....	36

2.4.1.3. Teoría BCS.....	39
2.4.2. Superconductores de alta temperatura crítica HT_c	43
2.4.2.1. YBaCuO.....	45
2.4.3. Aplicaciones de los superconductores de HT_c	45
2.4.3.1. Generadores eléctricos con elementos superconductores	46
3. Hipótesis.....	50
4. Objetivos.....	51
4.1. Objetivo general.....	51
4.2. Objetivos específicos.....	51
5. Metodología.....	52
5.1. Reactivos y materiales.....	52
5.1.1. Reactivos y materiales (obtención en bulto $YBa_2Cu_3O_{7-x}$)	52
5.1.1.1. Reactivos y solventes.....	52
5.1.1.2. Materiales y equipo.....	52
5.1.2. Reactivos y materiales (obtención de depósitos de $YBa_2Cu_3O_{7-x}$).....	53
5.1.2.1. Reactivos y solventes.....	53
5.1.2.2. Materiales y equipo.....	53
5.1.3. Materiales y equipo para la construcción del generador eléctrico.....	54
5.2. Obtención del superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ por reacción de estado sólido	55
5.3. Obtención de las películas de $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	57
5.4. Caracterización.....	58
5.4.1. Difracción de Rayos X.....	58
5.4.2. Espectroscopia Raman	61

5.4.3. Espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y microscopía electrónica de barrido (SEM)	64
5.4.4. Determinación de T_c por medición de resistencia eléctrica.....	67
5.5. Modelado de densidad de flujo magnético del rotor	70
6. Resultados y discusión	77
6.1. Caracterización estructural del superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ en bulto	77
6.1.1. Caracterización eléctrica de la muestra superconductora $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	84
6.2. Caracterización de las películas de $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	85
6.3. Cálculo eléctrico del generador	97
6.3.1. Parámetros fijos de operación eléctrica.....	97
6.3.2. Parámetros de operación eléctrica en vacío y plena carga.....	98
6.3.3. Cálculo de la diferencia de potencial del generador eléctrico con superconductores	104
7. Conclusión.....	107
8. Referencias.....	109
Anexos.....	123

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Partes físicas convencionales de un generador eléctrico	26
Cuadro 2. Propiedades estructurales del bulto con fase superconductora YBa ₂ Cu ₃ O _{6.962} obtenidas por difracción de rayos X.....	79
Cuadro 3. Fases superconductoras identificadas de las películas depositadas mediante impresión de pantalla a partir del bulto con fase superconductora YBa ₂ Cu ₃ O _{6.962}	87
Cuadro 4. Tamaños de cristal de las películas con YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} , calculados por las ecuaciones de Scherrer-Debye y Williamson-Hall.....	91
Cuadro 5. EDS de las películas con fases superconductoras YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}	93
Cuadro 6. Parámetros de las bobinas	97
Cuadro 7. Ficha de datos del generador eléctrico en vacío (SC) y plena carga (PC) a 2700 rpm	99
Cuadro 8. Ficha de datos del generador eléctrico en vacío y plena carga a 2700 rpm con el puente de diodos rectificador	101
Cuadro 9. Ficha de datos del generador eléctrico con elementos superconductores en vacío (SC) y plena carga (PC) a 2700 rpm.....	105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Conversiones de energía.....	21
Figura 2. FEM inducida.....	22
Figura 3. Ciclo de generación eléctrica.....	23
Figura 4. Ciclo sinusoidal de generación eléctrica (alternador)	24
Figura 5. Partes principales de un generador eléctrico.....	25
Figura 6. Clasificación de los generadores eléctricos convencionales	28
Figura 7. Comportamiento de histéresis electromagnética (Chapman, 2012)	30
Figura 8. Comparación de la resistencia eléctrica de un no superconductor y superconductor con respecto al cambio en la temperatura	31
Figura 9. Interacción de las líneas de campo magnético con un hipotético conductor perfecto y un superconductor	32
Figura 10. Clasificación de los superconductores a partir del incremento de ψ_2 y la disminución del B en una longitud desde superficie del superconductor. a) Comportamiento físico del superconductor tipo I. b) Comportamiento físico del superconductor tipo II.	36
Figura 11. a) Curva de magnetización de los superconductores Tipo I. b) Curva de magnetización de los superconductores Tipo II.....	37
Figura 12. Curvas de los estados en los superconductores a partir de su tipo con respecto a H_{c1} , H_{c2} y T_c	38
Figura 13. Generación de vórtices en los superconductores	39
Figura 14. Interacción de portadores de carga negativa - Fonón en la red cristalina de iones positivos (esferas azules) a T_c	39
Figura 15. Interacción de electrones con espines invertidos con un Fonón	40
Figura 16. Movimiento electrónico. a) Desplazamiento de electrones a temperatura ambiente. b) Formación de la región de carga positiva e interacción de electrones. c) Formación del par de Cooper. d) Interacción de pares de Cooper.....	41
Figura 17. Curvas comparativas Campo magnético - Temperatura de superconductores HT_c (Gurevich, 2011).....	44

Figura 18. Difracción de Rayos X de un cristal (Skoog et al., 2018).....	59
Figura 19. Esquema de un tubo de rayos X (Skoog et al., 2018)	61
Figura 20. Esquema de un microscopio electrónico de barrido (SEM)	67
Figura 21. Medición de resistencia eléctrica a través de dos puntas.....	68
Figura 22. Medición de resistencia eléctrica a través de 4 puntas.....	69
Figura 23. Circuito del módulo de medición con el superconductor.....	70
Figura 24. Núcleo de devanado de bobina	71
Figura 25. Diseño de la armadura del estator. a) Arreglo de bobinas eléctricas. b) Vista Frontal del estator. c)Corte transversal del estator.....	72
Figura 26. a) Bi-rotor montado en el estator. b) Posicionamiento frontal y posterior de los imanes a las bobinas	72
Figura 27. Vista isométrica del Bi-rotor.....	73
Figura 28. Simulación de la inducción de las líneas del campo magnético de un imán en el interior de una bobina.....	74
Figura 29. Simulación de la inducción de las líneas de campo magnético de los imanes en el interior de la bobina.....	75
Figura 30. Modelado de diseño del generador. a) Posicionamiento de los superconductores. b) Soporte de montaje de los superconductores.....	75
Figura 31. Modelado de la inducción de las líneas de campo magnético por los imanes y los superconductores	76
Figura 32. Esquema de posición de los imanes, los superconductores y las bobinas	77
Figura 33. Patrón de difracción de rayos X de la muestra en bulto identificada con fase superconductora $YBa_2Cu_3O_{6.962}$	78
Figura 34. Imagen SEM del bulto con fase superconductora $YBa_2Cu_3O_{6.962}$	81
Figura 35. (a) Celda unitaria característica del superconductor de alta temperatura $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. (b) Identificación de los planos significativos en la celda unitaria y de las cadenas CuO.	82
Figura 36. Espectroscopia Raman de la muestra superconductora en bulto $YBa_2Cu_3O_{6.962}$	84

Figura 37. Resistencia en función de la temperatura y determinación del valor de T_c de la muestra superconductora $YBa_2Cu_3O_{6.962}$	85
Figura 38. Patrones de difracción de rayos X de las películas depositadas por serigrafía a partir del bulto con fase superconductora $YBa_2Cu_3O_{6.962}$ en sustratos de Cu.....	86
Figura 39. Ampliación del patrón de difracción de rayos X correspondientes a los planos cristalinos (013) y (103) del bulto y de las películas con fases superconductoras $YBa_2Cu_3O_{7-x}$	91
Figura 40. Raman de la muestra en bulto con fase superconductora $YBa_2Cu_3O_{6.962}$ y las películas YBCO-1D, YBCO-1D-373, YBCO-1D-473, YBCO-1D-573, YBCO-2D-473 y YBCO-2D-573 obtenidas por serigrafía sobre sustratos de Cu.....	93
Figura 41. Imágenes por SEM de las películas de material superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$. a) Muestra YBCO-1D. b) Muestra YBCO-1D-373. c) Muestra YBCO-1D-473. d) Muestra YBCO-1D-573. e) Muestra YBCO-2D-473. f) Muestra YBCO-2D-573.....	96
Figura 42. Diagrama eléctrico de interconexión de las bobinas del generador eléctrico	98
Figura 43. Comparación del modelado del diseño del generador con el físico y puesta en marcha.	99
Figura 44. Grafica del punto de eficiencia de regulación de voltaje del generador eléctrico a plena carga (PC)	100
Figura 45. Gráfica del punto de eficiencia de regulación de voltaje del generador eléctrico con el puente de diodos rectificador a plena carga (PC).....	102
Figura 46. Análisis transitorio de voltaje del generador eléctrico con el puente de diodos rectificador.....	103
Figura 47. Sistema de rectificación señal de voltaje del generador	103
Figura 48. Análisis transitorio de las señales de voltaje. V (1) Corresponde a la señal semi-rectificada del puente de diodos. V (4) Corresponde a la señal de salida rectificada por el puente de diodos y los capacitores.	104

Figura 49. Puesta en marcha del generador eléctrico con elementos superconductores en condiciones criogénicas	105
Figura 50. Gráfica del punto de eficiencia de regulación de voltaje del generador eléctrico con superconductores a plena carga (PC)	106

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

RESUMEN

Desarrolló del compuesto $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ con fase superconductora por reacción de estado sólido, a través de tratamientos térmicos sin necesidad de una atmósfera controlada con un gas inerte o reactivo. Para la obtención del superconductor se realizaron tratamientos de oxigenación, con la incorporación de oxígeno de la atmósfera a la muestra en periodos de 4 horas. Mediante caracterización por difracción de rayos X, se identificó la fase superconductora $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ con $[x=6.962]$ en la muestra, sin presencia de fases no superconductoras. Esto se confirma mediante análisis de espectroscopia Raman. Se realizó la prueba del efecto Meissner a la muestra, permitiendo observar el efecto de la levitación magnética, confirmando la obtención del superconductor.

Posteriormente, se depositaron películas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ sobre sustratos de cobre flexibles mediante la técnica de serigrafía. Las películas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ se prepararon a partir de polvo superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ con etilenglicol. Posteriormente, fueron sinterizadas en una atmósfera abierta a diferentes temperaturas: 373, 473 y 573 K. La caracterización estructural exhibió la presencia de diferentes fases superconductoras. Se observó, que la presencia de fases en las películas depende de la temperatura de sinterización. A través de imágenes obtenidas por microscopio electrónico de barrido, se mostró que el aumentar la temperatura de recocido conduce a un aumento en el tamaño de grano debido a un proceso de coalescencia, que promueve el crecimiento de fases superconductoras con mayor contenido de oxígeno.

Por otra parte, se desarrolló el diseño y modelado de un generador eléctrico con elementos superconductores. Para lo cual, se realizó un análisis del comportamiento e incremento de las líneas de campo magnético, a partir de la interacción magnética entre los superconductores en este trabajo y los imanes permanentes de NdFeB colocados en la propuesta de un Bi-rotor. Esto, con la finalidad de incrementar en una mayor cantidad de líneas de campo magnético que cruzan hacia el interior de los devanados generadores de electricidad e incrementar la diferencia de potencial

generada. La incorporación de los superconductores incremento la potencia del generador en 32%.

Declaración de responsabilidad de estudiante

Declaro que los datos propios obtenidos en esta investigación fueron generados durante el desarrollo de mi trabajo de tesis de forma ética y que reporto detalles necesarios para que los resultados de mi trabajo de tesis sean reproducibles en eventuales investigaciones futuras.

Finalmente, este manuscrito de tesis es un trabajo original en el cual se declaró y dio reconocimiento a cualquier colaboración o cita textual presentadas en el documento.

ABSTRACT

Development of the compound $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ with a superconducting phase by solid state reaction, through heat treatments without the need for a controlled atmosphere with an inert or reactive gas. To obtain the superconductor, oxygenation treatments were carried out, with the incorporation of oxygen from the atmosphere into the sample in periods of 4 hours. By characterization by X-ray diffraction, the superconducting phase $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ was identified with $[x = 6.962]$ in the sample, without the presence of non-superconducting phases. This is confirmed by Raman spectroscopy analysis. The Meissner effect test was performed on the sample, it allowed to observe the effect of magnetic levitation, confirming the obtaining of the superconductor.

Subsequently, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films were deposited on flexible copper substrates using the silkscreen technique. $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ films were prepared from $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconducting powder with ethylene glycol. Later, they were sintered in an open atmosphere at different temperatures: 373, 473 and 573 K. The structural characterization showed the presence of different superconducting phases. It was observed that the presence of phases in the films depends on the sintering temperature. Through images obtained by scanning electron microscope, it was shown that increasing the annealing temperature leads to an increase in grain size due to a coalescence process, which promotes the growth of superconducting phases with higher oxygen content.

On the other hand, the design and modeling of an electric generator with superconducting elements was developed. For which, an analysis of the behavior and increase of the magnetic field lines was carried out, based on the magnetic interaction between the superconductors in this work and the permanent NdFeB magnets placed in the proposal of a Bi-rotor. This, in order to increase a greater number of magnetic field lines that cross into the electricity generating windings and increase the potential difference generated. The incorporation of superconductors increased the power of the generator by 32%.

AGRADECIMIENTOS

Por su apoyo financiero, se agradece al FONDO SECTORIAL CONACyT-SENER Sustentabilidad Energética.

A mis padres que aun en sus últimos momentos se encargaron de darme un lugar en donde me pudiera desarrollar como persona de la mejor manera y llegar a tener una profesión.

Verónica López Torrecillas †

Alfonso Juárez Hernández †

A los nuevos padres y madres que tuve a los 5 años de edad, que pese a todo me enseñaron los diferentes senderos que tiene la vida y a cómo elegir el mejor para mí, y a nunca decir no puedo hacerlo.

A mi abuelita materna, con orgullo para ti este trabajo como tributo y todos los que hice y vienen por desarrollarse, y es que tú supiste ser una madre para mí y te encargaste hasta el último momento de tu vida, de que yo sea alguien en la vida otorgándome el camino para ser un Ingeniero y llegar a ser más.

Teresa Torrecillas Medina †

A la Universidad Autónoma de Querétaro por brindarme la oportunidad de desarrollarme y las facilidades otorgadas para concluir mis estudios, a través de las Facultades de Química e Ingeniería.

A mis asesores Dr. Francisco Javier de Moure Flores, Dra. Iryna Ponomaryova, Dr. José Santos Cruz, Dr. José Coronel, Dra. Lucero Gómez, Dra. Sandra Mayen, M. en C. Jorge Cruz, M. en C. Gustavo Castillo, M. en C. Arturo Velasco, M. en C. Tania Sánchez, M. en C. Paola Rodríguez, M. en C. Rafael Olvera, M. en C. Samuel Carman, M. en C. Maylú Romero, Ing. Alejandro López Torrecillas y al Ing. Abraham Muñoz por sus enseñanzas y asesorías que me brindaron, y que no solamente se restringieron únicamente hacia el enfoque académico, si no a como desempeñarme e inculcar en mi un amplio sentido de seriedad, responsabilidad y rigor académico sin los cuales no podría tener una formación completa, llegando a ganarse mi lealtad y eterna admiración, quedando en deuda con cada uno de ellos por todo lo recibido.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

1. INTRODUCCIÓN

La obtención de energía siempre ha sido una necesidad del hombre, tanto por la fuerza que permite al hombre desarrollar un trabajo para sus necesidades básicas, como para sus comodidades. Sin embargo, a partir de las últimas décadas, se ha realizado una sobre explotación de todos los recursos para obtener energía, teniendo como consecuencia, la detonación de cambios climáticos en el mundo, lo cual obliga a cambiar la forma y fuentes de producción de energía. En los últimos años las grandes potencias económicas del mundo buscan alternativas para la sustentación de su población, algunas realizan convenios con países que tienen grandes recursos naturales, y otras desarrollan tecnología para aprovechar sus mínimos recursos y subsistir a través de sistemas de generación energética.

En 2019, la Comisión Federal de Electricidad (CFE) contó con una capacidad de generación bruta efectiva de 57 872 MW, del cual el 26% corresponde a energías limpias como el agua, viento, vapor geotérmico, sol y energía nuclear y el 74% con hidrocarburos (Comisión Federal de Electricidad, 2019). Así mismo, en su informe anual reportan una disminución en la generación energética en comparación al 2018, en donde menciona que los factores fundamentales fueron fallas, decrementos y el mantenimiento extendido a los sistemas de generación. Los sistemas de generación eléctrica funcionan por medio de sistemas de turboenergía, los cuales están compuestos de generadores eléctricos que tienen problemas de eficiencia y potencia, así como horas limitadas de operación. Las desventajas que presentan estos equipos se deben a las pérdidas por calentamiento en los devanados, pérdidas por fugas de campo magnético (Chapman, 2012). En la actualidad, se tienen prototipos de máquinas eléctricas que intentan obtener una mayor eficiencia eléctrica con el uso de materiales superconductores diseñados para disminuir dichas pérdidas (Kalsi et al., 2004; Kalsi et al., 2005; Antony and Shaw, 2016). Estos generadores eléctricos con elementos superconductores pertenecen a empresas privadas y algunos de ellos están complementados con materiales superconductores en forma

de películas delgadas, pero tienen un costo elevado debido al equipo e instrumentación necesarios para obtenerlos. Sin embargo, estas investigaciones se hacen a nivel de ciencia básica, y se presentan sus avances en diferentes congresos internacionales, además de que no se tiene una metodología de cálculo eléctrico definida, así como para la obtención de los materiales superconductores. Ya que, diversos autores reportan que se requieren condiciones especiales para la obtención de los materiales superconductores.

Dirección General de Bibliotecas de la UPAQ

2. ANTECEDENTES

El hombre ha utilizado diferentes mecanismos para facilitar su subsistencia y desarrollo, a partir del aprovechamiento de los diferentes tipos de energía. La energía es la capacidad de un sistema o de una partícula, para producir transformaciones debido a interacciones entre sí misma o en un conjunto de ellas, en diferentes medios y condiciones. También, es posible definir a la energía como la cualidad potencial de realizar un trabajo a partir de la interacción de dos o más partículas (Carta González et al., 2013).

2.1. Tipos de energía

La energía total debido a la interacción de partículas, se descompone en dos energías, la energía potencial y la energía cinética.

2.1.1. Energía potencial

Es la energía contenida en una partícula o sistemas, con la cual es posible realizar un trabajo a partir de su disposición o configuración con respecto a un sistema de referencia.

Ejemplo de esto, es el agua contenida en una laguna, un trozo de carbón, un depósito con gasolina, un tanque con gas butano, etc.

2.1.2. Energía cinética

Es la energía inherente a las partículas o cuerpos con masa que están en movimiento a una cierta velocidad.

Un objeto al estar en reposo puede llegar a contener energía cinética, debido a que las partículas que componen a ese objeto se encuentran oscilando a una frecuencia particular del objeto y del estado físico en el que se encuentre, ya sea sólido, líquido o gaseoso; esto es analizando al objeto en un sistema aislado de las interacciones energéticas del ambiente.

Ejemplos de energía cinética son el salto de agua que mueve una turbina, el carbón que, al ser quemado, genera calor, la gasolina que alimenta la combustión de un motor de explosión, etc.

2.1.3. Conservación de la energía

Los cambios en la materia van ligados a permutas energéticas, ocurriendo transformaciones a nivel atómico, molecular (reacciones químicas), así como cambios de estado de agregación (cambios físicos) (Sutcliffe and Woolley, 2012). Por lo cual, la masa y la energía, se conservan en todos sus procesos. La ley establecida por Mikhail Lomonosov y Antoine Lavoisier, establece que “en una reacción química o física, la masa se conserva” (Florez et al., 2019). Aunado a esto, la energía también tiene su propia ley universal, la cual menciona “que la energía no se crea y se destruye, sólo sufre una transformación” (Hall, 2018). Esto se da a partir del análisis de aprovechamiento de las diferentes fuentes de energía naturales y procesos energéticos (Yunus A. Çengel et al., 2017).

2.2. Conversión de energía

La energía se encuentra almacenada y en movimiento en diferentes elementos de la naturaleza que pueden ser estudiados como sistemas energéticos.

En la actualidad se aprovechan diferentes fuentes energéticas a través de diversos recursos energéticos para la obtención y empleo de energía, ya sea de manera directa o para transformarla; ejemplos de energía directa sería la energía mecánica y energía transformada sería la energía eléctrica.

Los recursos energéticos utilizados para la producción de energía son los convencionales o no renovables, los cuales consumen hidrocarburos en sus procesos energéticos; dichos procesos no obtienen un rendimiento energético de transformación energética eficiente, aunado a que son procesos energéticos altamente contaminantes (Yunus A. Çengel and Michael A. Boles, 2012). También, existen los recursos renovables, a través de los cuales se obtiene energía con procesos energéticos más amigables al ambiente; sin embargo, al igual que los

procesos energéticos con recursos no renovables, no se obtiene un aprovechamiento total de la energía. Esto se debe a la degradación de la energía. La degradación de la energía, es el efecto ocasionado de la energía que se pierde al momento de transformarla de un tipo de energía en otra. Ejemplos de estos fenómenos se dan principalmente en máquinas y dispositivos eléctricos; al energizar un equipo eléctrico como un motor eléctrico, este transforma la energía eléctrica recibida y la transforma en energía mecánica, pero debido al trabajo realizado internamente entre los componentes eléctricos y mecánicos del motor, se genera energía térmica que se pierde en el ambiente (Gerhard Pahl et al., 2007). El rendimiento energético se determina a partir de la relación de la energía útil obtenida y la energía que se suministra al sistema para la transformación energética, como que se muestra en la ecuación 1.

$$R_{energético} = \left(\frac{\text{Energía útil}}{\text{Energía total}} \right) \cdot 100\% \quad \text{Ec. 1}$$

De las energías que se encuentran en la naturaleza, la energía eléctrica es la más empleada debido a la versatilidad que tiene para transportarse (transmisión y distribución), almacenarse y emplearse cuando se requiera a través de diversos dispositivos y medios; además, la energía eléctrica puede ser medida o cuantificada, controlada y monitoreada (Enríquez Harper, 2014).

2.3. Generadores eléctricos

La energía eléctrica puede obtenerse de diferentes recursos energéticos de la naturaleza, a través de transformaciones energéticas en plantas o centrales eléctricas. Las centrales eléctricas son un conjunto de sistemas que tienen la finalidad de producir, controlar y monitorear la energía eléctrica; sus principales elementos son los generadores eléctricos (Enríquez Harper, 2009). Los generadores eléctricos son máquinas eléctricas que generan electricidad a través de la transformación de energía mecánica a eléctrica. La energía mecánica se obtiene del aprovechamiento de otras energías a través de rotopropulsores o turbinas. En la

Figura 1, se muestra un esquema de los principales ciclos de conversiones energéticas.

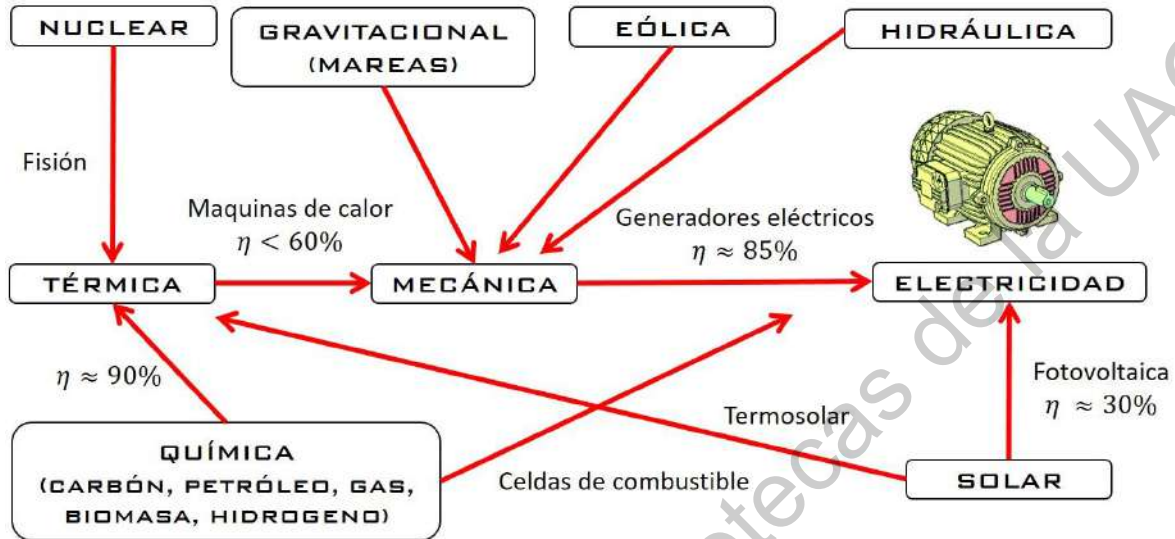


Figura 1. Conversiones de energía.

Los generadores eléctricos trabajan en la generación de corrientes eléctricas a partir de la inducción de fuerzas electromotrices.

2.3.1. Fuerza electromotriz inducida

La fuerza electromotriz (FEM) se puede inducir en una espira conformada por un conductor eléctrico, que se encuentra dentro de las líneas de flujo magnético en movimiento; en algunos casos la espira se encuentra en movimiento, comprendiendo que para la inducción de la FEM se requiere un movimiento relativo entre la espira conductora y la fuente de campo magnético. La FEM inducida en la espira se debe a la corriente inducida en la espira, que a su vez se debe a la excitación del movimiento de los electrones ocasionado por la interacción del campo magnético. Por lo cual, las cargas eléctricas (Q) del conductor que se desplazan a cierta velocidad (v) en una región donde exista un campo magnético (B) tendrán la reacción de una fuerza, conocida como fuerza de Lorentz, definida por:

$$F = (B \times v) \cdot Q$$

Además, la ley de inducción proclamada por Faraday menciona que la FEM inducida es directamente proporcional a la rapidez con que cambia el flujo de campo magnético en el tiempo al atravesar el área que genera la espira de un conductor, y que la polaridad de la fuerza electromotriz es capaz de generar una corriente eléctrica y que esta forma su propio campo magnético, el cual se opone al campo magnético de inducción como se observa en la Figura 2; esto se define en:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

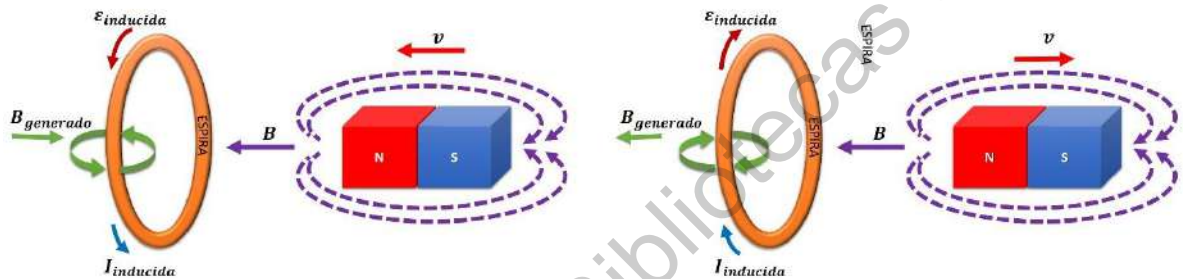


Figura 2. FEM inducida

El trabajo eléctrico realizado en un intervalo de tiempo (Watts) por el flujo de corriente eléctrica (Amper) desplazada es la fuerza electromotriz (Volts). También, es posible expresar a la fuerza electromotriz como el trabajo realizado por carga eléctrica.

$$\varepsilon = \frac{W}{I} \rightarrow \left(\frac{\frac{J}{s}}{\frac{q}{s}} \right) \rightarrow \frac{J}{q}$$

2.3.2. Ciclo de generación eléctrica

En la Figura 3, se representa un modelo convencional de generador eléctrico conformado por una espira conductora conectada a un voltmetro, que gira a con una velocidad angular en el interior de un campo magnético creado por un polo norte (N) y sur (S). El voltmetro registra la lectura del diferencial de potencial generado por el movimiento de la espira en el campo magnético. En el giro de la espira a 0° a 360°,

la espira llega a estar perpendicular y paralela a las líneas del flujo magnético de los polos.

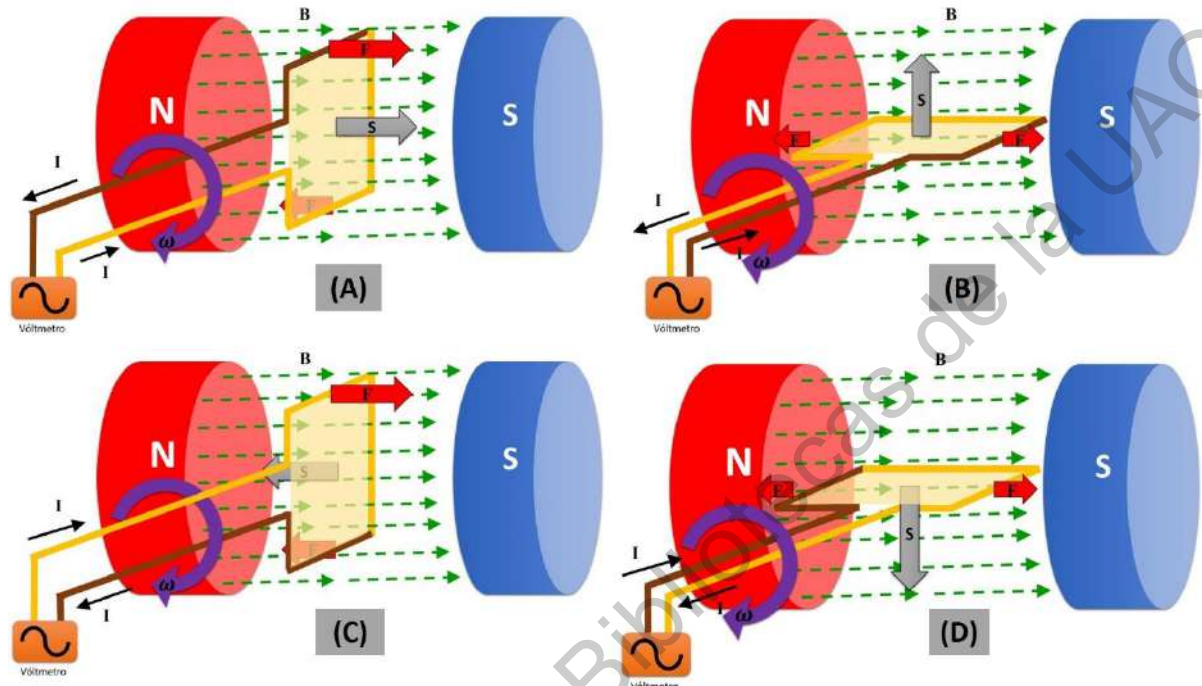


Figura 3. Ciclo de generación eléctrica

El ciclo de generación eléctrica comienza al estar la superficie formada por la espira de manera perpendicular (considerando un vector de superficie S), a las líneas de campo magnético B ; aquí, el flujo magnético es cero debido a que es el producto punto de dos vectores paralelos, como se ve en las Figuras (A) y (B) de la Figura 3.

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \varphi$$

Por lo cual la FEM también es nula y el voltímetro no marca una lectura. Cuando el giro de la espira está en 90° , la espira está paralela a las líneas del campo magnético, así como las líneas de fuerza, obteniendo las FEM máxima en el voltímetro. De manera similar ocurre lo mismo al estar la espira a 270° pero con una lectura de la FEM negativa, debido a la posición con la que se encuentran la dirección de las líneas de campo magnético. Al graficar las lecturas de la FEM con respecto al tiempo se observa una función sinusoidal que alterna con respecto al tiempo en el que mide

como se observa en la Figura 4. Por lo cual todos los generadores eléctricos son variaciones de un alternador.

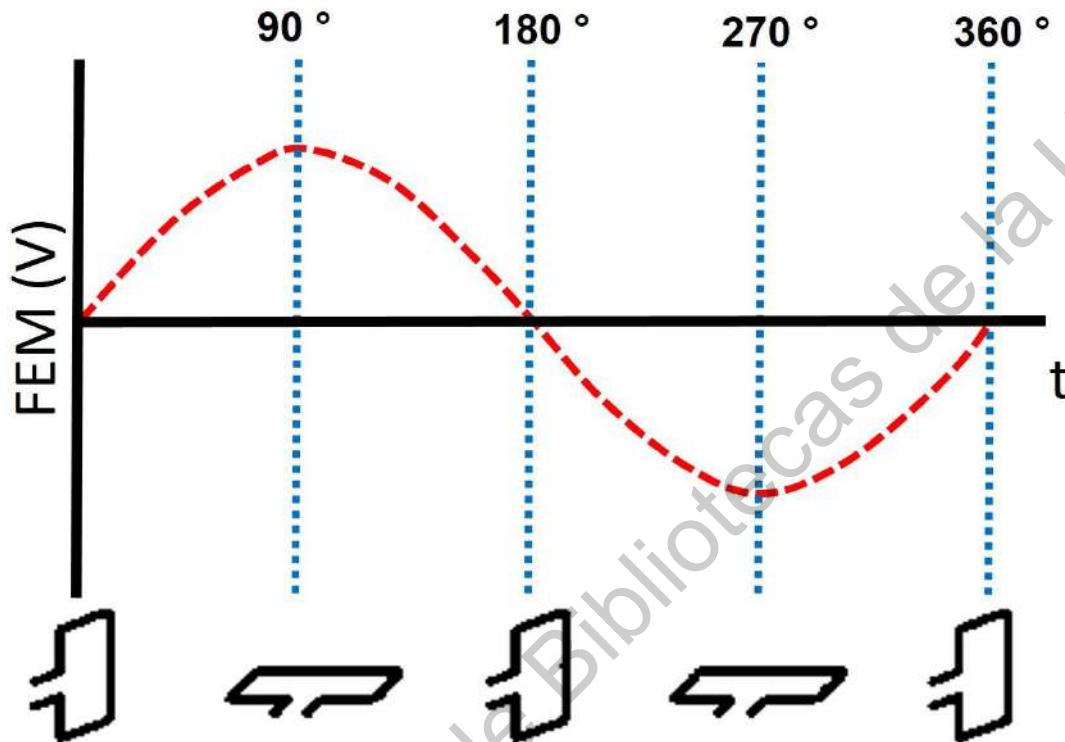


Figura 4. Ciclo sinusoidal de generación eléctrica (alternador)

2.3.3. Partes de un generador eléctrico

Para generar electricidad se debe empezar con un campo magnético principal, las líneas de este campo magnético se deben cortar por un conductor o un conjunto de ellos denominado bobina, embobinado o devanado. El campo principal se puede producir por un imán permanente que puede estar montado en el estator, como se muestra en la Figura 5(A), o bien, puede ser el rotor como se muestra en la Figura 5(B). Sin embargo, en las centrales eléctricas se requieren generadores eléctricos con campos magnéticos muy altos que no se pueden obtener por imanes permanentes; por lo cual, el campo principal se genera a través de un campo electromagnético en lugar de un imán permanente, la bobina que lo produce se le llama el devanado de campo, o simplemente el campo. El campo se puede devanar

sobre el estator como se muestra en la Figura 5(C), o sobre el rotor, como se muestra en la Figura 5(D). Los conductores en los que se induce la electricidad forman el devanado de armadura. En algunos generadores eléctricos, el devanado de armadura está sobre el rotor o parte giratoria, sin embargo, en los generadores de corriente alterna para ciertas aplicaciones, el devanado armadura está en la parte estacionaria (estator).

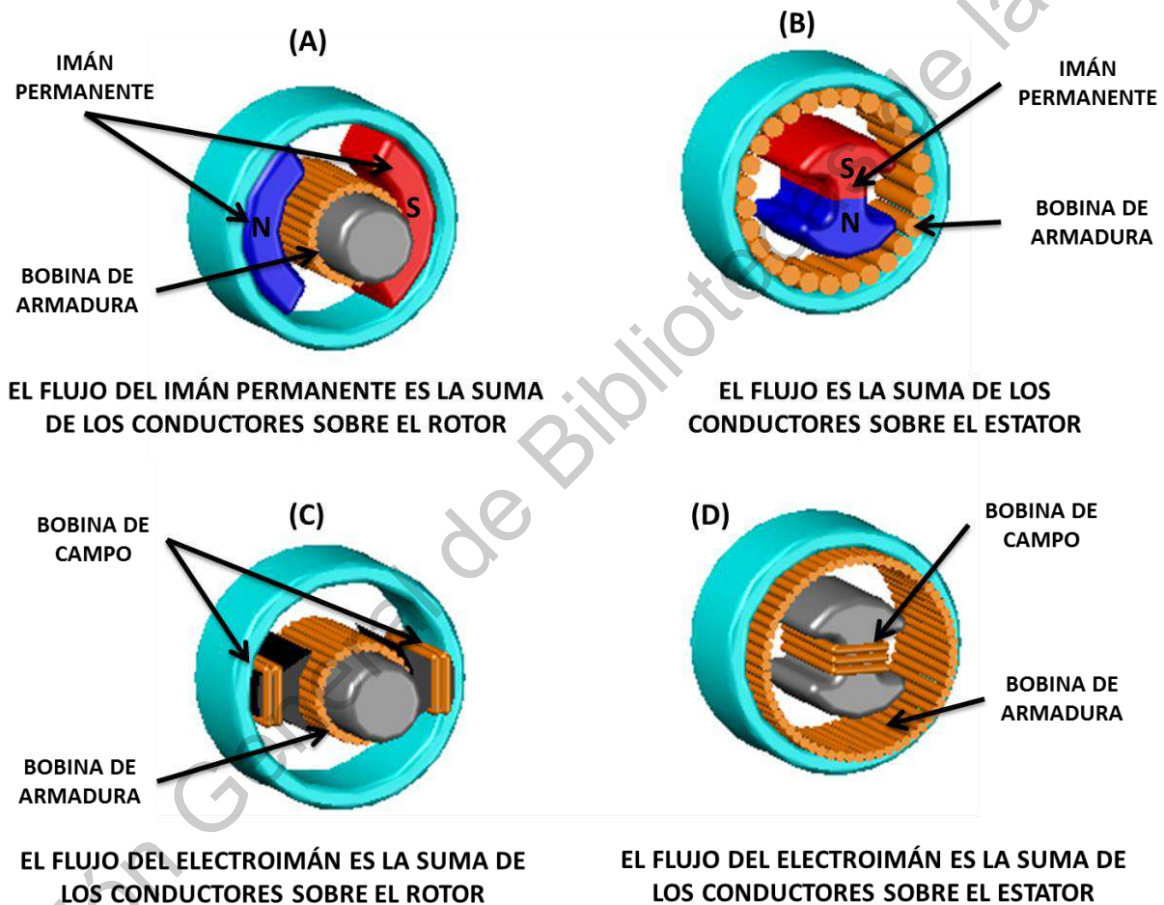
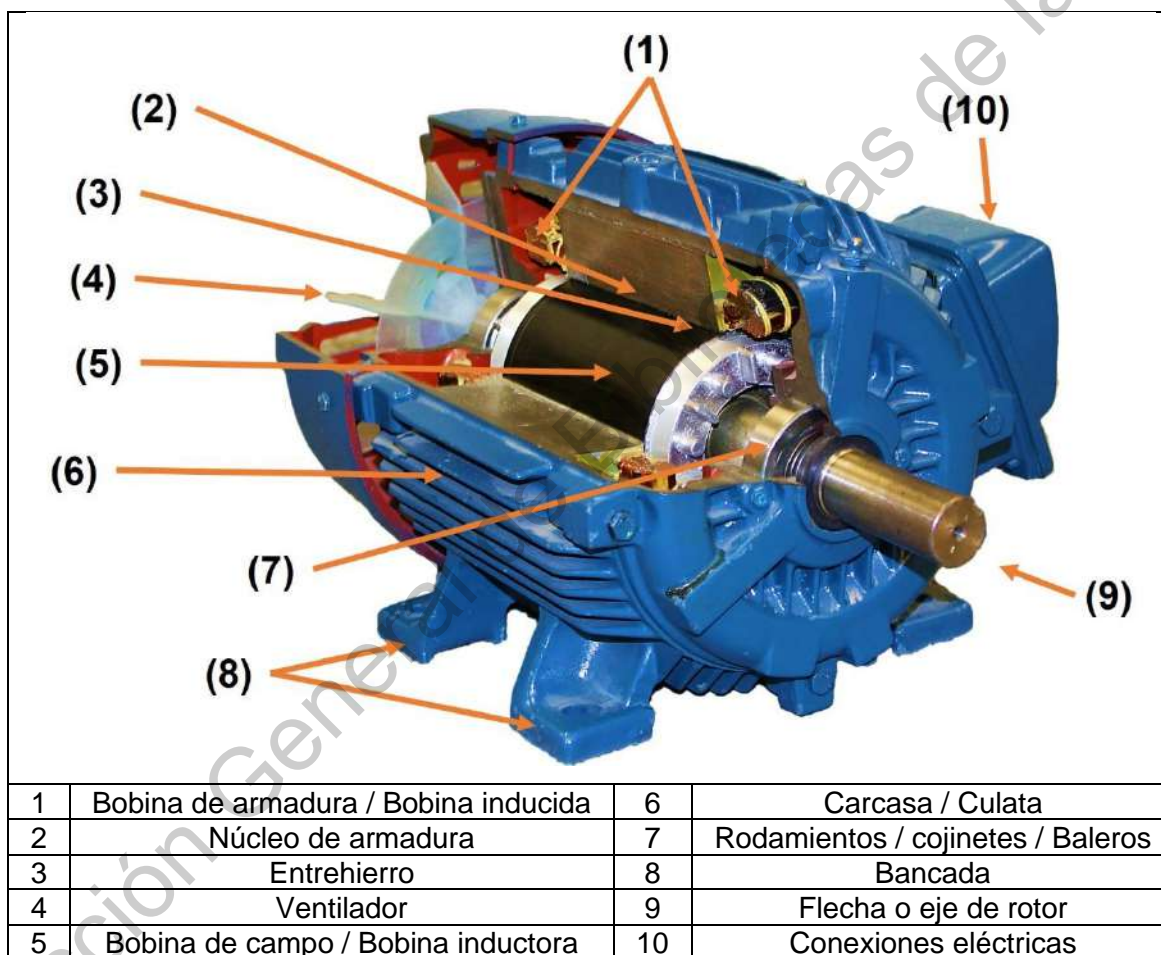


Figura 5. Partes principales de un generador eléctrico

Las partes físicas convencionales de un generador eléctrico se indican en el cuadro 1.

Cuadro 1. Partes físicas convencionales de un generador eléctrico



2.3.4. Clasificación de los generadores eléctricos

Los generadores eléctricos se clasifican como se muestra en el cuadro 2.

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

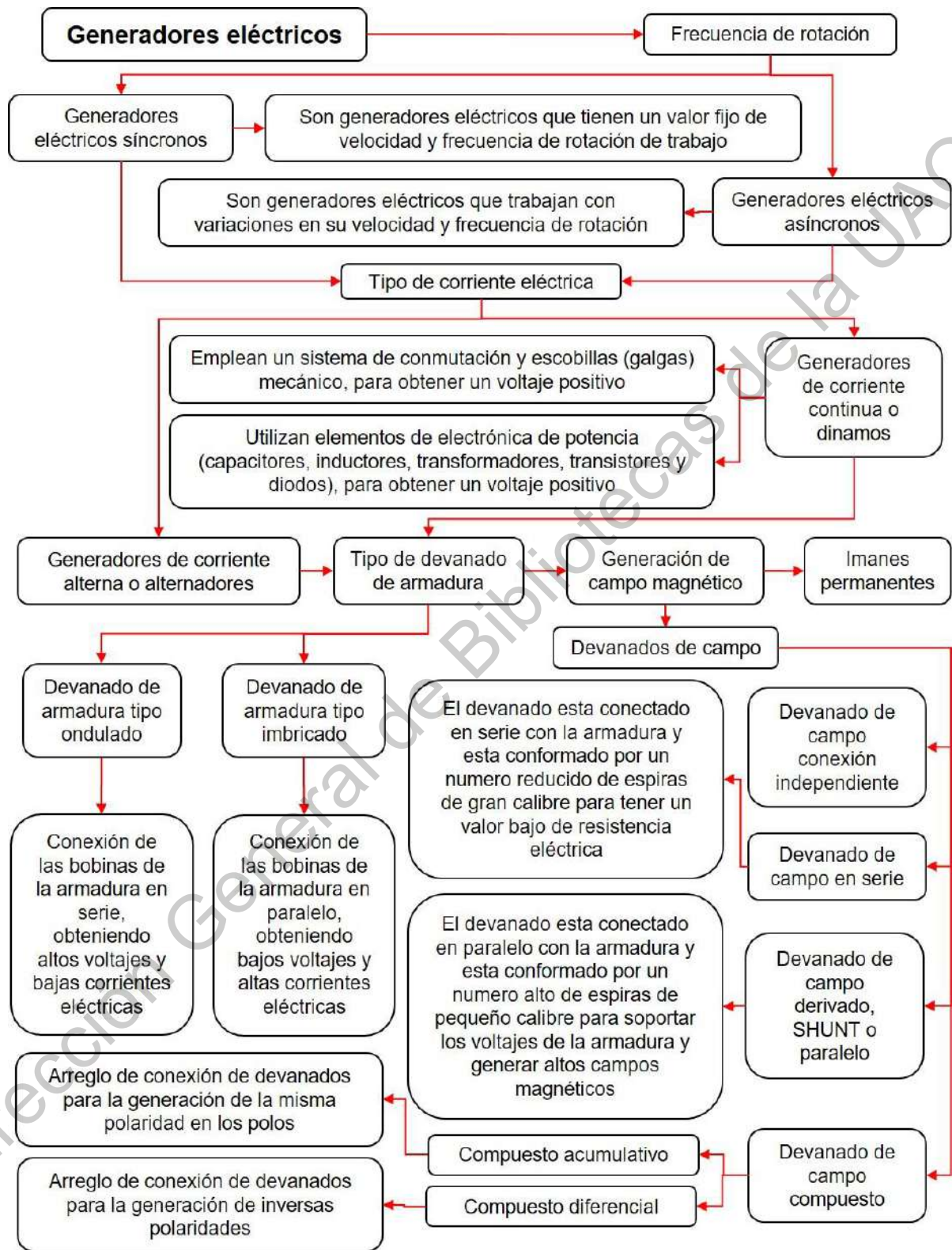


Figura 6. Clasificación de los generadores eléctricos convencionales

2.3.5. Pérdidas energéticas en los generadores eléctricos

Pérdidas eléctricas o pérdidas en el cobre. Son las pérdidas que se generan debido a la oposición del flujo de cargas eléctricas en los conductores de los devanados y que se manifiestan en forma de calor (Chapman, 2012; Enríquez Harper, 2012).

Pérdidas en el núcleo o en el hierro. Comúnmente los embobinados o devanados inducidos se construyen a partir del enrollamiento de espiras en un núcleo de hierro dulce magnético. A partir del giro del campo magnético inductor hacia los devanados de inducción, se genera una FEM en los devanados inducidos así como en su núcleo, formando pequeñas corrientes en él (Enríquez Harper, 2012). La formación de esta FEM y corrientes parásitas como se observa en la Figura 7(a), generan pérdidas por histéresis magnética y eléctrica que varían a partir de la magnitud del campo magnético inducido. En la Figura 7(b) se muestra el incremento de la corriente parásita en el núcleo a partir de la variación del flujo magnético en su interior, ocasionado por los ciclos de inducción magnética comenzando en el punto a con el incremento del flujo magnético hacia el punto b ; cuando la corriente decrece en el punto b , el flujo magnético se posiciona en el punto c , que siguió una trayectoria diferente a la inicial debido a que permanece una cantidad de flujo almacenada en el núcleo debido a sus propiedades electromagnéticas. Este comportamiento es muy similar al de los imanes permanentes. Al ser un ciclo de generación eléctrica alterna, se aplica una fuerza magnetomotriz coercitiva de inducción con diferente sentido a la inicial con la finalidad de que el valor del flujo magnético sea cero.

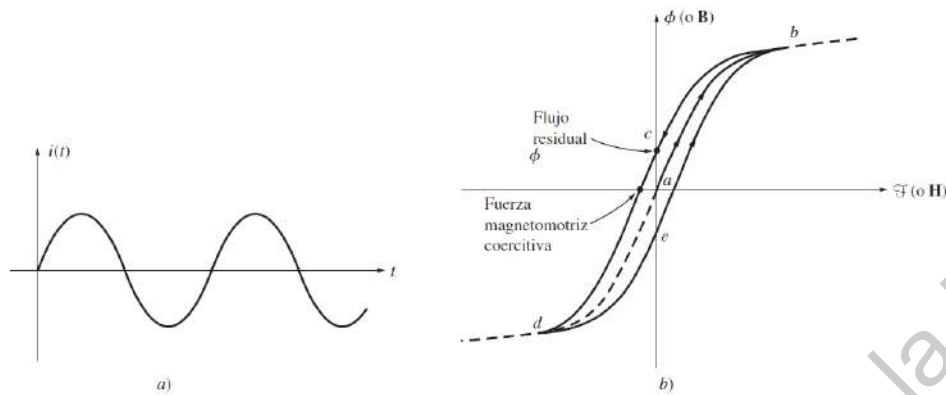


Figura 7. Comportamiento de histéresis electromagnética (Chapman, 2012)

Pérdidas mecánicas o pérdidas rotacionales. Son las pérdidas que se atribuyen a efectos mecánicos, principalmente a la fricción de los elementos de rotación en cojinetes o rodamientos, así como al rozamiento del aire en el interior debido al contacto con partes móviles del generador que varían conforme existan alteraciones en la velocidad de giro de los componentes.

Pérdidas dispersas o misceláneas. Son las pérdidas que no se pueden clasificar en ninguna de las anteriores, pero que están presentes en las máquinas eléctricas y que llegan a afectar en ~1% de la eficiencia eléctrica a plena carga (Chapman, 2012).

2.4. Superconductividad

En los conductores convencionales se permite el flujo de electrones a partir de la inducción de una diferencia de potencial. Sin embargo, el flujo de electrones interactúa con imperfecciones en la red cristalina del material, así como con colisiones con iones que tienen vibraciones fuera de su posición de equilibrio, ocasionando una resistencia al paso de los electrones. Al presentarse estas interacciones en el conductor, se propicia una pérdida de energía en forma de calor que es ascendente a partir del incremento de la resistencia eléctrica del material. Al disminuir la temperatura del conductor eléctrico durante la transición de corriente eléctrica, se experimenta una disminución considerable en la resistencia eléctrica, teniendo el comportamiento similar al de un conductor perfecto (Magaña Solís, 2013).

Sin embargo, no se tiene actualmente un conductor perfecto con resistencia cero a temperatura ambiente.

A principios del siglo XX, se comenzaba con el análisis de las propiedades eléctricas de los metales a bajas temperaturas. El primero en observar estos cambios en las propiedades eléctricas fue Kamerlingh Onnes, al experimentar la caída de la resistencia eléctrica en el mercurio a 4.2 K a un valor de $\sim 10^{-5}$ Ohm, lo que llevó al descubrimiento de la superconductividad (Kamerlingh Onnes, 1912; Delft, 2012; Zohuri, 2018). Al valor de la temperatura que tiene un material al estar en estado de superconductividad se le conoce como Temperatura crítica (T_c) (Geballe et al., 2015)

Es posible comparar la disminución de la resistencia eléctrica entre un conductor eléctrico convencional o no superconductor y un superconductor, como se observa en la Figura 8. En esta Figura, se muestra que el superconductor al llegar a una T_c si tendrá un valor de resistencia eléctrica con valor de cero, pero el material no superconductor, no llegará a este valor, aunque se disminuya aún más el valor de la temperatura y este llegue a un valor cercano a 0 K.

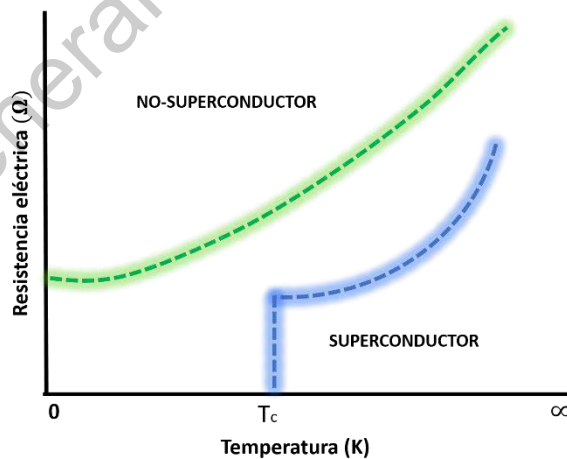


Figura 8. Comparación de la resistencia eléctrica de un no superconductor y superconductor con respecto al cambio en la temperatura

En el año 1933 Walther Meissner y Robert Oschenfeld llevaron a cabo experimentos en materiales superconductores y descubriendo que al aplicar campos magnéticos a una T_c , no se formaban campos magnéticos en el interior del superconductor y que el campo magnético no entraba a su interior ; a este efecto se le conoce en los superconductores como efecto Meissner-Oschenfeld (Meissner and Oschenfeld, 1933; Li, 2003; Li et al., 2020; Majewski, 2020).

Si se analiza un conductor eléctrico convencional, y a este se le aplica un campo magnético a una temperatura que tiende a 0 K, las líneas de campo magnético lo atravesaran sin mostrar una repulsión hacia ellas, este efecto se observa en la Figura 9 (a). En cambio, al hacer el mismo procedimiento a un superconductor, este repele las líneas de campo magnético hacia el exterior por sí mismo, esto efecto se observa en la Figura 9 (b).

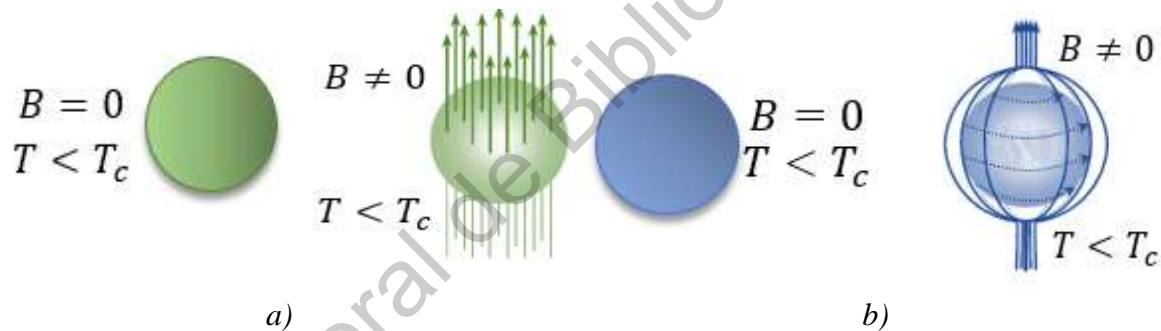


Figura 9. Interacción de las líneas de campo magnético con un hipotético conductor perfecto y un superconductor

Sin embargo, existe un valor de campo magnético al cual los superconductores no son capaces de expulsar su propio campo magnético, perdiendo el estado de superconductividad. A este valor se le conoce como campo magnético crítico (H_c) y esta atribuye a la diferencia de energía libre a partir del estado no superconductor y el estado de superconductividad, ocasionado por el trabajo efectuado por la aplicación del campo magnético al superconductor (Magaña Solís, 2013).

2.4.1. Teorías de la superconductividad

2.4.1.1. Teoría de Fritz and Heinz London

Esta teoría menciona que a partir de la interacción de un superconductor con un campo magnético externo se formarán corrientes superficiales por una cantidad finita de portadores de carga libres por unidad de volumen (n_s). Estas se convierten en supercorrientes debido a que no hay resistencia eléctrica en el material, generando un campo magnético superficial y opuesto al de la interacción inicial; obteniendo un estado diamagnético en el interior del superconductor. Sin embargo, estas supercorrientes y campos magnéticos superficiales solo existirán en un determinado espesor, de tal manera que, al incrementar el campo magnético hacia el superconductor se incrementara la longitud de penetración (λ_L) de las líneas del campo magnético, rompiendo el estado superconductor (London et al., 1935; Adriaanse, 2019). La obtención de la ecuación de la λ_L del campo magnético a partir de la teoría de London, y se determina a partir de la segunda ley de Newton y las ecuaciones de Maxwell. Si se hace una analogía a partir de la fuerza en función de la masa y la aceleración (Ec.1), con respecto a la fuerza eléctrica (Ec. 3).

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad \text{Ec. 2}$$

$$q\vec{E} = m \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} \quad \text{Ec. 3}$$

Si consideramos que el campo eléctrico en la (Ec. 4)

$$\vec{E} = \Lambda \vec{J} \quad \text{Ec. 4}$$

Donde $\Lambda = \frac{m}{n_s q^2}$ siendo m la masa de los portadores de carga, se desarrolla la (Ec. 5)

$$\vec{E} = \frac{m}{n_s q^2} \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad \text{Ec. 5}$$

Desarrollando un análisis de los rotacionales en ambos lados de la igualdad obtenemos la (Ec. 6)

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{m}{n_s q^2} \nabla \times \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad \text{Ec. 6}$$

Aplicando la igualdad con la Ley de Faraday (Ec.7) en la ecuación de Maxwell, se obtiene la (Ec.8). Permittedo determinar la (Ec.9)

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Ec. 7}$$

$$\frac{m}{n_s q^2} \nabla \times \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Ec. 8}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{m}{n_s q^2} \nabla \times \vec{J} + \vec{B} \right) = 0 \quad \text{Ec. 9}$$

Considerando que el campo magnético y el flujo eléctrico en el interior son cero, es posible aplicar la Ley de Ampere (Ec.10) y la Ley de Gauss para el campo magnético (Ec.11). Aplicando estas ecuaciones en la (Ec. 9) se obtiene la ecuación (Ec. 12).

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} \quad \text{Ec. 10}$$

$$\nabla^2 \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Ec. 11}$$

$$-\frac{m}{\mu_0 n_s q^2} \nabla^2 \vec{B} + \vec{B} = 0 \quad \text{Ec. 12}$$

En esta teoría se indica que la λ_L es dependiente de n_s en estado de superconductividad, como se muestra en (Ec.13).

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 n_s q^2}} \quad \text{Ec. 13}$$

Sustituyendo a λ_L en la (Ec. 12), obtenemos la ecuación de la teoría de London (Ec.14) que explica la formación de un campo magnético en la superficie a partir de supercorrientes superficiales que están limitadas por λ_L al aplicar un campo magnético al superconductor.

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{\vec{B}}{\lambda_L^2} \quad \text{Ec. 14}$$

No obstante, esta teoría no explica totalmente el comportamiento de los superconductores.

2.4.1.2. Teoría de Ginzburg – Landau

La teoría de Ginzburg – Landau toma como base a la teoría de los hermanos London, agregando la relación de las propiedades de interacción electromagnéticas de un superconductor con respecto a la T_c , a partir de la densidad finita de portadores de carga en estado superconductor n_s , en forma de función de onda compleja de energía libre en el material $\psi = |\psi|e^{i\phi}$ con módulo $|\psi|$ y en fase ϕ considerando a $|\psi|^2 = n_s$. Razón con la cual es posible generar supercorrientes a partir de la disminución de la temperatura ambiente hasta llegar a la T_c (L.V. Ginzburg, 1955; Ginzburg, 1957). Esta teoría menciona que cada superconductor tiene sus propiedades eléctricas y magnéticas caracterizadas a partir de dos magnitudes, la longitud de coherencia, que es la longitud de interacción entre los portadores carga característica de cada superconductor (ξ) (Ec.15) y la longitud de penetración del campo magnético aplicado (λ) en la (Ec.16) (Ginzburg and Landau, 2009). Esto se debe, a que a partir de la magnitud del campo magnético aplicado en el superconductor, este puede o no penetrar uniformemente en el material debido a la presencia de imperfecciones estructurales en el mismo, obteniendo una mezcla de regiones normales y superconductoras (Hummel, 2011).

$$\xi = \sqrt{\frac{\hbar^2}{2m^*\alpha}} \quad \text{Ec. 15}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{m^*}{4\mu_0 q^2 \psi_0^2}} \quad \text{Ec. 16}$$

A partir de los valores de ξ y λ es posible obtener el parámetro de Ginzburg – Landau κ (Ec. 17). Este valor clasifica a los superconductores en dos tipos a partir de su reacción con la interacción de un campo magnético hasta llegar a la magnitud de su propio campo crítico (H_c), en donde se pierde el estado superconductor (Ec.18) (V.L. Ginzburg, 1955; Ginzburg and Landau, 2009; Poole et al., 2014a; Adriaanse, 2019).

$$\kappa = \xi/\lambda \quad \text{Ec.17}$$

$$\kappa = 1/\sqrt{2} \quad \text{Ec.18}$$

Si el valor de $\kappa < 1/\sqrt{2}$ en el superconductor analizado se clasifica como superconductor tipo I, y si el valor de $\kappa > 1/\sqrt{2}$ se clasifica como superconductor tipo II (Ginzburg and Landau, 2009). La relación de ξ con respecto a λ se observa en la Figura 10 para los tipos de superconductores.

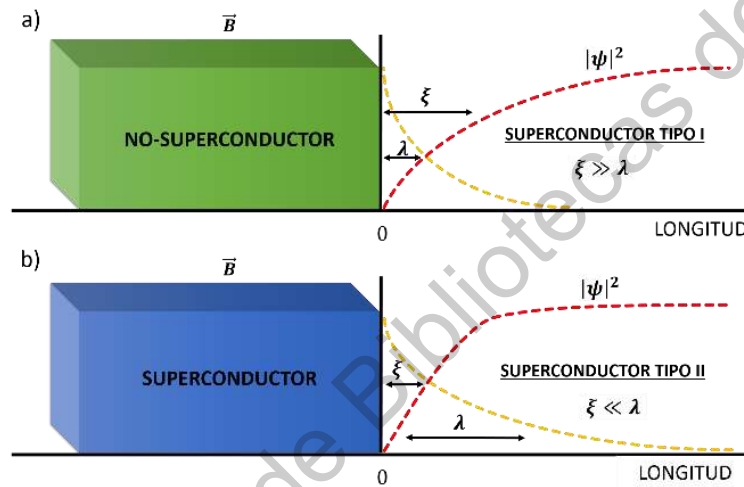
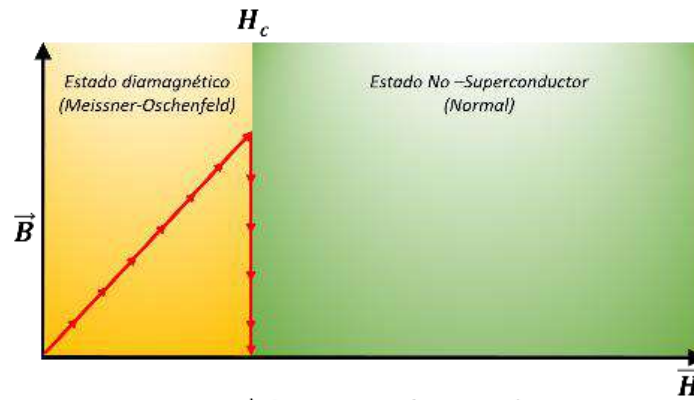


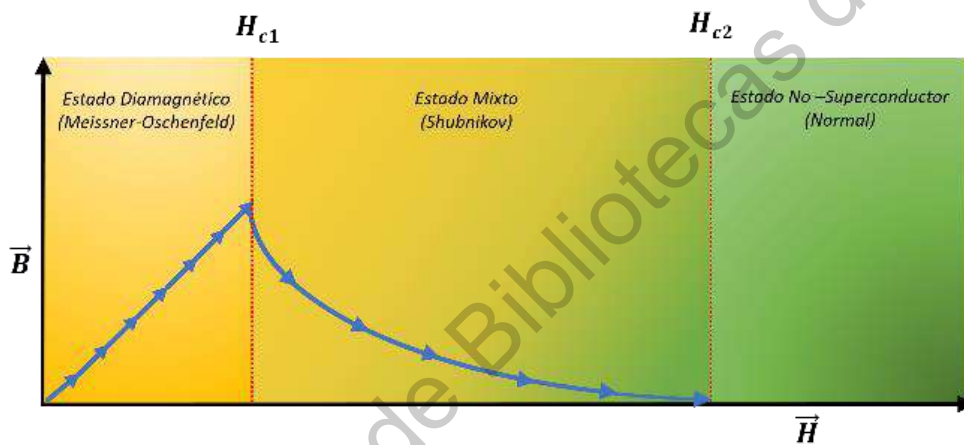
Figura 10. Clasificación de los superconductores a partir del incremento de $|\psi|^2$ y la disminución del \vec{B} en una longitud desde superficie del superconductor. a) Comportamiento físico del superconductor tipo I. b) Comportamiento físico del superconductor tipo II.

2.4.1.2.1. Tipos de superconductores

Los superconductores tipo I exhiben un diamagnetismo perfecto antes de llegar al valor de su propio H_c . Al superar su H_c el material pierde su estado de superconductor transitando al estado normal o no superconductor como se ve en la Figura 11a. Los superconductores tipo II presentan dos comportamientos diferentes a partir de la aplicación de H_c . El primero es el H_{c1} en el cual se presenta el efecto Meissner. El segundo es el H_{c2} en el cual se pierde el estado superconductor en el material, por lo cual el $H_{c2} > H_{c1}$ como se observa en la Figura 11b.



a) Superconductor tipo I



b) Superconductor tipo II

Figura 11. a) Curva de magnetización de los superconductores Tipo I. b) Curva de magnetización de los superconductores Tipo II.

En la Figura 12, se observa que el H_c que soporta un superconductor tipo I y tipo II, también está en función de la temperatura. En el intervalo entre H_{c1} y H_{c2} la magnetización del superconductor disminuye con respecto al incremento del campo magnético externo aplicado y se le conoce como estado mixto o en fase de Shubnikov (Rjabinin and Shubnikow, 1935; Shubnikov, 1936; Luiz, 2010; Ketterson, 2016).

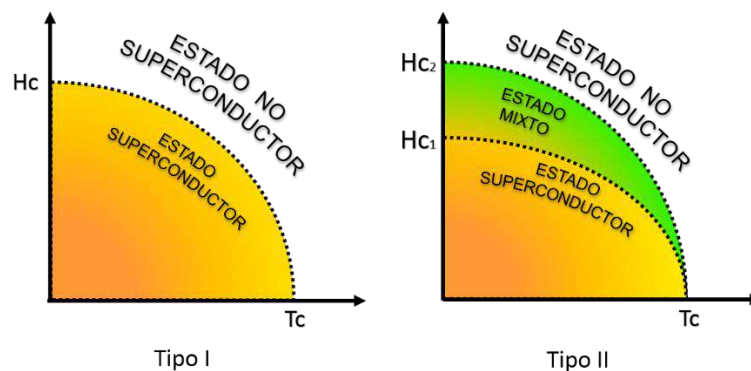


Figura 12. Curvas de los estados en los superconductores a partir de su tipo con respecto a H_{c1} , H_{c2} y T_c

En la transición del H_{c1} y H_{c2} del estado mixto, se demostró por Abrikosov, que a partir del incremento del campo magnético aplicado se forman vórtices de supercorrientes circulares, debido a que el campo magnético penetra en forma de cilindros generando confinamientos de flujo como se observa en la Figura 13 (Abrikosov et al., 2012). El valor de este confinamiento está dado por el valor de la Ec. 19.

$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.0678 \times 10^{-15} \text{ Wb} \quad \text{Ec. 19}$$

A partir de este valor es posible obtener los H_c de los superconductores tipo II con las ecuaciones Ec. 20 y Ec. 21 (Poole et al., 2014a).

$$H_{c1} = \frac{\Phi_0 \ln \kappa}{4\pi\mu_0\lambda^2} \quad \text{Ec. 20}$$

$$H_{c2} = \frac{\Phi_0}{2\pi\mu_0\xi^2} \quad \text{Ec. 21}$$

El efecto de la superconductividad se fundamenta en las interacciones Fonón-electrón en la red cristalina a bajas temperaturas, disminuyendo las vibraciones de los átomos ocasionando una reducción de la resistencia eléctrica en los superconductores (~ 0 Ohm), permitiendo un libre tránsito de flujo de portadores sin, además de crear un estado diamagnético (Lazarides and Tsironis, 2018; Grigorishin, 2019).

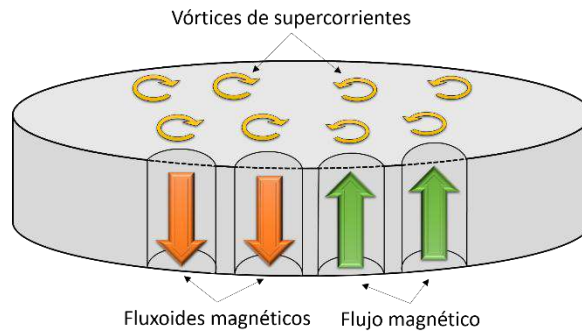


Figura 13. Generación de vórtices en los superconductores

2.4.1.3. Teoría BCS

Fröhlich menciona en su trabajo de 1950, que un portador de carga de un superconductor a T_c , tiene la capacidad de desplazarse por la red cristalina, con tendencia a atraer a los iones positivos de la red. Este produce, que a su alrededor se genera una aglomeración de iones positivos, alterando la densidad de cargas positivas en la red, ocasionando la interacción de un fonón; y que, al posicionarse en su cercanía otro portador de carga negativa, este sería atraído por las interacciones de cargas positivas, de modo que los portadores de carga negativa están interrelacionados con el fonón en la red cristalina como se observa en la Figura 14 (Fröhlich, 1950).

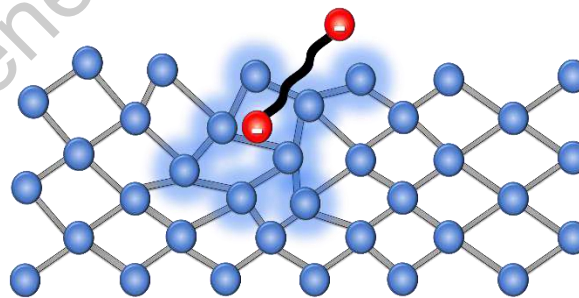


Figura 14. Interacción de portadores de carga negativa - Fonón en la red cristalina de iones positivos (esferas azules) a T_c .

A partir de esta idealización y las teorías anteriores, el equipo conformado por J. Bardeen, L. N. Cooper y J. R. Schrieffer presentaron su teoría de superconductividad.

Esta teoría considera que un par de electrones cercanos al nivel de Fermi que están en movimiento y que, al tener una interacción con un fonón, se supera el estado de repulsión Coulombiana, permitiendo la ligadura de estos electrones. Esta interacción ocasiona un estado relación de momentos de igual magnitud y opuestos entre sí ($\vec{k}_1 = -\vec{k}_2$), así como sus espines de igual manera son opuestos ($k \uparrow, -k \downarrow$), denominando a este conjunto como par de Cooper como se muestra en la Figura 15 (Bardeen et al., 1957).

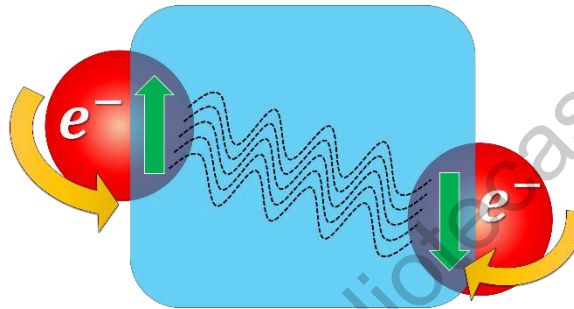


Figura 15. Interacción de electrones con espines invertidos con un Fonón

Un par de Cooper a T_c en un superconductor convencional, se comporta como bosón (Gabovich et al., 2002; Blencowe, 2004; Dattagupta, 2004; Salas et al., 2016; Heinrich et al., 2018), de tal manera que es posible estar en el mismo estado cuántico y estado energético, sin obedecer el principio de exclusión (Wang and Lee, 2011; Adriaanse, 2019). El comportamiento de los pares de Cooper se describe como una función de onda macroscópica, en donde se mantiene una coherencia de fase con una distancia con el valor de la longitud de coherencia intrínseca (ξ_0), que es la distancia entre los pares de Cooper. Además, las funciones de onda de los pares de Cooper a T_c , son causas de un defecto colectivo debido a la baja velocidad a la que se desplazan los iones positivos, permitiendo que las funciones de onda se solapen entre sí, formando una coherencia de estado como se observa en la Figura 16.

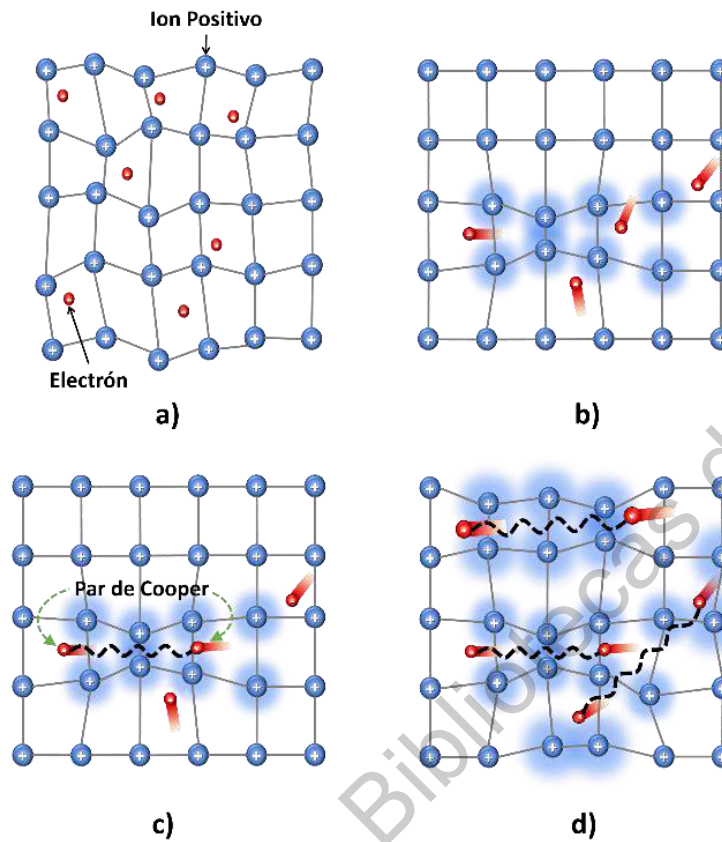


Figura 16. Movimiento electrónico. a) Desplazamiento de electrones a temperatura ambiente. b) Formación de la región de carga positiva e interacción de electrones. c) Formación del par de Cooper. d) Interacción de pares de Cooper.

En la teoría BCS, se establece la función de los estados excitados (E_{κ}) descrita en (Ec. 22), siendo (Δ) el ancho de banda prohibida del superconductor y (ϵ_{κ}) la energía cinética medida con respecto a E_F en (Ec. 23).

$$E_{\kappa} = \sqrt{\Delta^2 + \epsilon_{\kappa}^2} \quad \text{Ec. 22}$$

$$\epsilon_{\kappa} = \frac{\hbar^2 \kappa^2}{2m^*} - E_F \quad \text{Ec. 23}$$

La energía del sistema se reduce al generarse los pares de Cooper, a una magnitud igual a la energía de enlace entre los electrones (2Δ), que a su vez es el valor de la energía necesaria para estar en el primer estado de excitación del sistema.

La densidad de los estados electrónicos en los superconductores $N_s(E_\kappa)$ determina la formación del par de Cooper y la densidad de los estados electrónicos en la fase no superconductor $N_n(\epsilon_\kappa)$ que es cuando se disocia un par de Cooper, se obtiene a partir de Ec. (24).

$$\frac{dN_s(E_\kappa)}{dE_\kappa} = \frac{dN_n(\epsilon_\kappa)}{d\epsilon_\kappa} \left(\frac{d\epsilon_\kappa}{dE_\kappa} \right) \quad \text{Ec. 24}$$

Al considerar a la energía de Fermi como referencia, y con valores de $\epsilon_\kappa \rightarrow 0$, se considera que $N_n(\epsilon_\kappa)$ es constante e igual a $N_n(E_F = 0)$, se obtiene el análisis de la Ec. (25).

$$\frac{N_s(E_\kappa)}{N_n(0)} = \begin{cases} 0 & E_\kappa < \Delta \\ \frac{E_\kappa}{\sqrt{E_\kappa^2 - \Delta^2}} & E_\kappa > \Delta \end{cases} \quad \text{Ec. 25}$$

En 1959, L. P. Gor'kov logro unificar las teorías BCS con la de Ginzburg – Landau, señalando que un superconductor a una $T \approx T_c$, la función de onda compleja ψ de Ginzburg – Landau es la función de los pares de Cooper y es directamente proporcional al ancho de banda prohibida Δ en estado superconductor de BCS (Gor'kov, 1959). Obteniendo las ecuaciones de las longitudes de penetración (Ec. 27) y coherencia (Ec. 26) a partir de la temperatura, donde ξ_0 y λ_0 son los valores de la longitud de coherencia y penetración del campo magnético en $T_c=0$ K. Se consideran estas temperaturas, debido a la relación que existe del valor de la densidad de corriente eléctrica en estas temperaturas, obtenida por Barden, Cooper y Schrieffer (Bardeen et al., 1957) en el análisis teórico y experimental que realizan y se compara con el de Faber (Faber and Pippard, 1955).

$$\xi(T) = 0.74 \xi_0 \sqrt{\frac{T_c}{T_c - T}} \quad \text{Ec. 26}$$

$$\lambda(T) = \frac{\lambda_0}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{T_c}{T_c - T}} \quad \text{Ec. 27}$$

Sin embargo, estas teorías no explican el comportamiento en todos los superconductores de alta T_c (Behnia, 2017; Prakash et al., 2017). En específico con los materiales a base de cupratos (Singh, 2020), debido a la interacción electrónica que se presenta en su celda unitaria, originado por la cantidad de planos cobre – oxígeno en su interior. Permitiendo desarrollar nuevas teorías que unifiquen los comportamientos físicos para todos los superconductores.

2.4.2. Superconductores de alta temperatura crítica HT_c

Como se mencionó anteriormente, existen dos tipos de superconductores. Los del tipo I, que están conformados por elementos puros, y alcanza el estado superconductor en el intervalo de $T_c = [\sim 0.01 K \rightarrow 15 K]$, y su estado de superconductividad está limitado por su H_c (Magaña Solís, 2013). Sin embargo, los superconductores del tipo II, manifiestan el estado de superconductividad desde valores de $T_c = 0.63 K$ (Assmus et al., 1984), llegando hasta valores de $T_c = \sim 250 K$ (Magaña Solís, 2013; Poole et al., 2014a; Snider et al., 2020). Además, de tener la capacidad de soportar campos magnéticos de mayor magnitud en comparación con los superconductores del tipo I (Changkang, 1998; Geballe et al., 2015; Waldram, 2017). En las últimas décadas, se han desarrollado nuevos materiales compuestos principalmente por cupratos, los cuales son combinaciones de óxido de cobre con otros elementos. Dichos compuestos permiten la formación de planos cristalinos CuO_2 (Poole et al., 2014b), los cuales facilitan a los superconductores el alcanzar el estado superconductor a HT_c . Además, se han realizado análisis para relacionar la cantidad de planos cristalinos CuO_2 con los valores más altos obtenidos de la T_c en los superconductores de HT_c (Chu et al., 2015). Entre los cuales destacan los superconductores $YBaCuO$, $BiSrCaCuO$ y $HgBaCaCuO$ por sus propiedades electromagnéticas y su HT_c , permitiendo utilizar medios más económicos para enfriarlos como el nitrógeno líquido (Changkang, 1998; Kalta et al., 2011; Melhem, 2011; Magaña Solís, 2013; Poole et al., 2014a; Dai et al., 2019; Padam et al., 2019; Thadela et al., 2019; Vyas and Dondapati, 2020). No obstante, entre ellos se tienen

diferencias muy significativas entre su T_c y H_c en estado superconductor. En la Figura 17 se muestran los campos críticos que pueden alcanzar los superconductores al disminuir paulatinamente la temperatura, entre los cuales destaca el YBaCuO en el arreglo [123], por su generación de campos magnéticos intensos a T_c mayores que los otros superconductores. Esto lo hace un material adecuado para su aplicación en dispositivos electromecánicos de alta potencia, por lo cual nos enfocaremos en su obtención y aplicación en el desarrollo de un generador eléctrico en este trabajo.

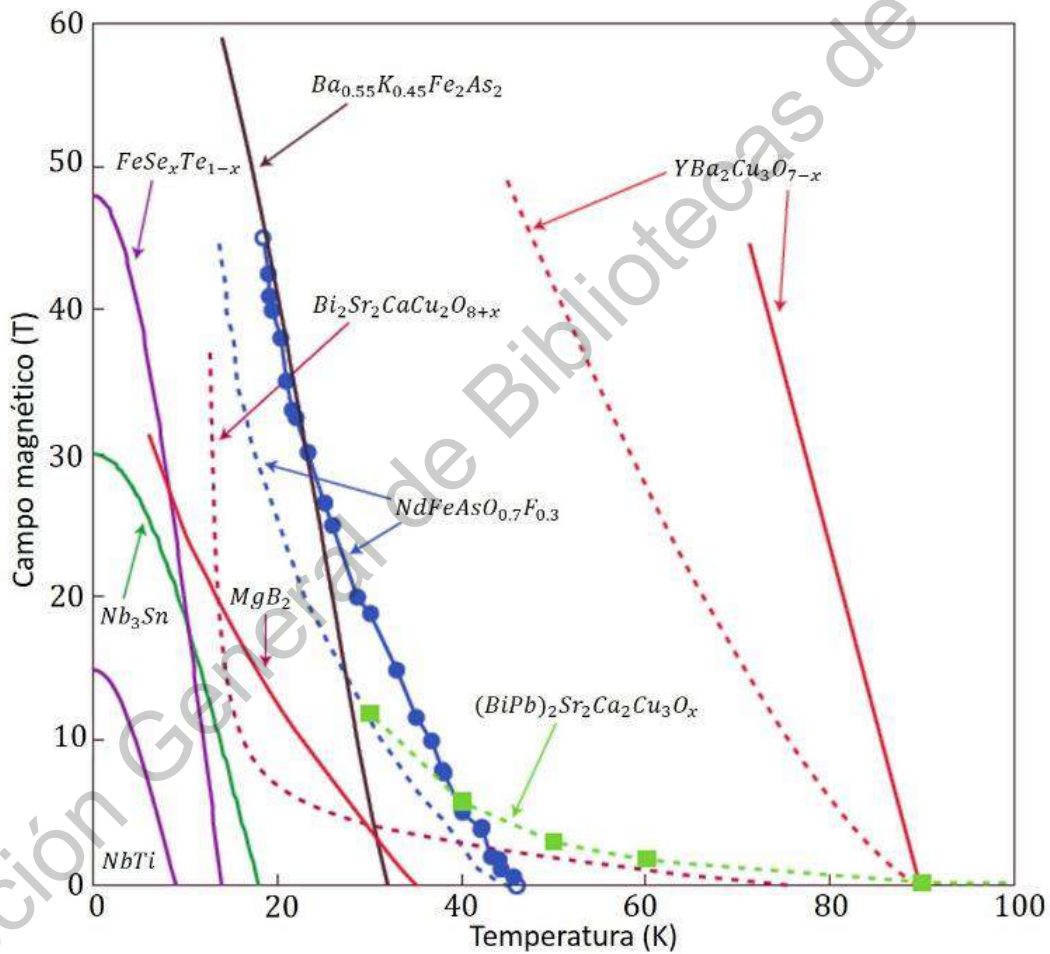


Figura 17. Curvas comparativas Campo magnético - Temperatura de superconductores HT_c (Gurevich, 2011)

2.4.2.1. YBaCuO

El YBaCuO en su arreglo [123] es considerado como uno de los mejores materiales superconductores debido a su capacidad para generar campos magnéticos elevados y para transportar altas densidades de corriente eléctrica (Liu et al., 2018). Este material tiene una estructura tipo perovskita con una simetría ortorrómbica, que presenta deficiencias de oxígeno, obteniendo el compuesto $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (Raveau et al., 1988). Las deficiencias de oxígeno en el material hacen que exista una mezcla de fases superconductoras y no superconductoras en pequeña y gran medida. Las fases superconductoras en el $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ se presentan en el intervalo [$x = (0 \approx x \leq 0.65)$] (Cava et al., 1987; Yamaguchi et al., 1988; Stoneham and Smith, 1991; Cava, 2000; Moure and Peña, 2015). Este material obtiene el estado superconductor a una $T_c = \sim 90 \text{ K}$ y tolera un $H_c = \sim 674 \text{ T}$ (Chu et al., 2015), esto se debe a la formación de los planos de CuO_2 característicos, en donde se atribuye el tener una baja resistencia ya que facilitan el movimiento electrónico a baja temperatura (Naito et al., 2001; Khadzhai et al., 2019). El desarrollo de la síntesis de fases superconductoras dependerá de la temperatura y la presión, debido a que diversos materiales precursores requieren diferentes tratamientos térmicos, los cuales deben de realizarse en una atmósfera controlada (Morosin et al., 1989; Peterson et al., 1991; Barboux et al., 1992; Coppa et al., 1992; Pak Sung S. et al., 1992; Terrell A., 1992; Kumar et al., 1993; Nishio and Fujiki, 1993; Gencer et al., 1997; Changkang, 1998). La técnica más común de obtención de este superconductor es en forma de bulto a través de sinterización mediante reacción de estado sólido en atmósferas ricas en oxígeno, empleando ciclos de tratamientos térmicos por lapsos de 8 a 100 h (Rao, 1988; Klissurski and Rives, 1994; Gencer et al., 1997; Koblischka and Koblischka-Veneva, 2003; Amirabadizadeh et al., 2012; Jin et al., 2017). Sin embargo, ningún material homogéneo ha sido sintetizado con éxito por este método.

2.4.3. Aplicaciones de los superconductores de HT_c

Los superconductores HT_c han demostrado buenas cualidades para su aplicación en el diseño y fabricación de dispositivos y maquinaria eléctrica (Byrd et al., 2010; Jin,

2014; Aly et al., 2016; Thomas et al., 2016a; Shi et al., 2018; Gimaev et al., 2019; Machura and Li, 2019; Mukherjee and Rao, 2019). Estos materiales se han utilizado para minimizar las pérdidas de resistencia eléctrica, lo que permite transportar altas densidades de corriente. Esta es una mejora muy importante en comparación con los materiales conductores tradicionales como el cobre, el aluminio o el acero. Además, los superconductores permiten la formación de campos magnéticos intensos sin usar imanes permanentes o electroimanes robustos mediante el uso de bajas corrientes, lo que reduce los costos energéticos. Además, las máquinas eléctricas equipadas con superconductores tienen tiempos de operación más largos, así como una vida útil más larga en comparación con las máquinas convencionales (Fujiwara et al., 2010; Tixador, 2010; Thomas et al., 2016b; Han et al., 2018; Yazdani-Asrami et al., 2019).

El superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ en particular, se ha empleado para la construcción de dispositivos eléctricos y electrónicos más eficientes, reduciendo considerablemente su tamaño en comparación con los dispositivos convencionales; comprendiendo el desarrollo de generadores eléctricos y su uso en turbinas eólicas (Abrahamsen et al., 2012; Keysan and Mueller, 2012; Lloberas et al., 2014), sistemas de transmisión, potencia y ondulación de energía (Byrd et al., 2010; Jin, 2014; Aly et al., 2016; Thomas et al., 2016b; Thomas et al., 2016a; Shi et al., 2018; Mukherjee and Rao, 2019), componentes e instrumentos de transmisión de microondas (Faisal, 2012), sistemas electromecánicos de asistencia de despegue y aterrizaje de aeronaves (Rohacs and Rohacs, 2016), desarrollo de dispositivos para vehículos de transporte (Tomita et al., 2002; Floegel-Delor et al., 2019; Machura and Li, 2019) sistemas de refrigeración magnéticos (Gimaev et al., 2019), por decir algunos.

2.4.3.1. Generadores eléctricos con elementos superconductores

En los años de 1970, la empresa Westinghouse condujo el estudio exhaustivo de un diseño de un generador 1,000 MVA 550KV/22kV, y se encontró que la transferencia de corriente, el funcionamiento corriente, y la protección sigue siendo un problema persistente (Barnes et al., 2005).

Uno de los primeros diseños de generadores de la fuerza aérea de Estados Unidos fue un sistema superconductor All - Cryogenic, que incorpora tanto un campo superconductor de bobinado y un superconductor devanado de inducido. Esta fue una máquina síncrona de 50 kW diseñada por Dynatech en 1967. Aunque no obtuvo el suficiente éxito, la prueba demostró el verdadero problema de las pérdidas de corriente alterna en un devanado de inducido superconductor. Posteriormente las máquinas utilizaron superconductores en los devanados de campo exclusivamente, en este caso, un espacio de vacío debe ser usado para separar los devanados de campo criogénicos y de temperatura ambiente del estator (Barnes et al., 2005).

Algunos pequeños alternadores superconductores síncronos estaban compuestos de devanados de campo de material superconductor estacionarios y, otros convencionales con devanados giratorios del inducido se estructuraban por varios grupos (Barnes et al., 2005). Los ejemplos de éstos se produjeron a finales de 1960 y principios de 1970 en algunas partes del mundo: un generador eléctrico superconductor de 8 kVA en los Estados Unidos, uno 100 kVA en Rusia, otro de 21 kVA en Alemania, y posteriormente otro de 30 kVA en Japón por Fuji Electric. Durante el mismo período de tiempo, el desarrollo de generadores con la rotación de los bobinados de campo y armadura estacionaria eran diseños óptimos a desarrollar. Los primeros esfuerzos en el MIT incluyeron un generador de 45 kVA, más tarde uno de 2 MVA. Por su parte la antigua Unión Soviética desarrolló uno de 1 MVA (Barnes et al., 2005).

Durante este tiempo, se diseñó y probó un generador con elementos superconductores por la empresa Westinghouse, que era de dos polos, a una frecuencia de 60 Hz, y de 5 MVA con un sistema giratorio diseñado bajo los principios de un recipiente criogénico Dewar, el cual es un sistema de aislamiento térmico que disminuye los incrementos de calor generados por convección, convección y radiación. Con esto obtuvo un convenio con la Fuerza Aérea de Estados Unidos para construir un generador de 5 MVA, a 400 Hz. El rotor estaba conformado por materiales superconductores y de cuatro polos a una velocidad 12 000 rpm,

llegándose a probar en 1974 (sin una armadura), la velocidad era de 240 a 12 000 rpm, una velocidad adecuada para aplicaciones aerotransportadas y compatible con el funcionamiento de un sistema de 5.32 MVA. El programa de desarrollo en el alternador se utilizó NbTi en los devanados del rotor, lo que exige una temperatura de 4.2 K de operación. Aun así, el blindaje electromagnético en el rotor fue considerado como el problema más importante del alternador superconductor, lo que causó un calentamiento excesivo en el escudo debido a campos variables de carga inducida. Esto sugiere que los futuros diseños tengan escudos térmicos y electromagnéticos separados para evitar el problema de calentamiento. La combinación de una mala refrigeración y altas pérdidas coloca estrictas restricciones de diseño en las especificaciones de superconductor (Barnes et al., 2005).

Westinghouse y General Electric fueron contratadas en 1975 para la conceptualización y desarrollo de un generador superconductor para producir 300 MVA a 60 Hz que se lograra escalar a 1200 MVA. Sin embargo, el proyecto se canceló en 1983 (Kalsi et al., 2004).

En 1988, a través del Ministerio de Comercio Internacional e Industria, Japón construyó uno de sus primeros generadores eléctricos con superconductores, interconectados a la red eléctrica. El proyecto requirió de 12 años de trabajo; sin embargo, al término del mismo se verificó el rendimiento y la confiabilidad de los superconductores. El generador eléctrico con superconductores entregaba una potencia de 200 MW. Posteriormente, en 1997 desarrollaron otro tipo de maquinaria que constaba de un estator común y un rotor con elementos superconductores, entregando una potencia de 79 MW. Los generadores japoneses interconectados al servicio eléctrico operan en jornadas de 1500 horas consecutivas con eficiencias del 98.15 % y del 98.30 % en la transformación y aprovechamiento de la energía total convertida, respectivamente. En 1999 se concluyeron 3 prototipos similares (Kalsi et al., 2004).

La empresa alemana SIEMENS fabricó en el 2005 una máquina eléctrica con materiales superconductores, que tiene la versatilidad de funcionar como motor y

generador eléctrico. Este equipo tiene la ventaja de contar con un motor-generador más esbelto, en comparación a sus predecesores, dado que utilizaba materiales superconductores tipo II, que generan campos magnéticos más grandes en comparación con los superconductores del tipo I. En modo de generador, el equipo entrega 4 MW a una velocidad de 3,600 rpm (Kalsi et al., 2004).

En 2005 Kalsi y colaboradores reportan el desarrollo de un generador con superconductores que permite interconectarse a la red como elemento de apoyo energético. Este sistema se clasificaba con un valor de 8 MVAR, con un voltaje línea a línea de 13.8 kV a una temperatura de trabajo desde -30 °C con tolerancia de +40 °C, con una eficiencia del 1.5%. Las ventajas eran que tenía estabilidad transitoria energética, adelanto y atraso de los parámetros eléctricos a partir de las necesidades, bajo costo de operación e instalación, protección de sobrecargas térmicas delimitadas por el estator y reducción de tamaño (Kalsi et al., 2005)

En los últimos años los generadores con elementos superconductores han tenido un incremento en su empleo en sistemas eólicos, ya que se adaptan estos generadores eléctricos a las dimensiones de la góndola, obteniendo una mayor producción energética. Tienen las ventajas de que no se satura la densidad de flujo en el entrehierro, disminución de volumen de tamaño, capacidad de aislamiento dieléctrica, disminución de armónicos, corrientes parásitas, reactancia síncrona y control de alta capacidad de sobrecarga, reducción en el peso y volumen del rotor permitiendo disminuir el momento inercia sin requerir demasiada fuerza. (Kalsi et al., 2004; Melhem, 2011; Abrahamsen et al., 2012; Keysan and Mueller, 2012; Sung et al., 2013; Lloberas et al., 2014; Kulkarni et al., 2015; Antony and Shaw, 2016; Pavel et al., 2017).

3. HIPÓTESIS

El material superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ se puede obtener a través de reacción de estado sólido sin el uso de gases reactivos, obteniendo un valor de $T_c > 90 \text{ K}$; para su aplicación en el aprovechamiento de las líneas de fuga de densidad de flujo magnético en un generador eléctrico, incrementado la eficiencia de conversión energética

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Obtener materiales superconductores mediante reacción de estado sólido para su uso en la conversión de energía mecánica a eléctrica, a través de un generador eléctrico.

4.2. Objetivos específicos

- Obtener pastillas superconductoras de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ mediante reacción de estado sólido.
- Determinar las propiedades estructurales, de composición y morfológicas de las pastillas superconductoras mediante difracción de rayos X, espectroscopia Raman, espectroscopia de energía dispersiva y microscopio electrónico de barrido.
- Evaluar las propiedades eléctricas de los materiales superconductores obtenidos.
- Obtener películas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ obtenido mediante la técnica de serigrafía.
- Evaluar las propiedades estructurales, de composición y morfología de las películas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ mediante difracción de rayos X, espectroscopia Raman, espectroscopia de energía dispersiva y microscopio electrónico de barrido, respectivamente.
- Realizar un modelado para determinar de la densidad de flujo magnético con un arreglo de imanes de NdFeB en el rotor de un generador eléctrico mediante software.
- Obtener un prototipo de generador eléctrico con la implementación de los materiales superconductores obtenidos.
- Evaluar la eficiencia del generador a través de los parámetros eléctricos por medio de una memoria de cálculo y medición de la potencia eléctrica en vacío y plena carga.

5. METODOLOGÍA

5.1. Reactivos y materiales

5.1.1. Reactivos y materiales (obtención en bulto $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$)

5.1.1.1. Reactivos y solventes

- | | |
|------------------------|--------------------------------|
| • Óxido de bario | BaO |
| • Óxido de itrio | Y_2O_3 |
| • Óxido de cobre | CuO |
| • Agua desionizada | |
| • Alcohol isopropílico | $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$ |
| • Ácido clorhídrico | HCl |
| • Ácido nítrico | HNO_3 |

5.1.1.2. Materiales y equipo

- Molino de bola
- Crisol de alúmina
- Vaso de precipitados de 100 ml
- Espátula
- Horno
- Balanza
- Molde para empestillar de $\text{Ø} = 12.7 \text{ mm}$
- Campana de extracción

5.1.2. Reactivos y materiales (obtención de depósitos de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$)

5.1.2.1. Reactivos y solventes

- Óxido de bario BaO
- Óxido de itrio Y_2O_3
- Óxido de cobre CuO
- Agua desionizada
- Alcohol isopropílico $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$
- Ácido clorhídrico HCl
- Ácido nítrico HNO_3
- Etilenglicol $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2$

5.1.2.2. Materiales y equipo

- Molino de bola
- Crisol de alúmina
- Vaso de precipitados de 100 ml
- Espátula
- Horno
- Balanza analítica
- Molde para empestillar de $\text{Ø} = 12.7 \text{ mm}$
- Campana de extracción
- Bastidor con malla de 32 hilos/cm con una abertura $\sim 0.19 \text{ mm}$)
- Sustratos de cobre (25.4 mm x 25.4 mm x 1mm)
- Mango de serigrafía
- Soportes de bastidor articulado

5.1.3. Materiales y equipo para la construcción del generador eléctrico

- Alambre magneto calibre 24 AWG.
- Borneras de interconexión eléctrica 4 vías $\varnothing=4$ mm.
- Núcleo de bobina de poliláctico (PLA).
- Base de estator de Polietileno UHMW-PE (Polietileno de ultra alto peso molecular), espesor 12.7 mm.
- Base de rotores de Polietileno UHMW-PE maquinado y tratado, espesor 8 mm.
- Soportes internos de Polietileno UHMW-PE maquinado y tratado, espesor 12.7 mm.
- Bancada de montaje superficial del generador de Polietileno UHMW-PE maquinado y tratado, espesor 12.7 mm.
- Base de los superconductores de Polietileno UHMW-PE maquinado, espesor 12.7 mm.
- Mica protectora para temperaturas criogénicas.
- Imanes de NdFeB de $\varnothing=29$ mm, espesor 8 mm, campo magnético $B=1T$.
- Tornillería diversa de acero inoxidable.
- Rodamiento de alta velocidad NSK 608Z $\varnothing=8$ mm.
- Flecha de transmisión AISI 4130 $\varnothing=8$ mm.
- Tubería de cobre de $\varnothing=12.7$ mm.
- Interconexiones de cobre tipo "T" $\varnothing=12.7$ mm
- Soldadura de estaño para tubería de cobre.
- Tanque de gas propano.
- Boquilla de soplete para tanque de gas propano.
- Chumaceras descentradas de alta velocidad NSK 608Z $\varnothing=8$ mm.
- Tornillo de banco de 50.8 mm.
- Taladro de banco con broquero de 2.54 mm
- Juego de brocas de HSS.
- Juego de destornilladores.
- Juego de destornilladores de precisión.
- Juego de llaves torx.
- Juego de pinzas.
- Juego de dados de alta resistencia.
- Torquímetro.
- Equipo de calibración y alineación superficial.
- Equipo de medición superficial.
- Equipo de medición de tolerancias.
- Desbastadora angular de 11.43 mm.
- Lijadora de superficie de 15.24 mm
- Máquina herramienta fresadora – Router.
- Máquina herramienta torno.
- Fresas de corte y perfilado de Router.

- Juego de desbastado de carburo de tungsteno.
- Soportes de carga en escuadra.
- Embobinadora con control de velocidad y contador de giros/revoluciones.
- Vóltmetro AC-DC.
- Amperímetro AC -DC.
- Óhmetro.
- Conexiones eléctricas banana – caimán.
- Placa de pruebas eléctricas protoboard de 830 puntos.
- Alambre de cobre recubierto tipo telefónico.
- Borneras de conexión superficial.
- Juego de resistencias electrónicas de montaje superficial de prueba de 2 W a 100 W.
- Miscelánea de cargas eléctricas de prueba.

5.2. Obtención del superconductor $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ por reacción de estado sólido

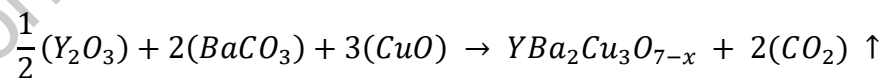
Se obtuvo el $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ superconductor en bulto por reacción de estado sólido a partir de los precursores Y_2O_3 , $BaCO_3$, CuO , con 99.99% de pureza en cada uno de ellos.

Tratamiento de secado

Se realizó un tratamiento térmico por separado a los precursores a 423 K durante 2 horas para eliminar la humedad.

Análisis estequiométrico

Se utilizó la siguiente reacción para la obtención de la composición nominal $YBa_2Cu_3O_{7-x}$



El valor de (x) en el oxígeno tiene que ser un valor de $x = \sim 0$, para obtener un superconductor con una T_c alta (Moure and Peña, 2015), y será resultante de los tratamientos térmicos que se realicen.

Molienda

Las cantidades pesadas se molieron por una hora en el molino de bolas antes de cada tratamiento térmico, excluyendo a los tratamientos de oxigenación.

Tratamientos térmicos y formación de pastillas

Los tratamientos térmicos se aplicaron a temperaturas superiores a 773 K para facilitar la sublimación de carbonatos (Klissurski and Rives, 1994; Amirabadizadeh et al., 2012). También consideramos los resultados consultados en la literatura, que indican que la temperatura entre 1023 K y 1173 K se beneficia la formación de la fase $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ con $[x = (0 \approx x \leq 0.65)]$ (Jin et al., 2017). Sin embargo, se deben evitar los tratamientos térmicos que excedan los 1223 K, ya que no se obtendrán fases superconductoras (Klissurski and Rives, 1994; Amirabadizadeh et al., 2012; Jin et al., 2017)

Los tratamientos térmicos se efectuaron en el orden que se describen.

- El primer tratamiento térmico se realizó a 1188 K por 11 horas y se dejó enfriar dentro del horno
- El segundo tratamiento térmico se efectuó a 1208 K por 9 horas, inmediatamente se realizó un tratamiento de oxigenación a 638 K por 4 horas, posteriormente se dejó enfriar dentro del horno.
- El tercer tratamiento se realizó a 1183 K por 10 horas, y continuamente se realizó un tratamiento de oxigenación a 723 K por 4 horas, posteriormente se dejó enfriar dentro del horno.
- El cuarto tratamiento térmico se hizo a 1188 K por 10 horas, posteriormente se dejó enfriar dentro del horno.
- El quinto tratamiento térmico se realizó a 1218 K por 9 horas, posteriormente se dejó enfriar dentro del horno.

Una vez finalizada la síntesis, el polvo obtenido se prensó en frío en el molde de 12.7 mm de \varnothing , para obtener el volumen de la siguiente manera; Como primer paso, se aplicaron 3 toneladas durante 5 minutos, luego la presión aumentó a 7 toneladas durante 5 minutos, luego aumentó a 12 toneladas y se mantuvo durante 12 minutos.

- El sexto tratamiento térmico fue a 1218 K por 3 horas.

5.3. Obtención de las películas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Molienda

La muestra en bulto de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ se trituró y molió para obtener un polvo resultante del compuesto.

Películas delgadas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Se obtuvo una mezcla del polvo superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ con ethylene glicol en una molalidad en conjunto de 4.32 mol/kg, la cual se preparó en baño ultrasónico por 2 horas.

La mezcla se depositó sobre 6 sustratos de Cu de 25.4 mm x 25.4 mm, a través de una malla de 32 hilos/cm con una abertura ~0.19 mm.

Las 6 muestras obtenidas por los depósitos se identificaron como YBCO-1D, YBCO-1D-373, YBCO-1D-473, YBCO-1D-573, YBCO-2D-473 y YBCO-2D-573.

Tratamientos térmicos

Las muestras YBCO-1D, YBCO-1D-373, YBCO-1D-473 y YBCO-1D-573 se obtuvieron con un solo depósito sobre el sustrato de Cu, y las muestras YBCO-2D-473 y YBCO-2D-573 se obtuvieron con dos depósitos sobre los sustratos de Cu.

A la muestra YBCO-1D no se le realizó ningún tratamiento térmico, para hacer una comparación con las otras muestras.

A las muestras YBCO-1D-373, YBCO-1D-473 y YBCO-1D-573 se les realizó un tratamiento térmico a 373 K, 473 K y 573 K por una hora respectivamente.

A las muestras YBCO-2D-473 y YBCO-2D-573 se les realizó un tratamiento térmico a 473 K y 573 K por una hora respectivamente.

5.4. Caracterización

Las propiedades estructurales del bulto y de las películas fueron evaluadas mediante Difracción de Rayos X, espectroscopia Raman, espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y Microscopía electrónica de barrido (SEM).

Se realizó una caracterización de resistencia eléctrica en función de la temperatura, para determinar el valor de T_c del bulto.

5.4.1. Difracción de Rayos X

La difracción por Rayos X es una caracterización utilizada para determinar diferentes propiedades de un material: estructura cristalina, orientación de los granos, cambios en los parámetros de red y la distinción entre fases de un material (Skoog et al., 2018), como sucede comúnmente en los superconductores.

En el momento en que la radiación electromagnética o rayos X atraviesan al material, el vector eléctrico de la radiación interactúa con los electrones de los átomos de la muestra para producir difusión (consiste en el flujo neto de átomos, iones o electrones dentro de un material). Cuando los rayos X son difundidos en la red cristalina del material, existen diferencias constructivas como destructivas entre los rayos dispersados, debido a que las distancias entre los centros de difusión son del mismo orden de magnitud que la longitud de onda de los rayos X (Skoog et al., 2018). Al chocar el haz de rayos X con la superficie de un cristal, forma un ángulo θ , en donde una porción del haz es difundida por la capa de átomos de la superficie. La porción no dispersada del haz penetra la segunda capa de átomos donde una fracción es difundida, y así sucesivamente con la tercera capa. El efecto acumulativo de esta difusión producida por los centros con separaciones regulares del cristal es la difracción del haz (Skoog et al., 2018).

Para que la difracción de rayos X ocurra se debe:

- Conocer que la separación entre las capas de átomos sean aproximadamente la misma que la longitud de onda de la radiación (Skoog et al., 2018).
- Los centros de dispersión estén distribuidos en el espacio de una manera muy regular (Skoog et al., 2018).

A través de la ecuación de Bragg (Cullity and Stock, 2014), se demostró que la difusión tiene lugar como consecuencia de la interacción de la radiación con los átomos localizados, en una determinada distancia, como se observa en la Figura 18.

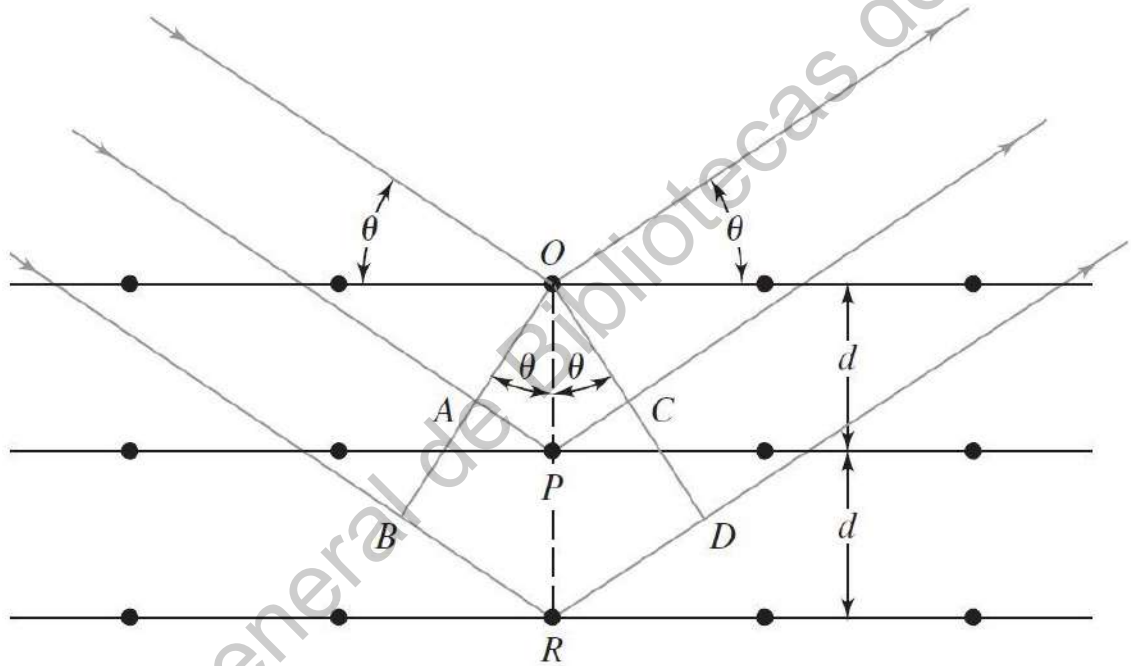


Figura 18. Difracción de Rayos X de un cristal (Skoog et al., 2018)

Si la distancia entre

$$AP + PC = n\lambda$$

Ec. 28

Donde n es un número entero, la radiación difundida está en fase en OCD, y el cristal parecerá reflejar la radiación X.

$$AP + PC = d \sin \theta$$

Ec. 29

Donde d es la distancia interplanar del cristal. Por consiguiente, las condiciones para que tenga lugar una interferencia constructiva del haz a un ángulo θ son:

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad \text{Ec. 30}$$

La ecuación 30 es la ecuación de Bragg, donde los rayos X son reflejados por el cristal si el ángulo de incidencia satisface dicha ecuación, ya que en los demás ángulos se producen interferencias destructivas.

Dentro de un difractograma o patrón de difracción de rayos X se puede tener un material cristalino con arreglos de los átomos diferentes, por lo cual un material puede presentar varios picos, pero todos localizados a un ángulo específico a la distancia entre dichos planos. Se observa tanto la intensidad de la difracción observada en función del ángulo de incidencia y la identificación de las fases presentes se realiza por comparación con los espectros de patrones disponibles o mediante cartas cristalográficas (Cullity and Stock, 2014; Skoog et al., 2018).

Entre los componentes del equipo se tiene una fuente, un dispositivo encargado de limitar los valores de longitud de onda de la radiación incidente, un porta muestras, un detector de radiación, un procesador de la señal y un sistema de lectura.

La fuente más común de rayos X es un tubo de rayos X, como se muestra en la Figura 19. Consta de un tubo al alto vacío en el cual está instalado un cátodo de filamento tungsteno y un ánodo (bloque de cobre con un blanco metálico depositado sobre la superficie). El blanco suele ser de tungsteno, wolframio, cromo, cobre, molibdeno, rodio, escandio, plata, hierro y cobalto.

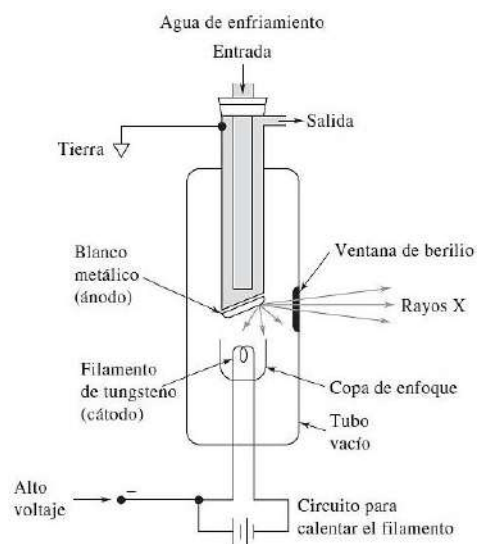


Figura 19. Esquema de un tubo de rayos X (Skoog et al., 2018)

El difractor es un aparato utilizado para determinar los ángulos en los que ocurre la difracción en la muestra, esta se coloca de modo que gire alrededor de un eje. El haz monocromático de rayos X y las intensidades de los haces difractados se detectan en el contador (Callister and Rethwisch, 2009).

La pastilla y las películas se caracterizaron usando difractor de rayos X (XRD) Siemens D5000 XRD usando radiación Cu- α como fuente de rayos X (1.5406 Å), en el rango de 2θ de 20° a 60° con un tamaño de paso de 0.02° .

5.4.2. Espectroscopia Raman

La espectroscopia Raman es una técnica espectroscópica vibracional no destructiva que puede detectar especies orgánicas e inorgánicas y medir la cristalinidad de los sólidos. Dicha técnica es sensible a la tensión, lo que permite su uso para detectar el estrés en un material (Ferraro et al., 2003).

Se basa en el efecto Raman, el cual consiste en la dispersión inelástica de fotones con excitaciones vibratorias elementales en el material. El fotón incidente pierde o gana energía en el proceso de dispersión por el material. Cuando la luz se dispersa desde la superficie de una muestra, dicha luz contiene principalmente longitudes de

onda que incidieron en la muestra (dispersión de Raleigh) pero también a diferentes longitudes de onda a intensidades muy bajas (pocas partes por millón o menos) representan una interacción de la luz incidente con el material. La interacción de la luz incidente con los fonones ópticos se denomina dispersión Raman (Skoog et al., 2018).

Por lo cual, la luz dispersada por la muestra se presenta de dos maneras: una fracción conservará la frecuencia de la luz incidente (dispersión elástica o Rayleigh) y otra tendrá diferente frecuencia (dispersión Raman, inelástica), tanto cediendo energía al medio (dispersión Stokes) o por haber tomado energía de él (dispersión anti – Stokes). El modo anti-Stokes es mucho más débil que el modo Stokes y es el modo Stokes el que generalmente se monitorea (Skoog et al., 2018).

El fotón que interactúa con el material sólido crea un “estado virtual”, este estado virtual no es una absorción completa del fotón, en su lugar es una perturbación de la molécula la cual excita o des-excita estados de energía vibracional o rotacional (Skoog et al., 2018).

La espectroscopia Raman solo es práctica cuando se utiliza una fuente de luz monocromática intensa como un láser. Al usar láseres con diferentes longitudes de onda y, por lo tanto, diferentes profundidades de absorción, es posible perfilar la muestra a cierta profundidad. La señal o luz dispersa débil se pasa a través de un monocromador doble para rechazar la luz dispersa de Raleigh y un fotodetector detecta las longitudes de onda desplazadas de Raman. La potencia del láser generalmente se mantiene por debajo de 5 mW para reducir el calentamiento de la muestra y su posible descomposición (Skoog et al., 2018).

Una limitación importante en la espectroscopia Raman es la interferencia causada por la fluorescencia, ya sea de impurezas o de la muestra misma. En un espectro Raman la intensidad es trazada como una función del número de onda Raman, expresado en cm^{-1} , el cual está relacionado a la diferencia en la frecuencia entre la luz dispersa y la radiación electromagnética incidente (Skoog et al., 2018)

La posición de la banda Raman en un espectro es determinada por dos factores: la masa reducida de los átomos y la constante de fuerza del enlace (Abou-Ras et al., 2011). El medio químico no influye en la masa reducida, sin embargo, si lo hace en la constante de fuerza del enlace químico. Un medio químico diferente puede causar un corrimiento en la banda de posición Raman. Si cada uno de estos enlaces presentes en el volumen medido de la muestra no tiene el mismo medio químico, puede existir una gama ligeramente diferente de constantes de fuerza, que pueden causar consecuentemente un ensanchamiento de bandas. Esto explica claramente porqué la banda Raman de un material amorfo es más ancho que la de un material cristalino (Vandenabeele, 2013).

La intensidad o potencia de una banda Raman normal depende de forma compleja de la polarizabilidad de la molécula, la intensidad de la fuente y la concentración del grupo activo, además de otros factores. Cuando no hay absorción, la potencia de la emisión Raman aumenta con la cuarta potencia de la frecuencia de la fuente. Las intensidades Raman suelen ser directamente proporcionales a la concentración de la especie activa. Desde este punto de vista, la espectroscopia Raman se parece más a la fluorescencia que a la absorción, en la cual la relación entre la intensidad y la concentración es logarítmica (Skoog et al., 2018).

Los espectros Raman tienden a mostrar menos amontonamiento de bandas que los espectros infrarrojos. Como consecuencia, es menos probable el traslape de picos en las mezclas, y las medidas cuantitativas son más sencillas. Además, los porta muestras en Raman no están sujetos al ataque de la humedad y las pequeñas cantidades de agua presentes en la muestra no interfieren (Skoog et al., 2018).

La manipulación de las muestras en espectroscopia Raman es más sencilla que en espectroscopia en el infrarrojo porque se puede usar vidrio para las ventanas, las lentes y otros componentes ópticos, en lugar de los haluros cristalinos que resultan más frágiles y menos estables en la atmósfera. Además, la fuente láser se puede enfocar con facilidad sobre una zona pequeña de la muestra y la radiación emitida también se puede enfocar de manera eficaz sobre la rendija de entrada o salida de

un espectrómetro. El resultado es que se pueden examinar muestras muy pequeñas. De hecho, un porta muestras común para muestras líquidas no absorbentes es un capilar ordinario como los que se usan para medir el punto de fusión del vidrio (Skoog et al., 2018).

Las mediciones de espectroscopia Raman de la pastilla y las películas, se llevaron a cabo en un sistema DXR2 científico Raman Thermo empleando una línea de excitación de 633 nm.

5.4.3. Espectroscopia de energía dispersiva (EDS) y microscopía electrónica de barrido (SEM)

El microscopio electrónico emplea un haz de electrones que es generado por un filamento incandescente. Los tres principales microscopios electrónicos son: Barrido, transmisión y emisión (Schroder, 2006).

El Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, por sus siglas en inglés), a través de electrones emitidos, que viajan a través del vacío, son acelerados por una rejilla cercana polarizada positivamente. Los electrones tienden a separarse debido a las fuerzas de repulsión electrostáticas que actúan entre ellos. Un campo eléctrico, generado por unas placas, se encarga de focalizar el haz y condensarlo. Cuando el haz llega a la muestra es deflactado hacia un punto mediante bobinas electromagnéticas, de manera que estas permiten realizar un barrido en la zona de interés. La interacción de estos procesos se utiliza para formar la imagen aumentada de la muestra y son esencialmente, electrones secundarios, electrones elásticos, rayos X y cátodo-luminiscencia. Cuando el microscopio es equipado con un espectrómetro de energía dispersiva de rayos X (EDS, por sus siglas en inglés) se puede obtener un análisis cualitativo o incluso semicuantitativo de una muestra en corto plazo. Son fácilmente detectables los elementos presentes en abundancia de uno por ciento en peso e incluso menos. En la espectroscopia de energía dispersiva, los fotones excitados son colectados como función de su energía y del espectro de la energía dependiente, la foto intensidad es analizada para determinar la composición química de la región de la muestra excitada bajo el haz de electrones.

Los detectores EDS colectan los rayos – X excitados simultáneamente en un intervalo amplio de energía, por lo tanto, altamente eficientes. Sin embargo, tienen una resolución de energía restringida, que en algunas ocasiones puede resultar en un traslape inaceptable de los picos característicos en la señal de rayos – X generada por diferentes componentes químicos de la muestra (Schroder, 2006; Brandon and Kaplan, 2008).

Un SEM consiste en un cañón de electrones, un sistema de lentes, bobinas de barrido, un colector de electrones y un tubo de rayos catódicos. La energía de los electrones es típicamente de 10 a 30 keV para la mayoría de las muestras, pero para las muestras aislantes la energía puede ser tan baja como varios cientos de eV. El uso de electrones tiene dos ventajas principales sobre los microscopios ópticos: son posibles aumentos mucho mayores ya que las longitudes de onda de los electrones son mucho más pequeñas que las de los fotones y la profundidad de campo es mucho mayor (Schroder, 2006).

Una parte importante del haz pierde energía mediante la excitación de procesos inelásticos con los átomos del material. Los principales procesos involucrados en la pérdida de energía son: la producción de electrones secundarios, la excitación de fonones y plasmones, la emisión de electrones Auger, la producción de rayos X por radiación de frenado (“Bremsstrahlung”), y la producción de radiación electromagnética en infrarrojo, visible y ultravioleta debido a transiciones electrónicas.

La imagen en un SEM se produce escaneando la muestra con un haz de electrones enfocado y detectando los electrones secundarios y/o retro dispersados. Los electrones secundarios forman la imagen SEM convencional. La energía de los electrones secundarios emitidos es inferior a 100 eV, y su rendimiento es muy alto, es decir, por cada electrón incidente podemos obtener varios electrones secundarios. Entonces así, una parte del haz de electrones incidente es absorbido por el material y la otra es expulsada como electrones secundarios y elásticos. De este balance se

genera una corriente, eléctrica a tierra que repone (o elimina) ese defecto (o exceso) de electrones y que en algunos casos también puede utilizarse para crear la imagen. Como hemos indicado, no todos los electrones que inciden pierden energía. Una parte importante de ellos son dispersados elásticamente, es decir, re-emitidos por el material en todas las direcciones y con la misma energía que llegaron. Los electrones retro dispersados también pueden formar una imagen, los rayos X se usan en la micro sonda electrónica, la luz emitida se conoce como cátodo luminiscencia y los electrones absorbidos se miden como corriente inducida por haz de electrones. Por otra parte, hay electrones que debido a su alta energía producen rayos X mediante la creación de transiciones electrónicas internas, y que como ya se vio pueden ser utilizados para obtener señal espectroscópica (Schroder, 2006). Todas estas señales se pueden detectar y amplificar para controlar el brillo de un tubo de visualización de rayos catódicos escaneado en sincronismo con el escaneo del haz de muestra en el SEM (Schroder, 2006). De este modo, se establece una correspondencia uno a uno entre cada punto de la pantalla y cada punto de la muestra.

El contraste dentro de una imagen en un SEM depende de varios factores. Para una muestra plana y uniforme, la imagen no muestra contraste. Sin embargo, si la muestra consta de materiales con diferentes números atómicos, se observa un contraste si la señal se obtiene de electrones retro – dispersados, porque el coeficiente de retro – dispersión aumenta con el número atómico. El contraste también está influenciado por las condiciones de la superficie y por los campos eléctricos locales. Pero la principal característica de mejora de contraste de SEM es la topografía de muestra. Los electrones secundarios se emiten desde los 10 nm superiores de la superficie de la muestra. Cuando la superficie de la muestra se inclina desde la incidencia del haz normal, la trayectoria del haz de electrones que se encuentra dentro de estos 10 nm aumenta en el factor $1/\cos \theta$ donde θ es el ángulo de la incidencia normal ($\theta = 0^\circ$) para la incidencia normal (Schroder, 2006).

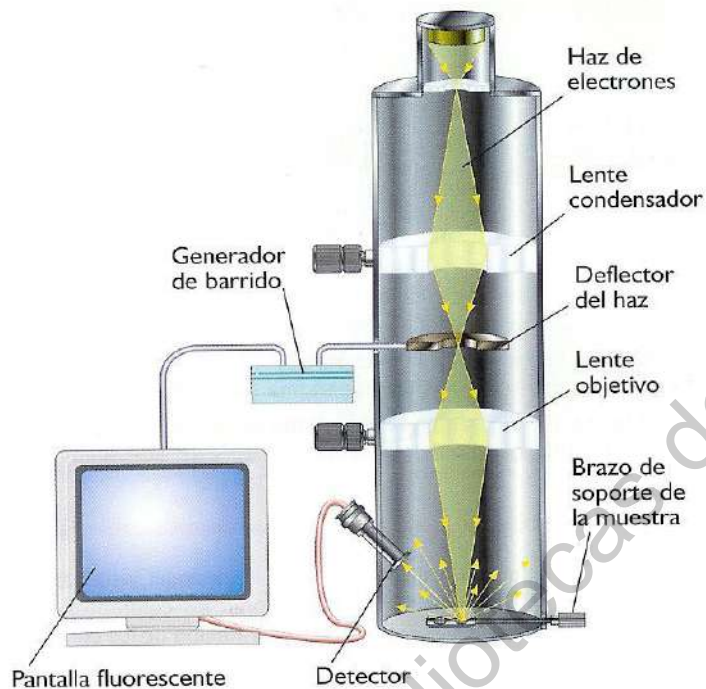


Figura 20. Esquema de un microscopio electrónico de barrido (SEM)

La morfología de la superficie de la pastilla y las películas se observó mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM) en un equipo de emisión de campo Jeol modelo JSM-7401F, la cuantificación de la concentración atómica se realizó mediante espectrometría de dispersión de energía (EDS) con un voltaje de aceleración de 20 kV para EDS y 5kV para SEM.

5.4.4. Determinación de T_c por medición de resistencia eléctrica.

El método de medición por 4 puntas se emplea para medir la resistividad de diversos dispositivos eléctricos, y se emplea principalmente con superconductores. Es una medición absoluta sin recurrir a patrones calibrados, y que se emplea para proporcionar estándares para comparaciones de valores de resistividad. La gran diferencia con el método de 2 puntas, que pareciera ser más fácil de aplicar, recae en que la interpretación de los datos recopilados es más complicada (Schroder, 2006).

En la Figura 21, se observa el esquema donde se suministra una corriente eléctrica (I), y se mide la diferencial de potencial (V).

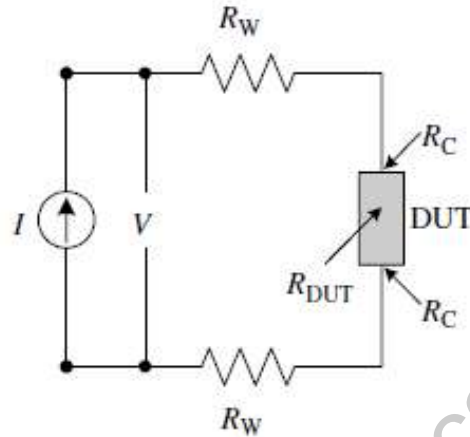


Figura 21. Medición de resistencia eléctrica a través de dos puntas

Para determinar la resistencia del dispositivo bajo prueba (por sus siglas en inglés: Device Under Test DUT), se realiza el siguiente análisis

$$R_T = \frac{V}{I} = 2R_W + 2R_C + R_{DUT}$$

donde R_W es la resistencia del cable, R_C la resistencia de contacto y R_{DUT} es la resistencia del dispositivo bajo prueba. Bajo esta configuración de medición es difícil determinar R_{DUT} . La solución es el método de 4 puntas, como se observa en la Figura 22. El diferencial de voltaje se mide con dos contactos adicionales. Se observa que en las líneas del voltaje contiene a R_W y R_C , como sucede con la línea de corriente suministrada.

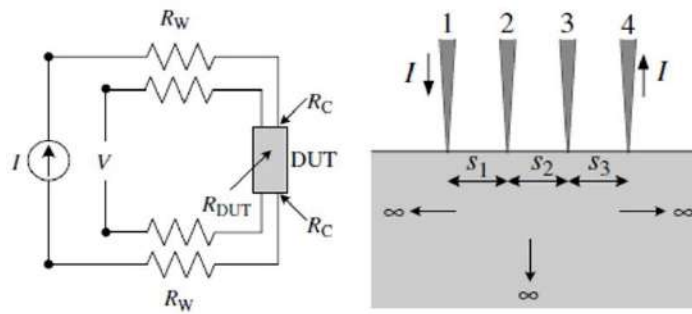


Figura 22. Medición de resistencia eléctrica a través de 4 puntas

Los contactos de medición se tienen que colocar a una distancia similar para evitar pérdidas energéticas y que estas alteren las lecturas. Se debe tomar en cuenta que la corriente que fluye a través de la línea de voltaje es muy baja debido a la alta impedancia de entrada del voltímetro (alrededor de 10^{12} Ohms o más). Por lo tanto, las caídas de voltaje a través de R_W y R_C , son insignificamente pequeñas y el voltaje medido es esencialmente la caída de voltaje a través del DUT. Al usar este método de 4 puntas en lugar de dos, hemos eliminado las caídas de voltaje parasitarias, a pesar de que las terminales de voltaje contactan al dispositivo en los mismos terminales de contacto que las terminales de corriente (Schroder, 2006).

Para el caso en particular de mediciones de resistencia eléctrica en superconductores a temperaturas criogénicas, se coloca el superconductor junto a un sensor de temperatura especial de platino – iridio, en un cabezal de inmersión en nitrógeno o helio líquidos. La interconexión se muestra en la Figura 23, en donde se hace circular una corriente con valor de 140 mA en los puntos 1 y 4, y se mide la diferencia de potencial en los puntos 2 y 3.

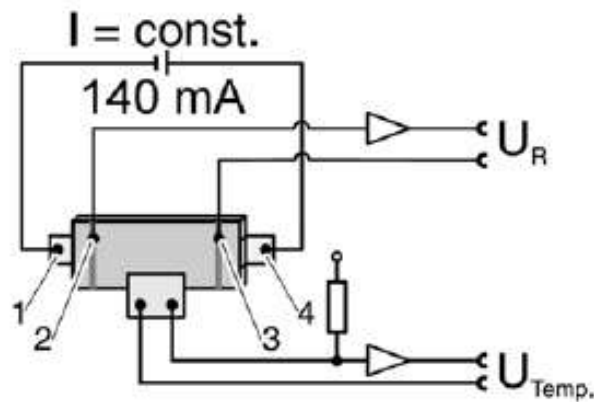


Figura 23. Circuito del módulo de medición con el superconductor

El valor de temperatura medido por el sensor de temperatura de platino-iridio se linealiza y se convierte en una señal de voltaje de 0 hasta 200 mV, correspondiente a un rango de temperatura de 0 a -200 °C. La alimentación es suministrada por la unidad de fuente de alimentación. El dispositivo está calibrado, de tal manera que al alcanzar la temperatura de transición el valor del voltaje medido es cercano a 0 volts, para tener un voltaje de compensación y así los voltajes de salida son corregidos y cuantificados (Leybold, 2020).

Para la caracterización eléctrica de la pastilla se colocaron contactos con pintura Ag y conductores de Cu de alambre magneto de calibre 40, con una separación equidistante de 1 mm. La resistencia de comparación del sistema fue de 30 Ohms con una diferencia de potencial pico a pico de 10 voltios. Las mediciones eléctricas se llevaron a cabo en una atmósfera de He líquido para alcanzar bajas temperaturas de hasta 61.25 K.

5.5. Modelado de densidad de flujo magnético del rotor

Se realizó el diseño de un generador eléctrico CA asíncrono, con inducción magnética por un Bi-rotor de imanes permanentes de NdFeB con elementos superconductores para incrementar la concentración de las líneas de campo magnético hacia la armadura.

La armadura del estator está conformada por 4 bobinas de 60 mm de largo y un diámetro de 60 mm, con espiras de alambre magneto calibre 24 AWG. Se diseñó un núcleo de devanado de la bobina especial para el estator, medidas en el Anexo 1, Figura 24.

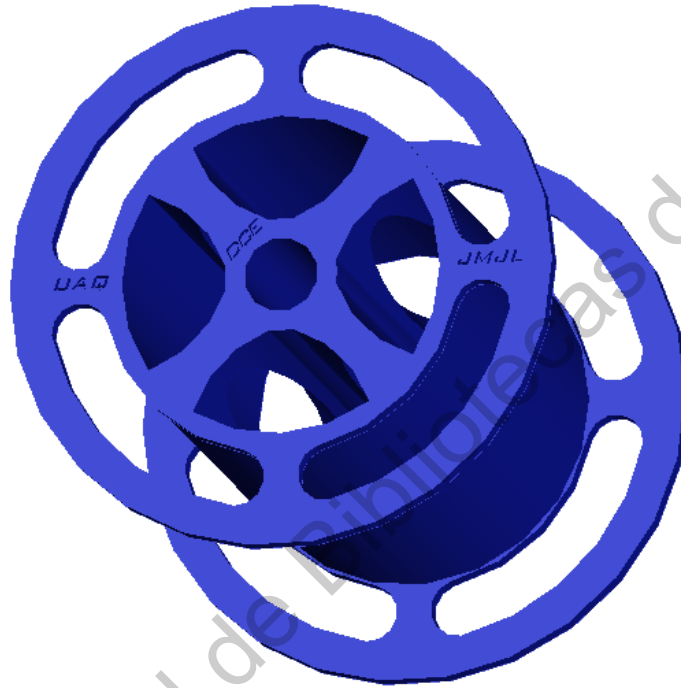


Figura 24. Núcleo de devanado de bobina

Las bobinas están en conexión mixta ondulada e imbricada para incrementar el valor de salida de voltaje en corriente alterna, así como la corriente, Figura 25.

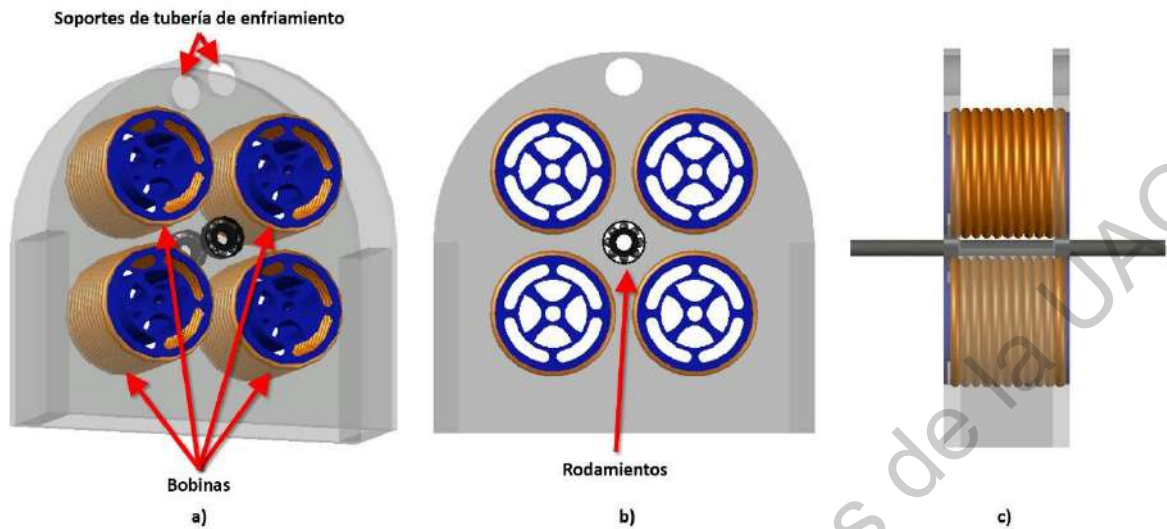


Figura 25. Diseño de la armadura del estator. a) Arreglo de bobinas eléctricas. b) Vista Frontal del estator. c) Corte transversal del estator.

La inducción de la armadura será a través de un rotor frontal y otro posterior con cuatro imanes con polaridades de campo invertidas cada uno direccionados hacia los diámetros de las bobinas, permitiendo una doble inducción para cada bobina en la armadura del estator, Figura 25. El conjunto de los dos rotores forma el Bi-rotor, Figura 26. Las medidas de los componentes del estator y los rotores se muestran en el Anexo 2.

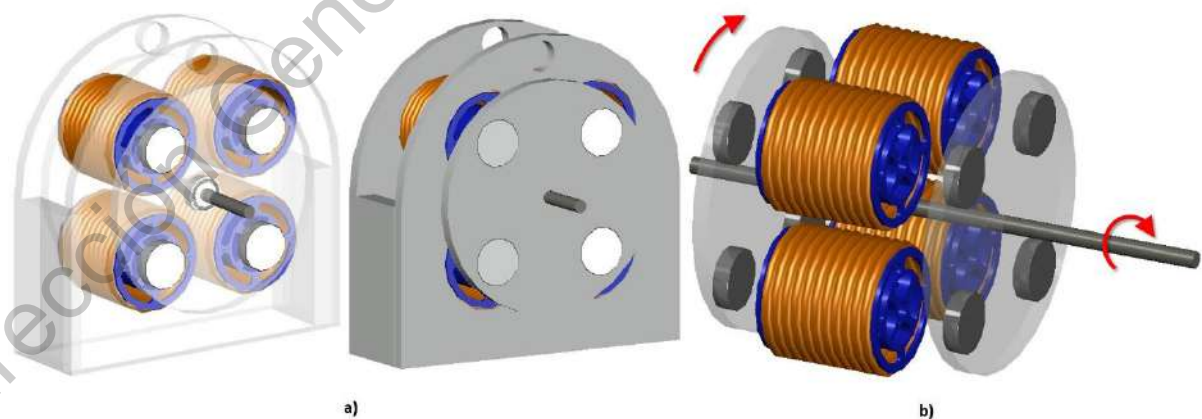


Figura 26. a) Bi-rotor montado en el estator. b) Posicionamiento frontal y posterior de los imanes a las bobinas

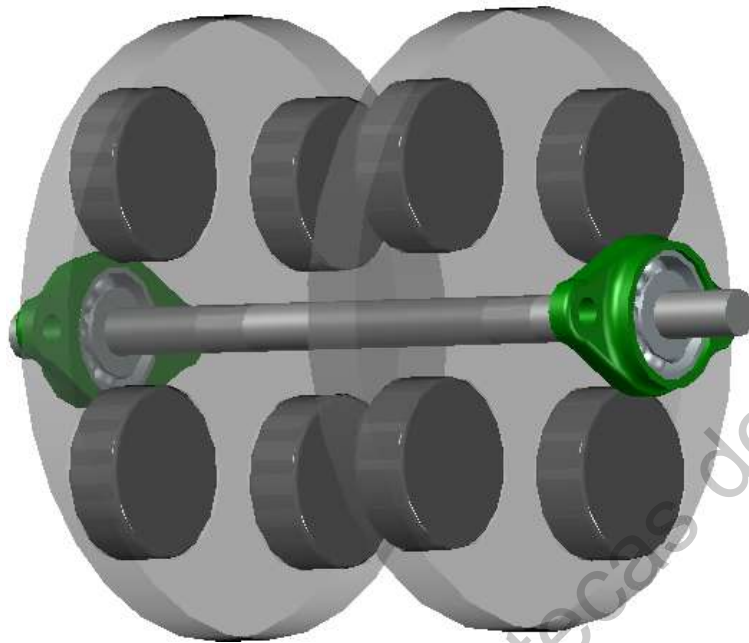


Figura 27. Vista isométrica del Bi-rotor

Se realizó un análisis individual a las bobinas, de la inducción de las líneas de campo magnético de los imanes permanentes, permitiendo determinar la densidad de flujo magnético en el interior de la bobina a través del software Vizimag.

En primera instancia, se realizó el modelado de las líneas de campo magnético de un solo imán en posición frontal al diámetro de la bobina, obteniendo un valor de campo igual a $3.15 \times 10^{-2} \text{ T}$ en el interior de la bobina, como se observa en la Figura 28.

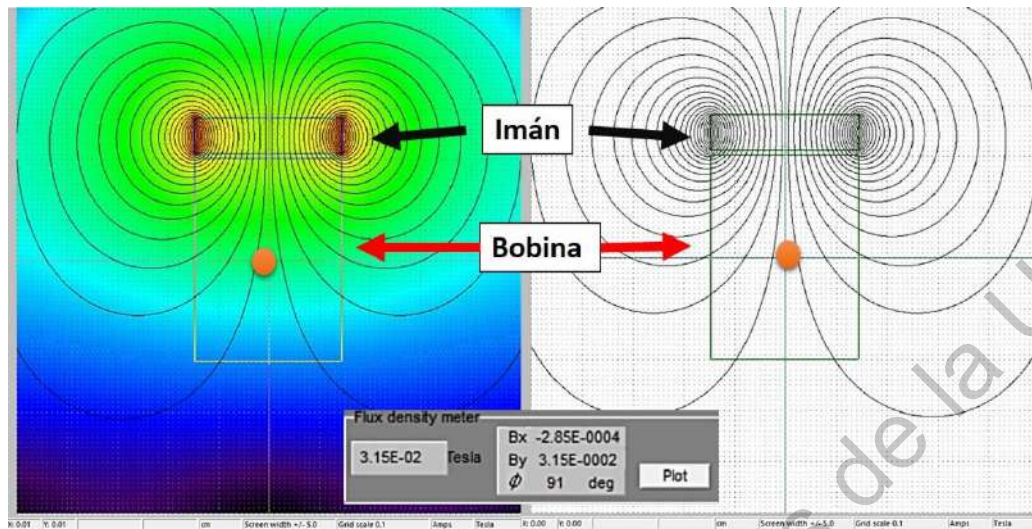


Figura 28. Simulación de la inducción de las líneas del campo magnético de un imán en el interior de una bobina

Posteriormente se realizó un modelado de las líneas de campo magnético de dos imanes de polaridad invertida, en posición frontal y posterior a los diámetros de cada bobina, Figura 29. En esta simulación, los dos imanes conformarían el Bi-rotor de inducción. El valor obtenido de la densidad de flujo magnético es de 6.26×10^{-2} T, que significa un incremento del 98% en el interior de la bobina, y que se atribuye a el posicionamiento de los dos imanes.

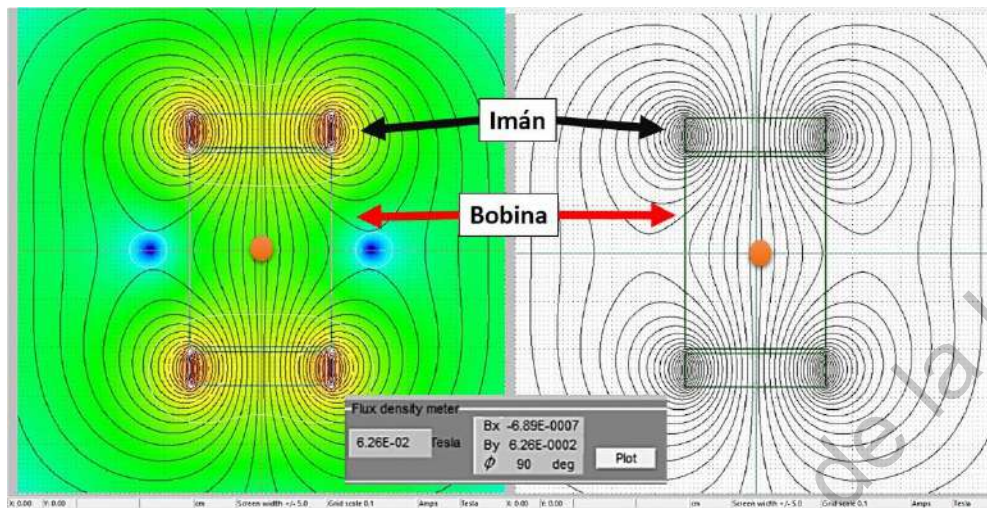


Figura 29. Simulación de la inducción de las líneas de campo magnético de los imanes en el interior de la bobina

Los superconductores se posicionarán en la parte trasera de los imanes y estarán fijos, como se observa en la Figura 30.

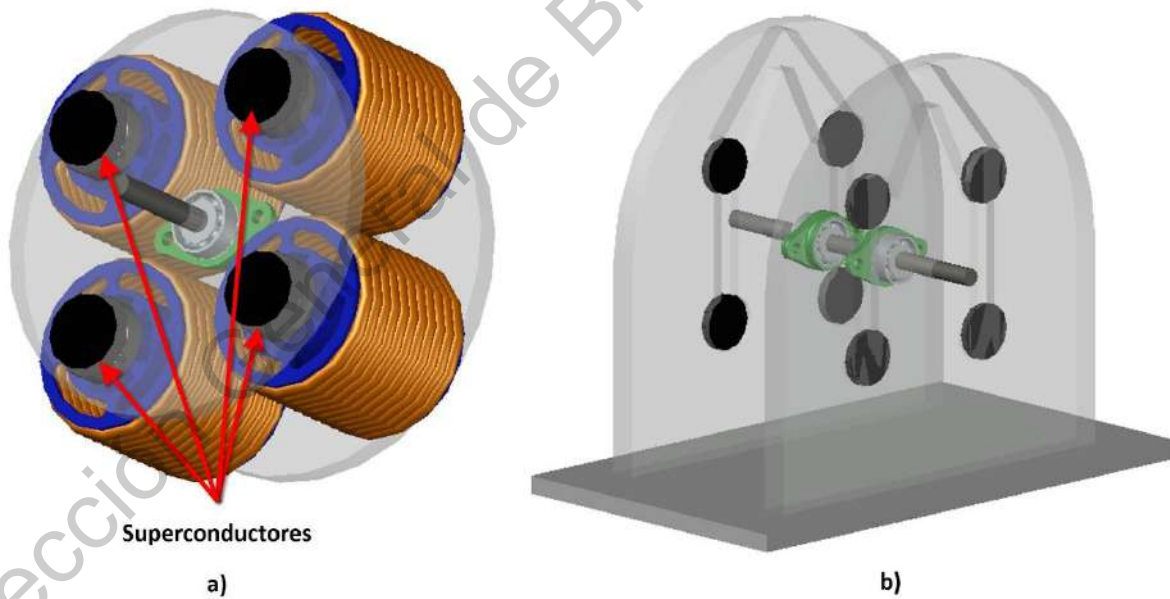


Figura 30. Modelado de diseño del generador. a) Posicionamiento de los superconductores. b) Soporte de montaje de los superconductores

En la Figura 31, se observa la simulación de la interacción de las líneas de campo magnético de 4 imanes en dos bobinas, y los superconductores. Se aprecia que, aunque dos imanes no están interactuando directamente con la bobina cercana, estos llegan a cambiar la posición de las líneas de campo magnético; además, los superconductores concentran una mayor cantidad de líneas del campo en el interior de la bobina. El valor de la densidad de flujo magnético en el interior de la bobina, a partir de la interacción de los imanes y los superconductores es de 8.67×10^{-2} T. En la Figura 32, se observa la colocación de los superconductores y los imanes con respecto a las bobinas.

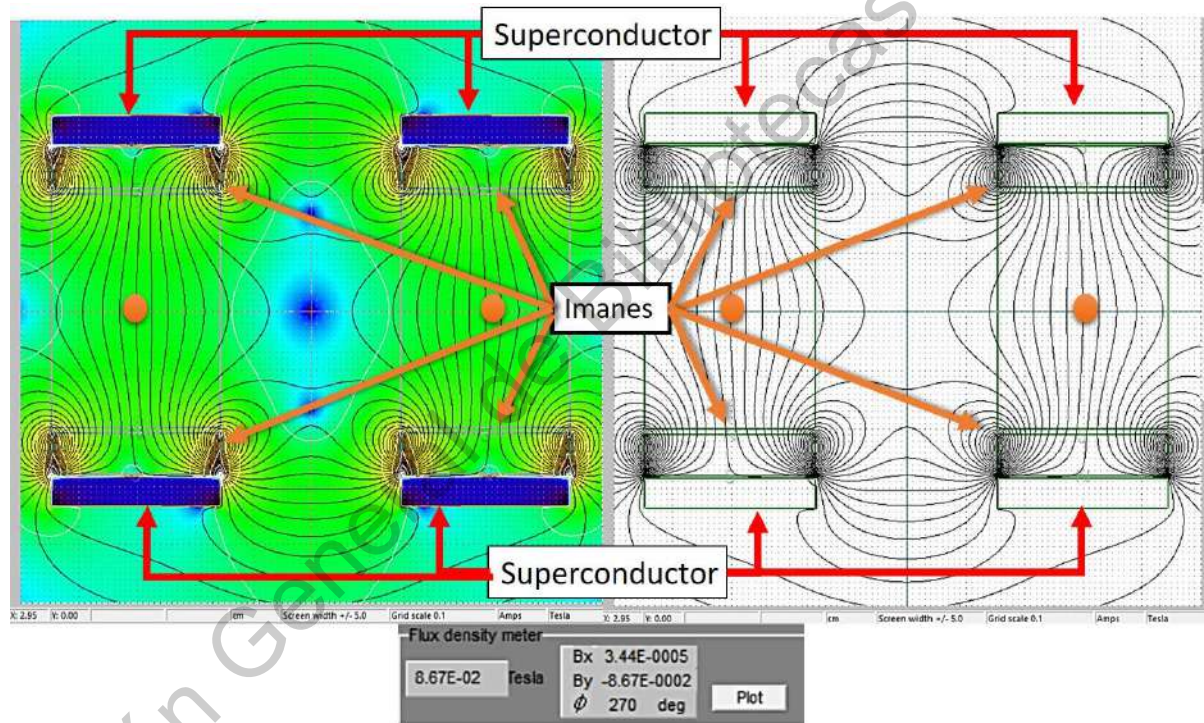


Figura 31. Modelado de la inducción de las líneas de campo magnético por los imanes y los superconductores

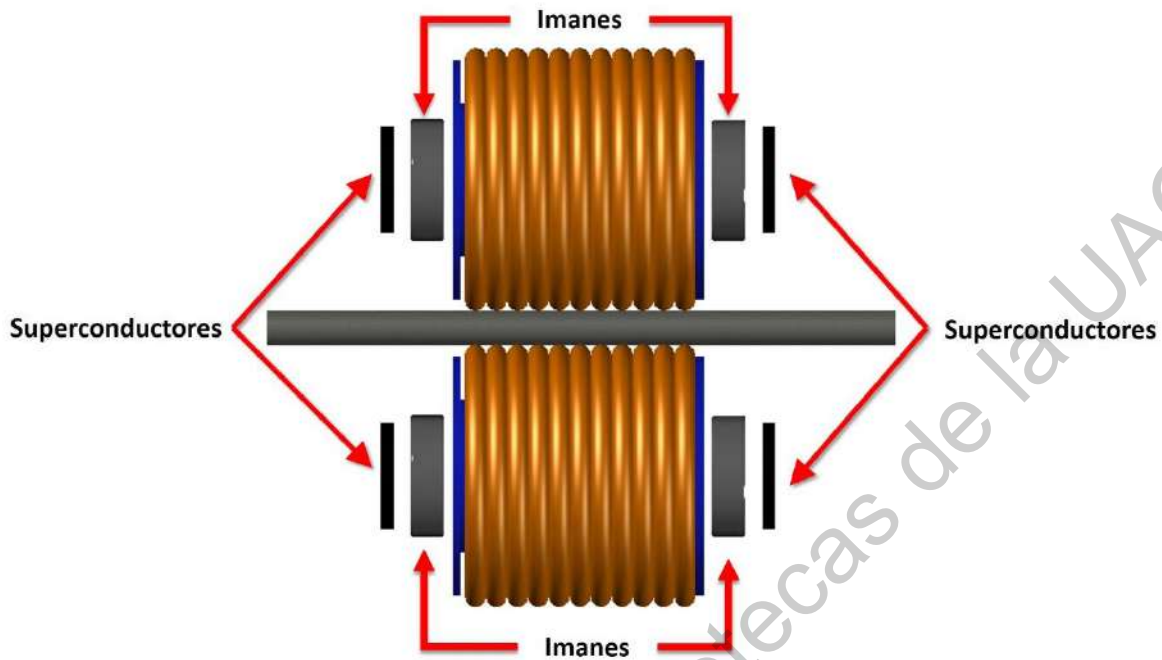


Figura 32. Esquema de posición de los imanes, los superconductores y las bobinas

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la caracterización estructural y eléctrica del bulto superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$; así como, de los depósitos realizados.

6.1. Caracterización estructural del superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ en bulto

El patrón difracción de rayos X que se muestra en la Figura 33, corresponde a la muestra en bulto obtenida por reacción de estado sólido. En el cual se identificaron los picos característicos pertenecientes a la fase superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$. Los cuales se indexaron usando el archivo de difracción de polvos 50-1886. Como resultado de cada tratamiento térmico, el polvo cambió de color lentamente a un tono más oscuro con cada paso. Algunos autores informan que el cambio de color de los polvos a verde es indicativo de la formación de una fase Y_2BaCuO_5 no superconductor (Rao, 1988; Koblischka and Koblischka-Veneva, 2003; Argyropoulou et al., 2007), efecto que no fue presentado en las muestras del presente trabajo.

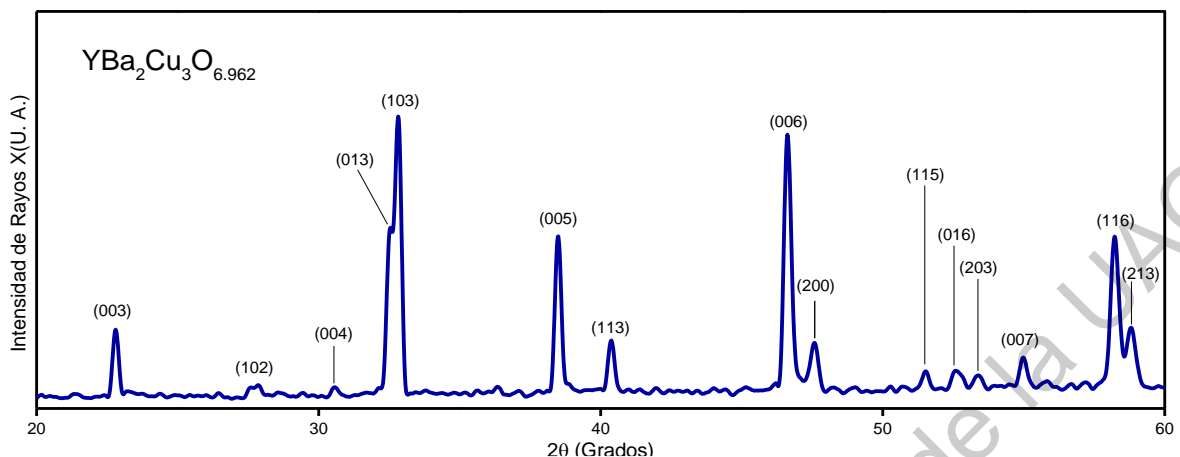


Figura 33. Patrón de difracción de rayos X de la muestra en bulto identificada con fase superconductora $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$

El superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$ en bulto pertenece al grupo espacial Pmmm (47), con una estructura ortorrómbica con los siguientes parámetros de red: $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$, $a=3.819 \text{ \AA}$, $b=3.884 \text{ \AA}$ y $c=11.683 \text{ \AA}$. Estos valores se cotejaron con los informes anteriores de Klissurski (Klissurski and Rives, 1994), Harabor (Harabor et al., 2019) y Beno (Beno et al., 1987).

Se determinaron los tamaños de cristal a partir de los picos característicos por la metodología de Scherrer (Langford and Wilson, 1978; Cullity and Stock, 2014; Harabor et al., 2014), ecuación 31. A su vez, se determinó el tamaño de cristal a través de la metodología de Williamson-Hall (Williamson and Hall, 1953), ecuación 32, contemplando los esfuerzos residuales en la estructura, ecuación 33, a partir del ancho completo a la mitad máxima (FWHM, por sus siglas en inglés) de los picos difracción de rayos X.

$$D = \frac{\lambda \cdot k}{\beta \cdot \cos\theta} \quad \text{Ec. 31}$$

$$\beta \cdot \cos\theta = \varepsilon \cdot \sin\theta + \frac{\lambda \cdot k}{D} \quad \text{Ec. 32}$$

$$\varepsilon = \frac{\beta \cdot \cos\theta}{4} \quad \text{Ec. 33}$$

Donde (β) es el FWHM, (θ) los ángulos de Bragg de los picos de difracción, (λ) es la longitud de onda de los rayos X emitida por el objetivo de cobre con valor de 1.5406 Å, (D) es el tamaño de cristal y (k) como la constante de forma con un valor de 0.93 (Patterson, 1939).

Los tamaños de cristal obtenidos por las ecuaciones 31 y 32 en el bulto con fase superconductora $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$ se enlistan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Propiedades estructurales del bulto con fase superconductora $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$ obtenidas por difracción de rayos X

2θ	hkl	Tamaño de cristal *Scherrer- Debye (nm)	Esfuerzo *Scherrer- Debye (10^{-4})	Tamaño de cristal *Williamson-Hall (nm)	Esfuerzo *Williamson-Hall (10^{-3})
22.84	003	83	4.2	77	1.8
27.86	102	126	2.8		
30.57	004	82	4.2		
32.53	013	16	46.1		
32.82	103	54	6.4		
38.5	005	62	5.6		
40.37	113	88	3.9		
46.62	006	50	7.0		
47.58	200	107	3.2		
51.5	115	78	4.4		
52.6	016	77	4.5		
53.4	203	78	4.4		
54.98	007	49	7.1		
58.22	116	51	6.9		
58.8	213	89	3.9		

El promedio del tamaño de cristal en el bulto obtenido por la ecuación de Scherrer-Debye es ~73 nm, muy similar al estimado por el método Williamson-Hall. Esto se debe al hecho de que el método de cálculo de Williamson-Hall considera FWHM como una combinación lineal de esfuerzos de tensión y tamaño de partícula. Por lo tanto, el tamaño del cristal será mayor en comparación con Scherrer-Debye. El tamaño del cristal también es similar a los valores de la literatura informados por (Oku, 2014). La variación en los tamaños de cristal estimados por la ecuación de

Scherrer-Debye puede atribuirse a la difusión en la técnica de estado sólido y los tratamientos térmicos que se realizan a temperaturas más bajas que la de fusión; causando el crecimiento de cristales en mayor proporción por la disminución de la cantidad de cristales pequeños, teniendo en cuenta las tensiones residuales (Terrell A., 1992). Además, las temperaturas de sinterización tuvieron una gran influencia en el contenido de oxígeno disponible; y por lo tanto, esto influirá en una mejor conductividad eléctrica en la muestra superconductora (Terrell A., 1992).

La Figura 34 muestra la morfología de la superficie de la muestra de fase superconductora $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$ medida por SEM. La superficie de la muestra consiste en una aglomeración de granos pequeños y grandes, con la presencia de porosidades. El tamaño de grano mínimo fue de $\sim 0.15 \mu\text{m}$, con un tamaño de grano máximo de $\sim 14 \mu\text{m}$ y un promedio de $\sim 3 \mu\text{m}$. La presencia de granos grandes favorece la conductividad eléctrica debido a la disminución de los límites de los granos (Jin et al., 2017). La presencia de granos pequeños se puede atribuir a los granos resultantes que no pudieron crecer para formar granos más grandes debido a los procesos de sinterización.

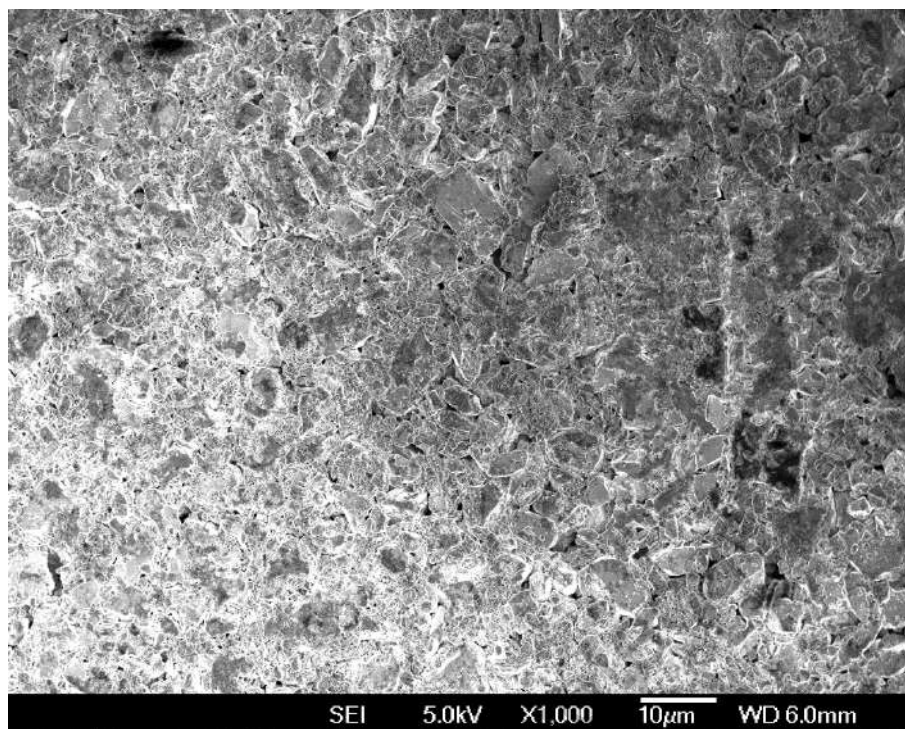


Figura 34. Imagen SEM del bulto con fase superconductora $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$

La caracterización EDS nos permitió estimar el promedio atómico de cada elemento que compone la muestra superconductora, obteniendo 5.02% para itrio, 15.83% para bario, 23.20% para cobre y 55.95% para oxígeno, sin mostrar la presencia de otro elemento químico. Estos promedios son muy similares a los que deben obtenerse para una disposición atómica (123) con variaciones de oxígeno 7-x (Jin et al., 2017). La cantidad de oxígeno en un superconductor altera las dimensiones de las celdas unitarias que lo componen y, por lo tanto, altera las propiedades estructurales que influyen en las propiedades eléctricas debido a la anisotropía característica de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

En la Figura 35 (a), se muestra el arreglo y posiciones típicas de los elementos que componen la celda unitaria del superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, definiendo a los átomos Cu₂, O₂ y O₃ enlazados para formar los planos CuO_2 . En la Figura 35 (b) se observa cómo los átomos de O₁ y Cu₁ forman las cadenas CuO orientadas paralelamente en

el eje c; así como la formación de los planos CuO y BaO. El átomo de oxígeno O4 enlaza los planos CuO₂ con las cadenas de CuO.

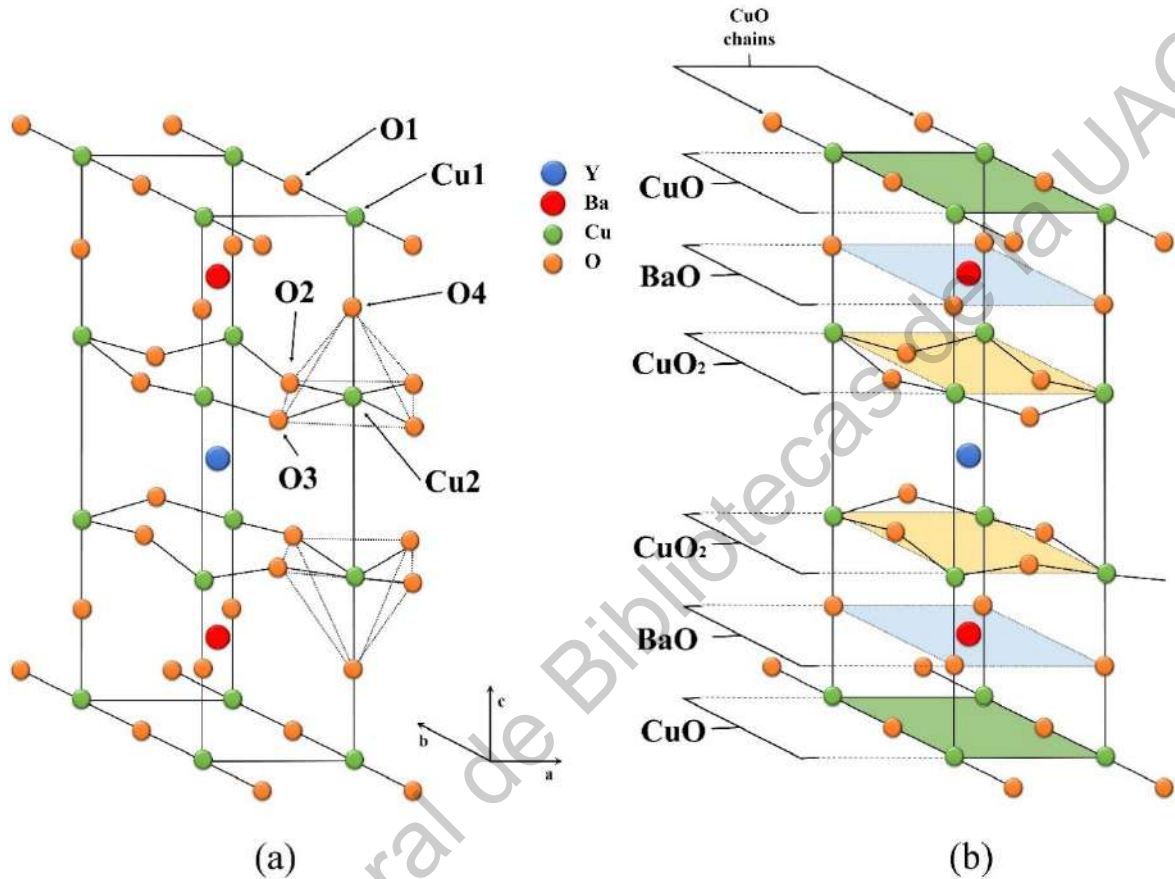


Figura 35. (a) Celda unitaria característica del superconductor de alta temperatura YBa₂Cu₃O_{7-x}. (b) Identificación de los planos significativos en la celda unitaria y de las cadenas CuO.

La Figura 36 muestra los espectros Raman para la muestra en bulto con fase YBa₂Cu₃O_{6.962} que tiene vibraciones polarizadas en diferentes ejes, como lo menciona Iliev (Iliev et al., 1996). Otros autores identifican estructuras como Ortho I y Ortho II, con modos activos Raman 5A_g + 5B_{2g} + 5B_{3g} y 11A_g + 4B_{1g} + 11B_{2g} + 8B_{3g} respectivamente. En Ortho I, encontramos cinco modos de vibración Raman polarizados en el eje Z debido a la intensidad exhibida por estas ondas, que a su vez dependen de la cantidad de oxígeno, la ruta de síntesis y la longitud de onda utilizada

(Benó et al., 1987; Iliev et al., 1996; Iliev et al., 2008; Bakr et al., 2013; Liarokapis, 2017). Además, la espectroscopia Raman mostró modos vibracionales correspondientes a Ba en 115 cm^{-1} , Cu (2) a 145 cm^{-1} pertenecientes a la simetría de Ag. Además, se identificaron O (2) y O (3) a 337 cm^{-1} con vibraciones antisimétricas o desfasadas, así como O (4) a 500 cm^{-1} . Al mismo tiempo, se identificaron modos vibracionales pertenecientes a $*\text{O}(2, 3)$, siendo vibraciones simétricas o en fase a 446 cm^{-1} . Estos modos de vibración corresponden a los planos característicos de CuO_2 , donde hay una resistencia eléctrica más baja y se permite la formación de corrientes altas a $T_c > 90\text{ K}$ (Naito et al., 2001; Zheng et al., 2016; Khadzhai et al., 2019). Sin embargo, los valores de T_c del material anisotrópico $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ están estrechamente relacionados con el valor x . La ubicación de los planos de CuO_2 y los elementos se observan en la celda unitaria de la Figura 35. En los espectros Raman, los modos vibracionales ($\sim 178\text{-}190$, $\sim 215\text{-}250$, $\sim 285\text{-}290$, $\sim 380\text{-}413$, ~ 540 , ~ 580 y $\sim 600\text{ cm}^{-1}$) del compuesto también fueron identificados y se atribuyen a vacancias parciales de oxígeno (Thomsen et al., 1988; Ivanov et al., 1995; Iliev et al., 1996; Panfilov et al., 1998; Iliev et al., 2008; Hong et al., 2010; Barboy et al., 2011; Bakr et al., 2013; Chromik et al., 2017; Liarokapis, 2017). El análisis Raman debe hacerse con cuidado ya que $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ y BaCuO_2 tienen modos vibracionales similares en 435 cm^{-1} y 500 cm^{-1} . Sin embargo, BaCuO_2 tiene otro modo cerca de 640 cm^{-1} (Bhadra et al., 1988), el cual no se presentó en esta muestra. Por lo tanto, a través del análisis de espectroscopia Raman de la Figura 36, se corrobora la ausencia de elementos diferentes a la composición del superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ o la formación de otros compuestos.

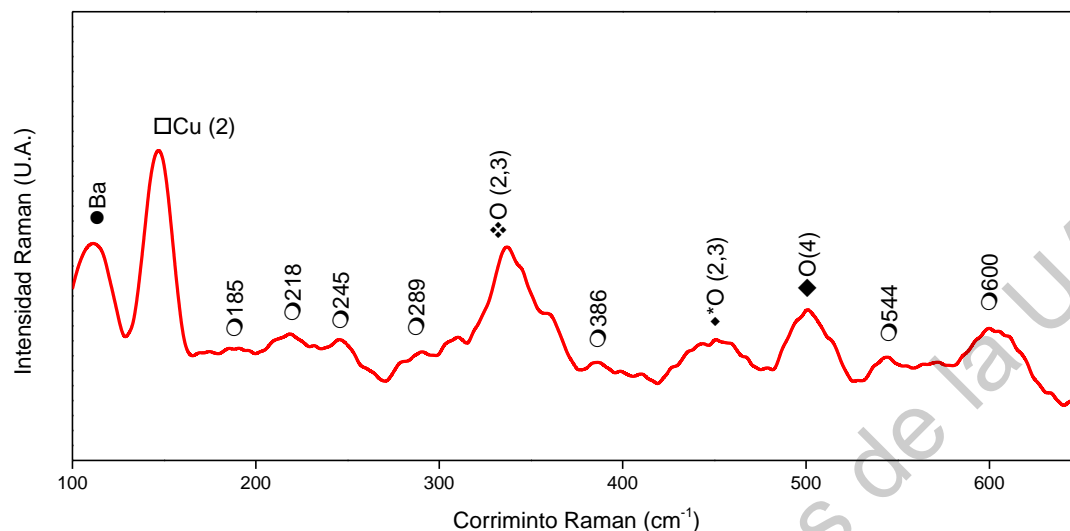


Figura 36. Espectroscopia Raman de la muestra superconductora en bulto $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$

6.1.1. Caracterización eléctrica de la muestra superconductora $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

La Figura 37, muestra el gráfico obtenido para la medición de la resistencia eléctrica en función de la temperatura, mediante la técnica de cuatro puntos en la muestra.

El superconductor exhibió una pendiente de temperatura de transición en un rango de (87 - 94 K), similar a lo que se informa en (Jasim et al., 2016). La temperatura crítica (T_c) se determinó a partir de dR / dT con respecto a la temperatura, obteniendo un valor de 91.462 K; este valor de temperatura es un valor más alto que el promedio ya que en la literatura se obtienen valores cercanos a 90 K (Eremenko et al., 2001; Naito et al., 2001; Kalta et al., 2011; Khadzhai et al., 2019). El valor de la temperatura crítica se puede atribuir a la estructura anisotrópica del $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, debido a la baja resistividad que aparece en los planos de CuO_2 , que a su vez están estrechamente relacionados con la cantidad de oxígeno.

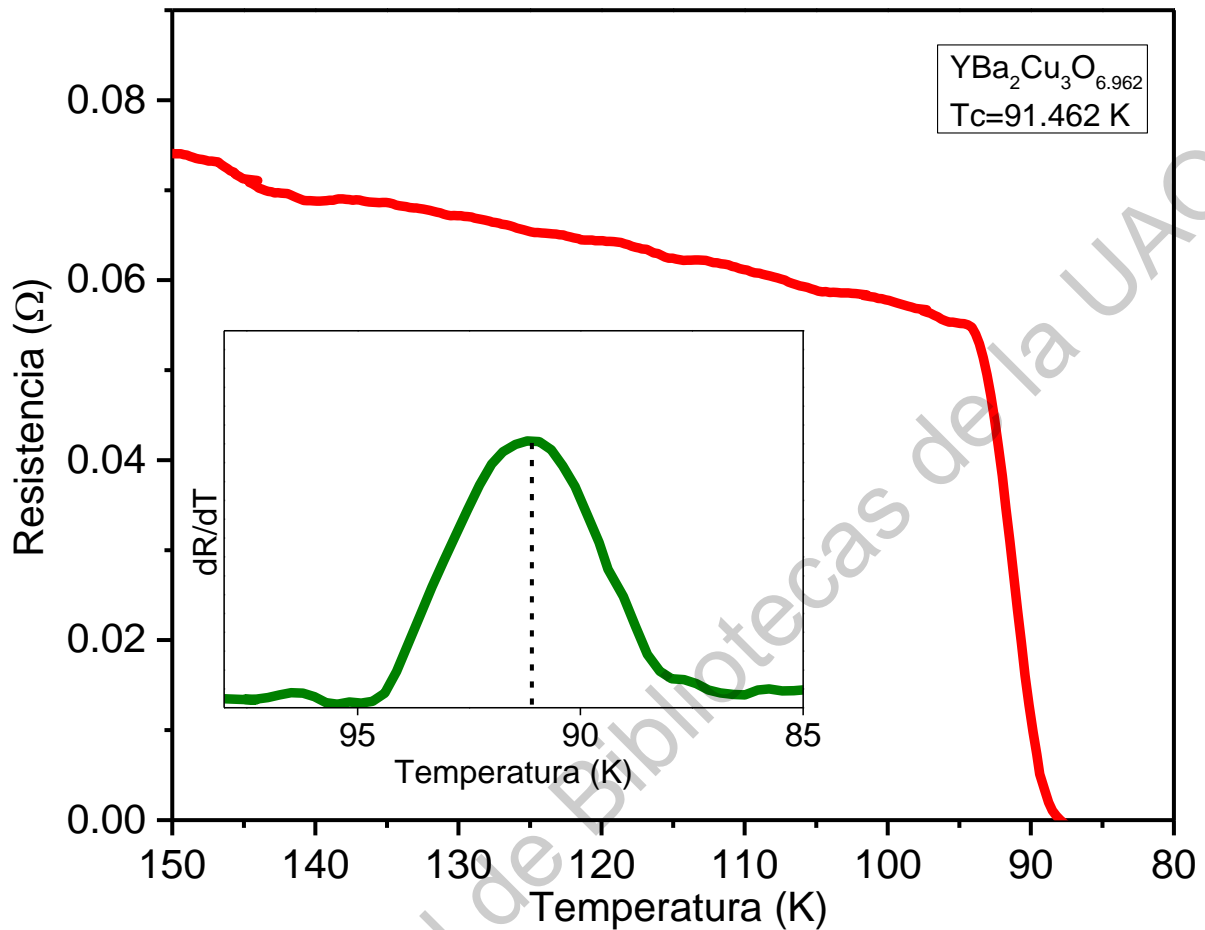


Figura 37. Resistencia en función de la temperatura y determinación del valor de T_c de la muestra superconductora $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$

6.2. Caracterización de las películas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

En la Figura 38 se observan los patrones de difracción de rayos X de las muestras obtenidas por serigrafía; a partir de estos difractogramas se identificaron y enlistaron en el cuadro 3, los picos correspondientes a las fases superconductoras identificadas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ presentes en las películas.

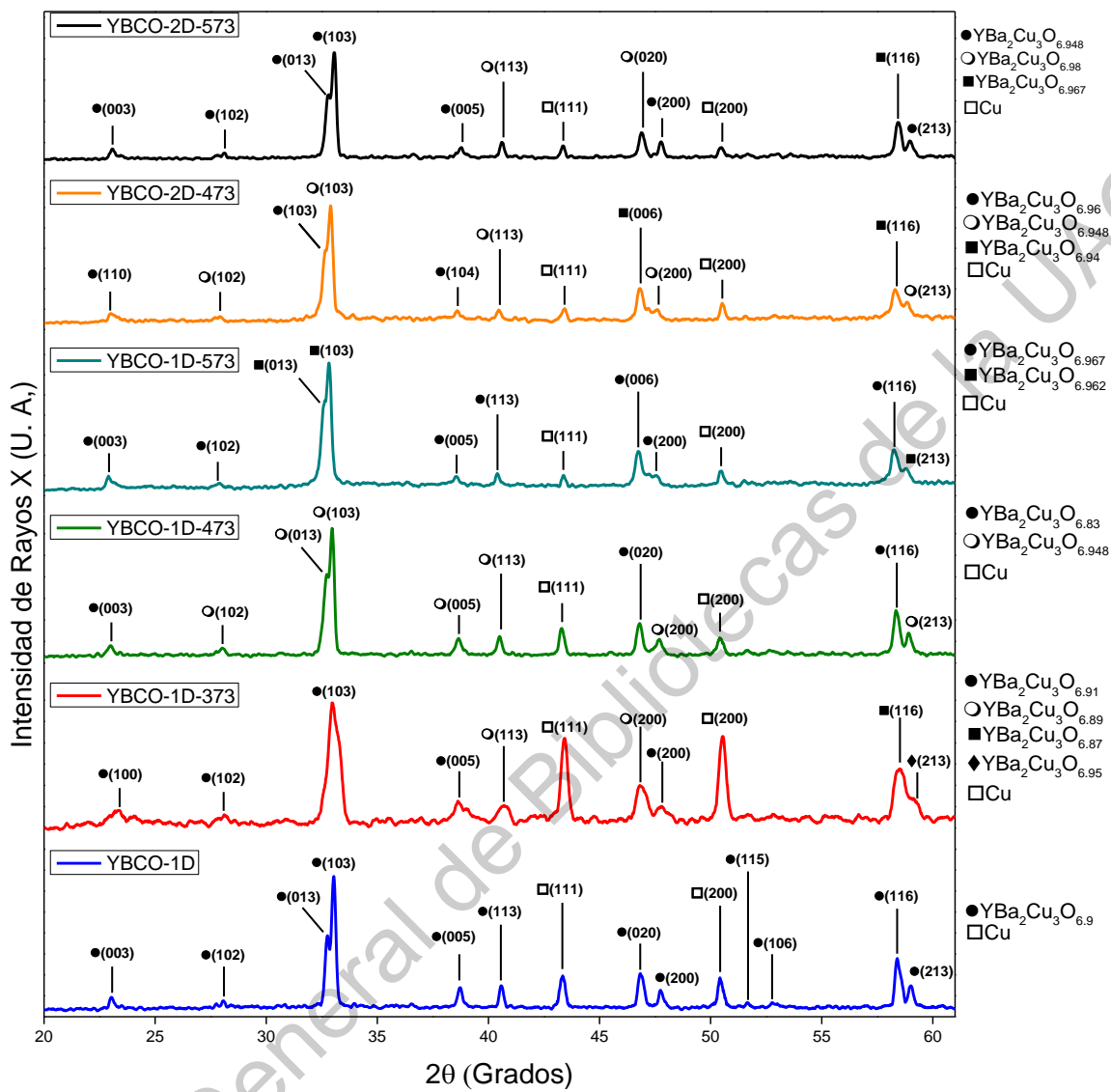


Figura 38. Patrones de difracción de rayos X de las películas depositadas por serigrafía a partir del bulbo con fase superconductora $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$ en sustratos de Cu.

Cuadro 3. Fases superconductoras identificadas de las películas depositadas mediante impresión de pantalla a partir del bulto con fase superconductoras $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$.

Películas	2θ	hkl	Fase	#PDF
YBCO-1D	23.02	003	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$	79-0318
	28.08	102		
	32.76	013		
	33.04	103		
	38.74	005		
	40.58	113		
	46.84	020		
	47.74	200		
	51.62	115		
	52.76	106		
	58.4	116		
	59.02	213		
YBCO-1D-373	23.38	100	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.91}$	79-0620
	28.1	102		
	32.96	103		
	38.62	005		
	40.66	113	$\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{6.89}$	78-1736
	46.82	200		
	47.68	200	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.91}$	79-0620
	58.57	116	$\text{Ba}_2\text{YCu}_3\text{O}_{6.87}$	87-1477
	59.28	213	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.95}$	86-0053
YBCO-1D-473	22.93	003	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.83}$	79-0654
	28.02	102	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.948}$	80-1969
	32.71	013		
	32.97	103		
	38.63	005		
	40.49	113		
	46.76	020		
	47.71	200	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.948}$	80-1969
	58.32	116	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.83}$	79-0654
	58.92	213	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.948}$	80-1969
YBCO-1D-573	22.83	003	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.967}$	79-1229
	27.85	102	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$	50-1886
	32.57	013		
	32.83	103		
	38.54	005	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.967}$	79-1229
	40.35	113		

	46.66	006		
	47.48	200		
	58.21	116		
	58.803	213	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.962}	50-1886
YBCO-2D-473	23.12	100	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.96}	87-1324
	28.13	102	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.948}	80-1969
	32.76	103	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.96}	87-1324
	32.91	103	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.948}	80-1969
	38.76	104	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.96}	87-1324
	40.56	113	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.948}	80-1969
	46.84	006	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.94}	87-1471
	47.70	200	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.948}	80-1969
	58.39	116	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.94}	87-1471
	58.97	213	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.948}	80-1969
	YBCO-2D-573	22.94	003	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.948}
28.13		102		
32.61		013		
33.06		103		
38.61		005		
40.37		113	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.98}	81-0081
46.72		020		
47.73		200	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.948}	80-1969
58.24		116	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.967}	79-1229
58.88	213	YBa ₂ Cu ₃ O _{6.948}	80-1969	

La muestra YBCO-1D presenta la fase YBa₂Cu₃O_{6.9}, la cual es una fase con una menor cantidad de oxígeno en comparación con la estequiometría obtenida en el bulto; esto se debe a la reacción obtenida por la mezcla entre los polvos del bulto superconductor y el aglutinante.

La muestra YBCO-1D-373, presentó una combinación de fases superconductoras con diferentes cantidades de oxígeno, lo cual se puede atribuir al tratamiento térmico a 373 K al que se sometió dicho recubrimiento. Esta muestra presentó una formación de cristales correspondientes a las fases superconductoras YBa₂Cu₃O_{6.91} y YBa₂Cu₃O_{6.95}, que en comparación con el material en bulto tienen una mayor cantidad de oxígeno.

La muestra YBCO-1D-473, la cual se obtuvo por un tratamiento térmico a 473 K, exhibió una combinación de fases superconductoras en la cuales se identificaron

YBa₂Cu₃O_{6.83} y YBa₂Cu₃O_{6.948}. Sin embargo, la fase YBa₂Cu₃O_{6.948} presentó una mayor cantidad de señales en el difractograma de rayos X. El incremento de la fase YBa₂Cu₃O_{6.948} se puede atribuir al incremento en la temperatura de tratamiento de sinterizado en atmósfera abierta.

En el difractograma de la muestra YBCO-1D-573 se parecía el crecimiento de las fases superconductoras YBa₂Cu₃O_{6.962} y YBa₂Cu₃O_{6.967}. El incremento de oxígeno en las fases superconductoras se debe a que la muestra se sometió a un tratamiento térmico a 573 K, la cual es una temperatura cercana a los 723 K, que es la temperatura a la que comúnmente se realiza el tratamiento de oxigenación en el superconductor YBa₂Cu₃O_{7-x}.

La muestra YBCO-2D-473 presentó en su difractograma de rayos X, señales características a las fases superconductoras YBa₂Cu₃O_{6.94}, YBa₂Cu₃O_{6.948} y YBa₂Cu₃O_{6.96}. Si se comparan las fases obtenidas de las muestras YBCO-1D-473 y YBCO-2D-473, debido a que ambas se obtuvieron por las mismas condiciones de tratamiento térmico; la muestra YBCO-2D-473 obtuvo la cristalización de fases superconductoras con mayor contenido de oxígeno que la muestra YBCO-1D-473. Esto se debe a que la muestra YBCO-2D-47 se obtuvo con dos depósitos.

La muestra YBCO-2D-573 se elaboró a partir de dos depósitos, con un tratamiento térmico a 573 K. Esta muestra presentó una recombinación de fases, obteniendo las fases superconductoras de YBa₂Cu₃O_{6.948}, YBa₂Cu₃O_{6.967} y YBa₂Cu₃O_{6.98}. Esto se atribuye de una manera similar a las muestras YBCO-1D-473 y YBCO-2D-473, comparando la muestra YBCO-1D-573 y YBCO-2D-573, ya que la muestra YBCO-2D-573 contiene un depósito más; y aunado a esto, a la muestra YBCO-2D-573 se le realizó un tratamiento térmico cercano a la temperatura de oxigenación por una hora; propiciando valores de oxígeno muy cercanos a 7. La ampliación del patrón de difracción de rayos X que se muestra en la Figura 39, permite hacer una comparación de las fases superconductoras presentes en el bulto y las películas obtenidas por serigrafía.

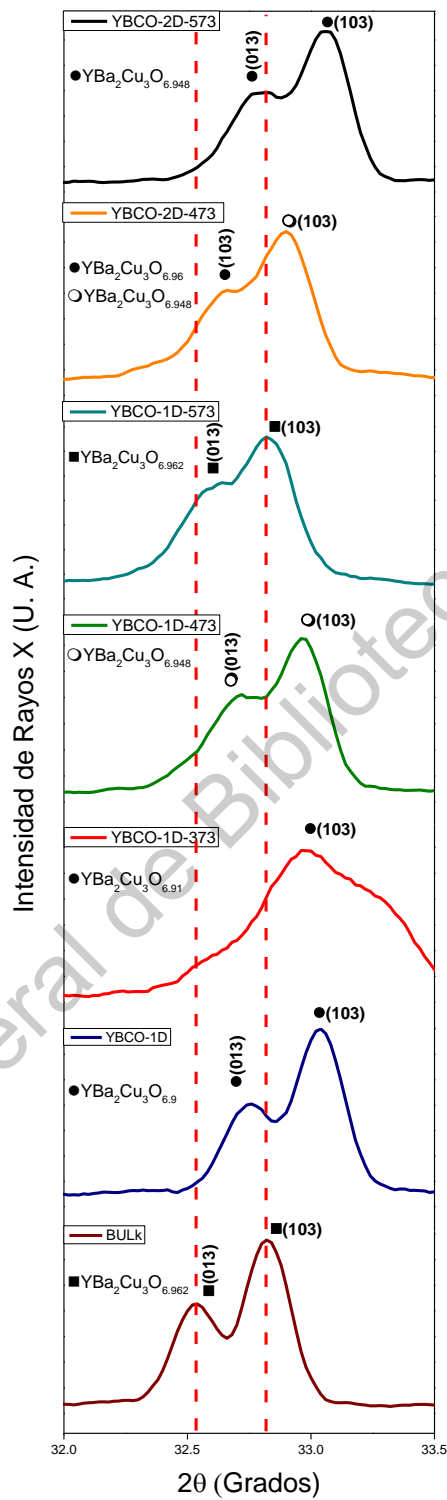


Figura 39. Ampliación del patrón de difracción de rayos X correspondientes a los planos cristalinos (013) y (103) del bulto y de las películas con fases superconductoras $YBa_2Cu_3O_{7-x}$.

Mediante los patrones de difracción de rayos X de la Figura 38, se calculó el tamaño de cristal promedio de las películas obtenidas a través de las ecuaciones 31 y 32, los resultados se muestran en el cuadro 4.

Cuadro 4. Tamaños de cristal de las películas con $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, calculados por las ecuaciones de Scherrer-Debye y Williamson-Hall

Película	Por la ecuación de por Scherrer- Debye	Por la ecuación de Williamson-Hall
YBCO-1D	52	57
YBCO-1D-373	61	69
YBCO-1D-473	49	51
YBCO-1D-573	50	59
YBCO-2D-473	70	82
YBCO-2D-573	52	57

El método de Williamson-Hall considera a los anchos medios a la mitad máxima de los picos de difracción como una combinación lineal debido a las contribuciones del esfuerzo de tensión y tamaños de partículas, por lo cual permite obtener un tamaño muy similar al que se obtiene por la fórmula de Scherrer-Debye. Sin embargo, la existencia de variaciones en los tamaños de cristal de cada una de las muestras obtenidas, se puede atribuir a la difusión que ocurre a través los tratamientos térmicos con variaciones de temperatura en cada uno de los depósitos de las películas. Además, al realizar tratamientos cercanos a 723 K se realizan tratamientos de oxigenación que favorecen la formación de fases superconductoras.

Los espectros Raman que se observan en la Figura 40, corresponden a la comparación del $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ en bulto y las películas obtenidas por serigrafía. Sin embargo, como se analizó en la difracción de rayos X, existe una mezcla de fases por lo cual, se presentan corrimientos en los modos vibracionales debido a esfuerzos en la red que se atribuyen a mezclas de fases superconductoras en mayor o menor medida.

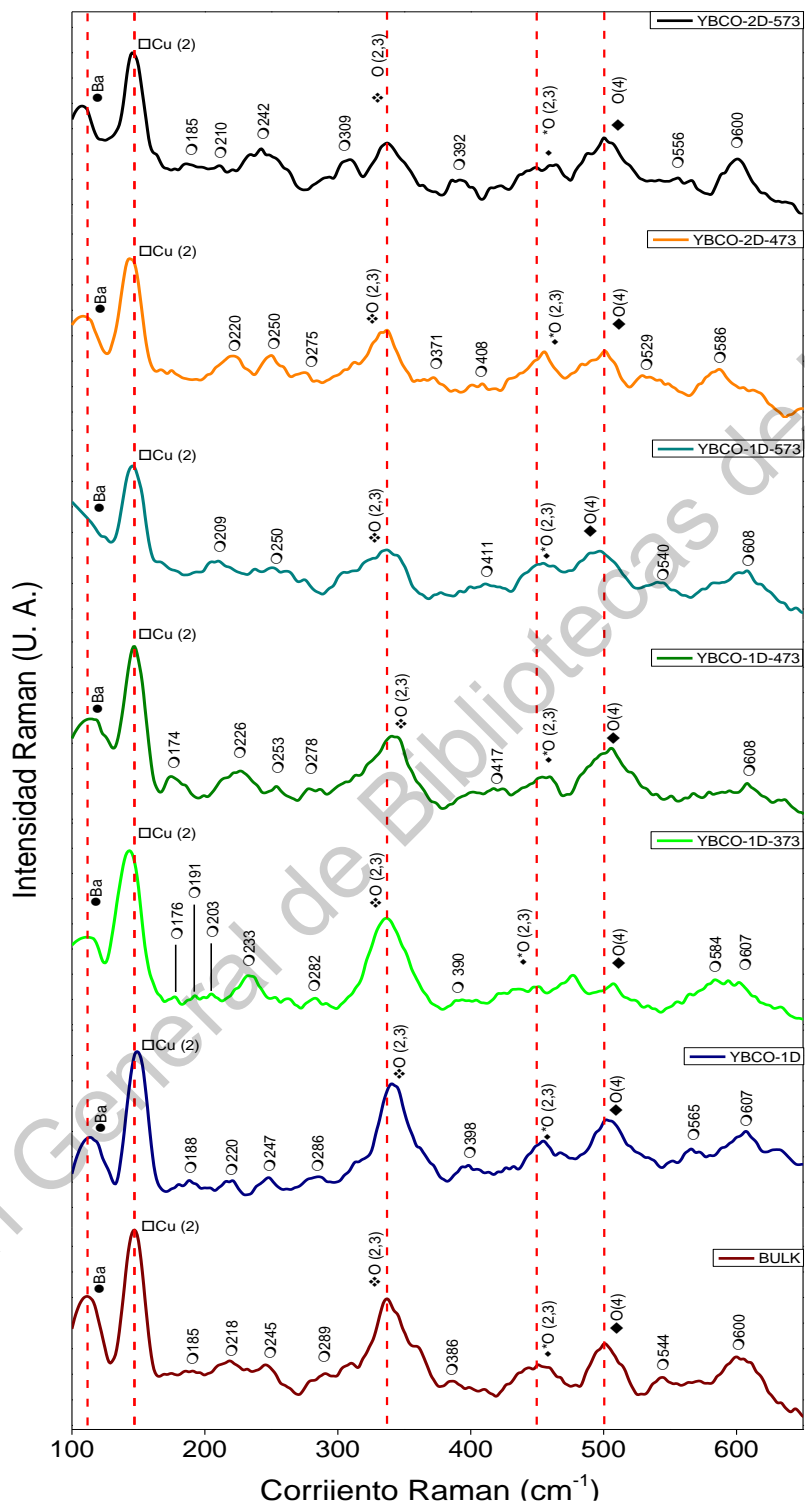


Figura 40. Raman de la muestra en bulto con fase superconductora $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$ y las películas YBCO-1D, YBCO-1D-373, YBCO-1D-473, YBCO-1D-573, YBCO-2D-473 y YBCO-2D-573 obtenidas por serigrafía sobre sustratos de Cu.

Los modos correspondientes a la simetría A_g pertenecen a los enlaces de Ba en $\sim 115 \text{ cm}^{-1}$, Cu₂ en $\sim 145 \text{ cm}^{-1}$, los modos vibracionales en $\sim 335 \text{ cm}^{-1}$ son vibraciones antisimétricas de enlaces O₂ y O₃; sin embargo, también se forman enlaces de O₂ y O₃ manifestando vibraciones simétricas en $\sim 446 \text{ cm}^{-1}$, estos modos vibracionales les competen a los planos CuO₂ donde se lleva a cabo la superconductividad (Beno et al., 1987; Thomsen and Kaczmarczyk, 2006; Liarokapis, 2017; Şarlı and Keskin, 2019). El modo vibracional en $\sim 500 \text{ cm}^{-1}$ es inherente al O₄ siendo una vibración en tensión en el eje c atribuido a los enlaces de Cu-O (Kourouklis et al., 1987; Stavola et al., 1987).

Las muestras obtenidas, además de presentar los modos vibracionales característicos al $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, revelan la existencia de otros modos vibracionales en: $\sim 174-191$, $\sim 203-233$, $\sim 245-253$, $\sim 275-289$, $\sim 386-392$, $\sim 408-417$, ~ 529 , $\sim 540-565$ y $\sim 584-608 \text{ cm}^{-1}$, que como se mencionó anteriormente, son propios de este superconductor de alta temperatura, y que se atribuyen a defectos y/o de vacancias parciales de oxígeno (Thomsen et al., 1988; Ivanov et al., 1995; Iliev et al., 1996; Panfilov et al., 1998; Liarokapis, 2000; Iliev et al., 2008; Hong et al., 2010; Barboy et al., 2011; Bakr et al., 2013; Chromik et al., 2017; Liarokapis, 2017).

Las películas con fases superconductoras $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ se analizaron a través de espectroscopia de dispersión de energía EDS. Los resultados de las mediciones se presentan en el cuadro 5. La relación de porcentajes atómicos de los elementos se mantiene relativamente constante, debido a que se formaron diferentes fases superconductoras con el arreglo estequiométrico $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, pero con variaciones en la cantidad de oxígeno (Khaled M.Elsabawy, 2011).

Cuadro 5. EDS de las películas con fases superconductoras $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$

Película	Y (At%)	Ba (At%)	Cu (At%)	O (At%)
YBCO-1D	5.11	15.72	23.42	55.75

YBCO-1D-373	4.78	15.27	22.42	57.53
YBCO-1D-473	4.70	15.24	23.26	56.8
YBCO-1D-573	5.06	14.91	22.40	57.63
YBCO-2D-473	4.92	15.10	22.30	57.68
YBCO-2D-573	4.62	14.83	22.65	57.90

La Figura 41 muestra las imágenes SEM de las películas superconductoras. En la Figura 41 (a), correspondiente a la muestra YBCO-1D, se observan tamaños de grano con un promedio de $\sim 0.041 \mu\text{m}$ y máximo de $\sim 0.324 \mu\text{m}$. La imagen SEM de la película YBCO-1D-373 que se muestra en la Figura 41 (b), se distingue un tamaño de grano promedio de $\sim 0.026 \mu\text{m}$ y máximos de $\sim 0.647 \mu\text{m}$; en este caso ocurrió una recristalización obteniendo nuevas fases como se observó en la difracción de rayos X. Además, en la muestra YBCO-1D-373 se puede observar que el tratamiento térmico realizado comenzó a acrecentar los granos en comparación a la muestra YBCO-1D. En la Figura 41 (c), correspondiente a la muestra YBCO-1D-473, se observan tamaños de grano promedio de $\sim 0.078 \mu\text{m}$ y máximo de $\sim 0.873 \mu\text{m}$. Por otra parte, en la imagen SEM de la Figura 41 (d), correspondiente a la película YBCO-1D-573, se observa un tamaño de grano, promedio de $0.09 \mu\text{m}$ y máximo de $1.81 \mu\text{m}$, mostrando variaciones considerables en los tamaños de grano. Es importante notar que el tratamiento térmico aumenta el tamaño de grano y disminuye las porosidades, esto probablemente se debe a un proceso de coalescencia en los granos. Para la película YBCO-2D-473 que se observa en la Figura 41 (e), se muestra un promedio de tamaño de grano de $\sim 0.44 \mu\text{m}$ y un máximo de $\sim 3.15 \mu\text{m}$, superando los tamaños obtenidos en bulto, lo cual se puede atribuir a ser dos depósitos los que conformen la película y la realización de un sinterizado. En la imagen SEM de la muestra YBCO-2D-573, Figura 41 (f), se observa un tamaño de grano promedio de $\sim 0.37 \mu\text{m}$ y máximo de $\sim 0.768 \mu\text{m}$; sin embargo, también se presentan granos pequeños irregulares de $\sim 0.102 \mu\text{m}$. Los resultados de las muestras YBCO-2D-473 e YBCO-2D-573, muestran que es favorable el realizar dos depósitos y hacer un tratamiento a 473.15 K , debido a que presenta un tamaño de grano de hasta $3.15 \mu\text{m}$. La existencia de una mayor cantidad de granos grandes, en

comparación con la cantidad de poros y límites de grano, favorece las propiedades de conducción eléctrica (Jin et al., 2017).

Dirección General de Bibliotecas de la UAQ

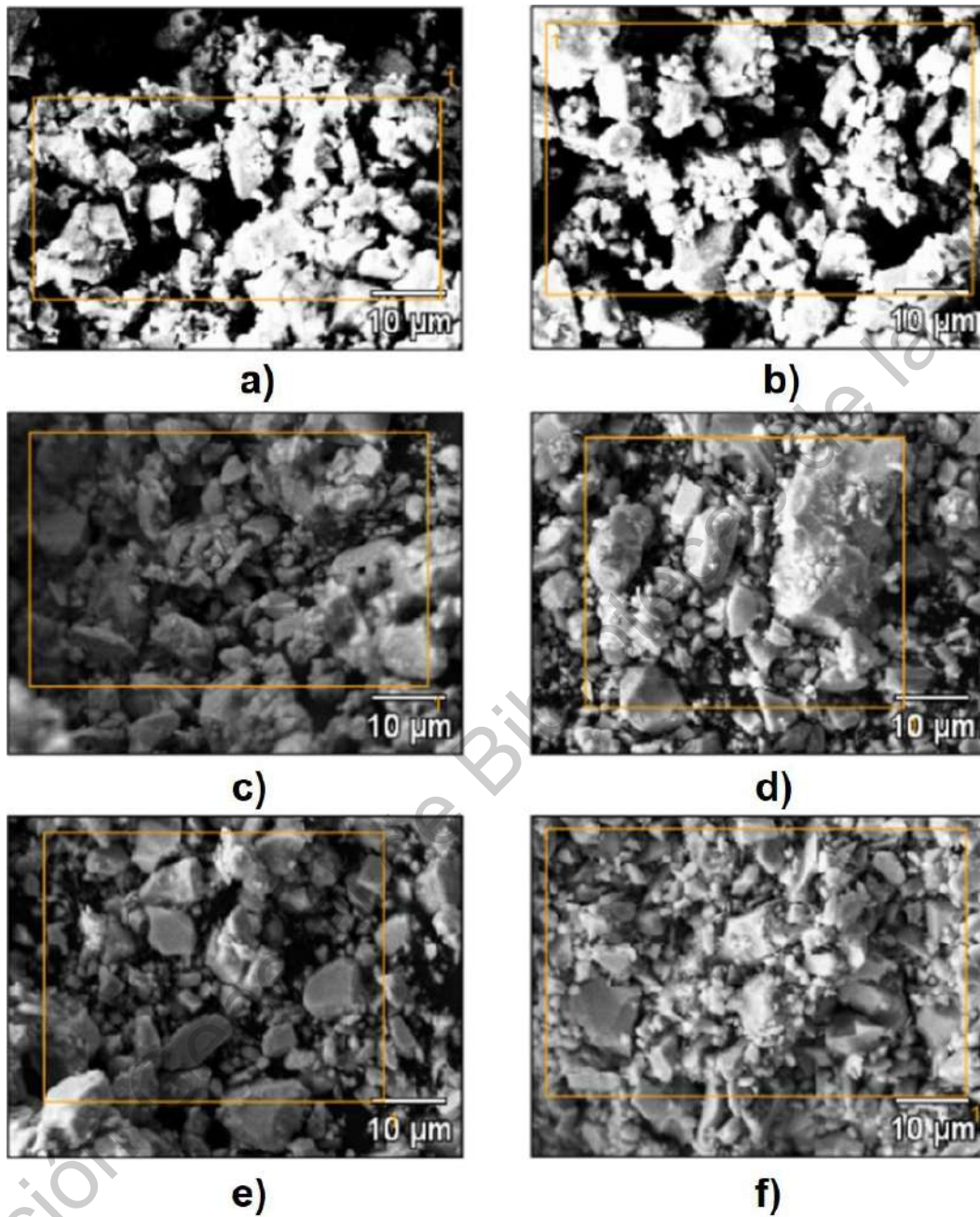


Figura 41. Imágenes por SEM de las películas de material superconductor YBa₂Cu₃O_{7-x}. a) Muestra YBCO-1D. b) Muestra YBCO-1D-373. c) Muestra YBCO-1D-473. d) Muestra YBCO-1D-573. e) Muestra YBCO-2D-473. f) Muestra YBCO-2D-573.

6.3. Cálculo eléctrico del generador

6.3.1. Parámetros fijos de operación eléctrica

Los parámetros de bobinas empleadas en el diseño del generador eléctrico se muestran en el cuadro 6.

Cuadro 6. Parámetros de las bobinas

Resistencia (Ohm)	Espiras	Diámetro exterior (m)	Diámetro interior (m)	Longitud (m)
9.1	2352	0.06	0.0375	0.056

Las bobinas se interconectaron como se muestra en el diagrama de la Figura 42.

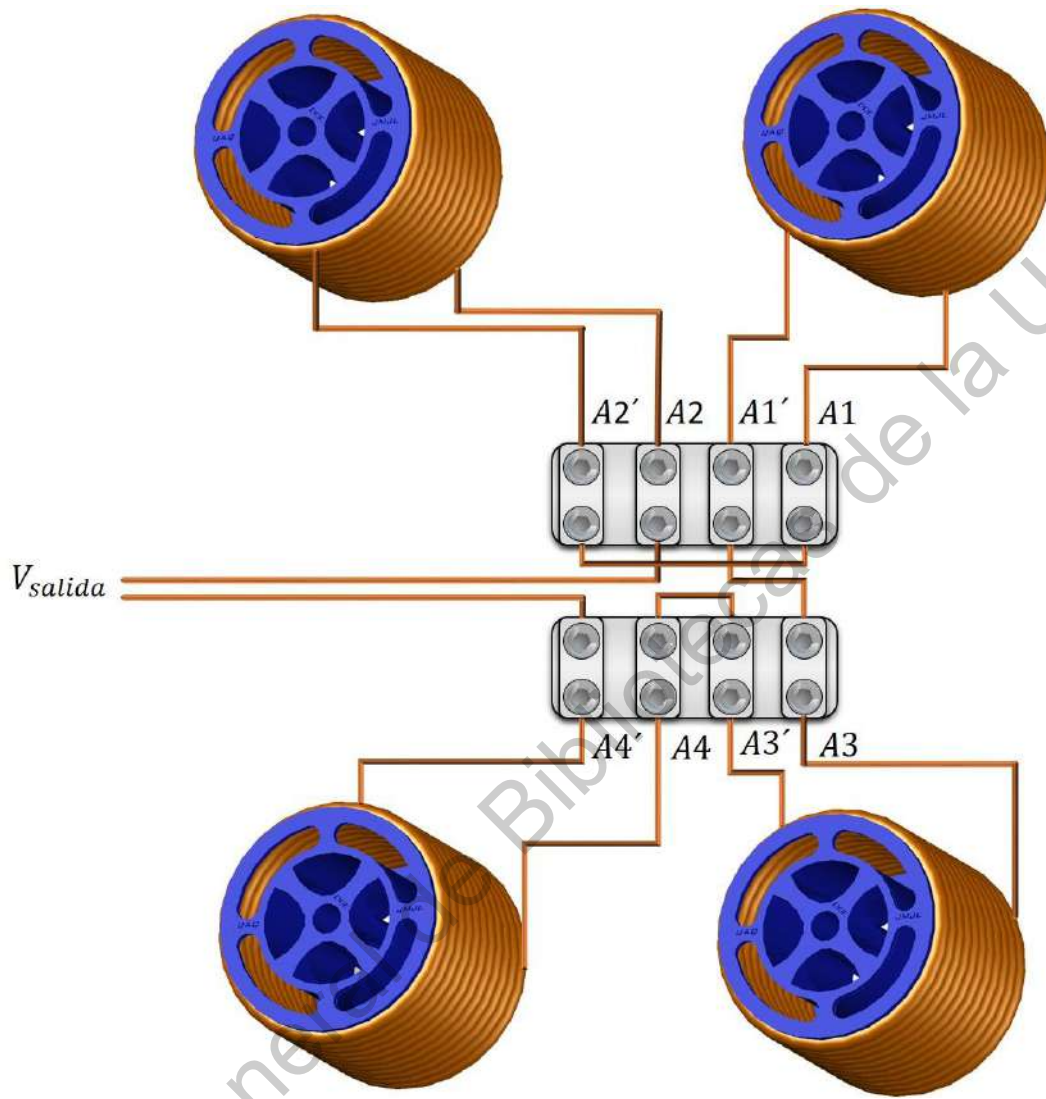


Figura 42. Diagrama eléctrico de interconexión de las bobinas del generador eléctrico

6.3.2. Parámetros de operación eléctrica en vacío y plena carga

El voltaje teórico estimado para este generador se determina a partir de la ecuación 34 (Enríquez Harper, 2012). Donde (Ξ) es el número de espiras, (p) es el número de pares de polos, (ϕ) es el flujo magnético y (n) es la velocidad angular.

$$\varepsilon = \frac{\Xi p \phi n}{360}$$

Ec. 34

El valor estimado teórico de la fuerza electromotriz máxima fue de 199.5 volts. Sin embargo, este valor teórico no será el real debido que considera el flujo magnético proveniente de la superficie del imán y este disminuirá a partir de la distancia del interior de la bobina, como se observa en las simulaciones anteriores de campo magnético, por lo cual depende estrictamente de las dimensiones de la geometría de la bobina. Además, no considera la distancia del entrehierro entre el rotor y el estator, la cual también afecta en la pérdida energética.

Se realizó la puesta en marcha del generador eléctrico en vacío y plena carga como se muestra en la Figura 43. Se obtuvieron los parámetros mostrados en el cuadro 7.

La prueba a plena carga se realizó al interconectar al generador con diversas cargas misceláneas inductivas y resistivas eléctricas para estimar la corriente eléctrica que suministra el generador, sin tener una caída de voltaje suministrado menor al 70% en la regulación de voltaje eficiente.



Figura 43. Comparación del modelado del diseño del generador con el físico y puesta en marcha.

Cuadro 7. Ficha de datos del generador eléctrico en vacío (SC) y plena carga (PC) a 2700 rpm

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Velocidad angular	2700 rpm	Número de pares polos	4
Campo magnético	1 T	Tipo de conexión	Ondulado-Imbricando
V_{SCmax}	156 Vca	V_{SCrms}	110.6 Vca
V_{PCmax}	120.2 Vca	V_{PCrms}	85 Vca
I_{PCmax}	5.23 A	I_{PCrms}	3.74 A

	Potencia eléctrica media	317.9 W
--	--------------------------	---------

La eficiencia de los generadores eléctricos se compara a partir de la regulación de voltaje (VR), esta magnitud relaciona la capacidad del generador eléctrico para mantener un voltaje estable en sus terminales a partir de las variaciones de carga (Chapman, 2012). La regulación de voltaje se determina a partir de la ecuación 35.

$$VR = \frac{V_{SC} - V_{PC}}{V_{PC}} \cdot 100\% \quad \text{Ec. 35}$$

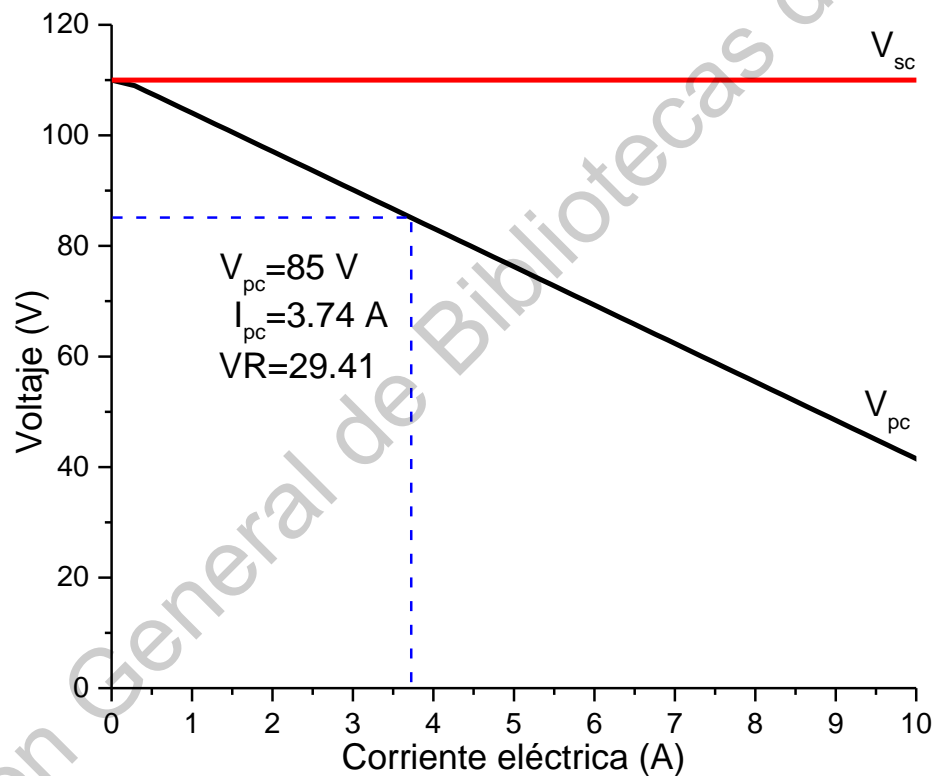


Figura 44. Grafica del punto de eficiencia de regulación de voltaje del generador eléctrico a plena carga (PC)

En sistemas energéticos de conversión energética compuestos por turbomáquinas, la eficiencia se determina, a partir la potencia en que suministra el recurso energético (eólico, hidráulico, térmico, etc.), con respecto a la potencia eléctrica obtenida por el generador eléctrico. Ecuación 36.

$$\eta = \frac{P_{salida-generada}}{P_{entrada-suministrada}} \cdot 100\%$$

Ec.36

Se realizó la interconexión del generador eléctrico a el puente de diodos rectificador KBPC5010, obteniendo los valores que se muestran en el cuadro 8. Los valores muestran una caída de tensión directa atribuida al consumo e interconexión interna del encapsulado del puente de diodos de ~1.2 Volts por elemento constituido, (ver Anexo 3).

Cuadro 8. Ficha de datos del generador eléctrico en vacío y plena carga a 2700 rpm con el puente de diodos rectificador

Velocidad angular	2700 rpm	Número de pares polos	4
Campo magnético	1 T	Tipo de conexión	Ondulado-Imbricando
V_{SCmax}	144.3 Vcc	V_{sc}	102.1 Vcc
V_{PC}	79 Vcc	I_{PC}	3.45 A
		Potencia eléctrica media	272.55 W

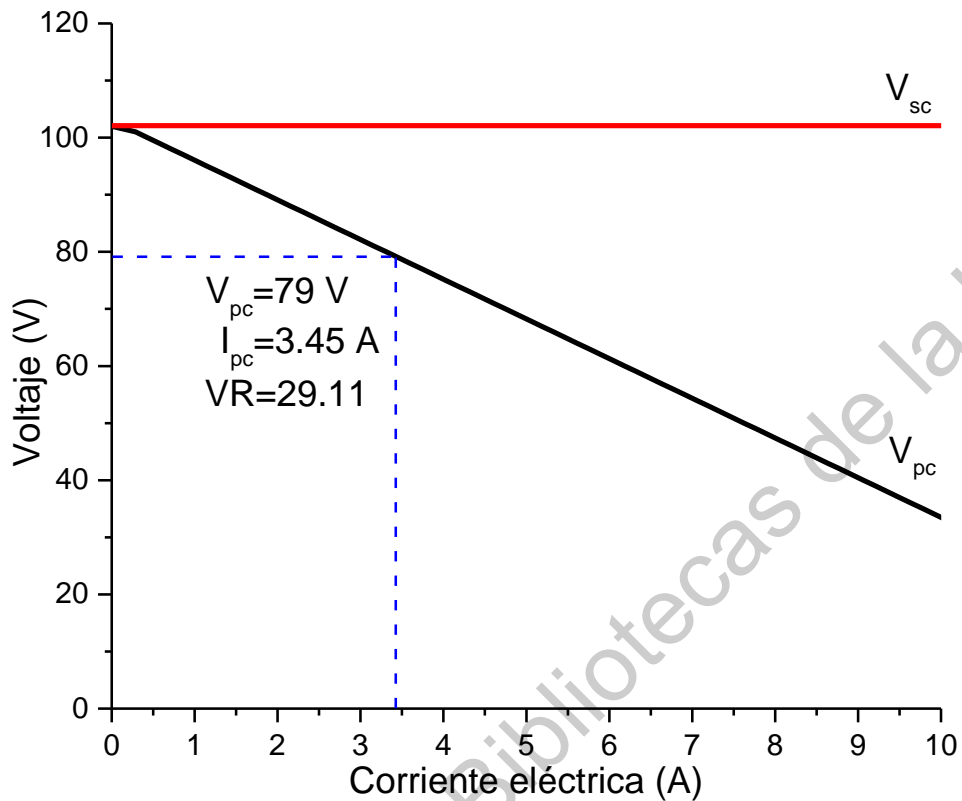


Figura 45. Gráfica del punto de eficiencia de regulación de voltaje del generador eléctrico con el puente de diodos rectificador a plena carga (PC)

Con los valores obtenidos del generador eléctrico conectado al puente de diodos rectificador, se realizó un análisis transitorio de la señal de voltaje en el software MULTISIM 14.0, como se observa en la Figura 46. El análisis se realizó considerando el V_{SCmax} , n , tiempo de análisis de $[0 - 0.05]$ s y un paso de tiempo máximo de 1×10^{-5} s. El análisis muestra el comportamiento positivo de la onda senoidal, sin embargo, tiene valles muy pronunciados de potencial eléctrico, los cuales deben de ser compensados con un circuito de capacitancia eléctrica.

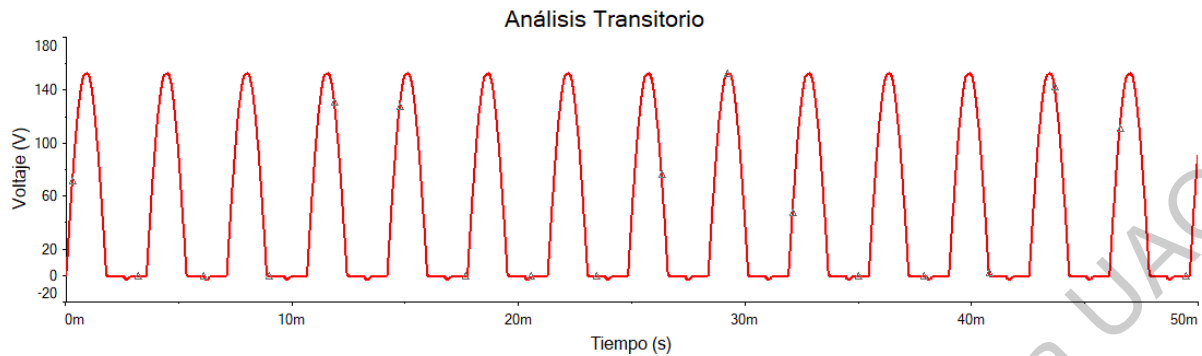


Figura 46. Análisis transitorio de voltaje del generador eléctrico con el puente de diodos rectificador

En la Figura 47 se muestra el diagrama de conexión con un sistema de rectificación de señal de voltaje compuesto por un conjunto de capacitores. Así, como en la Figura 48 se observa el análisis transitorio a partir de la comparación de las señales de voltaje rectificadas debido a la compensación de los capacitores (V(4)) y la semi-rectificada por el puente de diodos (V(1)). Sin embargo, si el generador eléctrico se quedara en una central de generación eléctrica, se debe de realizar un cálculo de las cargas fijas para readecuar un sistema de capacitores y protecciones eléctricas.

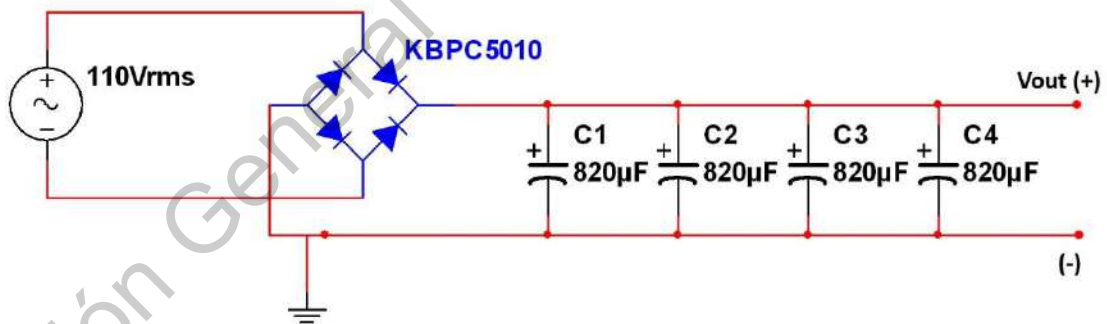


Figura 47. Sistema de rectificación señal de voltaje del generador

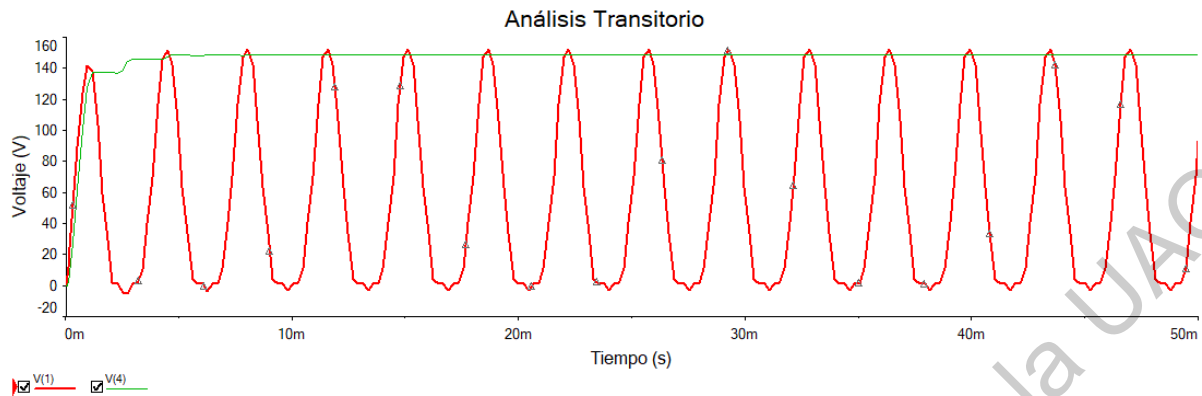


Figura 48. Análisis transitorio de las señales de voltaje. V (1) Corresponde a la señal semi-rectificada del puente de diodos. V (4) Corresponde a la señal de salida rectificada por el puente de diodos y los capacitores.

6.3.3. Cálculo de la diferencia de potencial del generador eléctrico con superconductores

La determinación del voltaje de salida en el generador eléctrico con superconductores, se obtiene a partir del planteamiento de la ecuación 37, que se basa en la ecuación 34. En la ecuación 37, se considera el factor de incremento del campo magnético en el interior de las bobinas debido a la reflexión del campo magnético (\mathbb{J}) de los imanes en el Bi-rotor.

$$\varepsilon = \frac{\Xi p \phi \mathbb{J} n}{360} \quad \text{Ec.37}$$

Sin embargo, este valor es considerando un superconductor idóneo con repulsión del campo crítico en forma estable, ya que, si se sobrepasa el campo crítico, se perderá el estado superconductor y por ende el diamagnetismo de este. Además, cada superconductor tiene definido su campo magnético de repulsión característico. Por lo cual el valor de \mathbb{J} debe de estar en el intervalo de $[1.001 \leq \mathbb{J} \leq 1.999]$, este parámetro no puede exceder de 2, debido a que no es posible reflejar totalmente el campo magnético de los polos magnéticos del Bi-rotor. Este factor, se verá afectado en su magnitud a partir de la distancia que exista entre la separación de los imanes

de cada uno de los rotores con los superconductores. No obstante, al existir esta serie de pérdidas, el factor permitirá tener un incremento porcentual en la salida de voltaje del generador eléctrico con superconductores. Para disminuir la pérdida de repulsión de campo magnético, se recomienda una separación máxima de 1 mm, entre el rotor y los superconductores, para evitar daños por rozamiento.

En la Figura 49 se observa la puesta en marcha del generador eléctrico con los superconductores. Los parámetros eléctricos obtenidos se muestran en el cuadro 9. Los valores de eficiencia de regulación de voltaje para el generador con los superconductores, se estiman con las mismas consideraciones que se propusieron en la ecuación 36.



Figura 49. Puesta en marcha del generador eléctrico con elementos superconductores en condiciones criogénicas

Cuadro 9. Ficha de datos del generador eléctrico con elementos superconductores en vacío (SC) y plena carga (PC) a 2700 rpm

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Velocidad angular	2700 rpm	Número de pares polos	4
V_{SCmax}	180.2 Vca	V_{SCrms}	127.4 Vca
V_{PCmax}	138.5 Vca	V_{PCrms}	98 Vca
I_{PCmax}	6.08 A	I_{PCrms}	4.3 A
		Potencia eléctrica media	421.4 W

En la Figura 50, se observa en la gráfica, que manteniendo una regulación de voltaje menor al 70% a plena carga se obtiene un valor de 4.3 A a 98 Vca en el generador eléctrico con elementos superconductores, obteniendo un incremento en el voltaje de 13 Vca y una intensidad de corriente de 0.6 A. Estos incrementos en los parámetros eléctricos se deben a la interacción de los campos magnéticos de los superconductores y los imanes permanentes de NdFeB posicionado en el Bi-rotor.

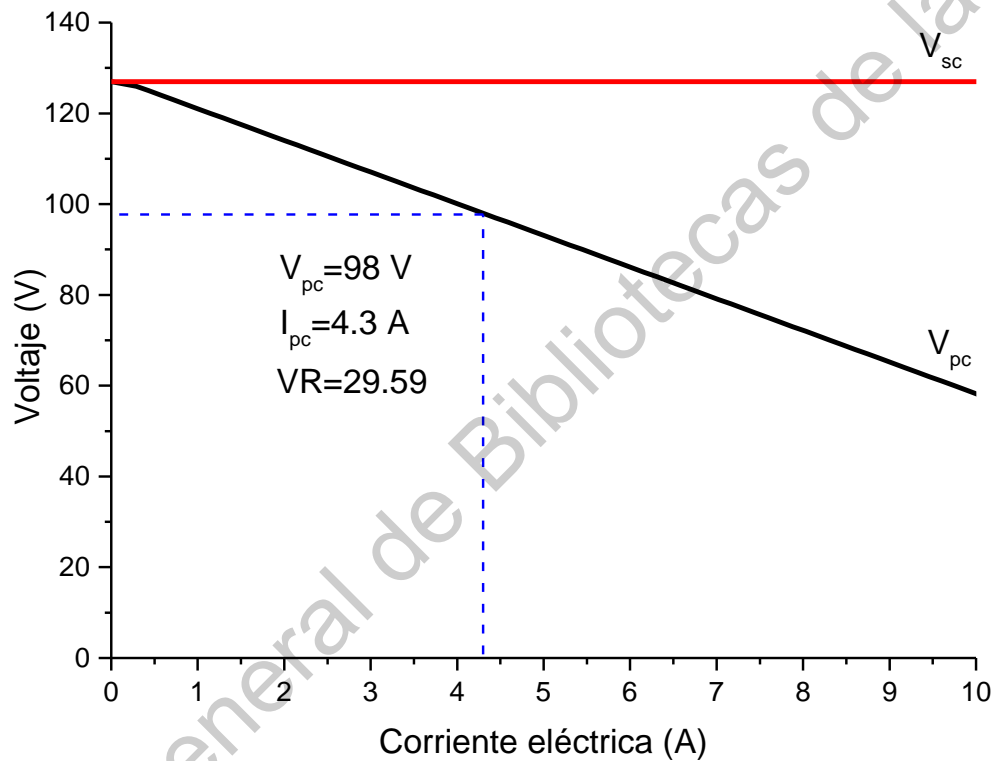


Figura 50. Gráfica del punto de eficiencia de regulación de voltaje del generador eléctrico con superconductores a plena carga (PC)

7. CONCLUSIÓN

El método de reacción de estado sólido, permitió obtener el superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, mediante seis tratamientos térmicos y dos tratamientos de oxigenación sin necesidad de emplear una atmósfera controlada. La caracterización estructural, por difracción de rayos X permitió identificar la fase superconductora $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.962}$, obteniendo un tamaño de cristal medio de ~ 73 nm. La prueba del efecto de Meissner se desarrolló con un imán de NdFeB, permitiendo observar el efecto de la levitación magnética debido al diamagnetismo generado en el superconductor a temperatura criogénica. La caracterización eléctrica a través de la técnica de cuatro puntas, permitió estimar la temperatura crítica, la cual tuvo un valor de 91.462 K, el cual es un valor de temperatura superior al promedio reportado en la literatura.

A partir del superconductor obtenido por reacción en estado sólido, se obtuvieron películas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, sobre sustratos flexibles de Cu mediante la técnica de serigrafía. La caracterización estructural por difracción de rayos X mostró la presencia de diferentes fases, que dependen de la temperatura de recocido y el número de capas que conforman el recubrimiento. A temperaturas de recocido altas, se promueve el crecimiento de fases con mayor contenido de oxígeno. El análisis Raman permitió la identificación de modos vibracionales característicos asociados con $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Este análisis, junto con los resultados de EDS, indicó que no se incorporaron otros elementos al compuesto. Las imágenes SEM mostraron que el aumento de la temperatura del tratamiento térmico conduce a un aumento del tamaño de grano debido a un proceso de coalescencia, que promueve la formación de fases superconductoras con mayor contenido en oxígeno. Esto revela, la importancia que tienen las condiciones tanto de tratamiento térmico como el número de depósitos para obtener películas con fases superconductoras $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. Los resultados obtenidos indican que las películas de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ obtenidas por serigrafía sobre sustratos flexibles de Cu podrían tener aplicaciones en la fabricación de dispositivos eléctricos.

En el diseño del generador eléctrico, se contempló la colocación de imanes permanentes de NdFeB con polaridades opuestas en ambos extremos de los devanados de generación; formando el Bi-rotor. Esto permitió incrementar la concentración de las líneas de campo en los devanados, incrementando la diferencia de potencial de salida en el generador eléctrico. Para el modelado se empleó Polietileno UHMW-PE, debido a que este material tiene la capacidad de trabajar a temperaturas cercanas a $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$, sin presentar fractura. Para los rodamientos, se seleccionaron los NSK 608Z por que trabajan a velocidades de 34 000 rpm y soportan una carga estática de 1.37 kN. La flecha de soporte del rotor esta maquinada a partir de un acero AISI 4130 para soportar altas velocidades y deflexiones. El modelado de los superconductores con los imanes en el software VIZIMAG, permitió observar que existe un factor de incremento del campo magnético en el interior de las bobinas, lo que se refleja en un incremento de la diferencia de potencial en el generador eléctrico. Durante las pruebas del generador eléctrico, se analizaron los parámetros eléctricos obtenidos, a partir de la comparación del voltaje y corriente eléctrica en vacío y plena carga con y sin superconductores. Obteniendo incrementos en el voltaje y corriente eléctrica de 13 Vca y 0.6 A, respectivamente, con una eficiencia mínima del 70% a partir de la regulación de voltaje. El desarrollo de este prototipo demostró que es posible incrementar la obtención de energía eléctrica del generador si se colocan elementos superconductores. Pero, el incremento energético dependerá de las dimensiones y elementos con los que se diseñe el generador eléctrico. Además, el diseño propuesto permite la colocación de una serie de generadores eléctricos en tándem, aprovechando el mismo eje de rotación, así como el campo magnético de salida posterior del Bi-rotor, disminuyendo el volumen del sistema de generación eléctrica en un sistema de Turboenergía.

8. REFERENCIAS

Abou-Ras, D., M. Nichterwitz, M. J. Romero, and S. S. Schmidt. 2011. Electron Microscopy on Thin Films for Solar Cells. In: *Advanced Characterization Techniques for Thin Film Solar Cells*. John Wiley & Sons, Ltd. p. 299–345. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9783527636280.ch12>

Abrahamsen, A. B., N. Magnusson, B. B. Jensen, and M. Runde. 2012. Large Superconducting Wind Turbine Generators. *Energy Procedia*. 24:60–67. doi:10.1016/j.egypro.2012.06.087.

Abrikosov, A. A., L. P. Gorkov, and I. E. Dzyaloshinski. 2012. *Methods of Quantum Field Theory in Statistical Physics*. Dover Publications, E.U.A.

Adriaanse, J.-P. 2019. Chapter Nine - High-Tc superconductors and magnetic electron lenses. In: *Advances in Imaging and Electron Physics*. Vol. 209. Elsevier. p. 215–338. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1076567018300946>

Aly, M. M., M. Abdel-Akher, S. M. Said, and T. Senjyu. 2016. A developed control strategy for mitigating wind power generation transients using superconducting magnetic energy storage with reactive power support. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 83:485–494. doi:10.1016/j.ijepes.2016.04.037.

Amirabadizadeh, A., S. Memarzadeh, N. Tajabor, and H. Arabi. 2012. Effect of Different Calcination Process and Gd₂O₃ as Impurities on the Different Phases of Bi-Based Superconductor. *World Journal of Condensed Matter Physics*. 2:148–152. doi:10.4236/wjcmp.2012.23024.

Antony, A. P., and D. T. Shaw. 2016. Empowering the electric grid: Can SMES coupled to wind turbines improve grid stability? *Renewable Energy*. 89:224–230. doi:10.1016/j.renene.2015.12.015.

Argyropoulou, R., M. Ochsenkühn-Petropoulou, C. Dounis, P. Karaboulis, A. Altzumailis, and K. M. Ochsenkühn. 2007. Comparison of the behavior of the three superconductors YBCO, Bi-2212 and MgB₂ in different environmental conditions. *Journal of Materials Processing Technology*. 181:2–5. doi:10.1016/j.jmatprotec.2006.03.002.

Assmus, W., M. Herrmann, U. Rauchschalbe, S. Riegel, W. Lieke, H. Spille, S. Horn, G. Weber, F. Steglich, and G. Cordier. 1984. Superconductivity in CeCu₂Si₂ Single Crystals. *Phys. Rev. Lett.* 52:469–472. doi:10.1103/PhysRevLett.52.469.

Bakr, M., S. M. Souliou, S. Blanco-Canosa, I. Zegkinoglou, H. Gretarsson, J. Stremper, T. Loew, C. T. Lin, R. Liang, D. A. Bonn, W. N. Hardy, B. Keimer, and M. Le Tacon. 2013. Lattice dynamical signature of charge density wave formation in

underdoped $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$. *Phys. Rev. B.* 88:214517.
doi:10.1103/PhysRevB.88.214517.

Barboux, P., I. Campion, S. Daghigh, J. Livage, J. L. Genicon, A. Sulpice, and R. Tournier. 1992. Synthesis of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ from coprecipitated hydroxides. *Journal of Non-Crystalline Solids.* 147–148:704–710. doi:10.1016/S0022-3093(05)80703-3.

Barboy, I., C. Camerlingo, I. Bar, G. Bareli, and G. Jung. 2011. Micro-Raman spectroscopy of laser processed $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin films. *Journal of Applied Physics.* 110:033912. doi:10.1063/1.3602111.

Bardeen, J., L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer. 1957. Theory of superconductivity. *Physical Review.* 108:1175–1204. doi:10.1103/PhysRev.108.1175.

Barnes, P. N., M. D. Sumption, and G. L. Rhoads. 2005. Review of high power density superconducting generators: Present state and prospects for incorporating YBCO windings. *Cryogenics.* 45:670–686. doi:10.1016/j.cryogenics.2005.09.001.

Behnia, K. 2017. The fragility of distant Cooper pairs. *Science.* 355:26–27. doi:10.1126/science.aal2516.

Beno, M. A., L. Soderholm, D. W. Capone, D. G. Hinks, J. D. Jorgensen, J. D. Grace, I. K. Schuller, C. U. Segre, and K. Zhang. 1987. Structure of the single-phase high-temperature superconductor $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. *Appl. Phys. Lett.* 51:57–59. doi:10.1063/1.98886.

Bhadra, R., T. O. Brun, M. A. Beno, B. Dabrowski, D. G. Hinks, J. Z. Liu, J. D. Jorgensen, L. J. Nowicki, A. P. Paulikas, I. K. Schuller, C. U. Segre, L. Soderholm, B. Veal, H. H. Wang, J. M. Williams, K. Zhang, and M. Grimsditch. 1988. Raman scattering from high- T_c superconductors. *Phys. Rev. B.* 37:5142–5147. doi:10.1103/PhysRevB.37.5142.

Blencowe, M. 2004. Quantum electromechanical systems. *Physics Reports.* 395:159–222. doi:10.1016/j.physrep.2003.12.005.

Brandon, D., and W. D. Kaplan. 2008. *Microstructural Characterization of Materials.* 1st ed. Wiley, England. Available from: 10.1002/9780470727133

Byrd, J. M., T. J. Shea, P. Denes, P. Siddons, D. Attwood, F. Kaertner, L. Moog, Y. Li, A. Sakdinawat, and R. Schlueter. 2010. Enabling instrumentation and technology for 21st century light sources. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* 623:910–920. doi:10.1016/j.nima.2010.06.244.

Callister, W. D., and D. G. Rethwisch. 2009. *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8th Edition. Wiley.

Carta González, J. A., R. Calero Pérez, A. Colmenar Santos, M. A. Castro Gil, and E. Collado Fernández. 2013. Centrales de energías renovables: Generación eléctrica con energías renovables. Pearson Educación, Madrid, España.

Cava, R. J. 2000. Oxide Superconductors. *Journal of the American Ceramic Society*. 83:5–28. doi:10.1111/j.1151-2916.2000.tb01142.x.

Cava, R. J., B. Batlogg, C. H. Chen, E. A. Rietman, S. M. Zahurak, and D. Werder. 1987. Oxygen stoichiometry, superconductivity and normal-state properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. *Nature*. 329:423–425. doi:10.1038/329423a0.

Changkang, C. 1998. Phase diagram and its application to the crystal growth of high T_c oxide superconductors. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 36:1–97. doi:10.1016/S0960-8974(98)00008-4.

Chapman, S. J. 2012. Máquinas eléctricas (5a. ed.). McGraw Hill México.

Chromik, Š., C. Camerlingo, M. Sojková, V. Štrbík, M. Talacko, I. Malka, I. Bar, G. Bareli, and G. Jung. 2017. Low energy electron beam processing of YBCO thin films. *Applied Surface Science*. 395:42–49. doi:10.1016/j.apsusc.2016.07.086.

Chu, C. W., L. Z. Deng, and B. Lv. 2015. Hole-doped cuprate high temperature superconductors. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 514:290–313. doi:10.1016/j.physc.2015.02.047.

Comisión Federal de Electricidad, M. 2019. Informe anual CFE 2019. México. Available from: https://infosen.senado.gob.mx/sgsp/gaceta/64/2/2020-07-20-1/assets/documentos/CFE_Informe_Anual_2019.pdf

Coppa, N. V., G. H. Myer, R. E. Salomon, A. Bura, J. W. O'Reilly, J. E. Crow, and P. K. Davies. 1992. Preparation, thermal processing behavior, and characterization of YBCO from freeze-dried nitrate precursors. *Journal of Materials Research*. 7:2017–2026. doi:10.1557/JMR.1992.2017.

Cullity, B. D., and S. R. Stock. 2014. Elements of X-Ray Diffraction. Third Edition. Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, U. K.

Dai, S., T. Ma, C. Xue, L. Zhao, Y. Huang, L. Hu, B. Wang, T. Zhang, X. Xu, L. Cai, and H. Chen. 2019. Development and test of a 220 kV/1.5 kA resistive type superconducting fault current limiter. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 565:1253501. doi:10.1016/j.physc.2019.06.004.

Dattagupta, S. 2004. Generalized spin-boson analysis of c-axis transport in layered superconductors. *Chemical Physics*. 296:267–272. doi:10.1016/j.chemphys.2003.10.005.

Delft, D. van. 2012. History and significance of the discovery of superconductivity by Kamerlingh Onnes in 1911. *Physica C: Superconductivity*. 479:30–35. doi:10.1016/j.physc.2012.02.046.

Enríquez Harper, G. 2009. *Tecnologías de generación de energía eléctrica*. Limusa, México.

Enríquez Harper, G. 2012. *Máquinas eléctricas*. Limusa.

Enríquez Harper, G. 2014. *El ABC de las energías renovables en los sistemas eléctricos*. Limusa, México.

Eremenko, V. V., V. N. Samovarov, V. L. Vakula, M. Yu. Libin, S. A. Uyutnov, and V. M. Rashkovan. 2001. Identification of the stripe state of a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ superconductor according to optical absorption data. *Low Temperature Physics*. 27:981–984. doi:10.1063/1.1421467.

Faber, T. E., and A. B. Pippard. 1955. Chapter IX Kinetics of the Phase Transition in Superconductors. In: *Progress in Low Temperature Physics*. Vol. 1. Elsevier. p. 159–183. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079641708600840>

Faisal, W. M. 2012. High T_c superconducting fabrication of loop antenna. *Alexandria Engineering Journal*. 51:171–183. doi:10.1016/j.aej.2012.02.004.

Ferraro, J. R., K. Nakamoto, and C. W. Brown. 2003. *Introductory Raman Spectroscopy*. 2nd ed. Elsevier, United States of America. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780122541056X50008>

Floegel-Delor, U., P. Schirrmeister, T. Riedel, R. Koenig, V. Kantarbar, M. Liebmann, and F. N. Werfel. 2019. Mobile HTS Bulk Devices as Enabling Ton-Force Technology for Maglev Trains. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 29:1–5. doi:10.1109/TASC.2019.2897216.

Florez, D., C. E. García-Duque, and J. C. Osorio. 2019. Is technology (still) applied science? *Technology in Society*. 59:101193. doi:10.1016/j.techsoc.2019.101193.

Fröhlich, H. 1950. Theory of the Superconducting State. I. The Ground State at the Absolute Zero of Temperature. *Phys. Rev.* 79:845–856. doi:10.1103/PhysRev.79.845.

Fujiwara, N., H. Hayashi, S. Nagaya, and Y. Shiohara. 2010. Development of YBCO power devices in Japan. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 470:980–985. doi:10.1016/j.physc.2010.05.015.

Gabovich, A. M., A. I. Voitenko, and M. Ausloos. 2002. Charge- and spin-density waves in existing superconductors: competition between Cooper pairing and Peierls or excitonic instabilities. *Physics Reports*. 367:583–709. doi:10.1016/S0370-1573(02)00029-7.

Geballe, T. H., R. H. Hammond, and P. M. Wu. 2015. What T_c tells. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 514:9–16. doi:10.1016/j.physc.2015.02.009.

Gencer, A., A. Ateş, E. Aksu, S. Nezir, S. Celebi, and E. Yanmaz. 1997. Microstructural and physical properties of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ superconductors prepared by the flame-quench-melt-growth (FQMG) method. *Physica C: Superconductivity*. 279:165–172. doi:10.1016/S0921-4534(97)00121-4.

Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz, Jörg Feldhusen, and Karl-Heinrich Grote. 2007. *Engineering Design*. 3rd edition. Springer-Verlag London, London, U.K.

Gimaev, R., Y. Spichkin, B. Kovalev, K. Kamilov, V. Zverev, and A. Tishin. 2019. Review on magnetic refrigeration devices based on HTSC materials. *International Journal of Refrigeration*. 100:1–12. doi:10.1016/j.ijrefrig.2019.01.024.

Ginzburg, L. V. 1955. Some Remarks Concerning the Macroscopic Theory of Superconductivity. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 3:593.

Ginzburg, V. L. 1955. On the theory of superconductivity. *Nuovo Cim*. 2:1234–1250. doi:10.1007/BF02731579.

Ginzburg, V. L. 1957. Ferromagnetic Superconductors. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 4:202.

Ginzburg, V. L., and L. D. Landau. 2009. On the Theory of Superconductivity. In: *On Superconductivity and Superfluidity: A Scientific Autobiography*. Springer, Berlin, Heidelberg. p. 113–137. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-540-68008-6_4

Gor'kov, L. P. 1959. Microscopic Derivation of the Ginzburg-Landau Equations in the Theory of Superconductivity. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 36:1918.

Grigorishin, K. V. 2019. The role of electron–vibron interaction and local pairing in conductivity and superconductivity of alkali-doped fullerenes. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 562:56–69. doi:10.1016/j.physc.2018.12.001.

Gurevich, A. 2011. To use or not to use cool superconductors? *Nature Materials*. 10:255–259. doi:10.1038/nmat2991.

Hall, C. W. 2018. *Laws and Models: Science, Engineering, and Technology*. CRC Press.

Han, T., S. Ko, and S. Lim. 2018. Fault Current Limiting Characteristics of Transformer-Type Superconducting Fault Current Limiter Due to Winding Direction of Additional Circuit. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 28:1–6. doi:10.1109/TASC.2018.2793236.

Harabor, A., P. Rotaru, and N. A. Harabor. 2014. Thermal properties, texture, second-order stress, and magnetic susceptibility of the $\text{Bi}_{1.8}\text{Pb}_{0.3}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. *J Therm Anal Calorim*. 118:227–234. doi:10.1007/s10973-014-4010-1.

Harabor, A., P. Rotaru, N. A. Harabor, P. Nozar, and A. Rotaru. 2019. Orthorhombic YBCO-123 ceramic oxide superconductor: Structural, resistive and thermal properties. *Ceramics International*. 45:2899–2907. doi:10.1016/j.ceramint.2018.07.272.

Heinrich, B. W., J. I. Pascual, and K. J. Franke. 2018. Single magnetic adsorbates on s-wave superconductors. *Progress in Surface Science*. 93:1–19. doi:10.1016/j.progsurf.2018.01.001.

Hong, S., H. Cheong, and G. Park. 2010. Raman analysis of a $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ thin film with oxygen depletion. *Physica C: Superconductivity*. 470:383–390. doi:10.1016/j.physc.2010.02.089.

Hummel, R. E. 2011. Electrical Conduction in Metals and Alloys. In: *Electronic Properties of Materials*. Springer, New York, USA. p. 79–114. Available from: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-8164-6_7

Iliev, M. N., V. G. Hadjiev, and V. G. Ivanov. 1996. Raman Spectroscopy of Local Structure and Reordering Processes in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ -Type Compounds. *Journal of Raman Spectroscopy*. 27:333–342. doi:10.1002/(SICI)1097-4555(199603)27:3/4<333::AID-JRS955>3.0.CO;2-W.

Iliev, M. N., V. G. Hadjiev, S. Jandl, D. Le Boeuf, V. N. Popov, D. Bonn, R. Liang, and W. N. Hardy. 2008. Raman study of twin-free ortho-II $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.5}$ single crystals. *Phys. Rev. B*. 77:174302. doi:10.1103/PhysRevB.77.174302.

Ivanov, V. G., M. N. Iliev, and C. Thomsen. 1995. Micro-Raman study of isotope substitution in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.2}$ during local laser annealing. *Phys. Rev. B*. 52:13652–13657. doi:10.1103/PhysRevB.52.13652.

Jasim, S. E., M. A. Jusoh, M. Hafiz, and R. Jose. 2016. Fabrication of Superconducting YBCO Nanoparticles by Electrospinning. *Procedia Engineering*. 148:243–248. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.595.

Jin, F., H. Zhang, W. Wang, X. Liu, and Q. Chen. 2017. Improvement in structure and superconductivity of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$ ceramics superconductors by optimizing sintering processing. *Journal of Rare Earths*. 35:85–89. doi:10.1016/S1002-0721(16)60177-1.

Jin, J. X. 2014. Emerging SMES Technology into Energy Storage Systems and Smart Grid Applications. In: J. Hossain and A. Mahmud, editors. *Large Scale Renewable Power Generation: Advances in Technologies for Generation, Transmission and Storage*. Springer, Singapore. p. 77–125. Available from: https://doi.org/10.1007/978-981-4585-30-9_4

Kalsi, S. S., D. Madura, and M. Ingram. 2005. Superconductor synchronous condenser for reactive power support in an electric grid. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 15:2146–2149. doi:10.1109/TASC.2005.849481.

Kalsi, S. S., K. Weeber, H. Takesue, C. Lewis, H.- Neumueller, and R. D. Blaugher. 2004. Development status of rotating machines employing superconducting field windings. *Proceedings of the IEEE*. 92:1688–1704. doi:10.1109/JPROC.2004.833676.

Kalta, B., A. Pattanaik, P. Nayak, and K. K. Nanda. 2011. A note on magnetization of high temperature superconductors (YBCO, BSCCO) in mixed state. *Physica C: Superconductivity*. 471:1664–1668. doi:10.1016/j.physc.2011.09.002.

Kamerlingh Onnes, H. 1912. Further experiments with Liquid Helium G. On the electrical resistance of Pure Metals etc. VI. On the Sudden Change in the Rate at which the Resistance of Mercury Disappears. *KNAW, Proceedings*. 14:818–821.

Ketterson, J. B. 2016. *The Physics of Solids*. Oxford University Press, Oxford, U. K.

Keysan, O., and M. A. Mueller. 2012. A Transverse Flux High-Temperature Superconducting Generator Topology for Large Direct Drive Wind Turbines. *Physics Procedia*. 36:759–764. doi:10.1016/j.phpro.2012.06.039.

Khadzhai, G. Y., R. V. Vovk, and O. V. Dobrovolskiy. 2019. Resistivity anisotropy in YBCO single crystals irradiated with fast electrons. *Physica B: Condensed Matter*. 566:121–124. doi:10.1016/j.physb.2019.05.004.

Khaled M.Elsabawy. 2011. Superconductivity, structure visualization, mechanical strength promotion and Raman spectra of hafnium-doped-123-YBCO synthesized via urea precursor route. *Cryogenics*. 51:452–459. doi:10.1016/j.cryogenics.2011.05.004.

Klissurski, D., and V. Rives. 1994. High-temperature superconductors in catalysis. *Applied Catalysis A: General*. 109:1–44. doi:10.1016/0926-860X(94)85001-1.

Koblischka, M. R., and A. Koblischka-Veneva. 2003. Characterization of bulk superconductors through EBSD methods. *Physica C: Superconductivity*. 392–396:545–556. doi:10.1016/S0921-4534(03)00850-5.

Kourouklis, G. A., A. Jayaraman, B. Batlogg, R. J. Cava, M. Stavola, D. M. Krol, E. A. Rietman, and L. F. Schneemeyer. 1987. Raman scattering in $\text{MBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ with $\text{M}=\text{Y}, \text{Eu}$, and Gd : Effect of ^{18}O substitution and oxygen vacancies on the Cu-O vibrational modes. *Phys. Rev. B*. 36:8320–8324. doi:10.1103/PhysRevB.36.8320.

Kulkarni, D., E. Chen, M. Ho, and H. Karmaker. 2015. Evaluation of Warm and Cold Shaft Designs for Large Multi-megawatt Direct Drive Offshore Superconducting Wind Generators. *Physics Procedia*. 67:195–200. doi:10.1016/j.phpro.2015.06.034.

Kumar, P., V. Pillai, S. R. Bates, and D. O. Shah. 1993. Preparation of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ superconductor by coprecipitation of nanosize oxalate precursor powder in microemulsions. *Materials Letters*. 16:68–74. doi:10.1016/0167-577X(93)90026-T.

Langford, J. I., and A. J. C. Wilson. 1978. Scherrer after sixty years: A survey and some new results in the determination of crystallite size. *Journal of Applied Crystallography*. 11:102–113. doi:10.1107/S0021889878012844.

Lazarides, N., and G. P. Tsironis. 2018. Superconducting metamaterials. *Physics Reports*. 752:1–67. doi:10.1016/j.physrep.2018.06.005.

Leybold. 2020. System that determining the transition temperature of a high-temperature superconductor. Available from: <https://www.leybold-shop.com/physics/physics-experiments/solid-state-physics/conduction-phenomena/superconductivity/determining-the-transition-temperature-of-a-high-temperature-superconductor/vp7-2-6-1.html>

Li, M. S. 2003. Paramagnetic Meissner effect and related dynamical phenomena. *Physics Reports*. 376:133–223. doi:10.1016/S0370-1573(02)00635-X.

Li, S., F. Lan, S. Chen, D. Peng, Y. Fang, R.-S. Wang, H. Lou, X. Zhang, Z. Zeng, X.-J. Chen, D. Qian, and Q. Zeng. 2020. Bulk intrinsic heterogeneity of metallic glasses probed by Meissner effect. *Intermetallics*. 119:106721. doi:10.1016/j.intermet.2020.106721.

Liarokapis, E. 2000. Raman Spectroscopy, Structural Modifications, and Phase Transitions in the High-Temperature Superconductors. *Journal of Superconductivity*. 13:889–893. doi:10.1023/A:1026470316446.

Liarokapis, E. 2017. Raman Study of the Anharmonicity in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$. In: *High-Tc Copper Oxide Superconductors and Related Novel Materials*. Springer International Publishing, Cham, Switzerland. p. 189–200. Available from: https://doi.org/10.1007/978-3-319-52675-1_15

Liu, Y., X. Zhang, J. Zhou, and Y.-H. Zhou. 2018. Transport AC loss in YBCO coated conductor with transverse crack. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 553:45–51. doi:10.1016/j.physc.2018.08.006.

Lloberas, J., A. Sumper, M. Sanmarti, and X. Granados. 2014. A review of high temperature superconductors for offshore wind power synchronous generators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 38:404–414. doi:10.1016/j.rser.2014.05.003.

London, F., H. London, and F. A. Lindemann. 1935. The electromagnetic equations of the supraconductor. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences*. 149:71–88. doi:10.1098/rspa.1935.0048.

Luiz, A. 2010. Superconductor. BoD – Books on Demand.

Machura, P., and Q. Li. 2019. A critical review on wireless charging for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 104:209–234. doi:10.1016/j.rser.2019.01.027.

Magaña Solís, L. F. 2013. Los superconductores. 4 Ed. Fondo de Cultura Económica, México.

Majewski, P. 2020. Superconducting Materials. In: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128035818117783>

Meissner, W., and R. Oschensfeld. 1933. Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften*. 21:787–788. doi:10.1007/BF01504252.

Melhem, Z. 2011. High Temperature Superconductors (HTS) for Energy Applications. 1st Edition. Woodhead Publishing, Cornwall, UK. Available from: <https://www.sciencedirect.com/book/9780857090126/high-temperature-superconductors-hts-for-energy-applications#book-info>

Morosin, B., E. L. Venturini, R. A. Graham, and D. S. Ginley. 1989. High-pressure shock modification and synthesis of superconducting ceramic oxides. *Synthetic Metals*. 33:185–224. doi:10.1016/0379-6779(89)90868-0.

Moure, C., and O. Peña. 2015. Recent advances in perovskites: Processing and properties. *Progress in Solid State Chemistry*. 43:123–148. doi:10.1016/j.progsolidstchem.2015.09.001.

Mukherjee, P., and V. V. Rao. 2019. Design and development of high temperature superconducting magnetic energy storage for power applications - A review. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 563:67–73. doi:10.1016/j.physc.2019.05.001.

Naito, T., S. Haraguchi, T. Suzuki, H. Iwasaki, T. Sasaki, T. Nishizaki, K. Shibata, and N. Kobayashi. 2001. In-plane anisotropy of the resistivity in 60 K YBCO single crystal under magnetic field. *Physica C: Superconductivity*. 362:310–313. doi:10.1016/S0921-4534(01)00694-3.

Nishio, T., and Y. Fujiki. 1993. Preparation of superconducting YBa₂Cu₃O_{7-x} fibres through metal citrate gel as a precursor. *J Mater Sci Lett*. 12:394–398. doi:10.1007/BF00609164.

Oku, T. 2014. High-resolution electron microscopy and electron diffraction of perovskite-type superconducting copper oxides. *Nanotechnology Reviews*. 3:413–444. doi:10.1515/ntrev-2014-0003.

Padam, G. K., M. Arora, S. D. Kaushik, and S. N. Ekbote. 2019. Enhanced critical current density (J_c) and fractural strength of low and high Eu level doped bare bulk (Bi, Pb)-2223 rods for cryogenic applications. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 562:78–84. doi:10.1016/j.physc.2019.03.013.

Pak Sung S., Montgomery Fred C., Duggan D. M., Chen K. C., Mazdiyasi K. S., Tsai Patricia K., Paulius Lisa M., and Maple M. Brian. 1992. Solution-Condensed YBa₂Cu₃O_{7-x} Superconductor Thin Films from Thermosetting Metal-Organic Precursors. *Journal of the American Ceramic Society*. 75:2268–2275. doi:10.1111/j.1151-2916.1992.tb04494.x.

Panfilov, A. G., A. I. Rykov, S. Tajima, and A. Yamanaka. 1998. Photoinduced oxygen reordering in YBa₂Cu₃O_{7-x} single crystals. *Phys. Rev. B*. 58:12459–12466. doi:10.1103/PhysRevB.58.12459.

Patterson, A. L. 1939. *thom*. *Phys. Rev.* 56:978–982. doi:10.1103/PhysRev.56.978.

Pavel, C. C., R. Lacal-Arántegui, A. Marmier, D. Schüler, E. Tzimas, M. Buchert, W. Jenseit, and D. Blagoeva. 2017. Substitution strategies for reducing the use of rare earths in wind turbines. *Resources Policy*. 52:349–357. doi:10.1016/j.resourpol.2017.04.010.

Peterson, D. E., K. A. Kubat-Martin, T. G. George, T. G. Zocco, and J. D. Thompson. 1991. Synthesis of YBa₂Cu₃O_{7-x} by chemical precursors. *Journal of Materials Research*. 6:11–17. doi:10.1557/JMR.1991.0011.

Poole, C. P., R. Prozorov, H. A. Farach, and R. J. Creswick. 2014a. 9 - Type II superconductivity. In: *Superconductivity*. Third Edition. Elsevier, London. p. 355–424. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095090000093>

Poole, C. P., R. Prozorov, H. A. Farach, and R. J. Creswick. 2014b. 16 - Cuprate high-T_c superconductors. In: *Superconductivity*. Third Edition. Elsevier, London. p.

677–726.

Available

from:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124095090000160>

Prakash, O., A. Kumar, A. Thamizhavel, and S. Ramakrishnan. 2017. Evidence for bulk superconductivity in pure bismuth single crystals at ambient pressure. *Science*. 355:52–55. doi:10.1126/science.aaf8227.

Rao, C. N. R. 1988. Solid-state chemistry of high-temperature oxide superconductors: The experimental situation. *Journal of Solid State Chemistry*. 74:147–162. doi:10.1016/0022-4596(88)90341-6.

Raveau, B., C. Michel, M. Hervieu, and J. Provost. 1988. Crystal chemistry of perovskite superconductors. *Physica C: Superconductivity*. 153–155:3–8. doi:10.1016/0921-4534(88)90483-2.

Rjabinin, J. N., and L. W. Shubnikow. 1935. Magnetic Properties and Critical Currents of Supra-conducting Alloys. *Nature*. 135:581–582. doi:10.1038/135581a0.

Rohacs, D., and J. Rohacs. 2016. Magnetic levitation assisted aircraft take-off and landing (feasibility study – GABRIEL concept). *Progress in Aerospace Sciences*. 85:33–50. doi:10.1016/j.paerosci.2016.06.001.

Salas, P., M. Fortes, M. A. Solís, and F. J. Sevilla. 2016. Specific heat of underdoped cuprate superconductors from a phenomenological layered Boson–Fermion model. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 524:37–43. doi:10.1016/j.physc.2016.03.002.

Santos-Cruz, D., S. A. Mayén-Hernández, F. de Moure-Flores, J. Campos-Álvarez, M. Pal, and J. Santos-Cruz. 2017. CuOX thin films by direct oxidation of Cu films deposited by physical vapor deposition. *Results in Physics*. 7:4140–4144. doi:10.1016/j.rinp.2017.10.022.

Şarlı, N., and M. Keskin. 2019. Effects of the Copper and Oxygen atoms of the CuO-plane on magnetic properties of the YBCO by using the effective-field theory. *Chinese Journal of Physics*. 59:256–264. doi:10.1016/j.cjph.2019.03.007.

Schroder, D. K. 2006. *Semiconductor Material and Device Characterization*. 3rd. Wiley-Interscience. Available from: <https://www.wiley.com/en-us/Semiconductor+Material+and+Device+Characterization%2C+3rd+Edition-p-9780471749080>

Shi, Y., H. J. Liu, F. Liu, Y. F. Tan, H. Jin, M. Yu, L. Lei, L. Guo, and Z. Y. Hong. 2018. Development of an YBCO coil with SSTC conductors for high field application. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 550:10–13. doi:10.1016/j.physc.2018.04.001.

Shubnikov, L. 1936. Destruction of Supraconductivity by Electric Current and Magnetic Field. *Nature*. 138:545–546. doi:10.1038/138545b0.

Singh, N. 2020. Leading theories of the cuprate superconductivity: a critique. arXiv:2006.06335 [cond-mat]. Available from: <http://arxiv.org/abs/2006.06335>

Skoog, D. A., F. J. Holler, and S. R. Crouch. 2018. *Principios de análisis instrumental*. 7a Edición. Cengage Learning, México. Available from: <https://latinoamerica.cengage.com/ls/9786075266558/>

Snider, E., N. Dasenbrock-Gammon, R. McBride, M. Debessai, H. Vindana, K. Vencatasamy, K. V. Lawler, A. Salamat, and R. P. Dias. 2020. Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride. *Nature*. 586:373–377. doi:10.1038/s41586-020-2801-z.

Stavola, M., D. M. Krol, W. Weber, S. A. Sunshine, A. Jayaraman, G. A. Kourouklis, R. J. Cava, and E. A. Rietman. 1987. Cu-O vibrations of Ba₂YCu₃O_x. *Phys. Rev. B*. 36:850–853. doi:10.1103/PhysRevB.36.850.

Stoneham, A. M., and L. W. Smith. 1991. Defect phenomena in superconducting oxides and analogous ceramic oxides. *J. Phys.: Condens. Matter*. 3:225. doi:10.1088/0953-8984/3/3/001.

Sung, H.-J., G.-H. Kim, K. Kim, M. Park, I.-K. Yu, and J.-Y. Kim. 2013. Design and comparative analysis of 10MW class superconducting wind power generators according to different types of superconducting wires. *Physica C: Superconductivity*. 494:255–261. doi:10.1016/j.physc.2013.04.061.

Sutcliffe, B. T., and R. G. Woolley. 2012. Atoms and Molecules in Classical Chemistry and Quantum Mechanics. In: A. I. Woody, R. F. Hendry, and P. Needham, editors. *Philosophy of Chemistry*. Vol. 6. North-Holland, Amsterdam. p. 387–426.

Terrell A., V. 1992. *Chemistry of superconductor materials, Preparation, Chemistry, characterization and theory*. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A.

Thadela, S., V. V. Rao, R. Agarwal, and R. S. Dondapati. 2019. Computational investigation on thermohydraulic characteristics of High-Temperature Superconducting (HTS) power cables. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 559:25–31. doi:10.1016/j.physc.2019.02.003.

Thomas, H., A. Marian, A. Chervyakov, S. Stückrad, and C. Rubbia. 2016a. Efficiency of superconducting transmission lines: An analysis with respect to the load factor and capacity rating. *Electric Power Systems Research*. 141:381–391. doi:10.1016/j.epsr.2016.07.007.

Thomas, H., A. Marian, A. Chervyakov, S. Stückrad, D. Salmieri, and C. Rubbia. 2016b. Superconducting transmission lines – Sustainable electric energy transfer with higher public acceptance? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 55:59–72. doi:10.1016/j.rser.2015.10.041.

Thomsen, C., M. Cardona, B. Gegenheimer, R. Liu, and A. Simon. 1988. Untwinned single crystals of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$: An optical investigation of the a–b anisotropy. *Phys. Rev. B*. 37:9860–9863. doi:10.1103/PhysRevB.37.9860.

Thomsen, C., and G. Kaczmarczyk. 2006. Vibrational Raman Spectroscopy of High-temperature Superconductors. In: *Handbook of Vibrational Spectroscopy*. American Cancer Society. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/0470027320.s6305>

Tixador, P. 2010. Development of superconducting power devices in Europe. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 470:971–979. doi:10.1016/j.physc.2010.05.014.

Tomita, M., K. Nagashima, T. Herai, and M. Murakami. 2002. Resin-impregnated bulk RE–Ba–Cu–O current leads for the superconducting magnet on maglev train. *Physica C: Superconductivity*. 372–376:1216–1220. doi:10.1016/S0921-4534(02)00976-0.

Vandenabeele, P. 2013. *Practical Raman Spectroscopy: An Introduction*. John Wiley & Sons.

Vyas, G., and R. S. Dondapati. 2020. AC losses in the development of superconducting magnetic energy storage devices. *Journal of Energy Storage*. 27:101073. doi:10.1016/j.est.2019.101073.

Waldram, J. R. 2017. *Superconductivity of Metals and Cuprates*. CRC Press. Available from: <https://www.taylorfrancis.com/books/9780203737934>

Wang, F., and D.-H. Lee. 2011. The Electron-Pairing Mechanism of Iron-Based Superconductors. *Science*. 332:200–204. doi:10.1126/science.1200182.

Williamson, G. K., and W. H. Hall. 1953. X-ray line broadening from fcc aluminium and wolfram. *Acta Metallurgica*. 1:22–31. doi:10.1016/0001-6160(53)90006-6.

Yamaguchi, S., K. Terabe, A. Imai, and Y. Iguchi. 1988. High-Temperature Resistivity Measurements of $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$. *Jpn. J. Appl. Phys.* 27:L220. doi:10.1143/JJAP.27.L220.

Yazdani-Asrami, M., S. A. Gholamian, S. M. Mirimani, and J. Adabi. 2019. Experimental investigation for power loss measurement of superconducting coils under harmonic supply current. *Measurement*. 132:324–329. doi:10.1016/j.measurement.2018.03.042.

Yunus A. Çengel, John M. Cimbala, and Robert H. Turner. 2017. Fundamentals of Thermal-Fluid Sciences. Fifth Edition. McGraw-Hill Education, United States of America.

Yunus A. Çengel, and Michael A. Boles. 2012. Termodinámica. Séptima edición. McGraw-Hill, México.

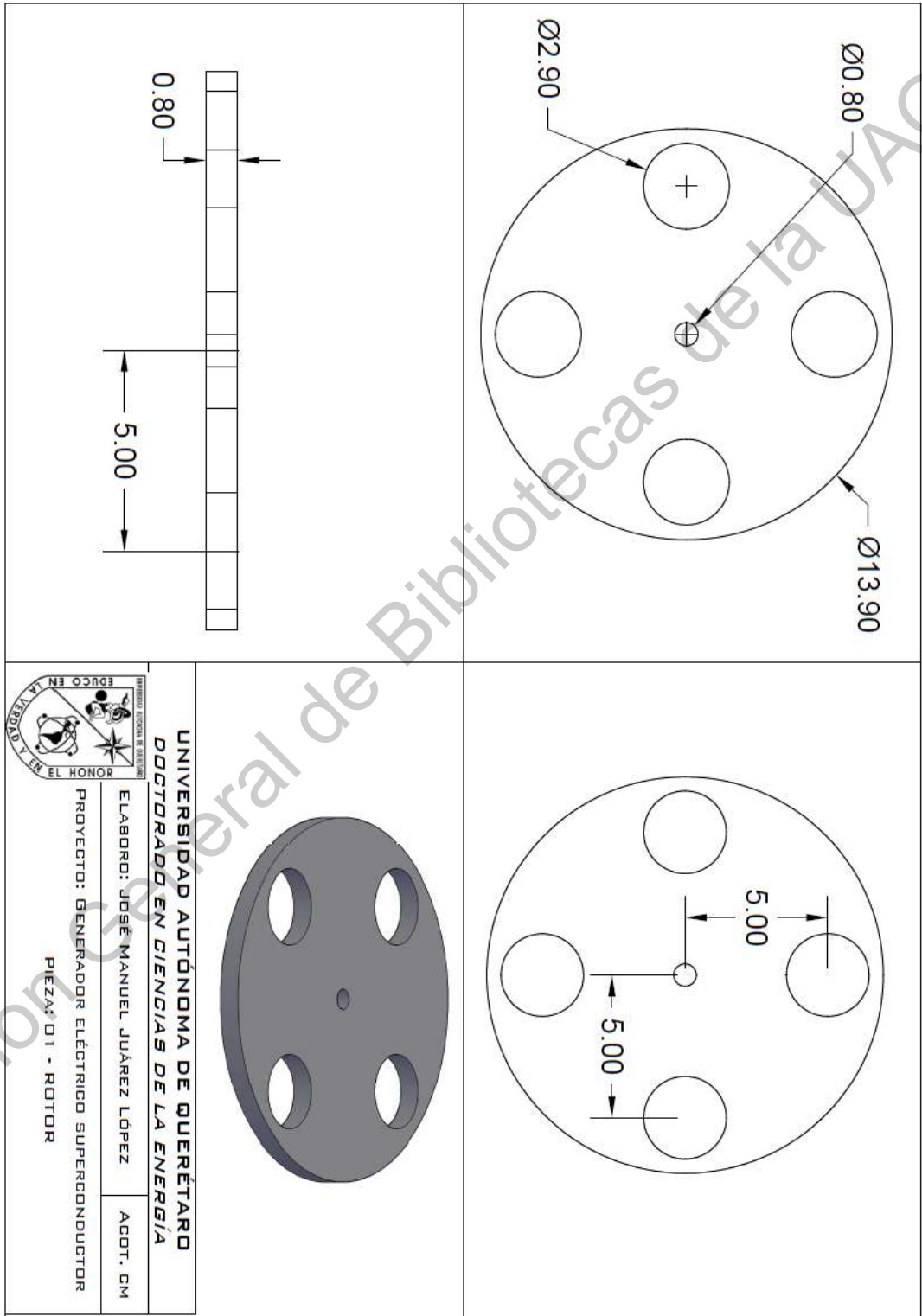
Zheng, B., J. Zheng, D. He, Y. Ren, and Z. Deng. 2016. Magnetic characteristics of permanent magnet guideways at low temperature and its effect on the levitation force of bulk YBaCuO superconductors. Journal of Alloys and Compounds. 656:77–81. doi:10.1016/j.jallcom.2015.09.116.

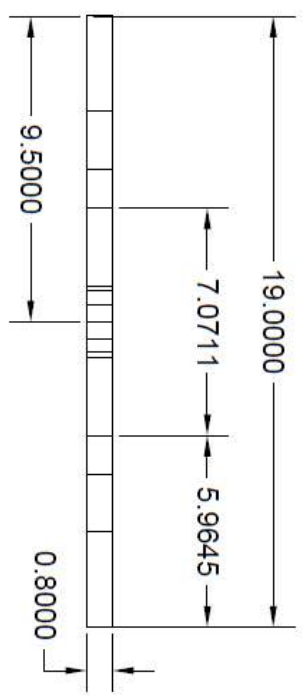
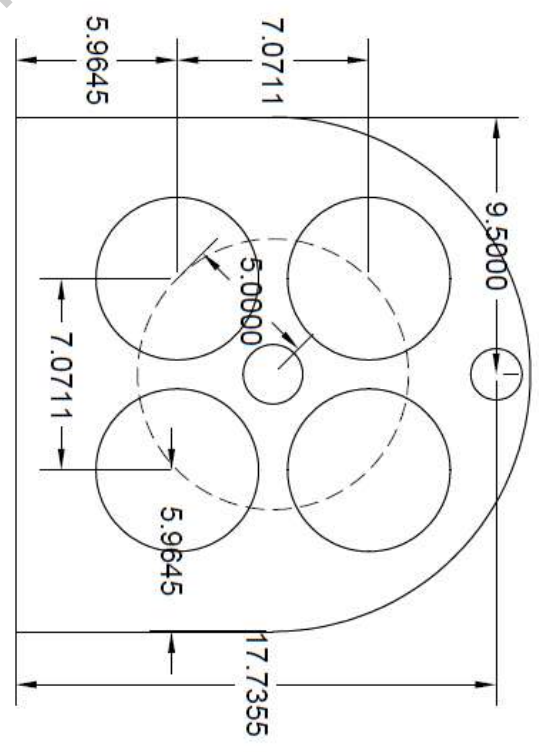
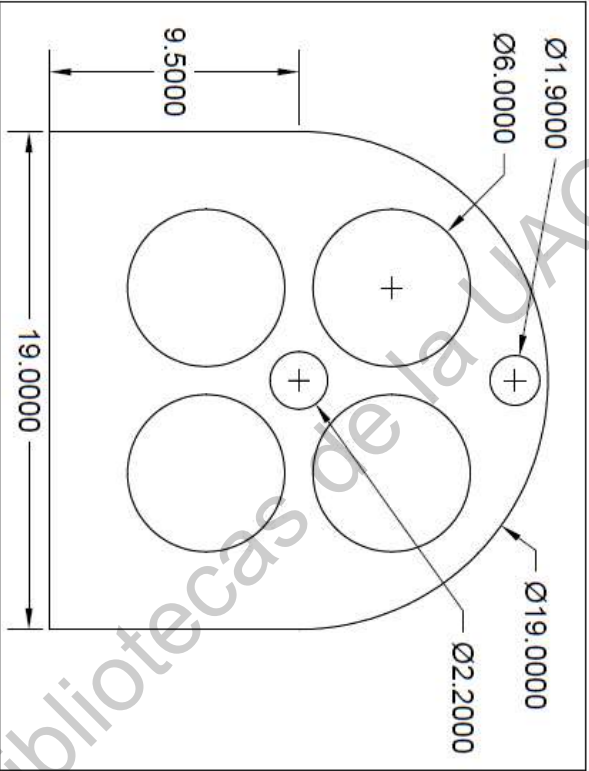
Zohuri, B. 2018. Chapter 1 - Cryogenic Technologies. In: Physics of Cryogenics. Elsevier. p. 1–51. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012814519700001X>


SECCIÓN TÉCNICA

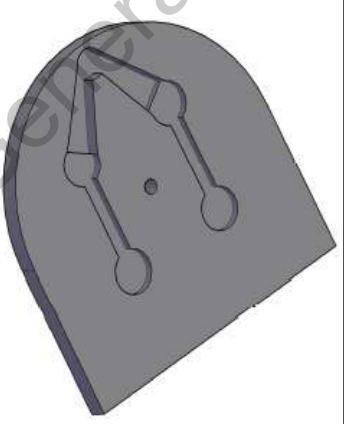
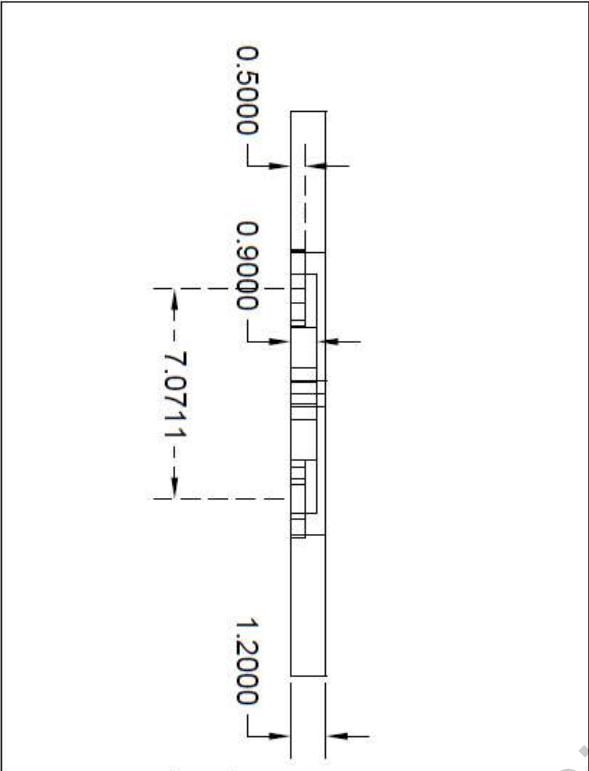
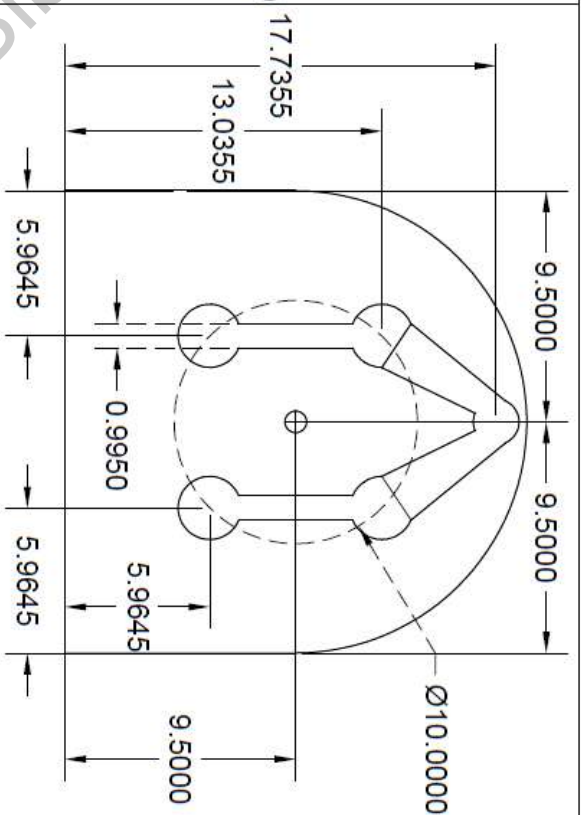
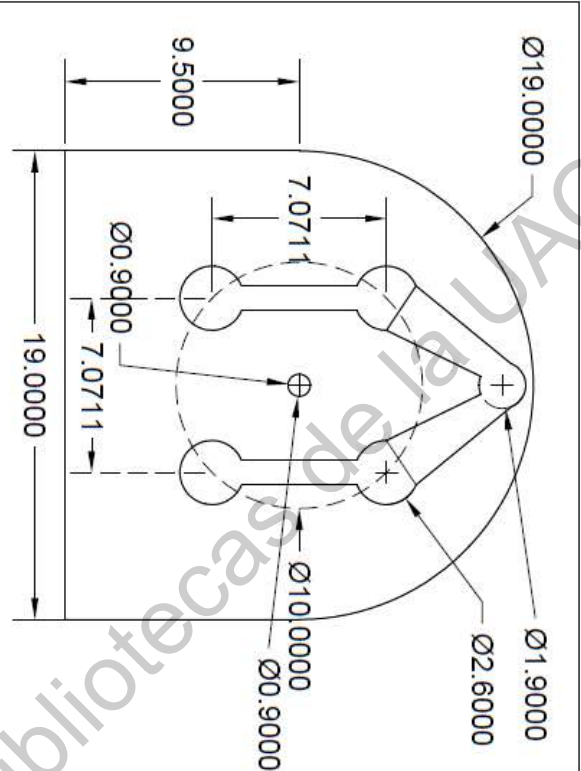
I. CARACTERÍSTICAS DIMENSIONALES DE ALAMBRES DESNUDOS


Calibre AWG	Diámetro del alambre en mm			Área de la sección transversal mm ²	Diámetro del alambre en in			Área de la sección transversal		Calibre AWG
	mínimo	nominal	máximo		mínimo	nominal	máximo	circular mils	in ²	
4	5.138	5.189	5.225	21.15	0.2023	0.2043	0.2057	417.35	0.03278	4
5	4.575	4.620	4.666	16.76	0.1801	0.1819	0.1832	330.84	0.02599	5
6	4.074	4.115	4.155	13.30	0.1604	0.1620	0.1631	262.46	0.02061	6
7	3.630	3.665	3.701	10.55	0.1429	0.1443	0.1453	208.20	0.01635	7
8	3.231	3.264	3.297	8.367	0.1272	0.1285	0.1294	165.13	0.01297	8
9	2.878	2.906	2.929	6.633	0.1133	0.1144	0.1153	130.89	0.01028	9
10	2.563	2.588	2.609	5.260	0.1009	0.1019	0.1027	103.81	0.00816	10
11	2.281	2.304	2.322	4.169	0.0898	0.0907	0.0914	82.28	0.00646	11
12	2.032	2.052	2.069	3.307	0.0800	0.0808	0.0814	65.27	0.00513	12
13	1.811	1.829	1.843	2.627	0.0713	0.0720	0.0726	51.85	0.00407	13
14	1.613	1.628	1.643	2.082	0.0635	0.0641	0.0647	41.08	0.00323	14
15	1.435	1.450	1.466	1.651	0.0565	0.0571	0.0577	32.59	0.00256	15
16	1.278	1.290	1.303	1.307	0.0503	0.0508	0.0513	25.79	0.00203	16
17	1.138	1.151	1.163	1.040	0.0448	0.0453	0.0458	20.53	0.00161	17
18	1.013	1.024	1.034	0.8236	0.0399	0.0403	0.0407	16.25	0.00128	18
19	0.902	0.912	0.922	0.6533	0.0355	0.0359	0.0363	12.89	0.00101	19
20	0.805	0.813	0.820	0.5191	0.0317	0.0320	0.0323	10.24	0.000804	20
21	0.716	0.724	0.732	0.4117	0.0282	0.0285	0.0288	8.12	0.000638	21
22	0.635	0.643	0.650	0.3247	0.0250	0.0253	0.0256	6.41	0.000503	22
23	0.569	0.574	0.579	0.2588	0.0224	0.0226	0.0228	5.11	0.000401	23
24	0.505	0.511	0.516	0.2051	0.0199	0.0201	0.0203	4.05	0.000317	24
25	0.450	0.455	0.460	0.1626	0.0177	0.0179	0.0181	3.21	0.000252	25
26	0.399	0.404	0.409	0.1282	0.0157	0.0159	0.0161	2.53	0.000199	26
27	0.358	0.361	0.363	0.1024	0.0141	0.0142	0.0143	2.02	0.000158	27
28	0.318	0.320	0.323	0.0804	0.0125	0.0126	0.0127	1.59	0.000125	28
29	0.284	0.287	0.290	0.0647	0.0112	0.0113	0.0114	1.28	0.000100	29
30	0.251	0.254	0.257	0.0507	0.0099	0.0100	0.0101	1.00	0.00007854	30
31	0.224	0.226	0.229	0.0401	0.0088	0.0089	0.0090	0.792	0.00006221	31
32	0.201	0.203	0.206	0.0324	0.0079	0.0080	0.0081	0.633	0.00005027	32
33	0.178	0.180	0.183	0.0254	0.0070	0.0071	0.0072	0.502	0.00003959	33
34	0.157	0.160	0.163	0.0201	0.0062	0.0063	0.0064	0.397	0.00003117	34
35	0.140	0.142	0.145	0.0158	0.0055	0.0056	0.0057	0.313	0.00002463	35
36	0.124	0.127	0.130	0.0127	0.0049	0.0050	0.0051	0.250	0.00001964	36
37	0.112	0.114	0.117	0.0102	0.0044	0.0045	0.0046	0.201	0.00001590	37
38	0.099	0.102	0.104	0.0082	0.0039	0.0040	0.0041	0.161	0.00001257	38
39	0.086	0.089	0.091	0.0062	0.0034	0.0035	0.0036	0.123	0.00000962	39
40	0.076	0.079	0.081	0.0049	0.0030	0.0031	0.0032	0.097	0.00000755	40
41	0.069	0.071	0.074	0.0040	0.0027	0.0028	0.0029	0.078	0.00000616	41
42	0.061	0.064	0.066	0.0032	0.0024	0.0025	0.0026	0.063	0.00000491	42
43	0.053	0.056	0.058	0.0025	0.0021	0.0022	0.0023	0.048	0.00000380	43
44	0.048	0.051	0.053	0.0020	0.0019	0.0020	0.0021	0.040	0.00000314	44

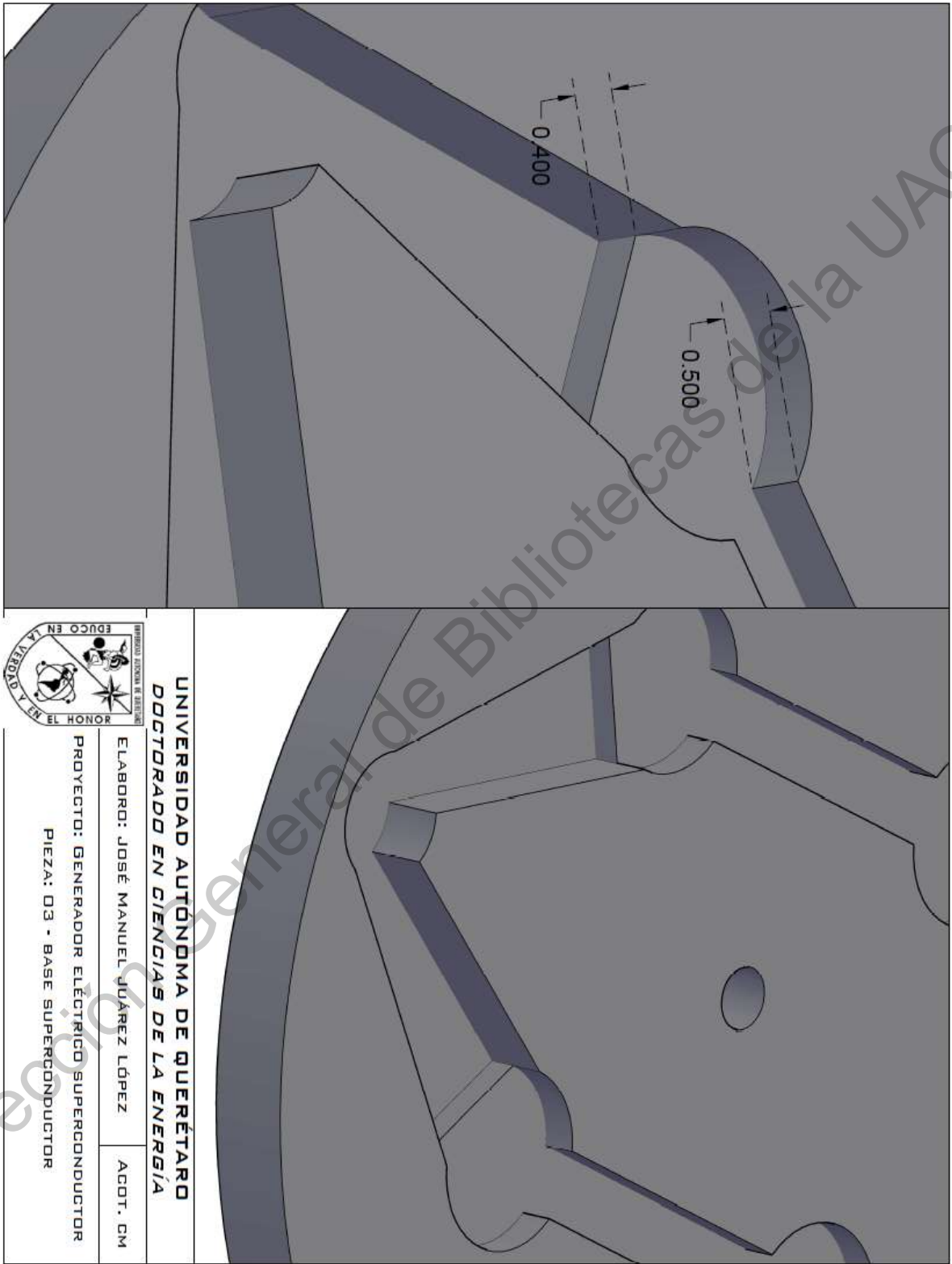




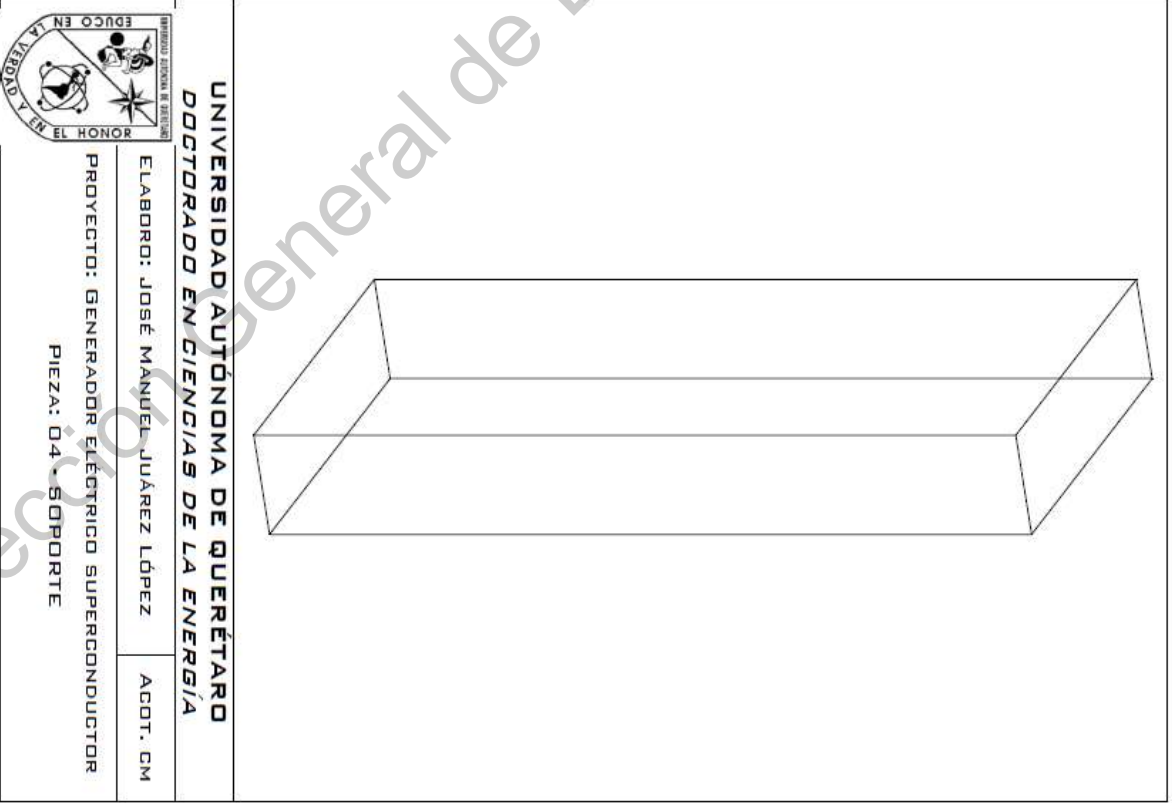
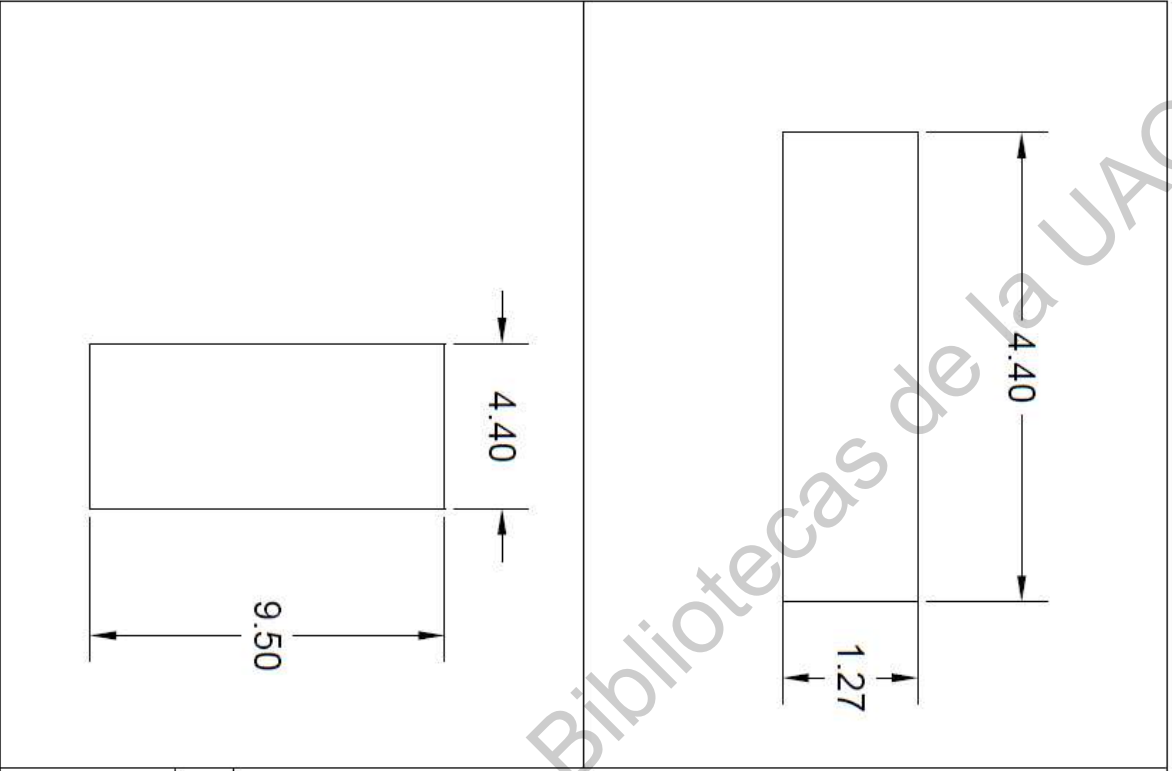

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA ENERGÍA
 ELABORO: JOSÉ MANUEL JUÁREZ LÓPEZ AGOT. CM
 PROYECTO: GENERADOR ELÉCTRICO SUPERCONDUCTOR
 PIEZA: 02 - ESTÁTOR




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA ENERGÍA
 ELABORÓ: JOSÉ MANUEL JUÁREZ LÓPEZ
 ACOT. CM
 PROYECTO: GENERADOR ELÉCTRICO SUPERCONDUCTOR
 PIEZA: 03 - BASE SUPERCONDUCTOR



Directorio General de Bibliotecas de la UAQ



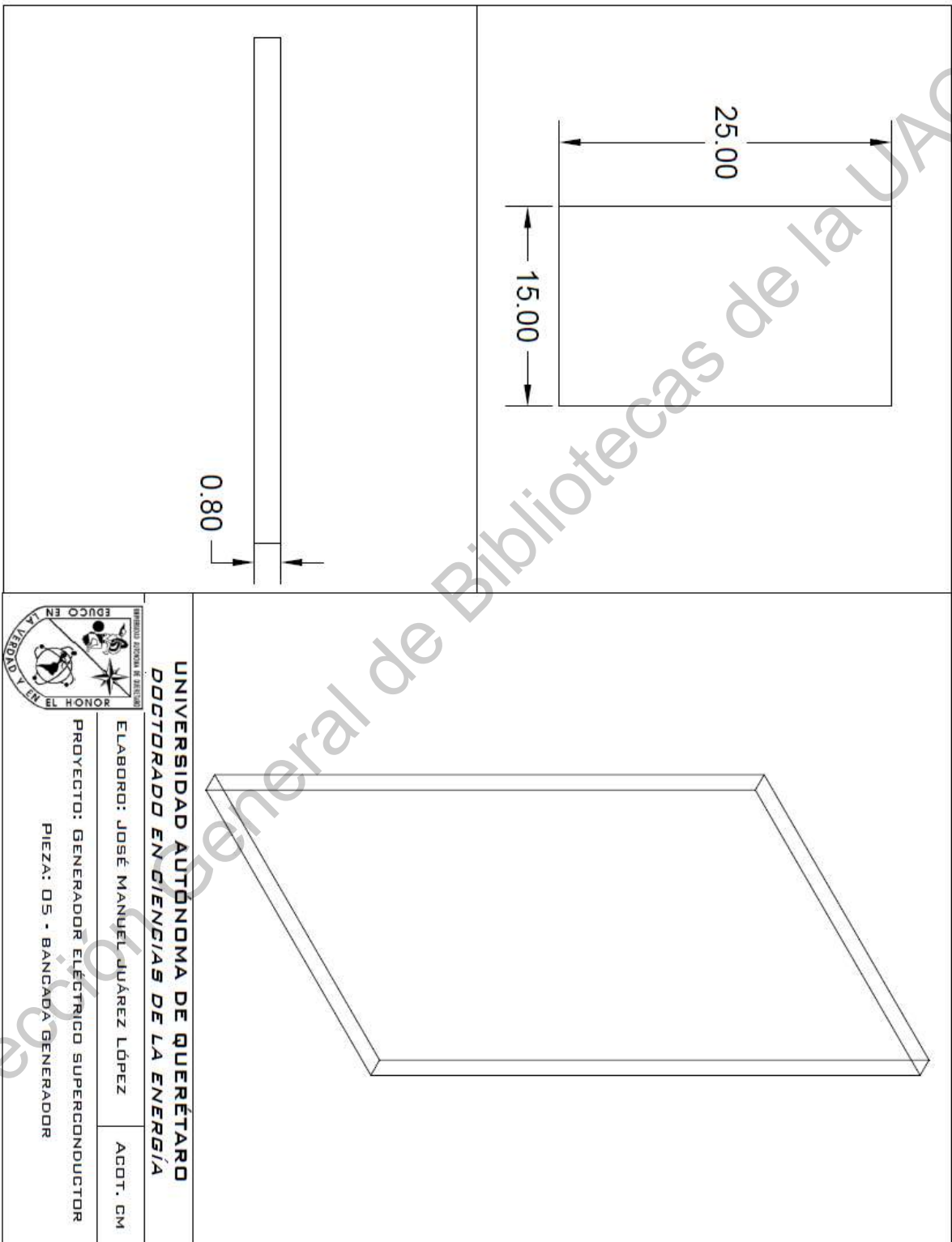
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA ENERGÍA


ELABORADO: JOSÉ MANUEL JUÁREZ LÓPEZ

ACOT. CM

PROYECTO: GENERADOR ELÉCTRICO SUPERCONDUCTOR

PIEZA: 04 - SOPORTE




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA ENERGÍA
ELABORADO: JOSÉ MANUEL JUÁREZ LÓPEZ ACOT. CM
PROYECTO: GENERADOR ELÉCTRICO SUPERCONDUCTOR
PIEZA: DS - BANCADA GENERADOR

KBPC40, 50/W SERIES

40, 50A HIGH CURRENT BRIDGE RECTIFIER

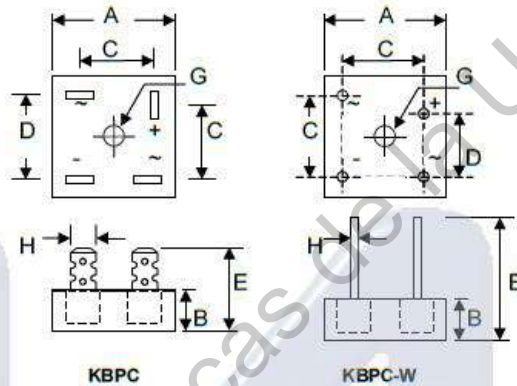
Features

- Diffused Junction
- Low Reverse Leakage Current
- Low Power Loss, High Efficiency
- Electrically Isolated Metal Case for Maximum Heat Dissipation
- Case to Terminal Isolation Voltage 2500V
- UL Recognized File # E157705

Mechanical Data

- Case: Metal Case with Electrically Isolated Epoxy
- Terminals: Plated Leads Solderable per MIL-STD-202, Method 208
- Polarity: Symbols Marked on Case
- Mounting: Through Hole for #10 Screw
- Weight: KBPC 31.6 grams (approx.)
KBPC-W 28.5 grams (approx.)
- Marking: Type Number

"W" Suffix Designates Wire Leads
No Suffix Designates Faston Terminals



Dim	KBPC		KBPC-W	
	Min	Max	Min	Max
A	28.40	28.70	28.40	28.70
B	10.97	11.23	10.97	11.23
C	15.70	16.70	17.10	19.10
D	17.50	18.50	10.90	11.90
E	22.86	25.40	30.50	—
G	Hole for #10 screw, 5.08Ø Nominal			
H	6.35 Typical		0.97Ø 1.07Ø	
All Dimension in mm				

Maximum Ratings and Electrical Characteristics @T_A=25°C unless otherwise specified

Single Phase, half wave, 60Hz, resistive or inductive load.
For capacitive load, derate current by 20%.

Characteristics	Symbol	-00/W	-01/W	-02/W	-04/W	-06/W	-08/W	-10/W	Unit
Peak Repetitive Reverse Voltage	V _{RRM}								V
Working Peak Reverse Voltage	V _{RWM}	50	100	200	400	600	800	1000	
DC Blocking Voltage	V _R								
RMS Reverse Voltage	V _{R(RMS)}	35	70	140	280	420	560	700	V
Average Rectifier Output Current @T _C = 55°C	I _O				40 50				A
Non-Repetitive Peak Forward Surge Current 8.3ms single half sine-wave Superimposed on rated load (JEDEC Method)	I _{FSM}				400 400				A
Forward Voltage Drop (per element)	V _{FM}				1.2				V
Peak Reverse Current At Rated DC Blocking Voltage	I _{RM}				10 1.0				µA mA