

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Fabricación y Caracterización de Electrodo Cerámicos
Utilizando Óxido de Cerio y Óxido de Cobre como
Materiales Alternativos a los que se Emplea en
Generadores Magneto-Hidrodinámicos**

Proyecto de Investigación

Camila Elizabeth Toledo Torres

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniera Mecánica

Quito, 28 de mayo de 2018

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Fabricación y Caracterización de Electrodo Cerámico Utilizando Óxido de Cerio y Óxido de Cobre como Materiales Alternativos a los que se Emplea en Generadores Magneto-Hidrodinámicos

Camila Elizabeth Toledo Torres

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Lorena Bejarano, Ph.D.

Firma del profesor

Quito, 28 de mayo de 2018

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

Nombres y apellidos:

Camila Elizabeth Toledo Torres

Código:

00112338

Cédula de Identidad:

0603813338

Lugar y fecha:

Quito, 28 de mayo de 2018

RESUMEN

En este estudio se ha realizado una reproducción de la fabricación de electrodos (pastillas) cerámicas a partir de dos materiales, óxido de cerio (CeO_2) y óxido de cobre (Cu_2O). Estos materiales fueron caracterizados mediante pruebas de difracción de rayos X y el uso de un microscopio electrónico de barrido. Adicionalmente, se realizó mediciones de conductividad eléctrica de las pastillas terminadas. La meta del estudio es la de reproducir las pruebas realizadas en materiales cerámicos para probar su viabilidad como material para la fabricación de electrodos cerámicos capaces de ser utilizados dentro de generadores magneto-hidrodinámicos. Los generadores magneto-hidrodinámicos son una fuente producción energética que permite aprovechar las altas temperaturas generadas al usar carbón directamente como combustible para la generación de energía eléctrica. El sistema requiere de partes móviles y contribuye a mejorar la eficiencia que una planta tradicional. El trabajo realizado fue de carácter experimental y se dividió en siete partes: 1) Calcinación de los materiales, 2) Caracterización morfológica mediante microscopio electrónico, 3) Prueba de difracción de Rayos X, 4) Fabricación de pastillas cerámicas por prensado seco, 5) Sinterización, 6) Recubrimiento conductor y prueba de conductividad eléctrica. Comúnmente se utiliza un molino de atricción para reducir el tamaño de las partículas, previo a su calcinación, pero no fue necesario en esta investigación debido a que ya poseían el tamaño requerido.

Cabe recalcar que durante el proceso de calcinación el óxido de cobre (Cu_2O) se oxidó debido a la temperatura, transformándose de manera parcial en CuO .

El resultado de la prueba de difracción de rayos X muestra que ambos cerámicos son cristales monofásicos y refleja los cambios de fase ocurridos en el Cu_2O . En el ensayo de conductividad eléctrica el CuO presenta características de semiconductor, lo que indica potencial de conducir electricidad en los rangos necesarios para el funcionamiento dentro de un GMHD. Por otro lado, el CeO_2 exhibe propiedades de conducción mixta y resultó ser un material aislante por su baja conductividad eléctrica.

Palabras clave: Cristales, electro cerámico, difractor de rayos X, cuerpo sólido, conductividad eléctrica.

ABSTRACT

The present study presents a reproduction of the manufacturing of green bodies used for electrodes using two materials, cerium oxide (CeO_2) and copper oxide (Cu_2O). These materials were characterized through X-ray diffraction tests, and the use of a scanning electron microscope. Additionally, electrical conductivity measurements of the finished green bodies were made. The goal of the study is to reproduce the tests carried out on ceramic materials to prove their viability as a material for the manufacture of ceramic electrodes capable of being used inside magneto-hydrodynamic generators. Magneto-hydrodynamic generators are a source of energy production which allows the direct use of coal as fuel to generate electric energy without the need for moving parts and with greater efficiency than a traditional plant. The experimental study presented has seven parts: 1) Calcination of the compounds 2) Morphological characterization by electron microscopy, 3) X-ray diffraction test, 4) Manufacture of ceramic tablets by dry pressing, 5) Sintering, 6) Conductive coating and electrical conductivity test. An attrition mill is commonly used to reduce the size of the particles before calcination, but it was deemed unnecessary in this investigation since they already had the required size.

It should be noted that during the calcination process the copper oxide (Cu_2O) was oxidized due to the temperature, resulting in partial amount of CuO .

The result of the X-ray diffraction test shows that both ceramics are single-phase crystals and also it reflects phase change in Cu_2O . In the electrical conductivity test the CuO has semiconductor characteristics, which indicates the potential to conduct electricity in the ranges necessary for operation within a GMHD. On the other hand, CeO_2 exhibits mixed conduction properties and turned out to be an insulating material due to its low electrical conductivity.

Key words: Crystal, electro-ceramic, X-ray diffractometer, electrical conductivity, green body.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN.....	4
ABSTRACT	5
TABLA DE CONTENIDOS	6
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS	9
Introducción	10
Métodos	18
Proceso de fabricación estándar de muestras de electrodos cerámicos.....	18
Especificaciones del material.....	19
Preparación de polvo- Mezcla y Pulverización	20
Calcinación.....	21
Caracterización de polvos cerámicos	22
Prensado en seco de muestra	24
Sinterizado	26
Prueba de conductividad eléctrica en electro-cerámicos.....	26
Resultados Y discusiones.....	30
Resultados de prueba de difracción de rayos X.....	30
Análisis estructural de muestras mediante el uso del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)	33
Prensado y Sinterizado	35
Resultados de Prueba de conductividad eléctrica.....	37
Conclusiones.....	41
Referencias bibliográficas	43
ANEXO A: IMÁGENES DE PROCESO DE MANUFACTURA DE PASTILLAS CERÁMICAS	45
Calcinación	45
Pesaje	45
Preparación de muestra	46
Prensado en Seco	47
Pesaje posterior a la sinterización	48
Pastillas Sinterizadas.....	48

Toma de Medidas.....	48
Recubrimiento con Pintura Conductora de Plata.....	49
ANEXO B: DATOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	50
Oxido de Cerio.....	50
Oxido de Cobre.....	51
Oxido de Cerio Calcinado.....	52
Oxido de Cobre Calcinado.....	53
ANEXO C: DATOS DE PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD.....	54
Oxido de Cobre.....	54
Oxido de Cerio.....	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones de equipos utilizados durante el proyecto de investigación.....	18
Tabla 2. Especificación de materiales.....	19
Tabla 3. Dimensiones y peso de pastillas de CuO y CeO ₂	25
Tabla 4. Densificación de las pastillas estándar antes y después de la sinterización.....	36
Tabla 5. Resultados de conductividad para CeO ₂ , primer y último dato.....	37
Tabla 6. Resultados de conductividad para CuO, primer y último dato.....	38
Tabla 7. Extrapolación a partir de la tendencia de los datos para Óxido de Cerio.....	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Esquema general del funcionamiento del GMHD (Carabineanu, 2014).	13
Ilustración 2. Esquema de corrientes dentro de la tobera.	14
Ilustración 3. Molde de acero inoxidable conformado por base, punzón y centro.	24
Ilustración 4. Pastilla de cobre pintada con pasta conductora de plata.	27
Ilustración 5. Estación de prueba Cascade Alessi REL-4800 con pastilla de CeO ₂	28
Ilustración 6. Difractograma de rayos X de CeO ₂ control.	30
Ilustración 7. Difractograma de rayos X de CeO ₂ Calcinado.	31
Ilustración 8. Difractograma de rayos X de Cu ₂ O control.	31
Ilustración 9. Difractograma de rayos X de CuO calcinado.	32
Ilustración 10. Óxido de cerio (CeO ₂) puro a 2000X.	33
Ilustración 11. Óxido de cerio (CeO ₂) calcinado a 1200°C a 2000X.	34
Ilustración 12. Óxido de cobre (Cu ₂ O) control a 1700X.	34
Ilustración 13. Óxido de cobre (CuO) calcinado a 800°C por 4 horas a 2000X.	35
Ilustración 14. Óxido de cobre (CuO) calcinado a 900°C por 4 horas a 2000X.	35
Ilustración 15. Datos de conductividad vs. temperatura de la pastilla de óxido de cerio.	37
Ilustración 16. Datos de conductividad vs. temperatura de la pastilla de óxido de cobre.	38

INTRODUCCIÓN

Los procesos industriales, de generación y consumo de energía han provocado que el planeta se enfrente al fenómeno conocido como calentamiento global, que se produce como consecuencia de altos niveles de producción de CO_2 y gases de invernadero. El alto porcentaje de estas emisiones se debe principalmente al uso de combustibles fósiles para actividades industriales o de generación de energía (Lashof & Ahuja, 1990). Para mitigar el impacto ambiental, la eficiencia en métodos de generación de energía, tanto renovable como no renovable, es un tema vital para la humanidad. A través del estudio de nuevos materiales, se ha buscado aumentar la eficiencia por quema de combustible en plantas generadoras de energía con el fin de extender la capacidad de generación energética y el tiempo que se podrá extraer y utilizar los recursos no renovables (Rossing & Bowen, 1976).

Los generadores magneto-hidrodinámicos (GMHD) son sistemas de apoyo que contribuyen al aprovechamiento de la energía calórica que se produce en plantas generadoras de energía por quema de combustibles fósiles, con el principal de contribuir en la reducción de emisiones de CO_2 . A continuación se describen los fundamentos y la estructura de este tipo de generadores.

Las ondas magneto-hidrodinámicas fueron descubiertas por Hannes Alfvén en la década de 1930. Físico de profesión, Alfvén fue ganador del Nobel en 1970. Sus cálculos teóricos fueron publicados en el año 1942 en una publicación científica de Nature. El trabajo de Alfvén indica que si un líquido conductor se coloca dentro de un campo magnético constante, cada movimiento del líquido genera un campo electromagnético, mismo que genera una corriente eléctrica de acuerdo con las leyes de la electrodinámica (Alfvén, 1942).

Dentro del estudio de este tipo de ondas magneto-hidrodinámicas existe una rama específica que se utiliza para la generación de energía. Los GMHD son mecanismos alternativos para

transformar energía, extender la capacidad de producción energética y prolongar el tiempo de uso de recursos no renovables. El principio básico de funcionamiento de los generadores magneto-hidrodinámicos está basado en transformar la energía interna de un fluido conductor en energía eléctrica. Estos tratan específicamente con el flujo de plasmas combustibles en la presencia de campos magnéticos (Triwahju, Sakamoto & Harada, 2008). El fluido se expande a través de un inyector que genera un movimiento independiente y cuya ubicación perpendicular al campo magnético da lugar a la generación de una fuerza y una corriente eléctrica en concordancia con el principio físico de inducción que permite que el funcionamiento de los generadores magneto-hidrodinámicos sea posible. Los principios están gobernados por la ley de Lorentz. El principio de inducción fue descubierto por Michael Faraday en 1831 (Kessler, 2000). Los cálculos específicos se detallan más adelante, junto con el funcionamiento del generador.

Este tipo de generadores se destacan principalmente por tener un sistema de funcionamiento que logra convertir directamente energía calórica a eléctrica, sin la necesidad de un paso intermedio por un sistema mecánico y por ende ser una mejora eficiente en la producción energética en plantas tradicionales de generación de energía.

En el año 1945 se creó el primer generador funcional, mismo que producía una energía muy inferior a la de una planta actual: 11.5 KW. Como comparación, una planta hidroeléctrica pequeña genera alrededor de 5000 MW (International Energy Agency, 2012). En los años 60 se diseñaron plantas de mayor capacidad de producción energética, que llegaron a generar hasta 1.5MW (Kessler, 2000). Consecutivamente, se realizaron investigaciones en Estados Unidos y Rusia, que finalmente llevaron al desarrollo de las primeras plantas piloto de generación de energía a través del sistema GMHD en estos países (Malghan, 1996). En la segunda mitad de los años 70, Rusia obtuvo una generación de hasta 25MW al igual que las primeras plantas que podían trabajar de manera continua hasta 10 horas, mientras que Estados

Unidos obtuvo resultados similares en 1985 (Malghan, 1996). A partir del año 1982, los esfuerzos por comercializar los GMDH han seguido hasta la actualidad. Hoy en día se utiliza GMDH en conjunto con centrales termoeléctricas a lo largo del planeta para incrementar la eficiencia energética y aminorar la pérdida de energía calórica en estos procesos (Malghan, 1996). Una planta tradicional de quema de carbón a través de vapor tiene una eficiencia de 30% a 40%, mientras que un generador MHD puede llegar a tener eficiencias de alrededor de 80% a 90%. Por desgracia, los generadores MHD no están diseñados para trabajar solos, si no como sistema de apoyo en plantas de otros tipos. Un sistema combinado de quema y GMHD llega al rango de 50% a 60% de eficiencia total (Chapman & Johanson, 1991).

A continuación se detalla el funcionamiento específico de los generadores magneto-hidrodinámicos. Estos operan bajo el principio de que un fluido conductor que se mueve con una velocidad a través de un campo magnético, lo que produce inducción electromagnética en concordancia con la ley de Ohm (Kayukawa, 2004). La inducción electromagnética fue demostrada por Michael Faraday, quien en 1832 realizó un experimento utilizando placas de cobre sumergidas a cada lado del Río Támesis. Las placas estaban conectadas mediante un cable en el exterior del río y no tenían ninguna fuente de voltaje. A pesar de esto, Faraday observó que una corriente eléctrica fluía a través del cable que conectaba ambas placas, esto se debía a que el flujo del agua a través del río llevaba consigo partículas cargadas, tales como sales minerales, mismas que se movían a través del campo magnético terrestre y generaban la corriente (Malghan, 1996).

Matemáticamente, si se denomina la velocidad a la que el carbón gasificado se mueve como u y la conductividad eléctrica escalar como σ , entonces según la ley de Ohm, la corriente por unidad de área j que se induce por el movimiento del gas a través del campo magnético B es

$$j = \sigma (u \times B - E) \quad (1).$$

Donde E es el campo eléctrico interno debido a la carga.

Como se puede observar, existe una relación proporcional entre la magnitud del campo magnético por el cual se mueve una partícula cargada, como un electrón o un ion por ejemplo, y la corriente por unidad de área inducida por el movimiento. La constante de proporcionalidad está dada por la velocidad de la partícula y su conductividad. Es decir, si el gas se mueve a mayor velocidad o tiene una mayor conductividad eléctrica, la corriente generada por su movimiento será mayor (Alfvén, 1942).

Los componentes principales de un generador magneto-hidrodinámico son: una cámara de combustión en la cual se quema el combustible y, a continuación, una tobera con electrodos ubicados en puntos opuestos del inyector para absorber la corriente generada (Rosa, 1987). El diseño de la zona de producción de plasma y la distribución de los elementos como los electrodos y magnetos se puede observar en la figura 1.

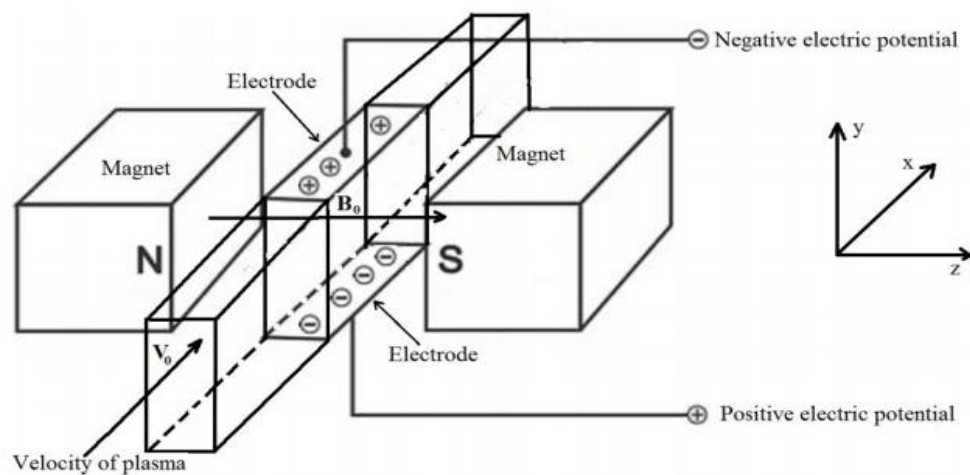


Ilustración 1. Esquema general del funcionamiento del GMHD (Carabineanu, 2014).

Dentro del GMDH, el proceso inicia con la ionización del material mediante la quema de combustibles como gas natural o carbón gasificado en la cámara de combustión. Debido a que se requiere de la presencia de partículas cargadas dentro del fluido, los iones son el elemento

principal para que la generación de la corriente se cumpla. El principal problema de este método es que la temperatura de combustión no es suficientemente alta como para que el carbón se ionice directamente, por lo que, para que la ionización sea más efectiva, se inyecta al carbón un nucleador de potasio, es decir, partículas típicamente de K_2CO_3 (carbonato de potasio), mismo que se ioniza a menor temperatura y tiene un costo de mercado bajo, que permite alto rendimiento económico (Rosa, 1987).

Una vez ionizado el material combustible, este pasa hacia la tobera. La tobera tiene un diámetro incremental a medida que el gas avanza, de manera que la velocidad del mismo es por la expansión que sufre el fluido conductor. Dentro de la tobera, las partículas cargadas, es decir los electrones y los cationes resultantes de la ionización del carbonato de potasio, pueden moverse debido a que el campo magnético los desvía en polos opuestos. El generador está diseñado de tal manera que el ánodo y el cátodo se encuentran posicionados a lados opuestos de la tobera (Rossing & Bowen, 1976).

El movimiento de las partículas cargadas genera lo que se denomina la corriente de Faraday en el eje vertical Y, y la corriente de Hall en el eje horizontal X, como se observa en la figura 2.

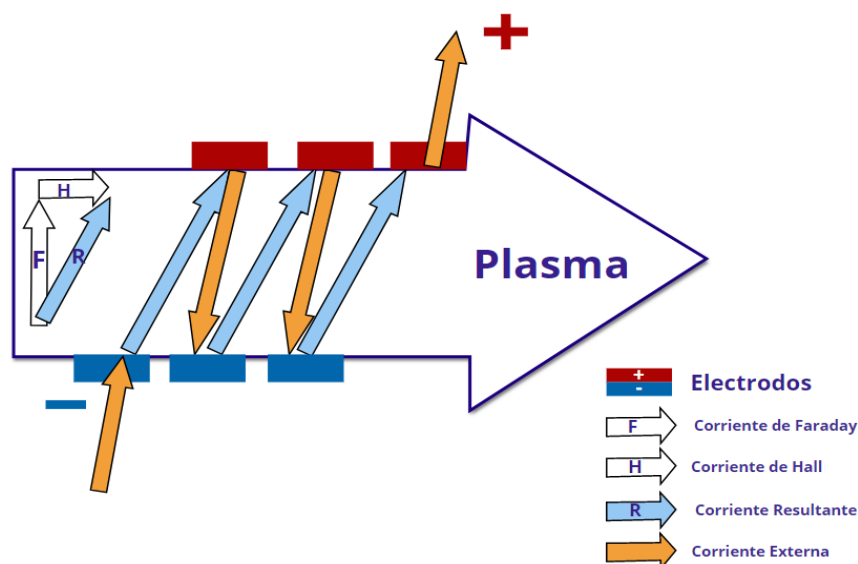


Ilustración 2. Esquema de corrientes dentro de la tobera.

Es importante notar que al existir el efecto de la corriente de Hall, no es posible el aprovechamiento máximo de la corriente de Faraday. Para aminorar estos efectos, los electrodos cerámicos se posicionan usualmente desplazados, en lugar de uno frente al otro, ya que la suma de los componentes de las distintas corrientes resulta en una corriente ligeramente diagonal con respecto a la corriente de Faraday.

Debido a que el cátodo es bombardeado por iones de potasio que están en contacto con los electrodos cerámicos es necesario utilizar un material que no reaccione con los nucleadores, aumentando así la eficiencia como la vida útil del generador (Rosa, 1987).

Los materiales cerámicos se utilizan para este tipo de aplicaciones debido a que mantienen su integridad mecánica a temperaturas mayores a 1500°C , temperaturas en las cuales muchos otros materiales se oxidan, deterioran o funden (Moulson & Herbert, 2003).

El ímpetu por desarrollar este tipo de generadores GMHD se debe a la necesidad de generar energía utilizando al máximo los recursos disponibles, aumentando la eficiencia en comparación con plantas de generación que usan combustión tradicional, que son ampliamente utilizadas en lugares donde otros métodos de obtención de energía son costosos o imprácticos. Cuando se emplea GMHD se usa menos material combustible para generar la misma cantidad de energía, reduciendo así las emisiones de CO_2/kW . Estos generadores también reducen el desperdicio de calor y facilitan el manejo de contaminantes, debido a que desde el diseño de los GMHD, el combustible se recicla dentro de la máquina (Kessler, 2000).

La construcción de una de estas plantas requiere de una alta inversión y de investigación constante por parte de los órganos reguladores, de modo que los beneficios obtenidos puedan incrementar su rentabilidad (The Department of Energy's Magnetohydrodynamics Development Program, 1993). Una planta de quema de carbón con generador MHD resulta aproximadamente un 93% más costosa que una planta de quema regular, esta inversión se

recupera debido a que la planta gana una eficiencia de aproximadamente 10%, pero debido al elevado costo inicial no es una inversión atractiva sin incentivos económicos externos (Sovie, Winter y Juhasz, 1982). Debido a que en Latinoamérica este tipo de generación de energía no es una prioridad hasta el momento, este tipo de plantas no han sido implementadas. En Ecuador, la alta producción de energía hidroeléctrica no ha dado cabida a la implementación de GMHD en el país.

A pesar de la eficiencia teórica de los sistemas generadores MHD, la restricción actual se encuentra en los electrodos cerámicos, que principalmente se fabrican a base de óxido de circonio. Los electrodos cerámicos reaccionan con el plasma, mismo que, como se mencionó anteriormente, se genera a partir de nucleadores de potasio (Meadowcroft, Meier, & Warren, 1972). El potasio se utiliza debido a que es fácilmente ionizable, económicamente favorable y el calor generado por la quema de carbón es suficiente para que sus electrones fluyan libremente, lo que permite el flujo de la corriente eléctrica (Triwahju, Sakamoto & Harada, 2008). Se requiere realizar pruebas de caracterización y conductividad eléctrica de un material cerámico alternativo, previamente seleccionado, que no reaccione con el nucleador de potasio; para de esta manera aumentar la eficiencia real del GMHD.

Para ello, se reproducen los procesos de fabricación y caracterización de un electrodo cerámico utilizando el óxido de cerio y el óxido de cobre, en lugar de los electrodos cerámicos utilizados actualmente como el zirconio y el lantano.

El proceso estándar inicia con la calcinación y molienda de los materiales, posteriormente se realiza una caracterización morfológica utilizando un microscopio electrónico de barrido y luego se realiza un análisis de difracción de rayos X con el fin de determinar la estructura cristalina del material. Después, la muestra pasa por un proceso de prensado seco con el fin de fabricar pastillas del material cerámico. Finalmente, la pastilla es sinterizada y recubierta con

pasta conductora de plata, y sobre esta se efectúa una caracterización de propiedades físicas y se caracteriza la conductividad eléctrica. No se ensaya la factibilidad como tal de cerámicos que usan en aplicaciones de GMHD, sino el proceso necesario para su fabricación. Por lo que en este trabajo se presenta el proceso de manufactura y pruebas realizadas sobre los materiales alternativos.

MÉTODOS

Proceso de fabricación estándar de muestras de electrodos cerámicos.

En el proceso de manufactura de polvos sinterizados se busca generar un cuerpo sólido para el posterior análisis de su estructura cristalina y conductividad eléctrica, tomando en consideración la limitación de equipos disponibles para cada prueba. A continuación se detalla en la Tabla 1 los equipos utilizados, conjuntamente con sus especificaciones generales.

Tabla 1. Especificaciones de equipos utilizados durante el proyecto de investigación.

Equipos	Especificaciones
Mufla Thermo Scientific Thermolyne Benchtop	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de 1200°C. ✓ Usado para calcinación y sinterización de las muestras. ✓ Proporcionado por el departamento de Química de la USFQ.
Molino de atricción	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de 50 gramos. ✓ Molienda húmeda con esferas de zirconio. ✓ Proporcionado por la Escuela Politécnica Nacional.
Difractómetro de Rayos X PANalytical EMPYREAN Series 2	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Análisis de muestras con software PANalytical B. V. HighScore Plus versión 4.1. ✓ Proporcionado por la Universidad de las Fuerzas Armadas
Balanza de precisión MS-TS Mettler Toledo	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Precisión de 0.0001 gramos.

Microscopio electrónico de Barrido (SEM)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Proporcionado por el departamento de Ingeniería Mecánica de la USFQ. ✓
Prensa hidráulica Matest	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidad de 3000 KN. - Proporcionado por el departamento de Ingeniería Civil de la USFQ
Estación de prueba Cascade Alessi REL-4800	<ul style="list-style-type: none"> - Proporcionado por el departamento de Ingeniería Electrónica de la USFQ

Especificaciones del material

En el campo de investigación de electro-cerámicos se busca materiales como óxidos metálicos, carburos, silicatos y nitruros que ofrezcan una mayor resistencia mecánica, conducción eléctrica, estabilidad química, y térmica. Para la presente investigación se seleccionó el óxido de cerio CeO_2 como material alternativo principal y el óxido de cobre Cu_2O como muestra de control. En la Tabla 2 se presentan las especificaciones de los materiales utilizados.

Tabla 2. Especificación de materiales.

Material	Especificaciones
Óxido de Cobre II (Cu_2O)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Densidad de 6.316 g/cm^3. ✓ 97% de pureza. ✓ Tamaño de $50 \mu\text{m}$.

Oxido de Cerio IV (CeO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Densidad de 7.22 g/cm³ ✓ 99.9% de pureza. ✓ Tamaño de 50 μm.
Pasta de Plata	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Temperatura de trabajo 250°C. ✓ Densidad de 10.49 g/cm³. ✓ Resistividad de 1-3E-5 Ω-cm.
Aceite de Maíz	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Aglutinante natural. ✓ Densidad de 0.917 g/cm³
Etanol	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Alcohol potable al 96%. ✓ Densidad de 0.789 g/cm³

El óxido de cerio tiene un punto de fusión de 2100°C y la mufla Thermo Scientific Thermolyne Benchtop a disposición tiene una temperatura máxima de 1200°C, por lo que es adecuada para la sinterización del mismo debido a que esta se realiza a una temperatura menor al 80% de la temperatura de fusión. Adicionalmente, de acuerdo a las propiedades químicas del CeO₂, el material tiene una menor proporción de reacción con los iones del nucleador de potasio que los materiales convencionalmente se usan. (Moulson & Herbert, 2003). El material de control Cu₂O tiene un punto de fusión de 1235°C y al calcinarse y oxidarse formando CuO, punto sube a 1326°C.

Preparación de polvo- Mezcla y Pulverización

Para la realización de las pruebas de caracterización del material se requiere que la muestra posea un tamaño de partículas menor o igual a 50μm (Suryanarayana &

Norton, 1998). Los materiales cerámicos utilizados en este proyecto ya poseían el tamaño de partícula necesario previo a pasar por la molienda, pero de no haber sido éste el caso, se debe realizar la pulverización de los materiales. Para esto se toman 25 gramos de material y se lo agita usando un molino de atricción con 50 gramos de alcohol etílico durante 10 minutos.

A este proceso se lo denomina molienda húmeda con esferas cerámicas, y gracias a la rotación del disco vibrador, las esferas de zirconio cortan y trituran la mezcla a manera de cascada uniformemente. Para que el proceso sea eficiente, es necesario considerar que el volumen del medio de molienda sea un tercio del volumen de la mezcla con etanol. Además, el volumen del medio líquido, en este caso etanol, debe ser entre 100% a 200% el volumen del material a utilizarse para generar una mezcla concentrada, que fluya dentro del envase (Álvarez & Dávila, 2011).

Calcinación

El proceso de calcinación hace referencia a someter un material a altas temperaturas dentro de una mufla, en el caso del CeO_2 15 gramos a 1000°C por 6 horas. Este proceso de alguna manera fuerza a los componentes a interactuar a nivel iónico, reduciendo el efecto de difusión que ocurre durante el sinterizado y permitiendo un cambio de estado en la composición física y química del material (Moulson & Herbert, 2003). Además, la calcinación permite eliminar la humedad absorbida en el material, el dióxido de carbono, y compuestos orgánicos volátiles.

La calcinación de los materiales a estudio permite obtener un compuesto monofásico que le otorga propiedades de conducción eléctrica mixta iónica y electrónica. Esto permite que el material sea más eficiente en cuanto a su conductividad a mayor

temperatura, siendo 2500°C la temperatura a la cual operan los generadores MHD. Este comportamiento se puede observar en la sección de resultados en la tabla 1 y 2.

La muestra de control Cu₂O 15 gramos se calcina a 700°C por 4 horas cambiando su tonalidad rojiza a negro, muestra de que el material se oxidó formando CuO.

Caracterización de polvos cerámicos

Se utilizaron dos técnicas de caracterización de materiales. La primera es la de la prueba de difracción de rayos X, y la segunda una caracterización morfológica utilizando un microscopio electrónico de barrido.

La difracción de rayos X es una técnica experimental en la cual se dispara rayos X hacia una estructura cristalina y se utiliza detectores para medir la refracción de los mismos debido a la estructura atómica de la muestra. De esta manera se puede determinar la estructura y fases de la sustancia.

Cuando un haz de rayos X choca con obstáculos capaces de dispersar la onda con una disposición uniforme, ésta se difracta. Cuando esto sucede, la onda inicial se ve amplificada. La amplificación de la onda a través de una serie de choques como éste se detecta mediante sensores que toman las amplitudes y generan los picos que se observan en el resultado gráfico de una difracción de rayos X que varía de acuerdo al ángulo de incidencia.

Los rayos X barren la muestra con distintos ángulos de incidencia y de esta manera se obtiene la mayor cantidad de datos posibles.

Una de las aplicaciones más usuales de la difracción de rayos X es la de determinar estructuras cristalinas a partir de los picos observados en el resultado los cuales son

comparados con un base de datos experimentales previos. De la misma manera se puede identificar la distancia entre partículas.

Para realizar la prueba de difracción sobre el dióxido de cerio se toma 1 gramo de la muestra calcinada, se la ubica dentro de un porta muestras plástico para XRD en modo Flat, es decir, se la distribuye en formando una capa delgada compacta de espesor homogéneo. El utilizar una muestra pulverizada asegura que al menos algunas de las partículas ordenadas al azar estén orientadas adecuadamente para refractar los rayos X (Callister, 2012). Posteriormente, esta se ubica dentro del Difractómetro de Rayos X PANalytical EMPYREAN Series 2 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. El análisis de la muestras se realiza durante dos horas en donde se somete a la prueba el CeO₂ y CuO₂ de control y calcinado, obteniendo así datos experimentales mediante el software PANalytical B. V. HighScore Plus versión 4.1.

El resultado del análisis de difracción de rayos X genera una gráfica en donde se muestran patrones de picos de intensidad en la ordenada y el ángulo de difracción medido, 2θ , a lo largo de la abscisa. La intensidad medida es proporcional al número de fotones de rayos X de una energía específica que fue contada por el detector para cada ángulo 2θ (Suryanarayana & Norton, 1998).

La información obtenida de esta prueba es el tipo de estructura, el grado de cristalinidad, la cantidad de contenido amorfo y la orientación de los cristales. La importancia de la determinación de la estructura del CeO₂ y CuO yace en que está ligada a la conductividad eléctrica y ofrece información sobre características específicas del material que se está estudiando (Marchant, 1984).

En cuanto a la caracterización morfológica utilizando el microscopio electrónico de barrido S.E.M. (Scanning Electron Microscope) por sus siglas en inglés modelo Jeol

IT300L. Ésta nos permite analizar la forma predominante de las partículas previo y posterior a su calcinación mediante la obtención de imágenes en escalas micro y nanométricas. Los resultados son evidencia del cambio físico de las partículas debido a la exposición a altas temperaturas (Liu et al., 2010).

Prensado en seco de muestra

Previo al proceso de sinterizado es necesaria la elaboración de cuerpos sólidos o pastillas a través del prensado en seco de muestras. Para la obtención de un conjunto de pastillas homogéneas se manufactura un molde cilíndrico hueco de tres piezas de acero inoxidable, como se observa en la figura 4.

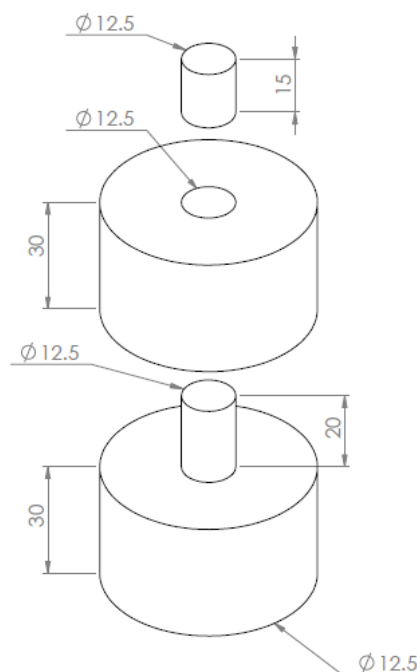


Ilustración 3. Molde de acero inoxidable conformado por base, punzón y centro.

Se pesa y se ingresa 1 gramo del material calcinado dentro del molde cilíndrico con la base y se lo tapa con el punzón. Debido a que se requiere consistencia en la cantidad de material para cada pastilla, se utiliza una balanza de precisión MS-TS de Mettler Toledo con una precisión de 0.0001 gramos. Luego se coloca el molde dentro de la

prensa hidráulica y se lo somete a una presión de entre 75 y 150Mpa para de esta manera minimizar los gradientes de densidad debido a la fricción entre la pared interna del cilindro y el punzón y, a su vez, minimizar la distorsión durante el sinterizado. Las altas presiones garantizan la destrucción de estructuras particuladas dentro de la pastilla resultante (Moulson & Herbert, 2003). Para el CeO_2 y el CuO , se aplica una presión de 119 MPa dentro de la prensa hidráulica Matest del laboratorio de materiales de ingeniería civil de la Universidad San Francisco, en este se ingresa una fuerza de 15kN para el área de la pastilla de 1.256 E-4 m^2 . En la Tabla 2 se muestran las dimensiones de las pastillas para cada material posterior a ser sacadas del molde. Es necesario mencionar que las pastillas de óxido de cobre tienen añadido 2 gotas de aceite de maíz y las de óxido de cerio 3 gotas. Este compuesto fue agregado como aglutinante natural para que las pastillas se mantengan sólidas y compactas durante el posterior proceso de sinterización. Debido a ello el peso de cada pastilla aumenta 0.011g por cada gota agregada a la muestra.

Tabla 3. Dimensiones y peso de patillas de CuO y CeO_2 .

Dimensión de Pastilla Estándar		
	Óxido de Cobre	Óxido de Cerio
Diámetro (mm)	12.800	12.800
Peso (g)	1.022	1.031
Espesor (mm)	1.800	1.800

Sinterizado

El sinterizado es un proceso metalúrgico en el cual un cuerpo sólido se somete a altas temperaturas por un largo periodo de tiempo de modo que disminuyan porosidades, densificando el cuerpo.

El sinterizado ocurre en tres etapas. En la primera, las partículas se adhieren las unas a las otras mediante contactos en parte de su estructura, pero permanecen en una configuración discreta. En la segunda etapa ocurre la densificación del sólido, es decir, las partículas de polvo se funden unas con otra, aumentando el tamaño de grano. Finalmente, baja el nivel de densificación y el material se estabiliza (Todd, 1994).

El objetivo de este proceso es el de densificar la muestra, es decir, reducir la energía superficial, volatilizando el adherente en las primeras etapas del sinterizado, disminuyendo las vacancias y reduciendo la porosidad en la muestra y aumentando el tamaño de grano para así mejorar la conductividad eléctrica (Moulson & Herbert, 2003).

Después de obtener el cuerpo sólido y tomar sus medidas de volumen y peso, se sinteriza el CeO_2 y CuO en la mufla Thermo Scientific Thermolyne Benchtop a 1200°C por 12 horas y 1000°C por 30 minutos, respectivamente. Se toman medidas de la pastilla después del sinterizado para el cálculo de reducción volumétrica y obtener el aumento de densidad de la pastilla.

Prueba de conductividad eléctrica en electro-cerámicos

Para la fabricación de electrodos cerámicos que puedan ser utilizados dentro de un GMHD se busca materiales con una conductividad eléctrica mayor a $10 \frac{1}{\Omega m}$ a

temperaturas de funcionamiento de 2500°C (Meadowcroft, Meier, & Warren, 1972). Los electrodos son el elemento mediante el cual se conecta el circuito para así extraer la corriente eléctrica generada en la tobera por el movimiento de los iones a través del campo magnético. El material electro-cerámico que se analiza es el óxido de cerio, mismo que es un conductor mixto, es decir, tiene buena conductividad tanto iónica como electrónica (Geffroy, Béchade, Masson, Fouletier, & Pons, 2017). Esto es importante debido a que los electrodos reciben tanto electrones como iones durante el proceso.

La teoría dicta que el dióxido de cerio tiene una mayor conductividad a mayor temperatura, por lo que se debe realizar la medición en función de la temperatura a la cual va a ser utilizado para obtener así el valor real de conductividad esperada al aplicar este material dentro de un GMHD (Moulson & Herbert, 2003).

Previo a la prueba de conductividad eléctrica de la pastilla, se la prepara lijando impurezas y dejándola lisa, para luego pintar ambas caras con pasta conductora de plata PCB con un pincel, dejando una fina capa del producto y secando cada cara por 1 hora, de manera que únicamente ese sea el camino de la corriente a través de la pastilla. La muestra preparada se muestra en la figura 5.



Ilustración 4. Pastilla de cobre pintada con pasta conductora de plata.

Debido a restricciones de equipos del laboratorio, se realiza la prueba a la mayor temperatura disponible, que es de 150°C con la estación de prueba Cascade Alessi REL-4800 el cual por medio de una aguja en contacto con la pastilla sinterizada y un sistema de sujeción de un plato al vacío, calienta el plato para la toma de datos cada 5 grados desde 25°C a 150°C. En el ensayo se aplica una diferencia de voltaje a los dos lados del sólido y se mide la corriente que fluye a través del mismo. El voltaje aplicado para el CuO es de 10 V y 5 V para CeO₂. A continuación se muestra se muestra en la distribución de los elementos en el ensayo.

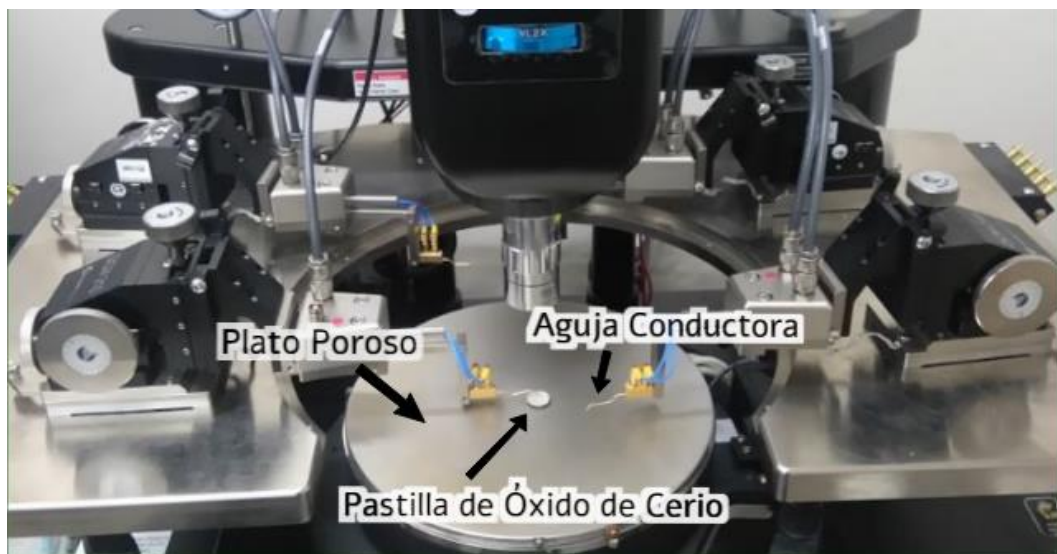


Ilustración 5. Estación de prueba Cascade Alessi REL-4800 con pastilla de CeO₂.

El equipo da como resultado una tabla de datos obtenidos en un incremento de 0.02V de corriente, resistencia y voltaje. Además muestra una gráfica voltaje versus corriente.

Por la ley de Ohm, se tiene que la corriente a través de un conductor es directamente proporcional a la diferencia de potencial entre ambos puntos donde la constante de proporcionalidad es la resistencia R . Esto se puede expresar con la ecuación 2.

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

A temperatura constante, la resistencia de un conductor es proporcional al largo de la muestra e inversamente proporcional al área de la misma. La constante de proporcionalidad se denomina resistividad ρ , es decir:

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

La conductividad σ se puede definir como el inverso de la resistividad ρ , dando como resultado la ecuación

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

(Dorf & Svoboda, 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación se analiza los resultados de los ensayos realizados sobre los materiales óxido de cerio y óxido de cobre. Estos ensayos son utilizados en la industria de los materiales para la caracterización de viabilidad de materiales para su uso en generadores magneto-hidrodinámicos. La meta de este trabajo no es el de determinar la viabilidad de los materiales, si no la de entender cada prueba y mostrar los resultados obtenidos en el material cerámico óxido de cerio, versus el material de control, óxido de cobre.

Resultados de prueba de difracción de rayos X

En cuanto a la prueba de difracción de rayos X, el óxido de cerio pulverizado se caracteriza como un cristal monofásico con una estructura cúbica centrada en las caras, ambos prerequisites para realizar el sinterizado de la muestra. A continuación en la figura 6 se observa los resultados obtenidos de la prueba de difracción de rayos X.

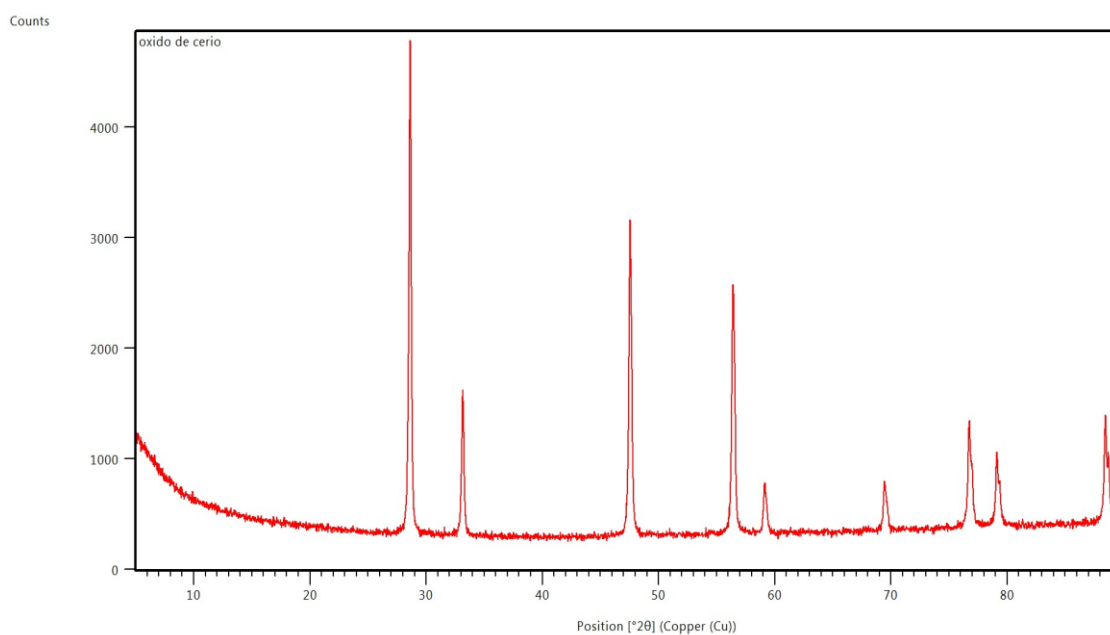


Ilustración 6. Difractograma de rayos X de CeO₂ control.

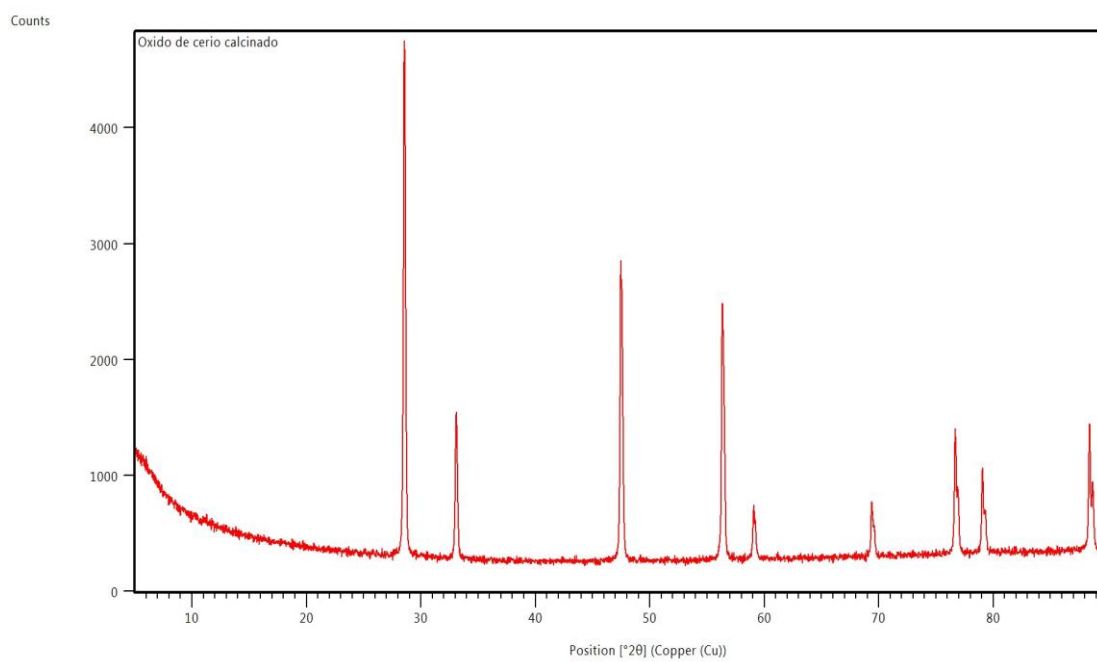


Ilustración 7. Difractograma de rayos X de CeO_2 Calcinado.

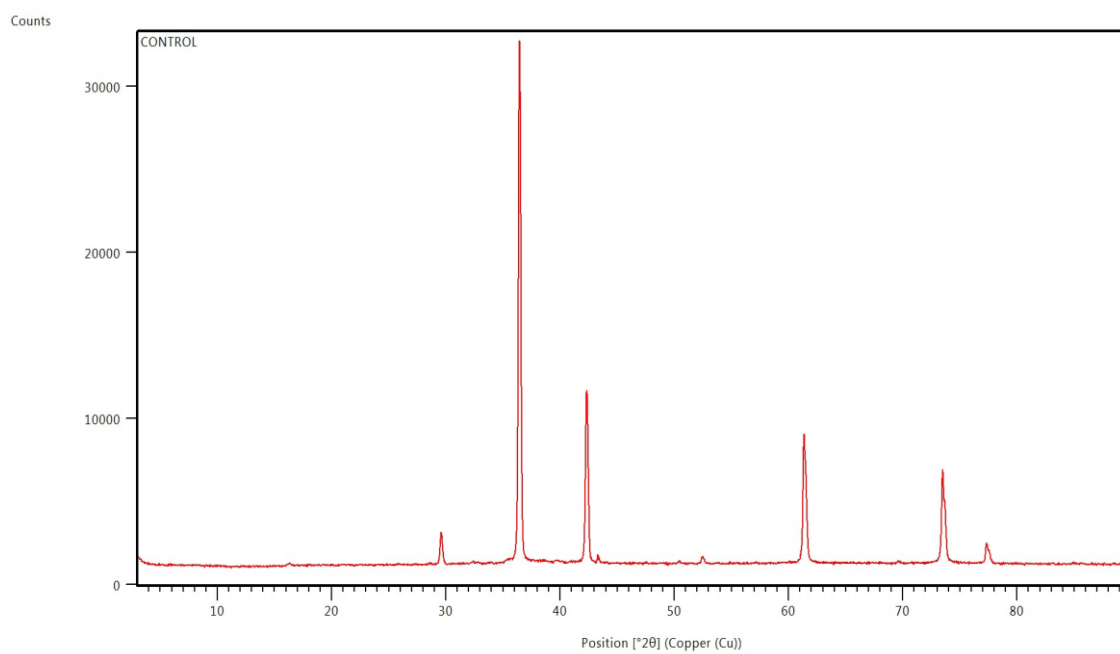


Ilustración 8. Difractograma de rayos X de Cu_2O control.

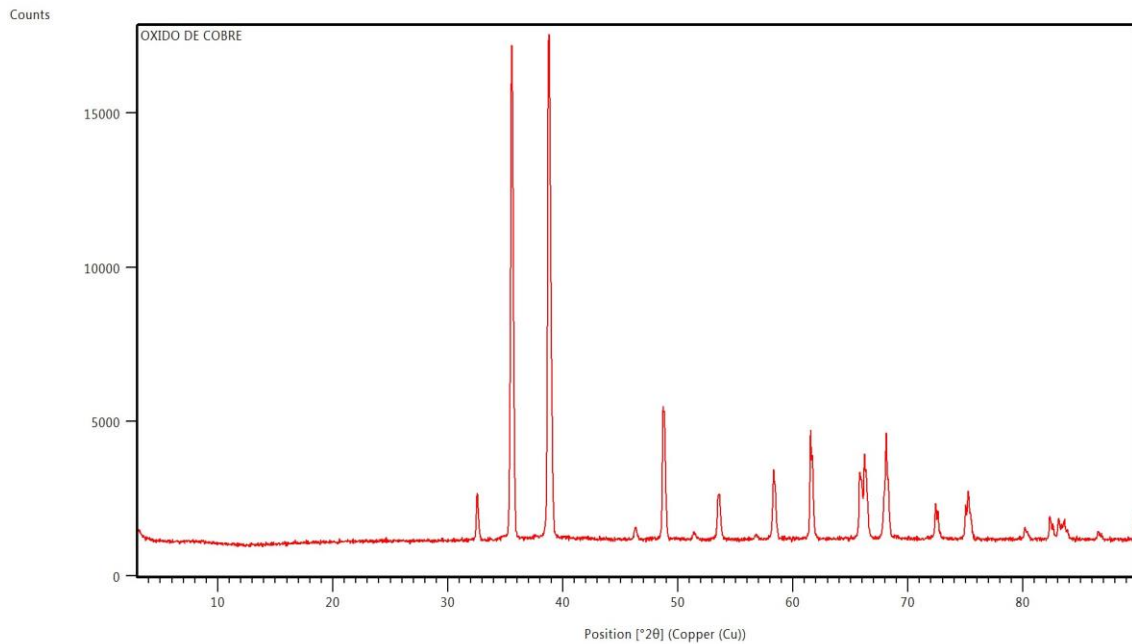


Ilustración 9. Difractograma de rayos X de CuO calcinado.

Los resultados fueron comprados con el software HighScore Plus donde al superponer la figura 11 y 12 con las gráficas de la base de datos de referencia se obtiene para el óxido de cerio un sistema cristalino cúbico. En el caso del óxido de cobre, Cu_2O (I), en la figura 13 se obtiene un sistema cristalino cúbico, mientras que el calcinado presenta un comportamiento consistente con el CuO (II) al referir el resultado a la base de datos, el cual tiene un sistema cristalino monoclinico. Por lo que se puede concluir que el material se oxida y es por ello que toma una tonalidad negra de su color rojo característico.

En los cuatro análisis los materiales se encuentran en una sola fase, el cual es uno de los requerimientos para continuar el proceso de manufactura de la pastilla cerámica. Como se menciona en la sección 6: prueba de conductividad eléctrica, el óxido de cerio al estar en una sola fase presenta conductividad mixta al estar expuesto a altas temperaturas (Suryanarayana & Norton, 1998).

Análisis estructural de muestras mediante el uso del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

El microscopio electrónico de barrido del laboratorio de materiales de la Universidad San Francisco permite observar de manera detallada los cambios que sufrieron tanto el óxido de cerio como el óxido de cobre al pasar por el proceso de calcinación. Iniciando por CeO_2 , las imágenes obtenidas no muestran un cambio notorio en la morfología de las partículas del polvo puro al material calcinado a 1200°C por 6 horas. Únicamente se observa aglutinamiento del material. Esto se debe a que la temperatura de calcinación se vio limitada por la mufla a disposición. En condiciones ideales experimentales el material se debe calcinar en una mufla a 1400°C por 6 horas (Johnson, 2017).

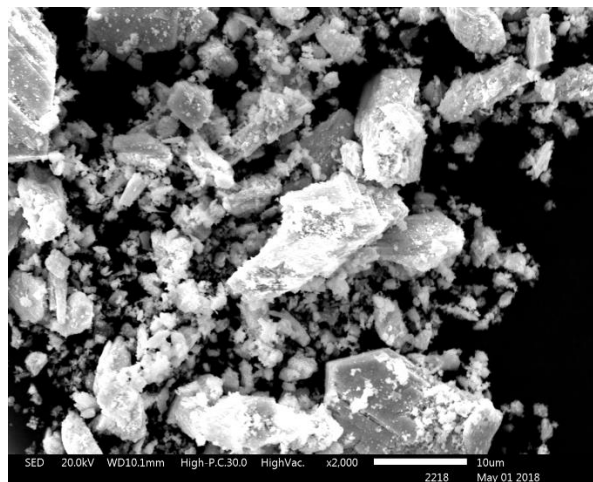


Ilustración 10. Óxido de cerio (CeO_2) puro a 2000X.

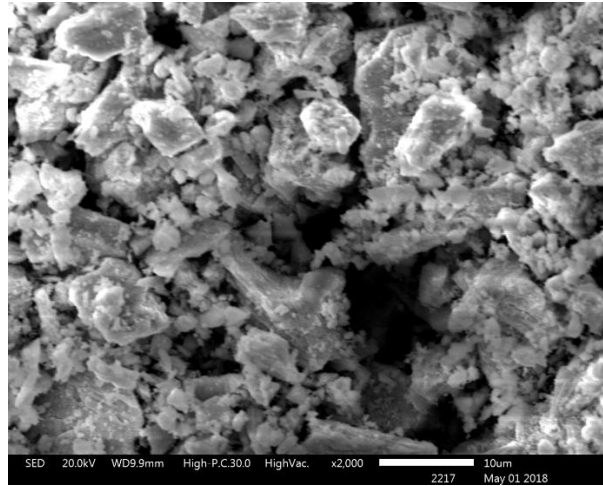


Ilustración 11. Óxido de cerio (CeO_2) calcinado a 1200°C a 2000X.

Para el caso del óxido de cobre, se realizó el análisis de una muestra del polvo puro y calcinado a 800°C y 900°C por 4 horas. Se puede observar en esta secuencia de fotos cómo las partículas presentan formas geométricas tetraédricas. A medida que se calcina el polvo las partículas se aglutinan y cambian su morfología, perdiendo su forma geométrica definida como se muestra en las figuras a continuación.

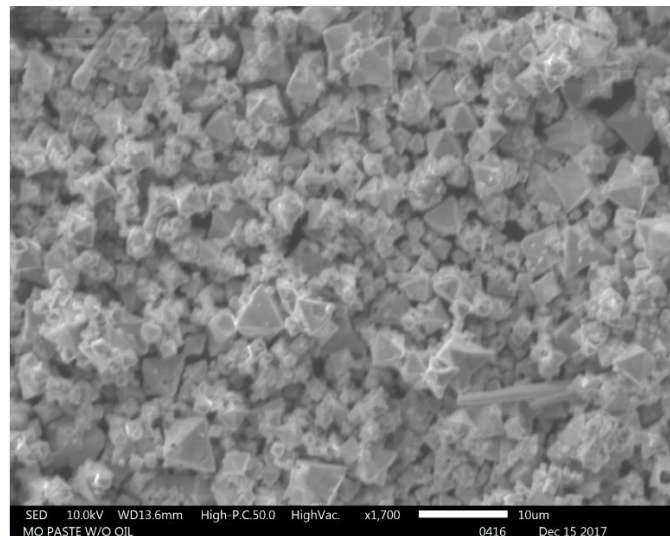


Ilustración 12. Óxido de cobre (Cu_2O) control a 1700X.

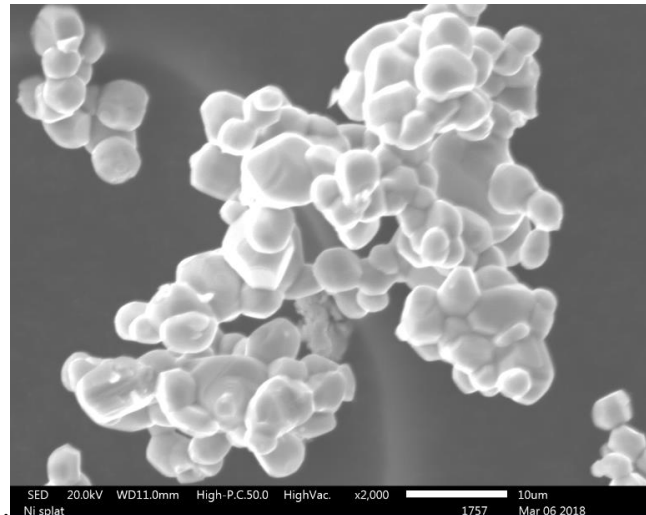


Ilustración 13. Óxido de cobre (CuO) calcinado a 800°C por 4 horas a 2000X.

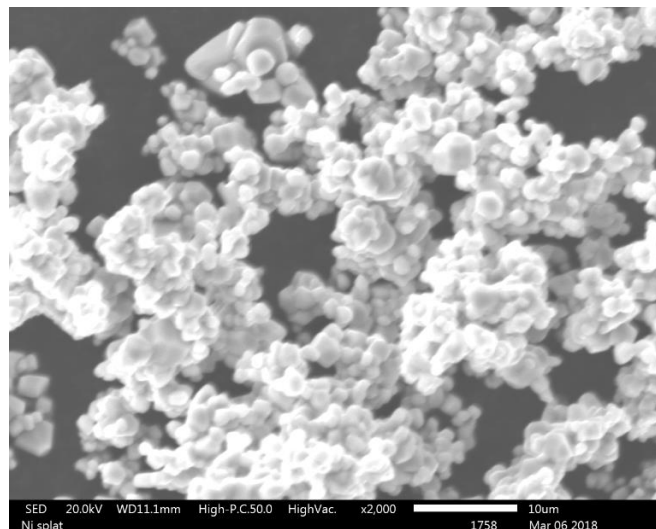


Ilustración 14. Óxido de cobre (CuO) calcinado a 900°C por 4 horas a 2000X.

Prensado y Sinterizado

Por medio de los datos de la tabla 4 de diámetro, espesor y pesos de las pastillas, se calcula la densificación de cada pastilla, tomando nuevos datos de los parámetros mencionados. A partir de la ecuación (5) se obtiene la densidad.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

Donde m es la masa y V el volumen del material antes y después de la sinterización. Los datos obtenidos de este cálculo se muestran a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. Densificación de las pastillas estándar antes y después de la sinterización.

Especificaciones de Pastilla Estándar			
		Óxido de Cobre	Óxido de Cerio
Antes de Sinterización	Diámetro (mm)	12.800	12.800
	Peso (g)	1.022	1.031
	Espesor (mm)	1.800	1.800
	Densidad (g/cm ³)	13.862	13.984
Después de Sinterización	Diámetro (mm)	12.500	12.600
	Peso (g)	0.979	0.940
	Espesor (mm)	1.600	1.550
	Densidad (g/cm ³)	15.660	15.283

En la Tabla 4 se puede observar que ambas pastillas se han densificado considerablemente, siendo la densidad del óxido de cobre 13.862 g/cm^3 antes de la sinterización y después de esta a 15.660 g/cm^3 , dando un incremento de densidad de 12.97% . En el caso del óxido de cerio la densidad sube de 13.984 g/cm^3 a 15.283 g/cm^3 , un incremento de 9.28% . Como se mencionó en la sección de métodos, la densificación de las pastillas de ambos materiales es necesaria para eliminar vacancias e impurezas para de esta forma no tener obstáculos en el paso de corriente a través de la pastilla.

Resultados de Prueba de conductividad eléctrica

Sometiendo las pastillas sinterizadas a la prueba de conductividad eléctrica, los resultados fueron los siguientes a distintas temperaturas tanto para el óxido de cerio como para el de cobre.

Para la obtención de la conductividad se utilizan dos ecuaciones: la ecuación [3] para calcular la resistencia del material y posteriormente la ecuación [4] para calcular la conductividad, utilizando un radio de 6.33 mm y un largo de 1.7 mm, estándar para todas las pastillas.

Tabla 5. Resultados de conductividad para CeO₂, primer y último dato.

Óxido de Cerio	
Temperatura [°C]	Conductividad [$\frac{1}{\Omega m}$]
35	1,7561E-9
150	2,3237E-9

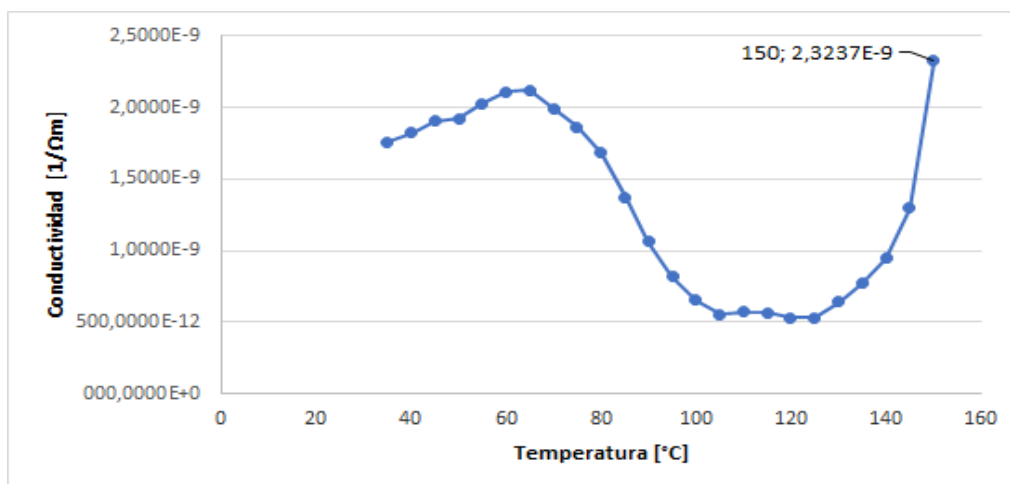


Ilustración 15. Datos de conductividad vs. temperatura de la pastilla de óxido de cerio.

El comportamiento irregular del cerio y su baja conductividad muestran que el cerio es un material aislante y necesita ser mezclado o conjugado con otros elementos para mejorar su conductividad. El óxido de cerio por sí solo no es un material viable para la fabricación de electrodos.

En el caso del óxido de cobre se realizaron gráficos de dispersión, y adicionalmente un modelo polinómico de grado tres de tendencia. Utilizando las tendencias se fabricó una tabla de extrapolación para de esta manera obtener una aproximación del comportamiento de la conductividad del elemento a mayor temperatura. Esto fue necesario debido a que los equipos con los cuales se realizó la prueba llegaban únicamente a 150°C, mientras que un generador MHD trabaja en temperaturas cercanas a los 2500°C.

Tabla 6. Resultados de conductividad para CuO, primer y último dato

Óxido de Cobre	
Temperatura [°C]	Conductividad [$\frac{1}{\Omega m}$]
30	23,5867E-6
150	1,1037E-3

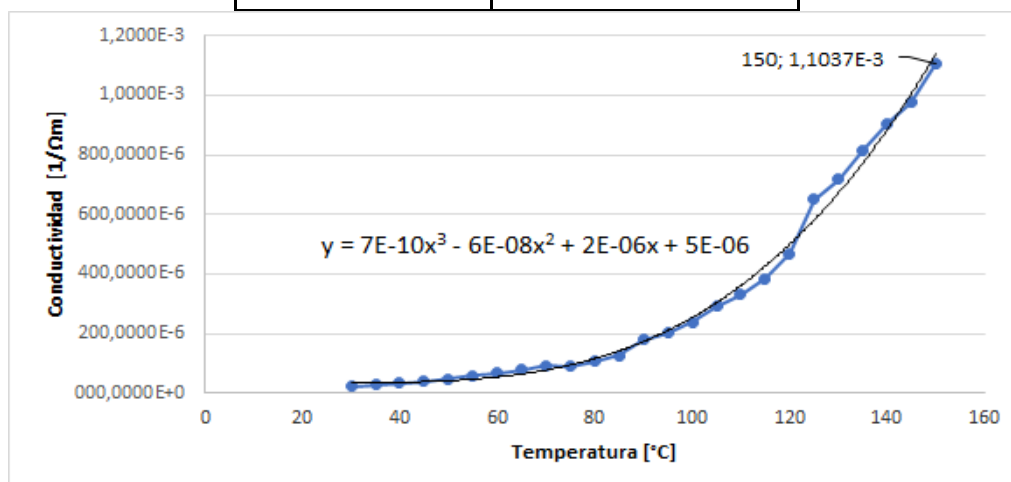


Ilustración 16. Datos de conductividad vs. temperatura de la pastilla de óxido de cobre.

Tabla 7. Extrapolación a partir de la tendencia de los datos para Óxido de Cerio

Extrapolación de Óxido de Cobre		
Temperatura	Conductividad	Conductancia
500	73,5050E-3	5,4342E-3
1000	642,0050E-3	47,4634E-3
1500	2,2305E+0	164,9012E-3
2000	5,3640E+0	396,5609E-3
2500	10,5675E+0	781,2556E-3
2600	11,9028E+0	879,9744E-3
2700	13,3461E+0	986,6775E-3
2800	14,9016E+0	1,1017E+0

Como se puede observar, el óxido de cobre obtiene un valor de $10.6 \frac{1}{\Omega m}$ cuando se encuentra a alrededor de 2500°C por lo que comparado con otros materiales utilizados en aplicaciones similares resulta un candidato viable (Chapman & Johanson, 1991). Por otro lado, el óxido de cerio no tiene un aumento tan significativo a medida que aumenta la temperatura, lo que lo vuelve un material que por sí sólo no es óptimo para la fabricación de electrodos.

Las pruebas entregaron los resultados esperados para cada material y permitieron entender a mayor profundidad las características del óxido de cerio y del óxido de cobre. Debido a su resistencia a altas temperaturas, el óxido de cerio es actualmente la

base para la investigación de materiales alternos para la fabricación de electrodos para generadores magneto-hidrodinámicos. Pero como se pudo observar en la prueba de conductividad, éste material por sí sólo no es un buen conductor. En fases posteriores de desarrollo será necesario realizar las pruebas con nuevos materiales a base de óxido de cerio que puedan conducir de manera más efectiva la electricidad.

CONCLUSIONES

A través del desarrollo del presente trabajo de titulación se analizó, comprendió y recreó los pasos para fabricar y pruebas necesarias para la caracterización de un material viable para ser utilizado en electrodos cerámicos a ser utilizados dentro de generadores magneto-hidrodinámicos. Se consiguió fabricar pastillas cerámicas con precisión a partir de un molde de acero inoxidable para su posterior sinterización. Posterior a ello, las caras de las pastillas fueron cubiertas con pintura conductora de plata y se las sometió a una prueba de conductividad eléctrica.

Para cada ensayo se realizó el análisis de los datos obtenidos y la interpretación de los mismos con el fin de obtener o no la viabilidad de los materiales para su uso dentro de un generador magneto-hidrodinámico.

Específicamente, se investigó acerca de las fases de los materiales para la interpretación de los resultados de la prueba de difracción de rayos X y su relación con la conductividad eléctrica.

En el caso del óxido de cobre, se concluye que es un material candidato para ser utilizado en un generador magneto-hidrodinámico en cuanto a su capacidad de conducir corriente eléctrica, más no es capaz de soportar temperaturas mayores a 1320°C, lo cual es una limitación debido a que este tipo de generadores opera en temperaturas de hasta 2500°C (Chapman & Johanson, 1991).

Con respecto a la viabilidad del uso del óxido de cerio como un material alterno para la fabricación de electrodos cerámicos, se concluye que, por ser un cerámico, éste muestra mucho potencial en cuanto a su resistencia a altas temperaturas. Pero a pesar de haber pasado por procesos de calcinación, sinterizado y densificación, el óxido de

cerio no presenta una conductividad eléctrica suficientemente amplia como para ser utilizado por sí solo dentro de la fabricación de electrodos para generadores magneto-hidrodinámicos.

En una etapa posterior de este proyecto se debería utilizar este material en conjunto con otros que puedan aumentar su conductividad eléctrica, tales como el Nb_2O_5 , Gd_2O_3 , Y_2O_3 , entre los más conocidos (Johnson, 2017).

La investigación en nuevos materiales es vital para aumentar la eficiencia de generación de energía. Ésta permite disminuir la brecha entre lo que es teóricamente posible y el traer estas ideas a la vida dentro de un contexto práctico. Para descubrir la aptitud de nuevos materiales es necesario ejecutar pruebas sobre los mismos que determinen si éstos poseen las propiedades deseadas para su aplicación.

Finalmente, las técnicas de preparación de materiales y ensayos realizados en este trabajo son ampliamente utilizadas en distintas aplicaciones dentro de la ciencia e ingeniería de materiales. Es por esto que el presente trabajo puede servir como base para el desarrollo de proyectos de mayor alcance, ya sea utilizando materiales distintos a los que se presentan aquí, o para la caracterización de materiales mediante las mismas pruebas con aplicaciones distintas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, R. & Robinson, E. (1968) Electrode Processes in MHD Generators. Proceedings of the IEEE, Vol. 56. No. 9. September 1968
- Álvarez, C. & Dávila, J. (2011) Diseño y construcción de un molino de atricción para moler materiales cerámicos. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Carabineanu, A. (2014) Numerical Calculation of the Output Power of a MHD Generator. University of Bucharest, Faculty of Mathematics and Computer Science, NBucharest, Romania.
- Chapman, J. & Johanson, N. (1991) MHD generators in power production. Mechanical Engineering-CIME Sept. Extraído de Insights: Global. Web. 30 Enero. 2018.
- Dorf, B. R., & Svoboda, J. A. (2010). *Introduction to Electric Circuits*. Danvers: John Wiley & Sons.
- Liu, F. Et Al. (2010) Morphology Study by Using Scanning Electron Microscopy. State Key Laboratory of Fine Chemicals, Department of Materials Science and Chemical Engineering, School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, 158 Zhongshan Road, Dalian 116012, P. R. China
- Geffroy, P.-M., Béchade, E., Masson, O., Fouletier, J., & Pons, A. (2017). *Characterization of electrical conduction and nature of charge carriers in mixed and ionic conductors*. Grenoble: ELSEVIER.
- Johnson, M (2017, July). Entrevista electronica con C. Toledo.
- Kayukawa, N. (2004) Open-cycle magnetohydrodynamic electrical power generation: a review and future perspectives. Center for Advanced Research of Energy Technology, Hokkaido University, Kita-ku, Kita 13, Nishi 8. Sapporo, Japón
- Kessler, R. (4 de Diciembre de 2000). Magnetohydrodynamics. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*, 2-54.
- Malghan, V. (Mayo de 1996). History of MHD power plant development. *Energy Conversion and Management*, 37(5), 569-590.
- Marchant, D. (1984) Ceramic Materials for MHD electrodes. 22. Symposium on engineering aspects of MHD, U.S. Dept. of Energy, Office of Technical Information
- Meadowcroft, D., Meier, P. G., & Warren, A. C. (Diciembre de 1972). Hot ceramic electrodes for open-cycle MHD power generation. *Energy Conversion*, 12(4), 145-147.
- Moulson, J., & Herbert, A. (2003). *Electroceramics*. Chichester: Wiley.
- Rosa, R. J. (1987). *Magnetohydrodynamic Energy Conversion*. New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Rossing, B., & Bowen, H. (1976). *Critical Materials Problems in Energy Production*. New York: Academic Press Inc.

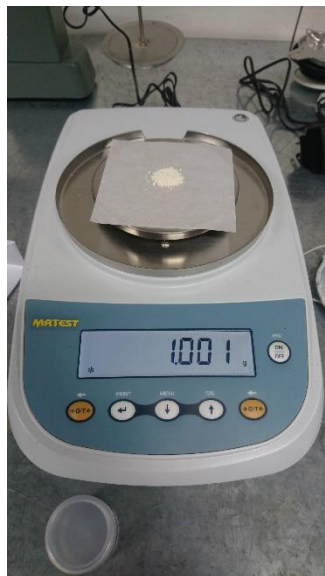
- Suryanarayana, C., & Norton, M. G. (1998). *X-Ray Diffraction*. New York: Plenum Press.
- The Department of Energy's Magnetohydrodynamics Development Program. (1993). *Fossil Fuels*. Washington, D.C.
- Sovie, R., Winter, J. & Juhasz, A. (1982). Comparative Analysis of the Conceptual Design Studies of Potential Early Commercial MHD Power Plants. U.S. Department of Energy. Washington, D.C. 20545.
- Todd, R. (1994). *Manufacturing Processes*. New York: Industrial Press Inc.

ANEXO A: IMÁGENES DE PROCESO DE MANUFACTURA DE PASTILLAS CERÁMICAS

Calcinación



Pesaje



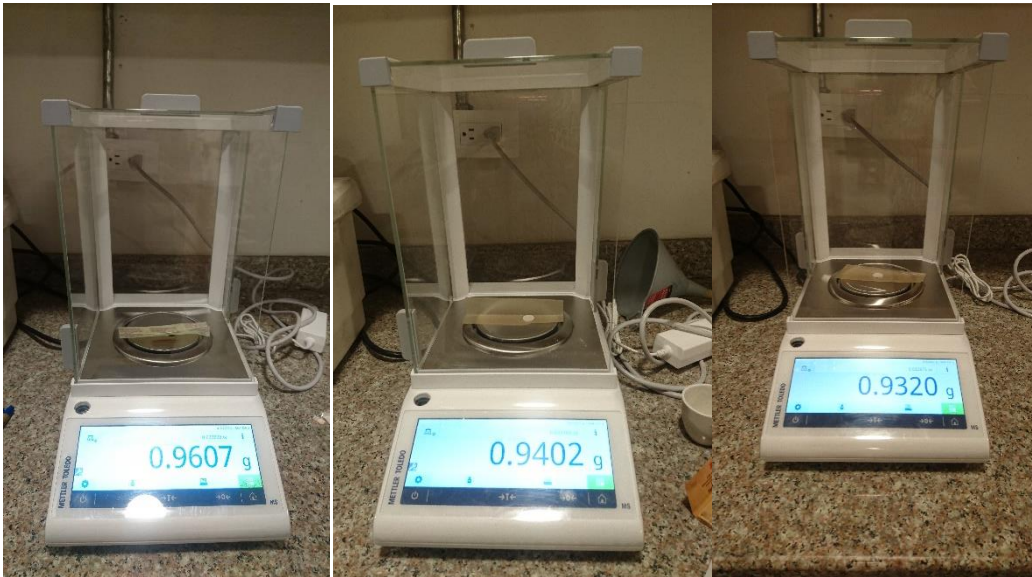
Preparación de muestra



Prensado en Seco



Pesaje posterior a la sinterización



Pastillas Sinterizadas



Toma de Medidas



Recubrimiento con Pintura Conductora de Plata



ANEXO B: DATOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Oxido de Cerio

CeO ₂ Puro	
Ángulo	Intensidad
6,54	966,84
8,24	771,68
9,94	663,62
11,64	596,79
13,34	511,38
15,35	459,13
16,74	427,73
18,44	431,30
20,14	383,20
21,84	347,68
23,54	332,69
25,24	373,43
26,94	334,90
28,64	4880,95
30,34	355,77
32,35	318,54
33,74	310,60
35,44	319,73
37,14	332,63
38,84	308,41
40,54	305,16
42,24	300,87
43,94	285,70
45,64	315,17

47,34	831,83
49,35	311,99
50,74	341,91
52,44	302,48
54,14	329,90
55,84	379,68
57,54	348,33
59,24	664,47
60,94	363,18
62,64	320,58
64,34	336,72
66,35	335,67
67,74	377,90
69,44	768,22
71,14	366,48
72,84	377,82
74,54	396,27
76,24	448,67
77,94	412,76
79,64	448,39
81,34	460,36
83,35	436,31
84,74	435,16
86,44	422,16
88,14	532,69
89,84	442,92

Oxido de Cobre

Cu₂O Puro	
Ángulo	Intensidad
3,84	1652,00
4,71	1189,59
6,41	1147,34
8,11	1190,63
9,81	1116,85
11,51	1116,25
13,21	1120,91
14,91	1139,72
16,61	1191,68
18,31	1198,64
20,84	1171,90
21,71	1222,74
23,41	1194,74
25,11	1214,40
26,81	1211,15
28,51	1252,11
30,21	1209,43
31,91	1230,67
33,61	1294,91
35,31	1455,59
37,84	1565,24
38,71	1446,53
40,41	1314,77
42,11	2488,61
43,81	1333,20

45,51	1286,12
47,21	1329,96
48,91	1284,93
50,61	1298,38
52,31	1373,79
54,84	1252,21
55,71	1251,17
57,41	1308,52
59,11	1260,47
60,81	1444,72
62,51	1388,34
64,21	1350,42
65,91	1261,62
67,61	1303,58
69,31	1254,68
71,84	1257,38
72,71	1388,22
74,41	1361,75
76,11	1250,69
77,81	1429,81
79,51	1264,50
81,21	1254,54
82,91	1205,88
84,61	1275,37
86,31	1200,98
88,84	1220,18
89,71	1224,17

Oxido de Cerio Calcinado

CeO₂ Calcinado	
Ángulo	Intensidad
6,54	996,95
8,24	825,19
9,94	666,13
11,64	609,54
13,34	512,18
15,35	468,70
16,74	478,90
18,44	414,75
20,14	376,62
21,84	358,67
23,54	337,38
25,24	322,59
26,94	291,41
28,64	3928,70
30,34	304,10
32,35	316,57
33,74	275,76
35,44	280,90
37,14	254,67
38,84	267,60
40,54	269,34
42,24	253,78
43,94	272,92
45,64	256,22

47,34	748,30
49,35	285,00
50,74	271,32
52,44	257,73
54,14	286,71
55,84	326,25
57,54	286,16
59,24	579,16
60,94	281,37
62,64	300,79
64,34	288,99
66,35	297,67
67,74	296,90
69,44	712,28
71,14	311,39
72,84	290,49
74,54	316,67
76,24	334,63
77,94	289,74
79,64	319,81
81,34	346,60
83,35	330,13
84,74	346,38
86,44	355,45
88,14	427,64

Oxido de Cobre Calcinado

CuO Calcinado			
Ángulo	Intensidad		
3,84	1613,00	45,51	1172,91
4,71	1134,83	47,21	1248,33
6,41	1131,96	48,91	3802,93
8,11	1170,16	50,61	1222,11
9,81	1054,38	52,31	1167,21
11,51	1051,11	54,84	1296,28
13,21	999,40	55,71	1189,11
14,91	1051,87	57,41	1172,73
16,61	1104,85	59,11	1198,94
18,31	1141,36	60,81	1235,45
20,84	1078,39	62,51	1221,13
21,71	1098,33	64,21	1274,44
23,41	1117,93	65,91	3179,84
25,11	1096,78	67,61	1318,70
26,81	1153,89	69,31	1236,57
28,51	1103,92	71,84	1203,87
30,21	1151,32	72,71	1636,16
31,91	1207,37	74,41	1224,70
33,61	1170,83	76,11	1235,62
35,31	2160,94	77,81	1204,46
37,84	1254,24	79,51	1249,26
38,71	15445,49	81,21	1218,75
40,41	1249,79	82,91	1280,57
42,11	1235,92	84,61	1156,72
43,81	1236,76	86,31	1228,62
		88,84	1244,59
		89,71	1611,70

ANEXO C: DATOS DE PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD

Oxido de Cobre

Óxido de Cobre	
Temperatura	Conductividad
30	23.5867E-6
35	27.0789E-6
40	33.8287E-6
45	40.6608E-6
50	47.9413E-6
55	59.7346E-6
60	68.8717E-6
65	79.6690E-6
70	92.4416E-6
75	90.8978E-6
80	105.8980E-6
85	127.0324E-6
90	179.3292E-6
95	200.8057E-6
100	239.3614E-6
105	292.8141E-6
110	330.8433E-6
115	383.3658E-6
120	467.3490E-6
125	651.1330E-6
130	717.0523E-6
135	814.5731E-6
140	904.7402E-6
145	974.9628E-6
150	1.1037E-3

Extrapolación Óxido de Cobre		
Temp	Conductividad	Conductancia
100	305.0000E-6	22.5487E-6
200	3.6050E-3	266.5177E-6
300	14.1050E-3	1.0428E-3
400	36.0050E-3	2.6618E-3
500	73.5050E-3	5.4342E-3
600	130.8050E-3	9.6704E-3
700	212.1050E-3	15.6809E-3
800	321.6050E-3	23.7763E-3
900	463.5050E-3	34.2669E-3
1000	642.0050E-3	47.4634E-3
1100	861.3050E-3	63.6763E-3
1200	1.1256E+0	83.2160E-3
1300	1.4391E+0	106.3930E-3
1400	1.8060E+0	133.5179E-3
1500	2.2305E+0	164.9012E-3

1600	2.7168E+0	200.8534E-3
1700	3.2691E+0	241.6849E-3
1800	3.8916E+0	287.7064E-3
1900	4.5885E+0	339.2282E-3
2000	5.3640E+0	396.5609E-3
2100	6.2223E+0	460.0150E-3
2200	7.1676E+0	529.9010E-3
2300	8.2041E+0	606.5295E-3
2400	9.3360E+0	690.2108E-3
2500	10.5675E+0	781.2556E-3
2600	11.9028E+0	879.9744E-3
2700	13.3461E+0	986.6775E-3
2800	14.9016E+0	1.1017E+0

Oxido de Cerio

Óxido de Cerio	
Temperatura	Conductividad
35	1.7561E-9
40	1.8215E-9
45	1.9060E-9
50	1.9225E-9
55	2.0245E-9
60	2.1089E-9
65	2.1206E-9
70	1.9920E-9
75	1.8653E-9
80	1.6842E-9
85	1.3743E-9
90	1.06257E-09
95	818.1878E-12
100	656.1858E-12
105	553.2989E-12
110	571.6597E-12
115	569.6937E-12
120	528.8940E-12
125	528.8940E-12
130	642.2305E-12
135	769.7964E-12
140	949.0598E-12
145	1.2953E-9
150	2.3237E-9