



*Instituto de Ciencias  
Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores  
Posgrado en Dispositivos Semiconductores*

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN GENERADOR  
MAGNETOHIDRODINÁMICO SOLAR Y ESTUDIO DEL PROCESO DE  
CONVERSIÓN**

*Tesis sometida como requisito para obtener el grado de  
Doctor en Dispositivos Semiconductores*

*Presentada por:*

***M.C. Steffanie Jiménez Flores  
216570127***

*Dirigida por:*

***Dr. J. Joaquín Alvarado Pulido  
Director***

***Dr. Antonio E. Jiménez González  
Codirector Externo***

***Dr. J. Guillermo Pérez Luna  
Codirector***

*©BUAP, Primavera 2020  
Todos los derechos reservados.*

*Beca CONACyT 33255*

*Sinodales.*

*Presidente: Dr. Víctor Dossetti Romero.*

*Secretario: Dr. Salvador Alcántara Iniesta.*

*Vocal: Dr. Armando Moreno Coria.*

*Vocal: Dr. Antonio E. Jiménez González.*

*Vocal: Dr. Sandra Jiménez Xochimitl.*

*Suplente: Dr. J. Guillermo Pérez Luna.*

*A mis padres, por todo su apoyo y cariño incondicional.*

## Agradecimientos

*Agradezco al centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por el apoyo brindado para realizar este trabajo de tesis.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la asignación de la beca 33255, con la cual fue posible concluir este proyecto satisfactoriamente.*

*Al Dr. J. Guillermo Pérez Luna, por compartir su conocimiento y experiencia durante los años que hemos trabajado juntos.*

*Al Dr. J. Joaquín Alvarado Pulido, por asumir con gran responsabilidad la batuta para concluir este trabajo de tesis en tiempo y forma.*

*Al Dr. Antonio E. Jiménez González, por su apoyo y disposición mostrada en todo momento para alcanzar los objetivos de este proyecto.*

*A todos los Doctores que me impartieron clase durante estos cuatro años de formación. Así como a mis compañeros, por su apoyo y compañía durante este periodo.*

*También agradezco al Dr. Víctor Dossetti Romero, Dr. Salvador Alcántara Iniesta, Dr. Armando Moreno Coria y Dra. Sandra Jiménez Xochimitl, por los consejos recibidos que fortalecieron el contenido de este trabajo, así como por su apoyo y disposición aún en momentos difíciles*

## Resumen

La finalidad de este trabajo de tesis se basa en el diseño y fabricación de un generador magnetohidrodinámico (MHD) solar y el estudio de su proceso de conversión. Por tal motivo, se desarrollaron dos generadores MHD que aprovechan la energía solar como fuente de calentamiento. El primero es un generador MHD solar de baja concentración y el segundo es un generador MHD que trabaja con radiación solar concentrada.

El primer generador se conforma de un sistema térmico solar formado por un conjunto de tubos con aletas de cobre, conectados en paralelo y colocados dentro de un panel de  $1 \text{ m}^2$ ; y de una celda MHD compuesta por un bloque de politetrafluoroetileno con electrodos de acero inoxidable. El segundo generador se compone de un sistema térmico solar formado por un concentrador de disco parabólico y celdas fabricadas sobre placas de Baquelita. Estas celdas fueron maquinadas a través de una perforadora CNC para formarles el canal eléctrico, recubiertas con  $100 \text{ }\mu\text{m}$  de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mediante ALD (Atomic Layer Deposition) para evitar su oxidación y encapsuladas con resina epóxica para brindarle resistencia en su manejo. Cabe señalar que ambos generadores trabajaron con temperaturas superiores a  $373\text{K}$  y con soluciones electrolíticas como fluido de trabajo.

Para evaluar las condiciones de operación de los generadores MHD, fueron implementados sistemas de caracterización que incluyeron medidores de presión, temperatura, irradiancia y velocidad. También se desarrolló un módulo interfaz de adquisición de datos con el cual fue posible cuantificar la corriente eléctrica.

Los resultados experimentales registrados, mostraron que el generador MHD solar de baja concentración opera con menor eficiencia con respecto al generador MHD solar de radiación concentrada. Esto fue corroborado con el software COMSOL Multiphysics®, a través del cual se obtuvo el comportamiento interno de las celdas MHD tomando en consideración sus parámetros de velocidad, presión, temperatura y densidad de corriente. La comparación entre los resultados teóricos y experimentales muestra que el modelo se ajusta satisfactoriamente.

## Índice General

Introducción.....	11
<i>Justificación.....</i>	12
<i>Objetivo general.....</i>	13
<i>Objetivos particulares.....</i>	13
<i>Estructura de la tesis.....</i>	13
Capítulo 1.....	15
Marco Teórico.....	15
1.1 <i>Teoría Magnetohidrodinámica.....</i>	15
1.1.1 <i>Ecuaciones de un fluido conductor.....</i>	15
1.1.2 <i>Ecuaciones de masa y conservación de carga.....</i>	17
1.1.3 <i>Ecuación de movimiento.....</i>	18
1.1.4 <i>Ley de Ohm generalizada.....</i>	19
1.1.5 <i>Ecuaciones MHD simplificadas.....</i>	21
1.2 <i>Generadores MHD.....</i>	24
1.2.1 <i>Tipología de los generadores MHD.....</i>	26
1.3 <i>Sistemas térmicos solares.....</i>	29
1.3.1 <i>Ciclo termodinámico característico de los sistemas térmicos solares.....</i>	31
1.3.2 <i>Eficiencia Térmica.....</i>	33
1.3.3 <i>Factores atenuantes de la eficiencia de los sistemas térmicos solares.....</i>	35
Capítulo 2.....	37
Diseño y fabricación de un generador MHD solar.....	37
2.1 <i>Generador MHD solar de baja concentración.....</i>	37
2.1.1 <i>Sistema térmico solar de baja concentración.....</i>	37
2.1.2 <i>Celda MHD del generador de baja concentración.....</i>	38
2.1.3 <i>Funcionamiento del Generador MHD solar de baja concentración.....</i>	39
2.2 <i>Generador MHD solar de radiación concentrada.....</i>	40
2.2.1 <i>Sistema térmico solar de radiación concentrada.....</i>	40
2.2.2 <i>Celda MHD del generador MHD solar de radiación concentrada.....</i>	41
2.2.3 <i>Funcionamiento del generador MHD solar de radiación concentrada.....</i>	43
Capítulo 3.....	44
Caracterización y resultados experimentales de un generador MHD solar.....	44

3.1	<i>Caracterización del generador MHD solar de baja concentración.....</i>	44
3.1.1	<i>Resultados Experimentales del generador MHD solar de baja concentración.....</i>	46
3.2	<i>Caracterización del generador MHD solar de radiación concentrada.....</i>	49
3.2.1	<i>Resultados Experimentales del generador MHD solar de radiación concentrada.....</i>	50
Capítulo 4	.....	54
Modelado de celdas MHD con COMSOL Multiphysics®.	.....	54
4.1	<i>Modelo Teórico de la densidad de corriente de una celda MHD.....</i>	54
4.2	<i>Aplicación del software COMSOL Multiphysics®.....</i>	56
4.2.1	<i>Campo Magnético (Magnetic Field).....</i>	56
4.2.2	<i>Fluidos (Fluid Flow).....</i>	57
4.2.3	<i>Distribución de corriente (Current Distribution).....</i>	58
4.3	<i>Modelado de la celda del generador MHD solar de baja concentración.....</i>	59
4.4	<i>Modelado de la celda del generador MHD solar de radiación concentradaa.....</i>	63
Capítulo 5	.....	70
Conclusiones	.....	70
Referencias	.....	73
Anexos	.....	78
A.	Propiedades del agua saturada: Tablas de presión.....	79
B.	Características Técnicas del Acero Inoxidable.....	80
C.	Propiedades del Cobre.....	81
D.	Propiedades de la Baquelita.....	82
E.	Fichas técnicas de los imanes de Neodimio.....	83

## Índice de Figuras.

<i>Figura 1. Principio de operación de un generador MHD.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 2. Esquema de un generador MHD. ....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 3. Generador MHD tipo Faraday.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 4. Esquema del efecto Hall.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 5. Generador MHD tipo Hall.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 6. Generador MHD tipo Disco.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 7. Disponibilidad de tiempo de las fuentes de energía convencionales.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8. Esquema de una instalación térmica de vapor.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 9. Diagrama T-S del ciclo Rankine.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 10. Sistema térmico solar de baja concentración (STS) a) Vista superior del STS y b) Panel y base del STS.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 11. Celda Magnetohidrodinámica de politetrafluoroetileno a) Diseño de la celda y b) Celda con coples de bronce.....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 12. Generador MHD solar de baja concentración a) Diseño del generador. b) Generador MHD en operación. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 13. Sistema térmico solar de concentrador parabólico, a) Diseño del sistema térmico solar y b) Sistema térmico solar real.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 14. Esquema de composición de las celdas MHD del generador MHD solar de radiación concentrada.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 15. Celda MHD del Generador MHD solar de radiación solar concentrada. a) Grabado de la placa de Baquelita b) Celda aislada con contactos y c) Celda posicionada dentro de imanes de neodimio.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 16. Generador MHD solar operado con radiación solar concentrada.....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 17. Modulo para la adquisición de datos. ....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 18. Diagrama de interconexión de la celda MHD con el módulo interfaz.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 19. Relación Irradiancia -Temperatura del generador MHD solar de baja concentración. ....</i>	<i>46</i>

<i>Figura 20. Relación Presión -Temperatura del generador MHD solar de baja concentración. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 21. Gradiente de presión del generador de baja concentración con respecto a la temperatura. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 22. Relación de la densidad de corriente con respecto a la Temperatura del generador MHD solar de baja concentración. ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 23. Relación corriente – voltaje de la celda MHD a 383 K del generador MHD de baja concentración. ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 24. Diagrama de caracterización del Generador MHD solar de radiación concentrada. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 25. Relación - Irradiancia - Temperatura del sistema térmico solar del generador MHD de radiación concentrada. ....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 26. Relación Presión – Temperatura del sistema térmico solar del generador MHD de radiación concentrada. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 27. Gradiente de Presión del generador MHD solar de radiación concentrada con respecto a la Presión atmosférica. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 28. Relación Corriente – Temperatura del Generador MHD solar de radiación concentrada operado con fluido con NaCl 20%.vol. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 29. Relación Corriente – Temperatura del Generador MHD solar de radiación concentrada operado con fluido con KOH 20%.vol. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 30. Relación Densidad de corriente – Temperatura del Generador MHD solar de radiación concentrada operado con fluido con NaCl 20%.vol. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 31. Relación Densidad de corriente – Temperatura del Generador MHD solar de radiación concentrada operado con fluido con KOH 20%.vol. ....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 32. Geometría 3D del interior de la celda MHD del generador MHD solar de baja concentración. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 33. Campo magnético de la celda MHD del generador MHD de baja concentración. ....</i>	<i>61</i>

<i>Figura 34. Magnitudes de presión de la celda MHD del generador MHD solar de baja concentración. ....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 35. Velocidad del fluido dentro de la celda MHD del generador solar de baja concentración. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 36. Densidad de corriente de la celda del generador MHD solar de baja concentración. ....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 37. Geometría 3D de las celdas MHD del generador MHD solar de radiación concentrada. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 38. Parámetros de operación de la celda MHD lineal tipo "I". a) Densidad de flujo magnético y b) Velocidad de desplazamiento del fluido de trabajo. ....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 39. Parámetros de operación de la celda MHD tipo "U". a) Densidad de flujo magnético y b) Velocidad de desplazamiento del fluido de trabajo. ....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 40. Comportamiento de la Presión dentro de las celdas del generador MHD solar de radiación concentrada. ....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 41 Densidad de corriente máxima generada por la celda MHD de recorrido lineal. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 42. Densidad de corriente máxima generada por la celda MHD de recorrido curvo. ....</i>	<i>67</i>

## Índice de Tablas.

<i>Tabla 1. Ecuaciones simplificadas del fenómeno MHD.....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 2. Ecuaciones de Maxwell reducidas.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 3. Clasificación de los sistemas térmicos solares activos en función a su capacidad de concentración solar.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 4. Clasificación de los sistemas térmicos solares en base a su temperatura de operación.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 5. Condiciones predeterminadas por el software Comsol Multiphysics® para el análisis de fluidos.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 6. Condiciones predeterminadas por el software Comsol Multiphysics® para el análisis de distribución de corriente.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 7 Resultados experimentales de la celda MHD a 383 K.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 8. Resultados experimentales obtenidos del generador MHD solar de radiación concentrada a 500K.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 9. Comparación de los resultados simulados con respecto a los experimentales de las celdas del generador MHD solar de radiación concentrada.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 10. Comparación de los valores de Presión y Temperatura del Sistema solar térmico con respecto a los valores simulados dentro de la celda del generador MHD de radiación concentrada.....</i>	<i>69</i>

## Introducción.

La conversión Magnetohidrodinámica (MHD) es considerada un método atractivo de generación de energía eléctrica, debido a que es capaz de convertir energía térmica en energía eléctrica sin utilizar estructuras móviles. Su principio de funcionamiento radica en la interacción de un fluido ionizado con un campo magnético que genera una corriente eléctrica [1]. Para lograr esto es necesario tener una fuente de calor que facilite la generación de plasma e incremente su velocidad de movimiento.

El generador MHD nació desde que se iniciaron los primeros desarrollos de la energía eléctrica. Michael Faraday realizó los primeros experimentos en las décadas de 1800, un siglo después en 1938 la empresa estadounidense Westinghouse profundizó su estudio en este fenómeno; pero fue en 1942 Hannes Alfvén quien le dio el concepto de magnetohidrodinámica [2]. Las investigaciones del fenómeno fueron muy entusiastas, sin embargo, la segunda guerra mundial detuvo su desarrollo y fue hasta los años 60's que se retomó el tema de estos generadores. A partir de la década de los 80's países como Rusia, Estados Unidos y Francia comenzaron a interesarse en esta tecnología abriendo sus propias líneas de investigación.

Estas áreas de investigación se centraron principalmente en aumentar la eficiencia de rendimiento, así como la reducción en los costos de fabricación [3]. Para lograrlo los investigadores centraron su atención en diversos factores como lo son: fuentes de calentamiento capaces de sustituir a fuentes fósiles, máquinas térmicas que trabajen con alta eficiencia termodinámica, indagar con diferentes fluidos de baja peligrosidad que posean buenas propiedades térmicas y conductivas, así como la innovación en sus diferentes tipologías de diseño y fabricación.

Actualmente el generador MHD más eficiente es el denominado generador de disco, desarrollado por el Instituto Tecnológico de Tokio [4]. Este generador hace fluir plasma de He dopado con Cs entre dos discos, y el campo magnético con el que interactúa el plasma es provisto por un par de bobinas Helmholtz. Las pruebas realizadas alcanzan una eficiencia de hasta un 30.2%, arriba del promedio de otros generadores.

En México, los centros de investigación que enfocan sus estudios a esta técnica de conversión de energía son escasos. El departamento más sobresaliente se ubica en el Instituto de Energías Renovables de la UNAM, quien centra sus estudios a nivel laboratorio en el análisis del comportamiento termodinámico de diferentes fluidos en el fenómeno MHD, así como el estudio de la dinámica de los fluidos bajo diferentes condiciones de temperatura.

Datos del Servicio Meteorológico Nacional, muestran que la radiación solar global media diaria que recibe México se encuentra entre 4.8 y 5.6 [KWh/m<sup>2</sup>], ésta varía según la posición geográfica en la que se encuentre [5]. Por tal motivo, México es considerado como uno de los diez países en el mundo con mayor atractivo para invertir en el uso de la energía solar.

Considerando lo anterior, es de nuestro interés enfocarnos en el diseño y fabricación de un generador Magnetohidrodinámico solar y estudiar el proceso de conversión. Con este estudio se pretende abrir nuevas líneas de investigación enfocadas en la conversión directa de energía, mediante el uso del fenómeno MHD y aprovechamiento de la energía solar.

### Justificación.

El interés en fabricar un dispositivo de generación de energía eléctrica, surge como parte de una solución a la demanda energética originada por el calentamiento global y el acelerado crecimiento poblacional. Actualmente, el 82% de la demanda energética mundial es cubierta por fuentes fósiles, y el porcentaje restante del 18% es cubierto por la energía hidroeléctrica, termoeléctrica, eólica, fotovoltaica y nuclear [5]. Sin embargo, dentro del área de la producción de energía renovable, el generador MHD representa una futura alternativa para la producción de energía eléctrica debido a la simplicidad que posee al no usar partes móviles en el proceso [6]. Los generadores MHD actuales reportan una eficiencia que varía del 10% al 20%, y para lograr esto se han realizado diversas investigaciones en las cuales se emplean imanes superconductores, así como fluidos con alto contenido iónico y suficiente energía cinética [7]. Uno de los procedimientos más utilizados para aumentar la energía cinética de los fluidos dentro de los generadores MHD consiste en elevar su temperatura de operación. Para ello, y en el margen del uso de las energías renovables, la comunidad

científica ha optado por comenzar a emplear la energía solar como método de calentamiento [8]. Bajo este contexto, en este trabajo se desarrolla un generador MHD que utiliza la radiación solar como fuente de calentamiento y se comparan los resultados experimentales con los resultados simulados obtenidos.

### Objetivo general.

Desarrollar un generador MHD empleando radiación solar concentrada.

### Objetivos particulares.

1. Diseñar y fabricar un calentador de fluidos que opere con radiación solar.
2. Diseñar y fabricar un generador MHD solar.
3. Analizar el proceso de ionización de diferentes fluidos que promuevan la generación de energía eléctrica estimulados mediante radiación solar.
4. Analizar y modelar el proceso de conversión de energía del generador MHD solar.
5. Realizar análisis de factibilidad para diferentes tipos de plasma que operen con el generador MHD solar.
6. Evaluar la eficiencia del generador MHD solar con diferentes tipos de plasma.

### Estructura de la tesis.

El presente trabajo tiene un carácter teórico – experimental, y su contenido se ha organizado de la siguiente manera. En el primer capítulo se presenta el Marco teórico, donde se explica los conceptos básicos del fenómeno MHD, sus ecuaciones fundamentales, así como la tipología de los generadores que operan bajo este principio. El capítulo dos corresponde al diseño y fabricación de un generador MHD solar, en el cual se describen los elementos que lo conforman, además de su proceso de operación. El tercer capítulo hace referencia al proceso de caracterización de un generador MHD solar, así como, el análisis de

los resultados obtenidos. En el capítulo cuatro se modelan las celdas MHD que forman parte del generador mediante el software COMSOL Multiphysics. El modelado solo se enfoca a este elemento, debido a que es en la celda MHD donde se lleva a cabo el proceso de conversión directa de energía. Finalmente, en el quinto capítulo se presentan las conclusiones y particularidades del presente trabajo.

# Capítulo 1

## Marco Teórico.

### 1.1 Teoría Magnetohidrodinámica.

Se denomina fluido a una sustancia que se encuentra en estado líquido o gaseoso, cuya fuerza de atracción entre sus moléculas eléctricamente neutras es débil. Cuando a un fluido se le aplica alta temperatura o alguna descarga eléctrica es posible dividir un gran número de las moléculas en subpartículas que lo componen, como lo son iones cargados positivamente y electrones cargados negativamente. Un fluido gaseoso en el cual sus partículas constituyentes están cargadas eléctricamente es denominado plasma [9].

Bajo ciertas condiciones es posible considerar toda la población del plasma como un fluido simple, sin diferenciar entre iones o incluso entre iones y electrones. Esta aproximación es conocida como Magnetohidrodinámica (MHD), es en general un método que permite modelar fluidos altamente conductivos como lo son el agua salada y el mercurio [10].

La aproximación del plasma a un fluido simple es apropiada para tratar condiciones de variación lenta cuando el plasma está altamente ionizado, de tal forma que los iones y los electrones son forzados a actuar al unísono, ya sea por colisiones frecuentes o por la acción de un fuerte campo magnético externo [11].

#### 1.1.1 Ecuaciones de un fluido conductor.

Un plasma compuesto por dos especies como los son electrones y un solo tipo de iones, se rige por las siguientes ecuaciones de continuidad (Ec. 1 y 3) y de momento (Ec. 2 y 4), las cuales se muestran a continuación [12].

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \nabla \cdot [N_e \mathbf{u}_e] = 0 \quad \text{Ec. 1}$$

$$m_e N_e \left[ \frac{\partial \mathbf{u}_e}{\partial t} + (\mathbf{u}_e \cdot \nabla) \mathbf{u}_e \right] = -\nabla p_e + q_e N_e (\mathbf{E} + \mathbf{u}_e \times \mathbf{B}) + \mathbf{S}_{ei} \quad Ec. 2$$

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} + \nabla \cdot [N_i \mathbf{u}_i] = 0 \quad Ec. 3$$

$$m_i N_i \left[ \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial t} + (\mathbf{u}_i \cdot \nabla) \mathbf{u}_i \right] = -\nabla p_i + q_i N_i (\mathbf{E} + \mathbf{u}_i \times \mathbf{B}) + \mathbf{S}_{ei} \quad Ec. 4$$

Donde  $N$  representa a la densidad de partículas,  $q$  la carga eléctrica,  $t$  el tiempo,  $\mathbf{u}$  la velocidad del fluido,  $p$  la presión,  $\mathbf{E}$  el campo eléctrico,  $\mathbf{B}$  el campo magnético y  $\mathbf{S}_{ei}$  la colisión entre iones y electrones. Los subíndices indican las cantidades asociadas con los iones y electrones respectivamente.

El término de colisión ( $\mathbf{S}_{ei}$ ), representa el momento total transferido a los electrones por unidad de volumen por unidad de tiempo, debido a las interacciones colisionales con los iones y viceversa. Para un plasma completamente ionizado compuesto de dos especies, el momento total es conservado en interacciones colisionales entre las mismas ( $\mathbf{S}_{ei} = -\mathbf{S}_{ie}$ ).

Dado que existe una diferencia substancial entre la masa del electrón ( $m_e$ ) y la masa del ion ( $m_i$ ), las escalas de tiempo características de los fenómenos descritos en las ecuaciones (2 y 4) son significativamente diferentes.

Cuando se trata con fenómenos de plasma a gran escala, cuya longitud es mucho mayor que la longitud de Debye ( $\lambda_D$ ), con frecuencias relativamente bajas ( $\omega \ll \omega_{pe}$ ), es considerado en promedio eléctricamente neutro ( $N_i \cong N_e$ ), y el movimiento de electrones independientemente de los iones no es importante. En tal caso es útil tratar al plasma como un fluido conductor, cuya inercia se provee primariamente por la masa de los iones.

En este régimen, la dinámica del plasma es similar a un fluido conductivo, cuyas variables macroscópicas permiten describirlo como un todo [13], y es representado por las siguientes ecuaciones:

$$\text{Densidad de masa } \rho_m \equiv N_e m_e + N_i m_i \quad Ec. 5$$

$$\text{Corriente eléctrica } \mathbf{J} \equiv N_e q_e \mathbf{u}_e + N_i q_i \mathbf{u}_i \quad Ec. 6$$

$$\text{Velocidad de masa } \mathbf{u}_m \equiv \frac{N_e m_e \mathbf{u}_e + N_i m_i \mathbf{u}_i}{N_e m_e + N_i m_i} \quad Ec. 7$$

$$\text{Tensor de presión total } \boldsymbol{\psi} \equiv \boldsymbol{\psi}_e + \boldsymbol{\psi}_i \quad \text{Ec.8}$$

Para ello se realizan combinaciones lineales de las ecuaciones 1 y 3, y se omite el término  $(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u}$  en las ecuaciones 2 y 4, debido a que se trata de un fluido con pequeñas perturbaciones, por lo que la velocidad del fluido ( $\mathbf{u}$ ), multiplicado por un gradiente  $\mathbf{u} \cdot \nabla$  no es visiblemente afectada. Considerando lo anterior, las ecuaciones de momento son simplificadas como se muestra en las ecuaciones 9 y 10.

$$m_e N_e \left[ \frac{\partial \mathbf{u}_e}{\partial t} \right] \simeq -\nabla \cdot \boldsymbol{\psi}_e + q_e N_e (\mathbf{E} + \mathbf{u}_e \times \mathbf{B}) + \mathbf{S}_{ei} \quad \text{Ec.9}$$

$$m_i N_i \left[ \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial t} \right] \simeq -\nabla \cdot \boldsymbol{\psi}_i + q_i N_i (\mathbf{E} + \mathbf{u}_i \times \mathbf{B}) + \mathbf{S}_{ei} \quad \text{Ec.10}$$

### 1.1.2 Ecuaciones de masa y conservación de carga.

La ecuación de continuidad de corriente eléctrica (ecuación de conservación de carga), se obtiene al multiplicar las ecuaciones 1 y 3 por  $q_e$  y  $q_i$  respectivamente, y posteriormente sumarlas. La ecuación 11 muestra el resultado de las operaciones anteriores.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad \text{Ec.11}$$

Donde  $\mathbf{J}$  es la densidad de corriente eléctrica y  $\rho$  corresponde a la densidad de carga eléctrica, cuya relación está dada por las ecuaciones 12 y 13 respectivamente.

$$\mathbf{J} = N_{e0} q_e \mathbf{u}_e + N_{i0} q_i \mathbf{u}_i \quad \text{Ec.12}$$

$$\rho = N_e q_e + N_i q_i \quad \text{Ec.13}$$

La conservación de masa se muestra en la ecuación 14, y se obtiene al multiplicar las ecuaciones 1 y 3 por  $m_e$  y  $m_i$  respectivamente.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \rho_{m0} \nabla \cdot \mathbf{u}_m = 0 \quad Ec. 14$$

Donde la densidad de masa  $\rho_{m0}$  y la velocidad lineal del fluido  $\mathbf{u}_m$ , están dadas por las ecuaciones 15 y 16.

$$\rho_{m0} = N_{e0} m_e + N_{i0} m_i \quad Ec. 15$$

$$\mathbf{u}_m = \frac{N_e m_e \mathbf{u}_e + N_i m_i \mathbf{u}_i}{N_{e0} m_e + N_{i0} m_i} \quad Ec. 16$$

### 1.1.3 Ecuación de movimiento.

La ecuación de movimiento para el plasma gaseoso puede obtenerse a través de la suma de las ecuaciones de momento (ecuaciones 2 y 4), considerando que la conservación del momento dado por las interacciones locales entre las mismas es ( $\mathbf{S}_{ei} = -\mathbf{S}_{ie}$ ), como se muestra a continuación.

$$(N_{e0} m_e + N_{i0} m_i) \frac{\partial \mathbf{u}_m}{\partial t} = -\nabla \cdot (\boldsymbol{\psi}_e + \boldsymbol{\psi}_i) + (N_{e0} q_e + N_{i0} q_i) \mathbf{E} + \mathbf{J} \times \mathbf{B}_0 \quad Ec. 17$$

El segundo término del lado derecho es proporcional al valor ambiental de la densidad de carga eléctrica,  $\rho_0 = N_{e0} q_e + N_{i0} q_i$ , igual a cero dado que el plasma es neutro. Por lo tanto, la ecuación de movimiento corresponde a la ecuación 18.

$$(N_{e0} m_e + N_{i0} m_i) \frac{\partial \mathbf{u}_m}{\partial t} = -\nabla \cdot (\boldsymbol{\psi}_e + \boldsymbol{\psi}_i) + \mathbf{J} \times \mathbf{B}_0 \quad Ec. 18$$

Esta ecuación es idéntica a la ecuación general de movimiento para un fluido conductor arbitrario, tal como el mercurio [13].

#### 1.1.4 Ley de Ohm generalizada.

La ecuación que describe la variación de la corriente eléctrica  $\mathbf{J}$ , se obtiene al multiplicar las ecuaciones 2 y 4 respectivamente por  $\frac{q_e}{m_e}$  y  $\frac{q_i}{m_i}$  y posteriormente sumarlas [14]. Dado que la carga del electrón y del ión son de signos opuestos, la diferencia entre ambos momentos se muestra en la ecuación 19.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} = & -\frac{q_e}{m_e} \nabla \cdot \psi_e - \frac{q_i}{q_i} \nabla \cdot \psi_i + \left( \frac{N_{e0} q_e^2}{m_e} + \frac{N_{i0} q_i^2}{m_i} \right) \mathbf{E} + \left( \frac{N_{e0} q_e^2}{m_e} \mathbf{u}_e + \frac{N_{i0} q_i^2}{m_i} \mathbf{u}_i \right) \times \mathbf{B}_0 \\ & + \frac{q_e}{m_e} \mathbf{S}_{ei} + \frac{q_i}{m_i} \mathbf{S}_{ie} \quad \text{Ec. 19} \end{aligned}$$

Cabe recalcar, que para un plasma eléctricamente neutro  $|q_e N_{e0}| \simeq |q_i N_{i0}|$ , la ecuación 19 pueden reescribirse como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} = & -\frac{q_e}{m_e} \nabla \cdot \psi_e - \frac{q_i}{q_i} \nabla \cdot \psi_i + \left( \frac{N_{e0} q_e^2}{m_e} + \frac{N_{i0} q_i^2}{m_i} \right) (\mathbf{E} + \mathbf{u}_m \times \mathbf{B}_0) + \left( \frac{q_e}{m_e} + \frac{q_i}{m_i} \right) (\mathbf{J} \times \mathbf{B}_0) \\ & + \left( \frac{q_e}{m_e} - \frac{q_i}{m_i} \right) \mathbf{S}_{ei} \quad \text{Ec. 20} \end{aligned}$$

Como se ha mencionado anteriormente, la masa del ion ( $m_i$ ) es mucho más grande que la masa del electrón ( $m_e$ ). De tal forma que se puede asumir que el plasma se encuentra en quasi equilibrio térmico, así que las presiones cinéticas de los electrones y de los iones son de magnitud similar, esto es ( $\psi_e \simeq \psi_i$ ). Bajo estas consideraciones la ecuación anterior se reduce a la ecuación 21.

$$\frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} = -\frac{q_e}{m_e} \nabla \cdot \psi_e + \left( \frac{N_{e0} q_e^2}{m_e} \right) (\mathbf{E} + \mathbf{u}_m \times \mathbf{B}_0) + \left( \frac{q_e}{m_e} \right) (\mathbf{J} \times \mathbf{B}_0) + \left( \frac{q_e}{m_e} \right) \mathbf{S}_{ei} \quad \text{Ec. 21}$$

El término  $\mathbf{S}_{ei}$  corresponde a las colisiones entre los iones y electrones, los cuales no han sido relacionados hasta ahora con parámetros macroscópicos. Únicamente por motivos

físicos, es razonable esperar que el impulso total se transfiera a los electrones por unidad de volumen por unidad de tiempo (como resultados de las colisiones con los iones), y es proporcional a la diferencia entre el promedio de la velocidad relativa de las especies ( $\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_e$ ) [22]. Debido a que las colisiones en un plasma completamente ionizado son colisiones Coulombicas, se espera que  $\mathbf{S}_{ei}$  sea proporcional a la fuerza Coulombica, tanto como sea proporcional a la densidad de electrones  $N_{e0}$  y la densidad de centros de dispersión  $N_{i0} = N_{e0}$ , como se muestra en la ecuación 22.

$$\mathbf{S}_{ei} = \eta q^2 N_{e0}^2 (\mathbf{u}_i - \mathbf{u}_e) \quad Ec. 22$$

Donde  $\eta$  es la constante de resistividad específica del plasma, cuyas dimensiones están dadas por  $[\Omega m \text{ ó } VmA^{-1}]$ . Esta constante es útil para expresar la resistividad en términos de una frecuencia de colisión  $\nu_{ei}$  (frecuencia de colisión por momento transferido de iones a los electrones), como se muestra en la ecuación 23.

$$\eta = \frac{m_e \nu_{ei}}{N_{e0} q^2} \quad Ec. 23$$

Note que  $\nu_{ei}$  no es la velocidad real a la que se produce la colisiones entre partículas, su función es más como un “factor compensatorio”, ya que hay procesos que no son contabilizados. Ejemplo de ello son las colisiones en secciones transversales y la efectividad en la transferencia de momento [23]. Para ello se asume que  $q_i = -q_e$  y  $N_{e0} = N_{i0}$ , y se emplea la ecuación 12 para reescribir la ecuación 22 como se muestra a continuación.

$$\mathbf{J} = N_{e0} q_e (\mathbf{u}_e - \mathbf{u}_i) \rightarrow \mathbf{S}_{ei} = -N_{e0} q_e \overset{\leftrightarrow}{\underset{\eta}{\cdot}} \mathbf{J} \quad Ec. 24$$

Debido a que un plasma magnetizado es anisotrópico (sus propiedades varías según su dirección) el parámetro resistividad es considerado como un tensor.

La ley generalizada de Ohm, se obtiene al sustituir la relación anterior en la ecuación 21, como se presenta en la ecuación 25.

$$\frac{\partial J}{\partial t} = -\frac{q_e}{m_e} \nabla \cdot \psi_e + \frac{N_{e0} q_e^2}{m_e} (\mathbf{E} + \mathbf{u}_m \times \mathbf{B}_0) + \frac{q_e}{m_e} (J \times \mathbf{B}_0) - \frac{N_{e0} q_e^2}{m_e} \leftrightarrow \cdot \mathbf{J} \quad \text{Ec. 25}$$

Para una corriente estacionaria en un plasma uniforme sin campo magnético, la variación de la densidad de corriente con respecto al tiempo es igual a cero, por tanto, la variable de presión y campo magnético es nulo, y el tensor de resistividad se reduce a un valor escalar  $[E = \eta J \rightarrow J = \frac{1}{\eta} E]$ . El campo eléctrico puede ser explícitamente descrito como se muestra en la ecuación 26, para ello se consideró la ley generalizada de Ohm y la variable resistividad, descritas en ecuaciones anteriores.

$$\mathbf{E} = -\mathbf{u}_m \times \mathbf{B}_0 - \frac{J \times \mathbf{B}_0}{N_{e0} q_e} + \frac{\nabla \cdot \psi_e}{N_{e0} q_e} + \leftrightarrow \cdot \mathbf{J} + \frac{m_e}{N_{e0} q_e} \frac{\partial J}{\partial t} \quad \text{Ec. 26}$$

El primer término de lado derecho representa al campo eléctrico asociado con el marco de referencia del fluido. En un marco de referencia en el cual el fluido se mueve a una velocidad  $\mathbf{u}_m$ , el campo eléctrico esta dado por  $\mathbf{E}' = \mathbf{E} + \mathbf{u}_m \times \mathbf{B}_0$ . El segundo término incorpora al efecto Hall y generalmente es omitido. En el tercer término figura la polarización ambipolar del plasma y describe al campo eléctrico que surge de los gradientes de la densidad del plasma, el cuarto término constituye las pérdidas por efecto Joule y finalmente el quinto término puede ser interpretado como la contribución de la inercia de electrones al flujo de corriente. Cabe señalar que, para plasmas con mínimas colisiones, su resistividad es cero y su conductividad es infinita, y el fluido de plasma se comporta como el mercurio o como algún otro metal líquido [16]. Las ecuaciones 11, 14, 18 y 25 son ecuaciones que permiten que el plasma sea tratado como un fluido conductor, y constituyen la base de la magnetohidrodinámica.

### 1.1.5 Ecuaciones MHD simplificadas.

Las ecuaciones descritas en apartados previos, que representan al fenómeno MHD aplicado a fluidos simples, se resumen a continuación [17].

$$\text{Conservación de masa } \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \rho_{m0} \nabla \cdot \mathbf{u}_m = 0 \quad \text{Ec. 27}$$

$$\text{Conservación de momento } \rho_m \frac{\partial \mathbf{u}_m}{\partial t} = -\nabla \cdot \psi + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad \text{Ec. 28}$$

$$\text{L. de Ohm } \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t} = -\frac{q_e}{m_e} \nabla \cdot \psi_e + \frac{N_{e0} q_e^2}{m_e} (\mathbf{E} + \mathbf{u}_m \times \mathbf{B}) + \frac{q_e}{m_e} (\mathbf{J} \times \mathbf{B}) - \frac{N_{e0} q_e^2}{m_e} \overleftrightarrow{\epsilon} \cdot \mathbf{J} \quad \text{Ec. 29}$$

Sin embargo, dichas ecuaciones pueden ser simplificadas como se muestran en la tabla 1 y para ello se establecen diversas aproximaciones que se describen en seguida [17].

- Se considera un fluido isotrópico, que cumple con la siguiente ecuación ( $\nabla \cdot \psi = \nabla p$ ). Donde  $p$  es la presión escalar, y el tensor de resistividad del plasma ( $\overleftrightarrow{\epsilon}$ ) se reduce a la resistividad escalar ( $\eta$ ).
- Se omite el efecto Hall y los términos de la polarización ambipolar en la Ley de Ohm generalizada, esto solo en circunstancias muy especiales. Si el plasma experimenta frecuencias bajas, es posible omitir el término ( $\partial \mathbf{J} / \partial t$ ), debido a que las variaciones de tiempo no son relevantes.

**Tabla 1. Ecuaciones simplificadas del fenómeno MHD.**

<i>Ley de Ohm generalizada.</i>	$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{u}_m \times \mathbf{B})$
<i>Ecuación de conservación del momento.</i>	$\rho_m \frac{\partial \mathbf{u}_m}{\partial t} = -\nabla \cdot p + \mathbf{J} \times \mathbf{B}$
<i>Ecuación de conservación de masa.</i>	$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \rho_{m0} \nabla \cdot \mathbf{u}_m = 0$

Cabe señalar que la ley de Ohm también puede ser representada como ( $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}'$ ), donde  $\mathbf{E}' = (\mathbf{E} + \mathbf{u}_m \times \mathbf{B})$  y corresponde al campo eléctrico percibido por un observador o una partícula que se mueve con el elemento fluido.

En el fenómeno MHD el plasma empleado se asemeja a un fluido con alta conductividad, donde el desplazamiento de corrientes se omite y se asume que no existe acumulación de carga espacial dentro del fluido. De esta forma las ecuaciones descritas en la tabla 1 están sujetas a las ecuaciones de Maxwell (tabla 2) [18].

**Tabla 2. Ecuaciones de Maxwell reducidas.**

<i>Ley de Ampere generalizada</i>	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$
<i>Ley de Faraday-Lenz</i>	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$
<i>Ley de Gauss para el campo eléctrico</i>	$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$
<i>Ley de Gauss para el campo magnético</i>	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$

La ecuación 30 muestra la relación de la Ley de Ohm con las ecuaciones de Maxwell. Expresa la sensibilidad del campo magnético al movimiento del fluido (plasma) así como la difusión del plasma, que para un fluido altamente conductor ( $\sigma = \infty$ ) lo que da lugar a la ecuación 31.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times \left( \mathbf{u}_m \times \mathbf{B} - \frac{\mathbf{J}}{\sigma} \right) = \nabla \times (\mathbf{u}_m \times \mathbf{B}) + \frac{\nabla^2 \mathbf{B}}{\mu_0 \sigma} \quad \text{Ec. 30}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u}_m \times \mathbf{B}) \quad \text{Ec. 31}$$

El segundo término de la ecuación 30 que representa a la difusión es despreciable, y se omite si solo si  $\left| \frac{\mathbf{J}}{\sigma} \right| \ll |\mathbf{u}_m \times \mathbf{B}|$ .

Para desplazamientos de corriente insignificantes, es válido asumir la relación propuesta en la ecuación 32 que es equivalente al número de Reynolds magnético ( $R_M$ ). Donde  $L$  corresponde la longitud característica del sistema y  $\mu_0$  a la permeabilidad magnética.

$$|\mathbf{B}| \simeq \mu_0 L |\mathbf{J}| \quad \text{Ec. 32}$$

$$R_M = \sigma |\mathbf{u}_m| \mu_0 L \gg 1 \quad \text{Ec. 33}$$

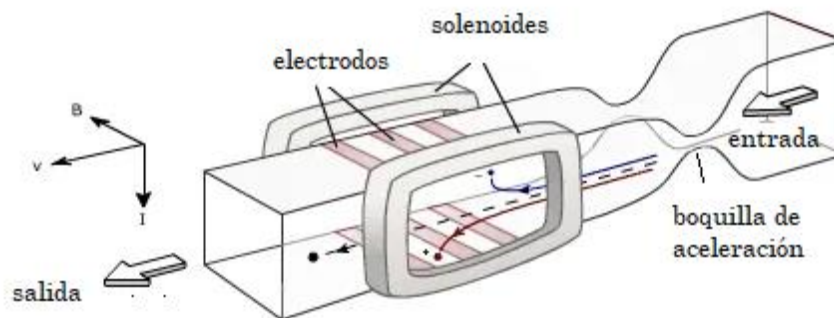
El número de Reynolds (Ec. 33) es muy útil para determinar si un sistema es dominado por el flujo o por la difusión. Cuando  $R_M \gg 1$  el flujo domina y el campo magnético simplemente se mueve con el flujo and viceversa.

La descripción del comportamiento del fluido se complementa al considerar la relación termodinámica ante la presión y la densidad. Esta relación se designa como un proceso adiabático, dado que cuando el fluido se desplaza no intercambia calor con su entorno [19]. La ecuación 32 describe la ecuación de estado termodinámico, donde  $\gamma$  es el coeficiente adiabático determinado por la tasa entre el calor específico a presión constante y el calor específico a volumen constante ( $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ )

$$\frac{d}{dt}(p \rho_m^{-\gamma}) = 0 \quad \text{Ec. 32}$$

### 1.2 Generadores MHD.

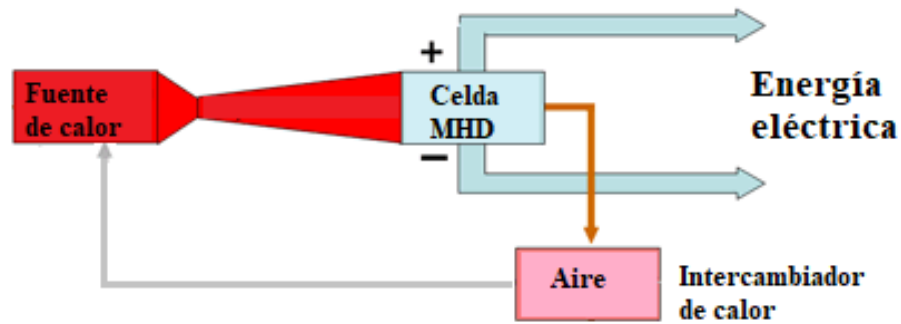
Un generador MHD es un dispositivo capaz de generar energía eléctrica, a través de la interacción de un fluido conductor y un campo magnético [20]. Esta inducción magnética da lugar a un campo eléctrico perpendicular al campo magnético y a la dirección del desplazamiento del fluido. Las cargas inmersas en el fluido conductor son desplazadas hacia las paredes de los electrodos produciendo una corriente eléctrica, como se muestra en la figura 1.



**Figura 1. Principio de operación de un generador MHD.**

Usualmente los generadores MHD se componen de una fuente de calentamiento, una celda MHD donde se lleva a cabo la conversión directa de energía, imanes ó electroimanes

que proveen de un campo magnético a la celda y un intercambiador de calor que permite la recirculación del fluido. La figura 2 muestra el esquema de un generador MHD, cabe resaltar que la ventaja principal de estos sistemas, es que al no usar partes móviles se mejora la eficiencia de conversión [21]



**Figura 2. Esquema de un generador MHD.**

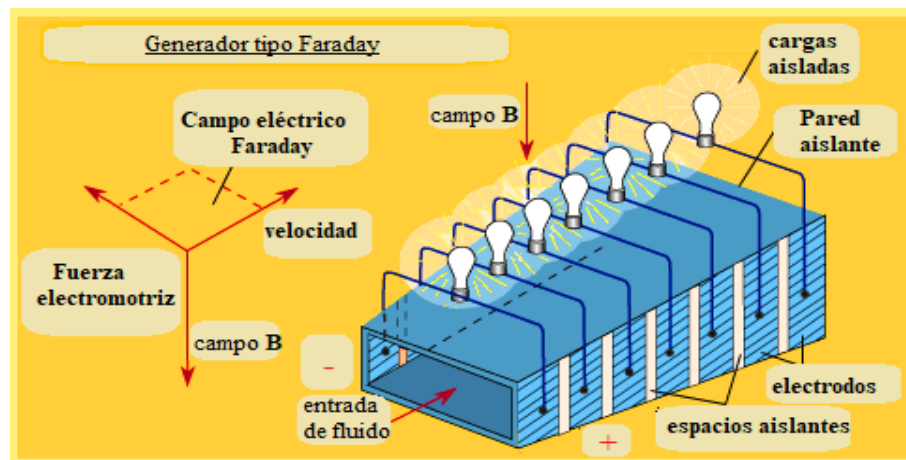
Los generadores MHD convencionales operan de la siguiente manera: primero un fluido es expuesto a altas temperaturas, con lo cual incrementa su energía cinética alcanzado la energía necesaria para ser inyectado dentro de la celda MHD. Dentro de la celda, el fluido interactúa con un campo magnético provisto de imanes o electroimanes, y de acuerdo con la Ley de Faraday, se establece un campo eléctrico que actúa en dirección perpendicular al fluido y al campo magnético. Los electrodos que se encuentran en el interior de la cavidad de la celda, le permiten al generador proveer una corriente eléctrica debido a la recolección de cargas inmersas en el fluido. Finalmente, un intercambiador de calor ubicado después de la celda MHD reduce la temperatura del fluido para que repita el ciclo nuevamente [22].

La cantidad de energía producida por un generador MHD, está dada por la relación del área activa de los electrodos y es proporcional al producto de la conductividad del fluido, el cuadrado de la velocidad y el cuadrado de la fuerza del campo magnético que se le induce. Utilizando esta relación es posible obtener generadores MHD competitivos y con tamaños razonables [23]. Cabe señalar que tres aspectos de vital importancia en estos generadores, radican en trabajar con fluidos altamente conductores, implementar campos magnéticos potentes (3-5 T), así como el uso de electrodos conductores con larga vida útil.

### 1.2.1 Tipología de los generadores MHD.

De acuerdo al estado del arte actualmente existen tres tipologías de generadores MHD: generador Faraday, generador Hall y generador de Disco, siendo este último el de mayor eficiencia de operación (30%) [24].

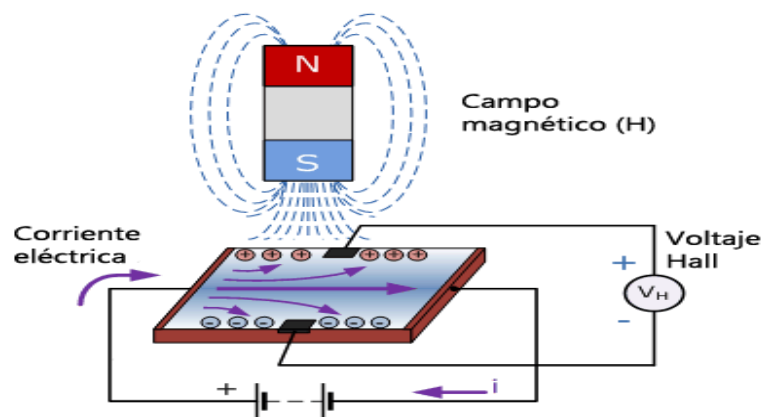
- El generador Faraday obtiene su nombre en honor a Michael Faraday, quien fue el primero en observar el efecto de líquidos conductores circulando a través de un campo magnético. Consta de una cavidad rectangular fabricada de un material aislante, y de electrodos localizados de forma paralela dentro de sus paredes internas. De esta forma, cuando un fluido conductor se desplaza a través del canal, el fluido interactúa con la presencia de un campo magnético perpendicular. Las cargas inmersas en el flujo son inducidas por el campo y son arrastradas hacia los electrodos para dar lugar a una corriente eléctrica (Fig. 3) [25].



**Figura 3. Generador MHD tipo Faraday.**

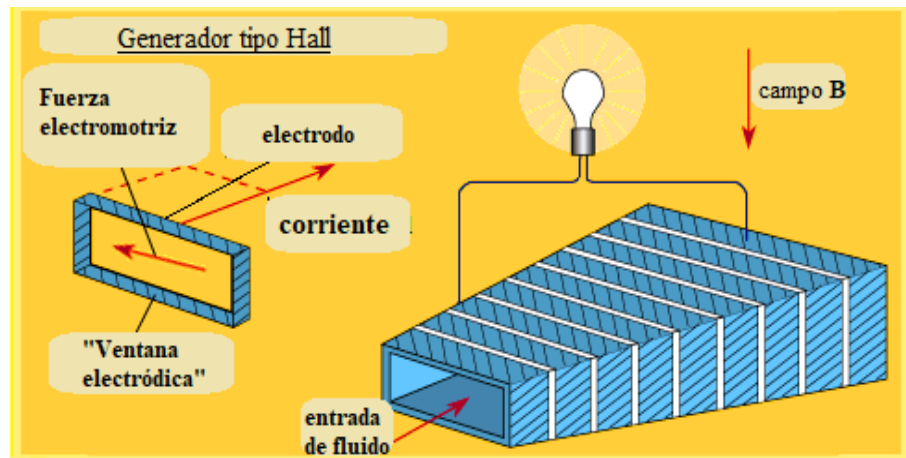
La potencia extraída de estos generadores, es proporcional al área transversal del canal y a la velocidad del flujo conductor. Sin embargo, la pérdida más grande se tiene por el efecto Hall de la corriente, lo que hace que estos generadores sean poco eficientes. Para mejorar el desempeño de estos generadores se han implementado magnetos muy potentes elaborados de materiales superconductores.

- El generador tipo Hall es el más utilizado, debido a que soluciona el problema ocasionado por el efecto del mismo nombre. Cabe recordar que, el efecto Hall radica en la aparición de un campo eléctrico en un material conductor o semiconductor por el cual circula una corriente [25]. Este material es atravesado perpendicularmente por un campo magnético el cual desvía las cargas y genera una diferencia de potencial. La diferencia de potencial (Voltaje Hall) se genera entre las caras transversales de los electrodos. El voltaje producido es proporcional a la relación entre la magnitud de la corriente y el valor del campo magnético (Fig. 4).



**Figura 4. Esquema del efecto Hall.**

La figura 5 muestra el modelo de un generador MHD tipo Hall, cuya característica principal es crear una corriente que fluya junto con el fluido de trabajo. El esquema normal consiste en colocar una gran cantidad de pequeños electrodos paralelos alrededor de las paredes del canal de la celda, separados a una cierta distancia; siendo el primer y último electrodo los que alimentan la carga. Sin embargo, estos cortes generados a la corriente Faraday, inducen un potente campo magnético dentro del fluido, propiciando un campo magnético secundario en forma de arco entre el primer y el último electrodo [25].



**Figura 5. Generador MHD tipo Hall.**

Las pérdidas en este tipo de generadores son menores que los generadores tipo Faraday, en consecuencia, los voltajes obtenidos son mayores debido a que se tiene un menor corte de la corriente final inducida. Un requisito importante de los generadores tipo Hall, consiste en mantener al fluido de trabajo bajo una velocidad constante. Esto permite que la eficiencia del generador sea independiente de su carga, ya que conforme varía la carga varía la velocidad del fluido, lo que produce el desalineamiento de las corrientes de Faraday con los electrodos que están destinados a atraparlas [26].

- El tercer generador, es el generador MHD tipo disco, este diseño tiene hasta el momento el récord de eficiencia y generación de energía eléctrica [27]. Este generador tiene la característica de que el fluido se mantiene circulando en el centro de un disco, a través de un ducto que lo rodea. La excitación magnética es creada por un par de alambres circulares que conforman las bobinas de Helmholtz, las cuales son colocadas sobre la periferia del disco. De esta forma, las corrientes producidas por el efecto Hall fluyen entre los electrodos en forma de anillos cerca del centro y entre los electrodos.

Las ventajas de este generador con respecto a los anteriores, consisten en que debido a que el flujo es procesado dentro de un disco el campo magnético puede estar más cerca del fluido. Mediante la implementación de las bobinas de Helmholtz, la fuerza del campo magnético puede ser incrementado hasta una séptima potencia de su magnitud, en comparación con los campos magnéticos tradicionales. Otra ventaja, radica en el tamaño del

generador, con este diseño se logra un generador compacto en relación con la potencia que produce. La figura 7 muestra el diagrama del generador MHD tipo disco, el cual fue fabricado por el Instituto Tecnológico de Tokio [28].

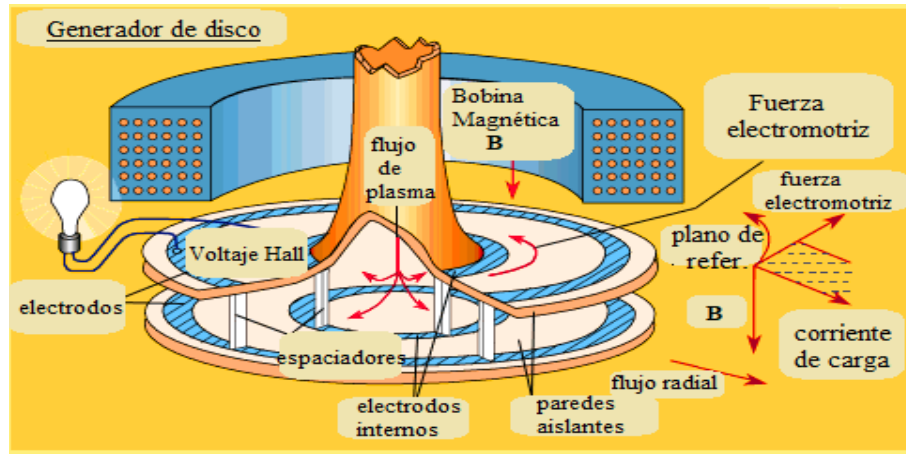


Figura 6. Generador MHD tipo Disco.

### 1.3 Sistemas térmicos solares.

La energía solar es una energía renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del sol. Todas las energías renovables cuentan con un potencial disponible que se puede aprovechar. Sin embargo, la energía solar es considerada de mayor ponderación entre las energías renovables. Debido a que la cantidad de energía solar captada por la Tierra anualmente es aproximadamente de  $5.4 \times 10^{24}$  Joules [29].

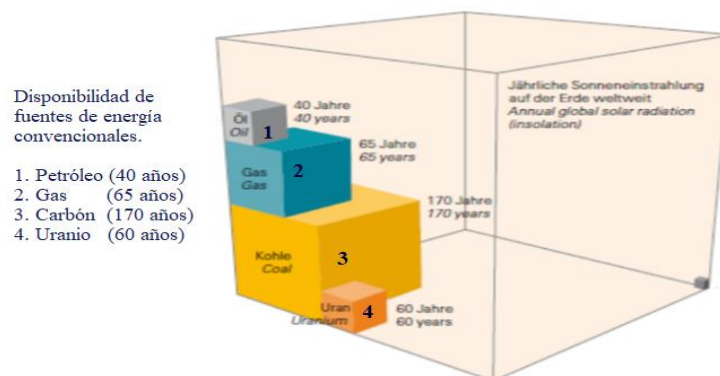


Figura 7. Disponibilidad de tiempo de las fuentes de energía convencionales.

Un estudio realizado por la empresa alemana SBP (Schaich Bermann Partner) en el 2014, presentó una comparación del tiempo disponible entre las fuentes de energía convencionales [30]. Dicho estudio muestra que, de acuerdo a la demanda energética mundial las fuentes de energía convencionales como los son los combustibles fósiles tendrán una fecha de agotamiento (Fig. 7), lo que promueve el uso de energías solar.

La energía térmica solar es la energía que aprovecha la radiación proveniente del sol para generar energía calorífica. Los sistemas térmicos solares son los elementos que obtienen esta energía térmica y la transmiten a un fluido caloportador que usualmente es agua, aceite o algún gas [31].

Los sistemas térmicos solares se dividen en sistemas activos y sistemas pasivos [32]. Los sistemas pasivos, son aquellos que no necesitan ningún dispositivo de captación solar; ya que usan indirectamente el calor producido por la radiación solar al transferirlo a un elemento caloportador que no realiza ningún trabajo. Ejemplo de ello es la aplicación de diversos elementos arquitectónicos que permiten controlar el calor dentro de una vivienda de manera natural.

En contraste, los sistemas activos utilizan directamente el calor de la radiación solar a través de concentradores, con el objetivo de transmitir energía térmica a fluidos caloportadores para que realicen un trabajo. La concentración solar radica en manipular eficazmente los fotones extraídos desde un área determinada hacia un receptor de área más pequeña. Y de acuerdo a su nivel de concentración son clasificados como se muestra en la tabla 3 [33].

**Tabla 3. Clasificación de los sistemas térmicos solares activos en función a su capacidad de concentración solar.**

<b>Baja concentración</b>	$C_g < 100$	*Colectores de placas planas.
	Eficiencia 30-50%	*Colectores lineales de Fresnel.
		*Tubos al vacío.
<b>Media concentración</b>	$C_g > 500$	*Colectores cilindro-parabólicos.
	Eficiencia 50-65%	*Sistema de recepción central.
<b>Alta concentración</b>	$C_g > 5000$	*Colectores de discos parabólicos.
	Eficiencia 65-70%	

El término  $C_g$  corresponde al índice de concentración geométrica y está determinado por la relación entre el área de apertura ( $A_a$ ) y el área de recepción ( $A_r$ ) como se muestra en la ecuación 32. El área de apertura es el área máxima proyectada de un colector solar a través de la cual se capta la energía solar no concentrada. Por otra parte el área de recepción, es el área que contiene el material absorbedor que recibe la radiación y la transforma en energía térmica.

$$C_g = \frac{A_a}{A_r} \quad \text{Ec. 32}$$

De acuerdo con otros autores [34], los sistemas solares térmicos pueden clasificarse en base a su temperatura de operación, como se muestra en la tabla 4.

**Tabla 4. Clasificación de los sistemas térmicos solares en base a su temperatura de operación.**

<b>Sistema de baja temperatura</b>	< 80 °C
<b>Sistema de media temperatura</b>	80 – 250 °C
<b>Sistema de alta temperatura</b>	250 – 4000 °C

Los sistemas de baja temperatura son empleados con fines térmicos para procesos donde el agua no llega al punto de ebullición. Aplica para calentadores de agua domésticos y preparación de alimentos. Los de media temperatura son empleados en sistemas industriales, donde se necesita mantener una temperatura propicia para generar vapor. Finalmente, los sistemas de alta temperatura se utilizan en la producción de electricidad a gran escala y para ello se emplean concentradores solares.

### 1.3.1 Ciclo termodinámico característico de los sistemas térmicos solares.

El ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico que tiene como objetivo la conversión de calor en trabajo, constituyendo lo que se denomina un ciclo de potencia. La eficiencia de este ciclo de potencia está limitada, en comparación con la eficiencia termodinámica de un ciclo de Carnot [35]. Este ciclo consiste en calentar agua en una caldera, evaporarla y elevar

la presión del vapor inmerso en ella. Posteriormente, el vapor es llevado a una turbina donde eleva su energía cinética a costa de reducir su presión. Su camino continúa hacia un condensador, donde el vapor residual cambia a estado líquido, con el objetivo de ser ingresado a una bomba que nuevamente lo introducirá en la caldera. La figura 8, muestra un esquema del proceso de una instalación térmica de vapor, que se rige bajo el ciclo Rankine.

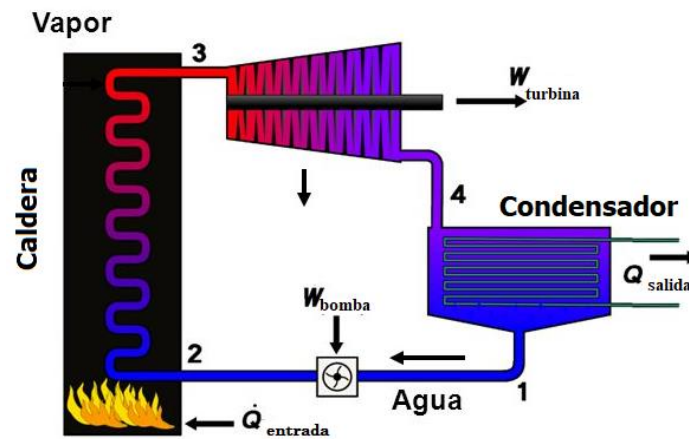


Figura 8. Esquema de una instalación térmica de vapor.

En el ciclo Rankine se llevan a cabo 4 procesos termodinámicos. Los estados se identifican por números en marrón, mostrados en el diagrama T – S (temperatura – entropía) de la figura 9.

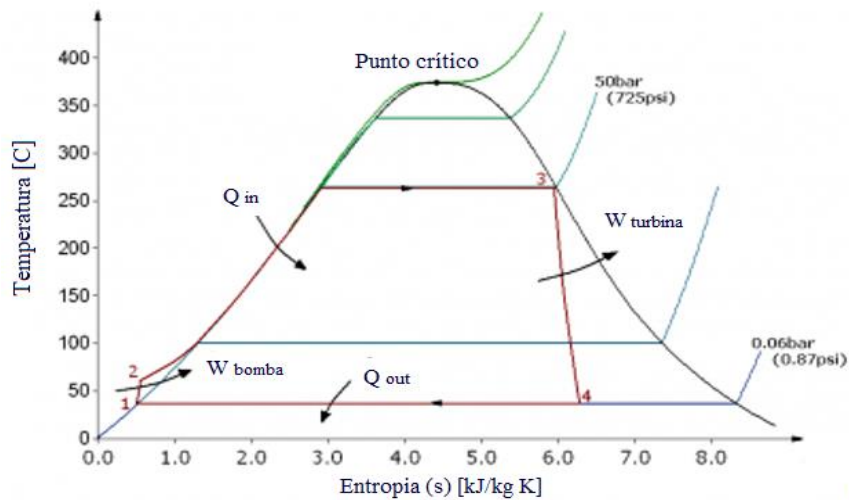


Figura 9. Diagrama T-S del ciclo Rankine.

Etapa 1–2. En esta etapa el fluido de trabajo es bombeado, produciendo un cambio de baja a alta presión. Sin embargo, debido a que el fluido se encuentra en estado líquido, la bomba requiere poca energía de entrada. En términos termodinámicos, en este proceso se lleva a cabo bajo una compresión isentrópica en la bomba.

Etapa 2–3. En este punto el líquido de alta presión ingresa a una caldera, donde se calienta a presión constante mediante un proceso isobárico. La función de la caldera consiste en producir un cambio de fase en el líquido, hasta convertirlo en vapor seco saturado.

Etapa 3–4. El vapor seco saturado se expande a través de una turbina de vapor, generando energía. Desde un punto de vista termodinámico, esto disminuye la temperatura y la presión del vapor, y puede ocurrir algo de condensación. Lo anterior puede ser resumido como un proceso isentrópico.

Etapa 4–1. Finalmente, el vapor húmedo ingresa a un condensador, donde el fluido cambia de fase a una presión constante (proceso isobárico), hasta convertirse en un líquido saturado.

En un ciclo Rankine ideal, la bomba y la turbina son isentrópicas, es decir, la bomba y la turbina no generarían entropía y, por lo tanto, maximizarían la producción neta de trabajo. Los procesos 1–2 y 3–4 estarían representados por líneas verticales en el diagrama T – S y se asemejarían más al del ciclo de Carnot.

Sin embargo, el ciclo termodinámico de vapor real difiere del ciclo de Rankine ideal, debido a las irreversibilidades en los componentes, causadas por la fricción del fluido y la pérdida de calor en los alrededores. La fricción del fluido provoca caídas de presión en la caldera, el condensador y la tubería entre los componentes. Como resultado de lo anterior, el vapor sale de la caldera a una presión más baja y la pérdida de calor reduce la producción neta de trabajo. Por lo tanto, se requiere calor adicional al vapor en la caldera para mantener el mismo nivel de producción neta de trabajo.

### *1.3.2 Eficiencia Térmica.*

La eficiencia térmica permite conocer y evaluar la capacidad de aprovechamiento de un motor o máquina térmica. Un motor térmico ideal, es un motor imaginario en el que la

energía extraída como calor se convierte por completo en trabajo [36]. Sin embargo, de acuerdo con el enunciado de Kelvin-Planck [37], tal motor violaría la segunda ley de la termodinámica, porque debe haber pérdidas en el proceso de conversión. El calor neto agregado al sistema, debe ser mayor al trabajo neto realizado por el sistema.

De acuerdo con lo anterior, se define a la eficiencia térmica ( $\eta_t$ ) como la relación entre el trabajo ( $w$ ) que se lleva a cabo, con respecto a la fracción de calor recibido ( $Q_h$ ) como se muestra en la ecuación 33.

$$\eta_t = \frac{w}{Q_h} \quad Ec. 33$$

La eficiencia es una medida de rendimiento sin dimensiones de un motor térmico, como lo son una turbina de vapor o un motor de combustión. Dado que la energía se conserva de acuerdo con la primera ley de la termodinámica, y la energía no se puede convertir en trabajo por completo [38]. El calor recibido ( $Q_h$ ), debe ser igual al trabajo realizado, más el calor que se debe disipar como calor residual ( $Q_c$ ), en el ambiente. Por lo tanto, se puede reescribir la ecuación anterior a la ecuación 34.

$$\eta_t = \frac{Q_h - Q_c}{Q_h} = 1 - \frac{Q_c}{Q_h} \quad Ec. 34$$

Cabe señalar que las eficiencias térmicas suelen ser inferiores al 50%, y esta ineficiencia puede atribuirse a las siguientes causas:

\*Irreversibilidad de los procesos. Existe un límite teórico para la eficiencia de la conversión de calor a trabajo en cualquier motor térmico. De acuerdo al principio de Carnot, ningún motor puede ser más eficiente que un motor reversible.

\*Presencia de fricción y pérdidas de calor. En sistemas termodinámicos reales o en motores de calor real, una parte de la ineficiencia general del ciclo se debe a las pérdidas de calor por efecto Joule que tienen lugar en cada uno de los componentes.

\*Ineficiencia de diseño. El diseño de un motor térmico es un factor importante en su rendimiento. Ya que en este proceso se consideran los costos, la operación del ciclo, así como los materiales adecuados para su desempeño.

### 1.3.3 Factores atenuantes de la eficiencia de los sistemas térmicos solares.

Todos los dispositivos reales tienen condiciones establecidas bajo las que funcionan a niveles óptimos. Cualquier fluctuación en estas condiciones produce una disminución en su eficiencia de operación. Los sistemas térmicos solares no son una excepción a esto, y existen diversos factores que merman su rendimiento global [39]; los cuales, se describen a continuación.

- Pérdidas por sombra. Engloba a las sombras proyectadas por elementos ajenos al sistema, que impiden la radiación directa del sol hacia los sistemas solares térmicos.
- Pérdidas por reflectividad. Están relacionadas con la reflexión parcial de la radiación incidente en los sistemas térmicos solares. Estas pérdidas pueden ser ocasionadas por exceso de partículas sobre la superficie del sistema, así como por el bajo índice de absorción del material con el que se fabricó el dispositivo.
- Pérdida por atenuación atmosférica. Al ser el aire un medio por el cual se desplazan los rayos del sol, existen pérdidas por absorción y dispersión en el trayecto hacia el receptor de la radiación solar. Estas pérdidas son directamente proporcionales a la distancia entre el receptor y el absorbedor y a la temperatura atmosférica de ese momento.
- Pérdidas por transmisión de calor en el receptor. De acuerdo a la física existen tres tipos de mecanismos de transmisión de calor (conducción, convección y radiación) [40]. La pérdida por conducción se origina por el contacto que existe entre todos los elementos del sistema térmico solar, desde el receptor de radiación solar hasta sus elementos estructurales. Por otro lado, la pérdida por convección es resultado de la pérdida de calor producida por el movimiento del fluido; y se origina desde el cuerpo absorbedor del sistema térmico solar hasta el aire que lo rodea. Finalmente, la pérdida por radiación se debe a la radiación electromagnética que se escapa por el movimiento

térmico de las partículas presentes en la materia que conforma al sistema térmico solar. Estas pérdidas pueden depender del índice de absorbanza del material con el que fue fabricado, así como de la radiación generada por el absorbedor del sistema térmico hacia sus alrededores.

- Pérdida por factor coseno. Se trata de un factor atenuante que cuantifica las pérdidas causadas por la inclinación del eje óptico de los receptores solares, como lo son los heliostatos. Son proporcionales al coseno del ángulo formado por la dirección de incidencia de la radiación, con la normal de la superficie reflectiva en el centro del heliostato.

## Capítulo 2

### Diseño y fabricación de un generador MHD solar.

En este capítulo se resume el proceso de diseño y fabricación de un generador MHD solar, se muestran imágenes de los elementos que lo conforman, así como la descripción de su funcionamiento. Cabe señalar, que en este trabajo se desarrollaron dos generadores MHD solares, uno de baja concentración que opera con captadores solares planos y el segundo generador que opera con radiación solar concentrada.

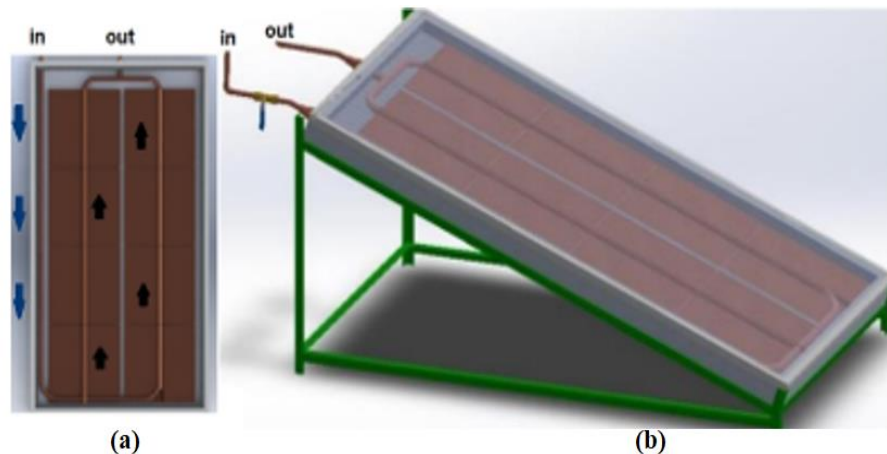
#### 2.1 Generador MHD solar de baja concentración.

Para estudiar experimentalmente el comportamiento de un fluido ionizado bajo el efecto de un campo magnético, se diseñó y fabricó un generador MHD solar, el cual se desarrolló a partir de dos elementos, un sistema térmico solar de ciclo cerrado y una celda MHD. El objetivo del primer elemento consiste en incrementar la energía cinética del fluido electrolítico (NaCl) a partir de la energía térmica solar; mientras que, el propósito de la celda consiste en llevar a cabo la conversión directa de energía. A continuación, se describe cada uno de estos elementos, así como su funcionamiento.

##### 2.1.1 Sistema térmico solar de baja concentración.

El sistema térmico solar de baja concentración se fabricó siguiendo un diseño similar a una caldera acuotubular con captadores solares planos, en el cual el fluido de trabajo se desplazó dentro de los tubos durante su calentamiento. Para captar la radiación solar se fabricaron aletas rectangulares que fueron colocadas de forma envolvente sobre tubos de cobre de 1.27 cm (0.5") de diámetro. Posteriormente, se colocó el arreglo de tubos dentro de una charola de lámina de 1 m<sup>2</sup>, la cual se cubrió por medio de una placa de policarbonato (Fig. 10a).

Para operar el sistema térmico solar, el panel fue colocado sobre un soporte de perfil tubular rectangular con una inclinación de  $19^\circ$ ; este ángulo corresponde a la latitud geográfica de la ciudad donde se llevó a cabo la experimentación. Una vez orientado el panel hacia el sur; éste se expuso a la radiación solar y de esta forma se propició el aumento de energía térmica y cinética de la solución electrolítica. Bajo estas condiciones, el fluido se mantiene en temperaturas y presiones arriba de 373 K y 96 KPa respectivamente. La inclusión de una válvula check en el sistema, permite que el fluido se desplace en una sola dirección evitando la posibilidad de que el fluido se desplace en la dirección opuesta. De esta manera, se logra que el vapor comprimido dentro del sistema térmico mantenga una circulación continua hacia la celda MHD (Figura 10b).

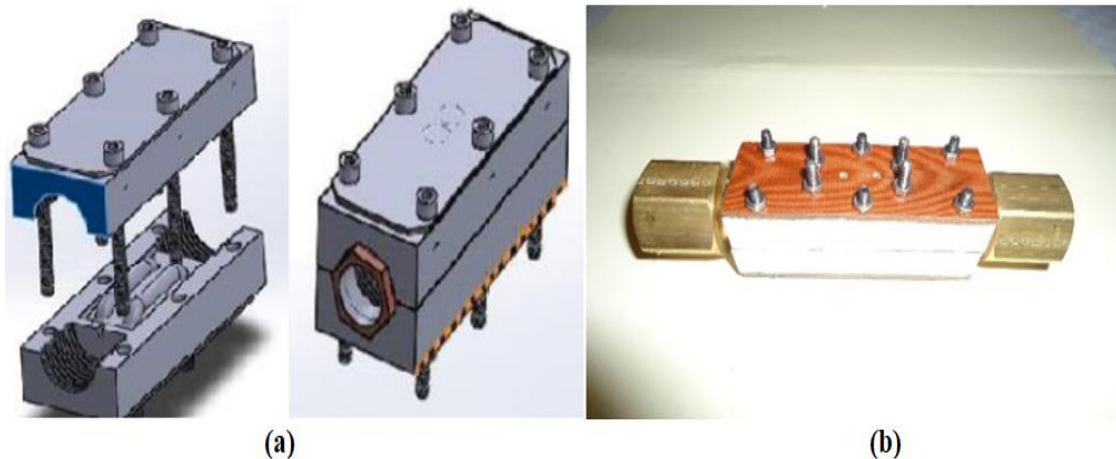


**Figura 10. Sistema térmico solar de baja concentración (STS) a) Vista superior del STS y b) Panel y base del STS.**

### 2.1.2 Celda MHD del generador de baja concentración.

La celda MHD implementada en el generador de baja concentración, se conforma por dos piezas. Ambas fueron maquinadas de politetrafluoroetileno (Figura 11a), en su posición interna se colocan dos electrodos de acero inoxidable de 4 mm de diámetro a una distancia inter-electródica de 2 mm; y en su parte externa perpendicular a los electrodos, se colocaron cuatro imanes de neodimio con un campo magnético de 1.02 T. La celda MHD cuenta con dos entradas geométricas circulares con un diámetro de 12.70 mm; dentro de las

cuales se colocaron dos coples de bronce. Estos coples permitieron conectar a la celda con la entrada y salida del sistema térmico solar, y favorecer la circulación del electrolito de NaCl hacia el interior de la celda en forma continua y en ciclo cerrado (figura 11b).

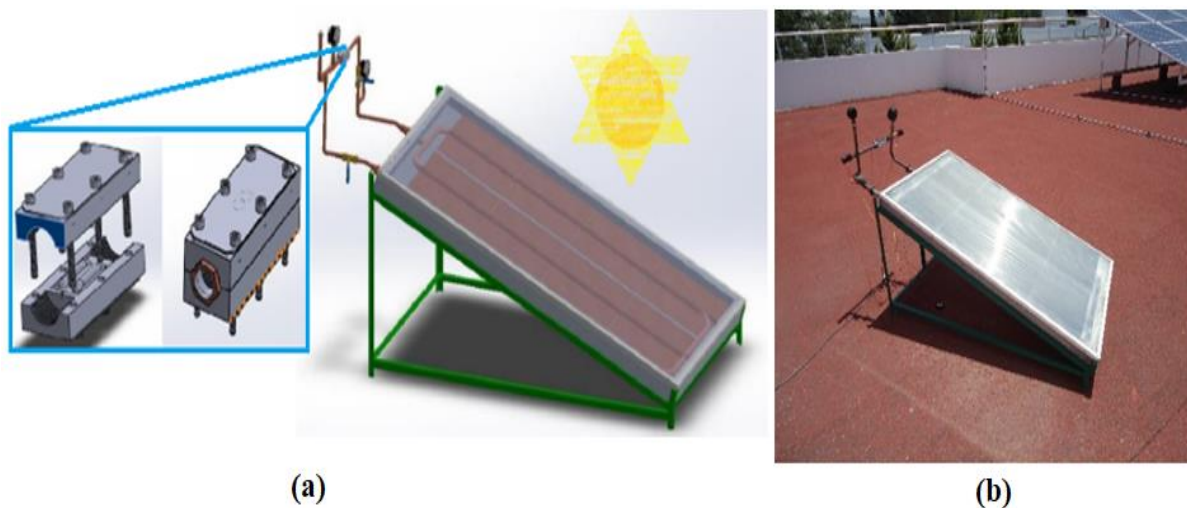


**Figura 11. Celda Magnetohidrodinámica de politetrafluoroetileno a) Diseño de la celda y b) Celda con coples de bronce.**

### 2.1.3 Funcionamiento del Generador MHD solar de baja concentración.

Para poner en operación al generador MHD solar de baja concentración, fue necesario introducir la solución electrolítica de NaCl al 20% vol. dentro del sistema térmico solar. Después se unió la celda MHD al sistema térmico mediante coples de bronce posicionados en los dos extremos de la celda. Posteriormente el generador se expuso a la radiación solar, de esta manera la energía térmica solar fue captada por el sistema térmico, propiciando que el fluido incrementará su temperatura, así como su energía cinética, lo cual permitió que el fluido se desplazara dentro de la celda en una sola dirección (figura 12a y 12b).

Dentro de la celda MHD se llevó a cabo el proceso de conversión directa de energía, para lograrlo el electrolito debió atravesar el espacio interelectródico, lugar donde la trayectoria de los iones se vio modificada por el campo magnético y posteriormente fueron captados por los electrodos de acero inoxidable; produciendo un flujo de corriente eléctrica.



**Figura 12. Generador MHD solar de baja concentración a) Diseño del generador. b) Generador MHD en operación.**

## 2.2 Generador MHD solar de radiación concentrada.

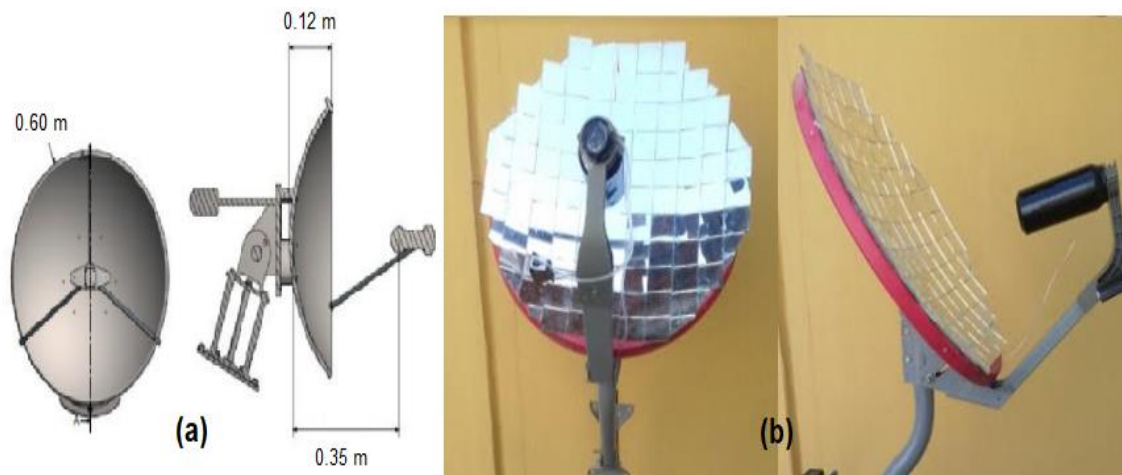
Con el propósito de mejorar el aprovechamiento de la energía térmica solar se diseñó y fabricó un generador MHD que opera con radiación solar concentrada. Este generador consta de un concentrador de disco parabólico y de celdas fabricadas sobre placas de Baquelita PCB. A continuación, se describe cada uno de los elementos que lo conforman y su funcionamiento.

### 2.2.1 Sistema térmico solar de radiación concentrada.

El sistema térmico solar consta de un captador de disco parabólico y un receptor exterior cilíndrico. Este modelo presenta la particularidad de mantener un punto o área focal fija hacia donde se concentra la radiación solar.

El sistema fue fabricado a partir de una antena parabólica comercial de 60 cm. de diámetro. La cual, fue lijada y cubierta por espejos cuadrados de (3.0 x 3.0 x 0.3 cm). Posteriormente, se colocó sobre una base de acero que permite su posicionamiento adecuado ante la radiación solar. Aunado al concentrador parabólico, se instaló un receptor cilíndrico

de cobre que funge como depósito del fluido electrolítico, cuya capacidad es de 800 ml. El receptor se posicionó justo en el área focal, con el propósito de recibir la radiación solar concentrada y transmitir energía térmica al fluido. La figura 13 muestra el esquema de diseño, así como la fabricación real de este sistema térmico solar. Para activar el sistema es necesario posicionarlo frente al sol, de esta manera el receptor colocado en el área focal absorbe la radiación solar y la traspa en forma de calor al fluido presente en el receptor.



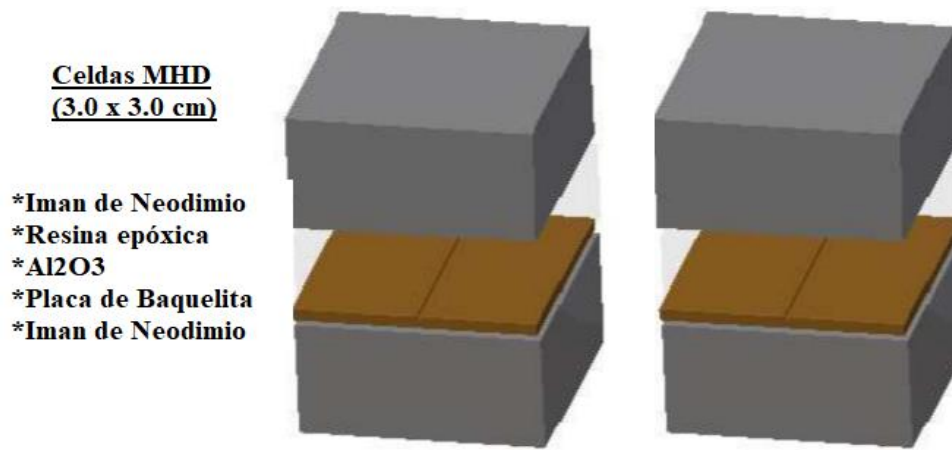
**Figura 13. Sistema térmico solar de concentrador parabólico, a) Diseño del sistema térmico solar y b) Sistema térmico solar real.**

### 2.2.2 Celda MHD del generador MHD solar de radiación concentrada.

Para llevar a cabo el proceso de conversión directa de energía en el generador MHD solar de radiación concentrada se diseñaron y fabricaron dos celdas con diferente patrón geométrico en su canal electródico. Las cuales fueron fabricadas sobre una placa de Baquelita PCB, la cual se compone de una lámina de cobre recubierta por un material aislante. Para su realización se cortaron dos placas cuadradas de 3.0 x 3.0 cm, y posteriormente les fue grabado un recorrido de diferente geometría con un enrutador CNC. La primera celda fue grabada con un recorrido lineal a la mitad de la placa y la segunda celda se grabó con un recorrido curvo distribuido sobre la placa. Ambos grabados se realizaron con las siguientes dimensiones: 2

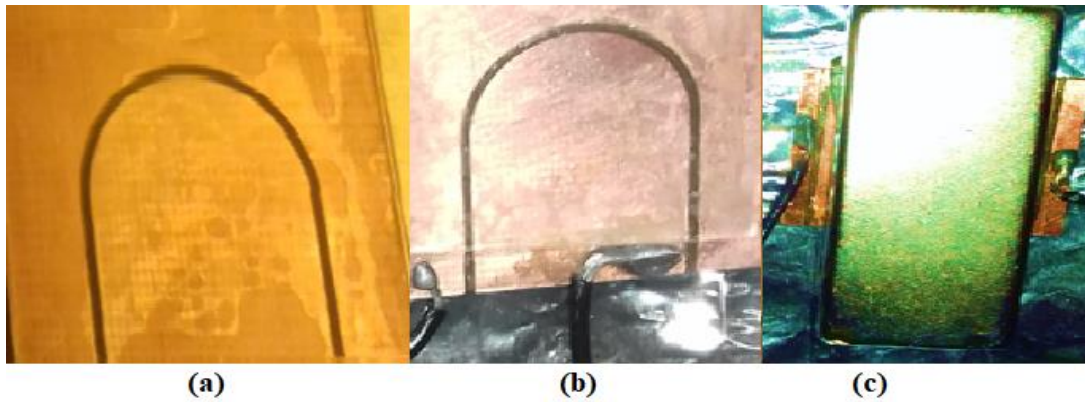
mm de profundidad y 1 mm de ancho, y través de este proceso, fue generado el canal por donde se desplaza el fluido, así como las paredes electródicas.

Posteriormente se depositó una capa protectora de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [100  $\mu\text{m}$ ], para evitar oxidación en la superficie de cobre. Este proceso se realizó mediante ALD (atomic layer deposition), y se tuvo especial cuidado en no afectar las áreas electródicas y de contacto. La figura 14, muestra un esquema de composición de las celdas MHD posicionadas dentro de los imanes de neodimio.



**Figura 14. Esquema de composición de las celdas MHD del generador MHD solar de radiación concentrada.**

Acto seguido, se colocaron los contactos eléctricos, y se recubrió la superficie de cobre de la placa con resina epóxica. Este procedimiento, facilitó la colocación de tubos capilares en ambos extremos del canal asegurando el apropiado desplazamiento del fluido. Finalmente, las celdas se colocaron entre dos imanes rectangulares de neodimio (1.20 T), con los cuales se aseguró la inducción de un campo magnético hacia el fluido de trabajo (Fig. 15). El fluido de operación empleado a estas celdas, corresponden a soluciones electrolíticas de NaCl y de KOH, ambas al 20 % vol. La elección de estas soluciones electrolíticas radica en su alta conductividad eléctrica.



**Figura 15. Celda MHD del Generador MHD solar de radiación solar concentrada. a) Grabado de la placa de Baquelita b) Celda aislada con contactos y c) Celda posicionada dentro de imanes de neodimio.**

### 2.2.3 Funcionamiento del generador MHD solar de radiación concentrada.

Para accionar el generador MHD de radiación solar concentrada, fue necesario introducir una solución electrolítica dentro del receptor exterior del concentrador solar. Posteriormente, la celda MHD de Baquelita es acoplada al sistema térmico solar mediante tubos y conectores de PTFE. Una vez unidas las dos piezas que conforman el generador, es expuesto en dirección frente al sol para localizar su punto focal. De esta manera la radiación solar es concentrada en el receptor exterior, propiciando un incremento en la energía cinética del fluido que da lugar a su desplazamiento entre los electrodos de la celda MHD.



**Figura 16. Generador MHD solar operado con radiación solar concentrada**

## Capítulo 3

### Caracterización y resultados experimentales de un generador MHD solar.

Este capítulo detalla el proceso experimental que se implementó para evaluar el desempeño de los generadores MHD solares. Se muestra parte de la instrumentación implementada para cuantificar cada una de las variables inmersas en el fenómeno MHD, así como los resultados obtenidos.

#### 3.1 Caracterización del generador MHD solar de baja concentración.

Para cuantificar las condiciones de operación del generador MHD solar se instalaron los siguientes elementos de medición; piranómetro Kipp & Zonen SP Lite, sensores de temperatura LM35 y manómetros De Wit modelo 235; con el fin de medir, irradiancia solar, temperatura y presión respectivamente. El conjunto de estos elementos se interconectó a la celda MHD y a una tarjeta de adquisición de datos National Instruments SCB-68 por medio del circuito eléctrico mostrado en la figura 16.

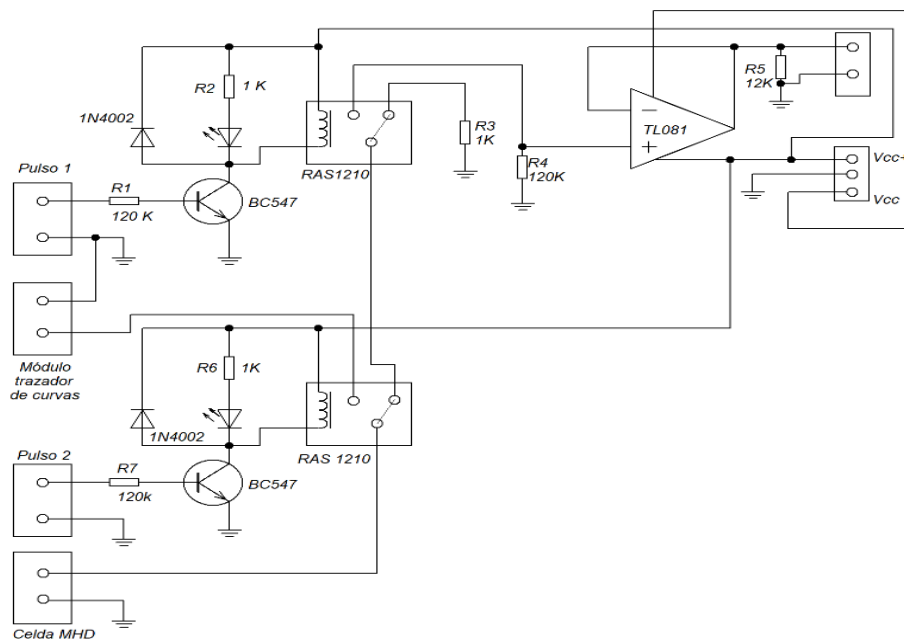
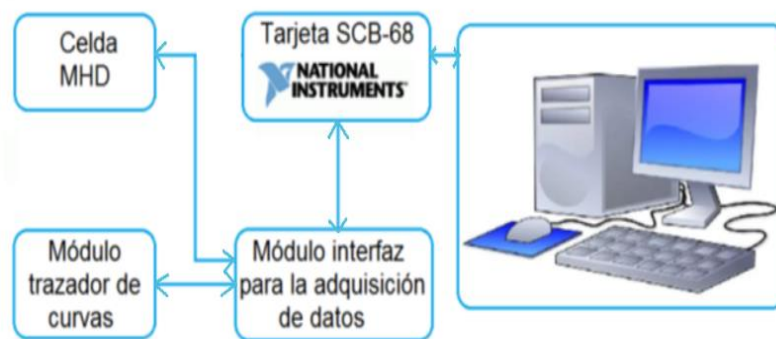


Figura 17. Módulo para la adquisición de datos.

La interfaz de circuito eléctrico está conformada por dos relevadores RAS1210 que se conmutan para permitir la medición de la impedancia interna y la corriente generada por la celda MHD en tiempo real. El manejo de los relevadores, se efectúa por medio de los transistores BC547 en una secuencia previamente establecida en el programa Lab view; el cual maneja también la tarjeta de adquisición de datos SCB-68. Los diodos 1N4002 mostrados en el circuito se emplean para proteger los transistores de los impulsos eléctricos inversos provocados por las bobinas de los relevadores. Asociado a este circuito se interconectó un amplificador operacional TL081 para realizar la medición de voltaje transitorio en la celda MHD, con el fin de determinar la capacitancia interna de la celda. La interfaz incluye la medición de la curva característica corriente-voltaje (I-V) de la celda; para esto la secuencia de conmutación consideró interconectar un módulo trazador de curvas (MTC) para determinarla [42].

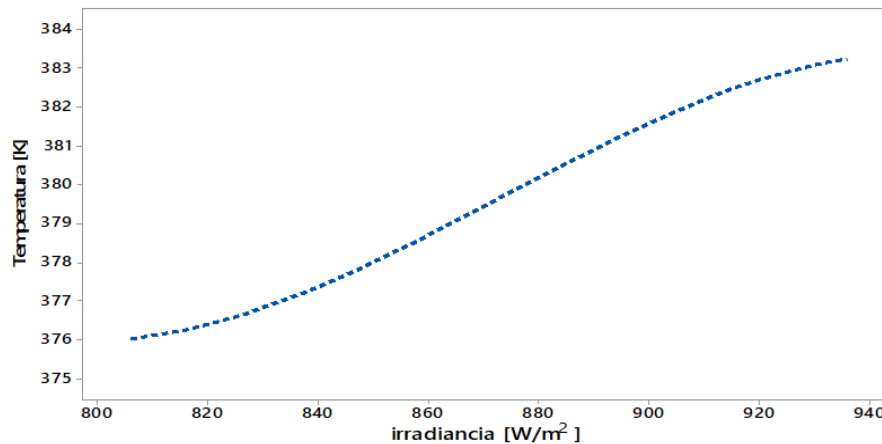
La obtención de la curva característica I-V, por medio del MTC permite establecer de una manera efectiva la capacidad de generación eléctrica que presenta la celda MHD, cuando se incrementa la temperatura de la solución electrolítica contenida en el panel solar. La figura 17 muestra el diagrama de interconexión entre la celda MHD, el módulo interfaz de adquisición de datos y la tarjeta National Instruments, con las cuales es posible visualizar los valores registrados de las variables en un ordenador en tiempo real.



**Figura 18. Diagrama de interconexión de la celda MHD con el módulo interfaz.**

### 3.1.1 Resultados Experimentales del generador MHD solar de baja concentración.

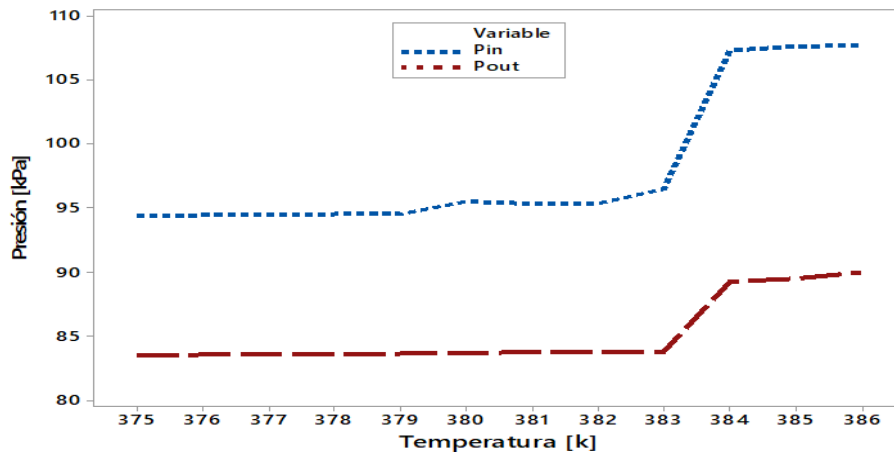
Los resultados experimentales obtenidos por medio del sistema de caracterización muestran que, la temperatura con la que opera la celda MHD solar se incrementa conforme aumenta la irradiancia solar recibida. El rango de operación con el cual trabaja el generador para estas condiciones, corresponde a temperaturas superiores a 373 K; debido a que en este rango de temperatura el fluido cambia de fase, favoreciendo su desplazamiento a través de la misma. La figura 18 muestra la relación temperatura - irradiancia, donde se observa que arriba de 800 [W/m<sup>2</sup>] se alcanza la temperatura deseada para mantener al fluido en condición de evaporación. En general la temperatura de operación de la celda MHD aumenta conforma aumenta la irradiancia; sin embargo, a partir de 383 K el sistema tiende a mantenerse en equilibrio térmico.



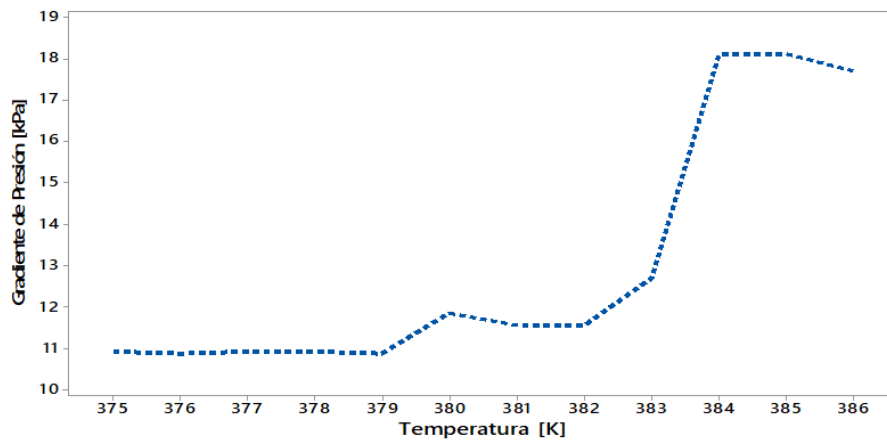
**Figura 19. Relación Irradiancia -Temperatura del generador MHD solar de baja concentración.**

Los datos de presión medidos por medio de los manómetros de la entrada y salida de la celda se muestran en la figura 19, en donde se observa una tendencia ascendente de las presiones con respecto al aumento de la temperatura. El gradiente de presión presente entre la entrada y salida de la celda MHD en promedio es de 13 KPa; no obstante, a temperaturas mayores de 383K el gradiente aumenta hasta alcanzar a un máximo de 18 KPa, como se

muestra en la figura 20. El crecimiento abrupto de ambas curvas a partir de 383 K se atribuye a que se alcanza la fase vapor de la solución electrolítica.



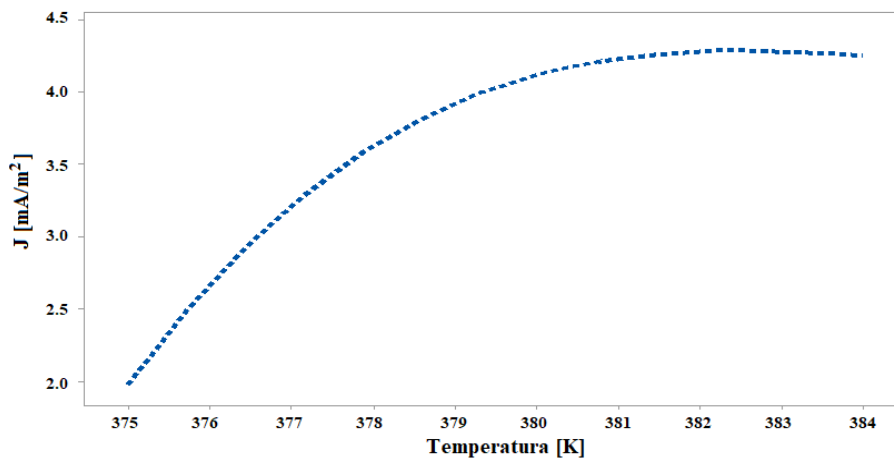
**Figura 20. Relación Presión -Temperatura del generador MHD solar de baja concentración.**



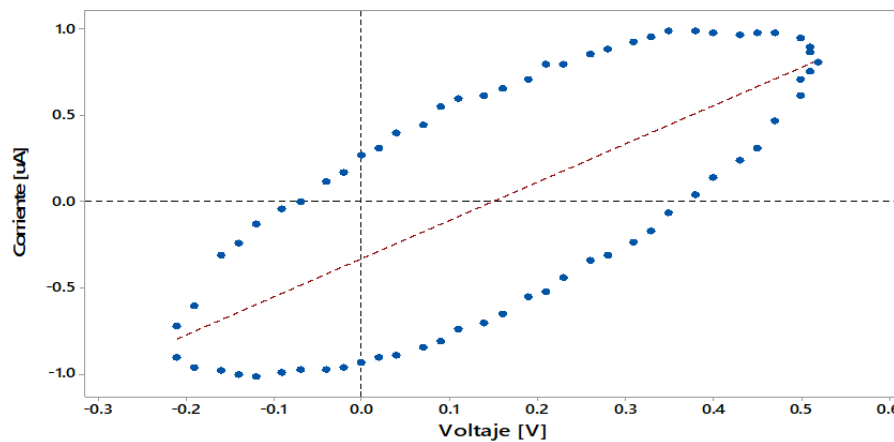
**Figura 21. Gradiente de presión del generador de baja concentración con respecto a la temperatura.**

La figura 21 muestra la relación experimental de la densidad de corriente generada por la celda MHD con respecto a la temperatura, para ello se consideró el area efectiva de los electrodos cilindricos de acero inoxidable; la cual resulto ser de  $2.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ . La gráfica presenta los valores máximos alcanzados conforme aumenta la temperatura; el valor máximo obtenido corresponde a  $4.30 \text{ mA/m}^2$  y se origina cuando el generador opera a temperaturas

arriba de 383 K. Posterior a esta temperatura no se observa ningún incremento de la densidad de corriente; de acuerdo a la literatura, este comportamiento puede ser atribuido a dos causas; la primera radica en haber obtenido la máxima cantidad de iones presentes en la solución electrolítica bajo estas condiciones de presión y temperatura, y la segunda causa consiste en la formación de una nube de carga espacial alrededor de los electrodos, motivo por el cual, aunque los iones sigan atravesando el canal interelectródico necesitan una fuerza más intensa que le permita a las particular cargadas vencer esa barrera y mantener su flujo de corriente [43].



**Figura 22. Relación de la densidad de corriente con respecto a la Temperatura del generador MHD solar de baja concentración.**



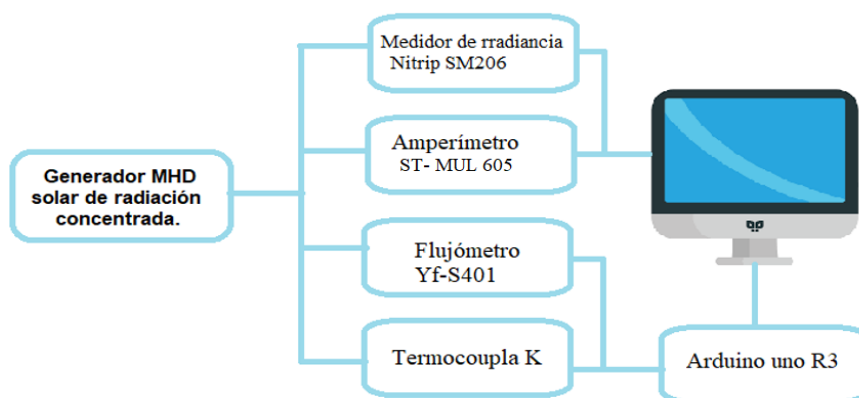
**Figura 23. Relación corriente – voltaje de la celda MHD a 383 K del generador MHD de baja concentración.**

La respuesta eléctrica I-V, de la celda MHD a una temperatura de 383 K se muestra en la figura 22. Esta gráfica corresponde a un comportamiento de histéresis desplazado del origen; la recta sobrepuesta a la gráfica establece la condición de generación de energía eléctrica y la impedancia resistiva interna. En esta condición el voltaje de circuito abierto es de 0.13 V y la corriente de corto circuito es de  $-0.47 \mu\text{A}$ ; mientras que la resistencia interna es de  $470 \text{ K}\Omega$ . Por otra parte, la curva de histéresis refleja la presencia de una capacitancia interna de la celda; cuyo valor es de  $0.70 \mu\text{F}$ .

### 3.2 Caracterización del generador MHD solar de radiación concentrada.

El generador MHD solar de radiación concentrada presenta la factibilidad de operar con diversas soluciones electrolíticas, así como, con dos celdas de distinto patrón geométrico.

La evaluación del comportamiento de éste generador; se realizó mediante la implementación de dispositivos de medición que permitieron cuantificar las variables de temperatura, velocidad, corriente e irradiancia relacionadas con el sistema. La irradiancia recibida por el generador MHD solar fue determinada a través del medidor digital Ntrip SM206. La temperatura de operación del sistema térmico solar se obtuvo mediante una Termocoupla tipo K colocado en el área focal junto al receptor. El medidor de flujo Yf-S401, permitió cuantificar la velocidad con la cual el fluido sale del sistema térmico solar e ingresa a la celda MHD. Mientras que, la corriente producida por el generador se cuantifico a través del amperímetro ST Mul 605.

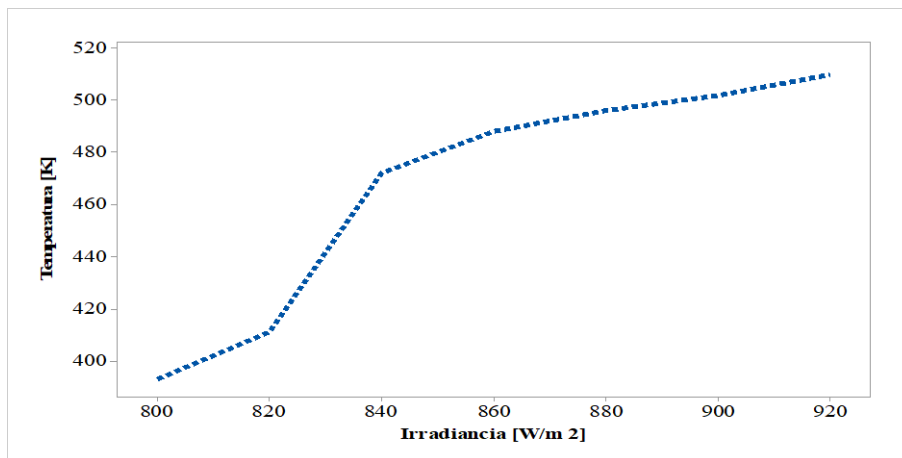


**Figura 24. Diagrama de caracterización del Generador MHD solar de radiación concentrada.**

La figura 24, muestra el diagrama de interconexión entre los dispositivos de medición y el generador MHD, donde se observa el uso de la tarjeta Arduino uno R3 como interfaz para obtener de forma gráfica los valores de temperatura y velocidad inmersos en el sistema.

### 3.2.1 Resultados Experimentales del generador MHD solar de radiación concentrada.

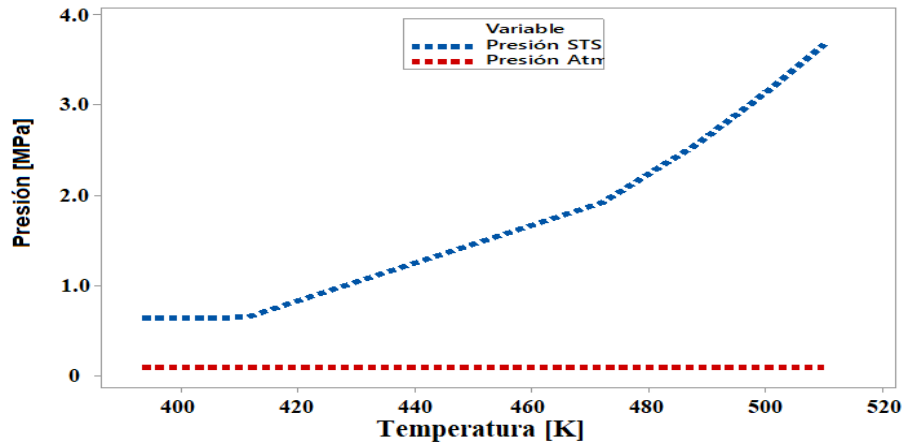
Los valores de presión y temperatura obtenidos por medio de los sensores de medición se observan en la figura 25, donde se distingue un comportamiento ascendente exponencial de la temperatura con respecto a la irradiancia. Cabe señalar, que el rango de temperatura con el cual operó el sistema solar térmico de este generador MHD corresponde a 373 – 500 K, Debido a que bajo estas condiciones fue posible realizar diversas mediciones en condiciones estables sin poner en riesgo al sistema.



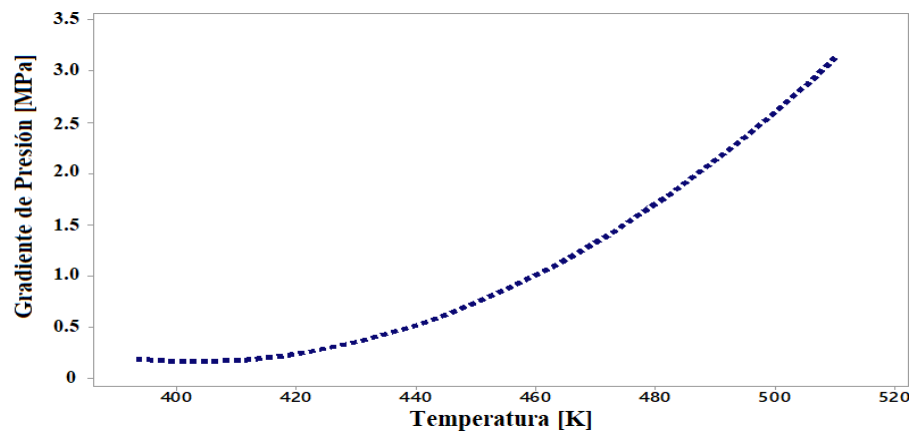
**Figura 25. Relación - Irradiancia - Temperatura del sistema térmico solar del generador MHD de radiación concentrada.**

Los valores de presión con los cuales operó el sistema solar térmico de radiación concentrada, son determinados mediante la relación presión – temperatura. Esta relación implica un incremento proporcional de la presión, cuando el fluido inmerso dentro del sistema aumenta su energía interna (Fig. 26). A una temperatura de 500K el sistema solar térmico alcanzó bajo una presión de 2.5 MPa, sin embargo, el fluido no ingresará con esos parámetros dentro de la celda, debido a todas las pérdidas de calor que presentan cuando se

encuentra fuera del receptor solar. La figura 27 muestra el gradiente de presión obtenido del sistema solar térmico con respecto a la presión atmosférica promedio (80 kPa). Esta relación es muy importante en el fenómeno MHD por favorecer el incremento de la velocidad del fluido de trabajo. Cabe señalar, que la velocidad máxima obtenida a 500 K corresponde a 1.40 m/s.



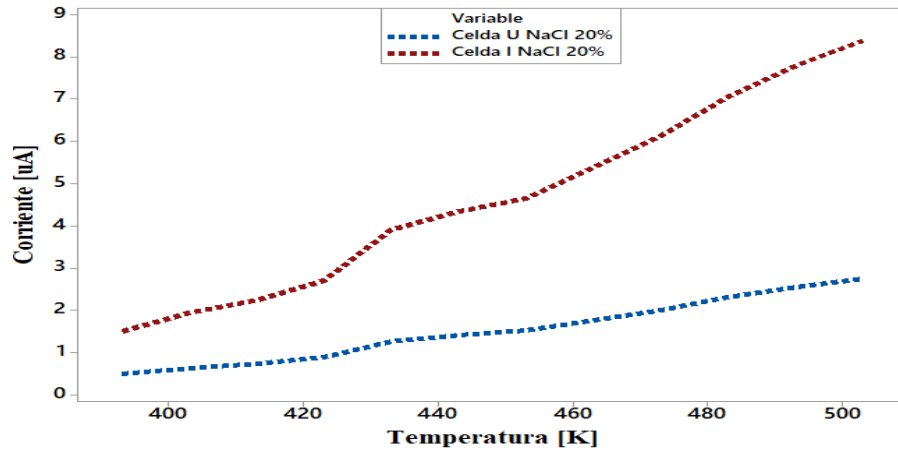
**Figura 26. Relación Presión – Temperatura del sistema térmico solar del generador MHD de radiación concentrada.**



**Figura 27. Gradiente de Presión del generador MHD solar de radiación concentrada con respecto a la Presión atmosférica.**

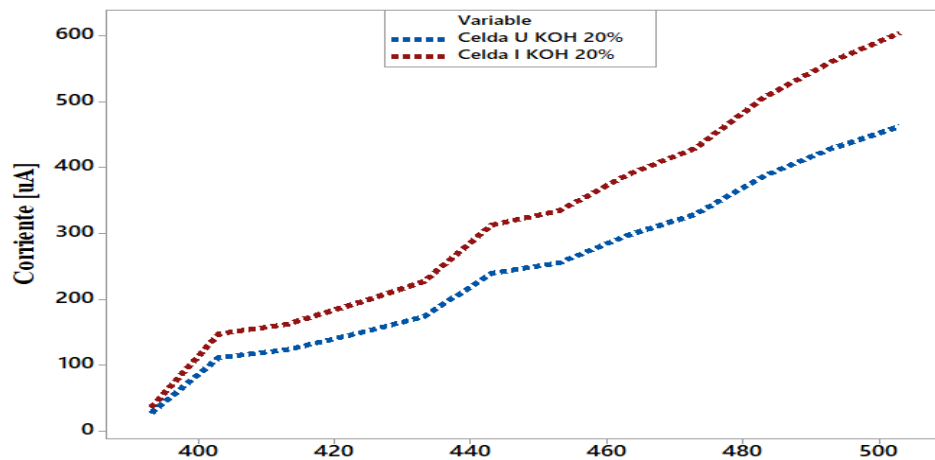
Como se mencionó en el capítulo anterior, el generador MHD presenta la factibilidad de operar con fluidos electrolíticos, así como con dos diferentes tipos de celdas. La figura 28 muestra los valores de corriente obtenidos para cada una de las celdas, cuando el fluido de trabajo del generador corresponde a una solución electrolítica de NaCl 20 % vol. En el gráfico

se observa una tendencia creciente, donde el valor de corriente máxima obtenida a 500 K corresponde a  $2.74 \mu\text{A}$  en la celda de canal curvo “U” y de  $8.4 \mu\text{A}$  en la celda de canal lineal “I”. La disminución de corriente generada en la celda tipo “U” se atribuye al cambio de dirección y de velocidad a la que se enfrenta la solución electrolítica al desplazarse por el canal inter electrodico.



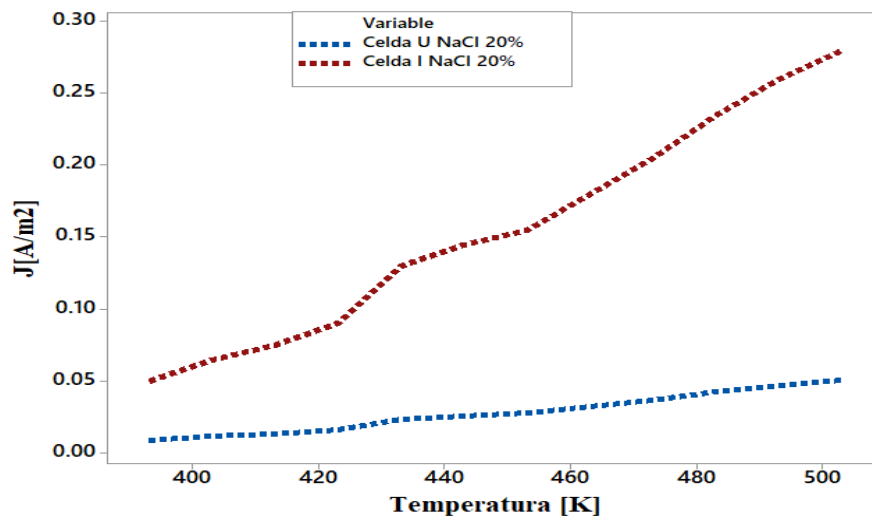
**Figura 28. Relación Corriente – Temperatura del Generador MHD solar de radiación concentrada operado con fluido con NaCl 20%.vol.**

La grafica expuesta en la figura 29, muestra los valores de corriente derivados de la solución electrolítica de KOH 20% vol. Se observa un incremento en dos órdenes de magnitud con respecto al NaCl. Este fenómeno se debe a la diferencia de conductividad entre las dos soluciones; siendo la solución de KOH la más conductiva.

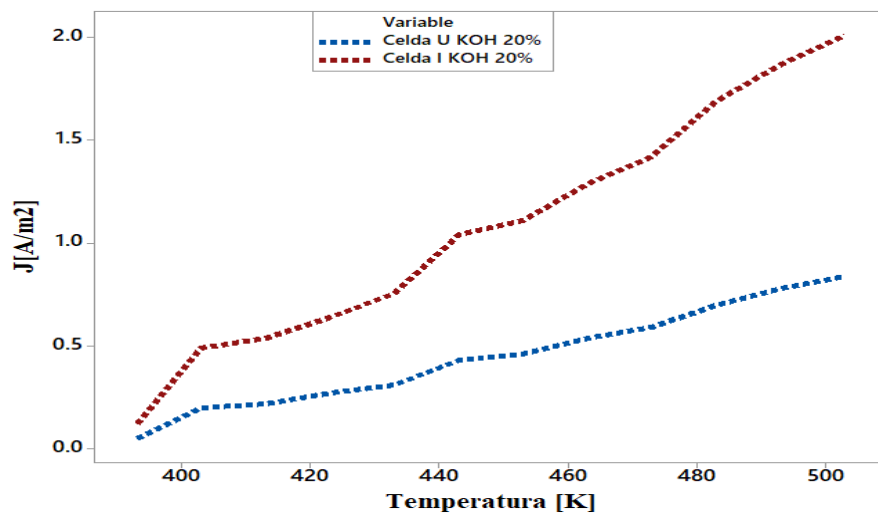


**Figura 29. Relación Corriente – Temperatura del Generador MHD solar de radiación concentrada operado con fluido con KOH 20%.vol.**

La densidad de corriente eléctrica es una magnitud que relaciona a las unidades de corriente eléctrica por unidad de superficie, es decir, intensidad por unidad de área. Las figuras 30 y 31 muestran los valores de densidad para cada una de las celdas con respecto a las diferentes soluciones electrolíticas. Para esto se debe considerar la diferencia geométrica entre las dos celdas; la celda de recorrido lineal tipo “I” cuenta con un área superficial electrodica de  $3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ , mientras que la celda de recorrido curvo tipo “U” presenta un área de  $5.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$ .



**Figura 30. Relación Densidad de corriente – Temperatura del Generador MHD solar de radiación concentrada operado con fluido con NaCl 20%.vol.**



**Figura 31. Relación Densidad de corriente – Temperatura del Generador MHD solar de radiación concentrada operado con fluido con KOH 20%.vol.**

## Capítulo 4

### Modelado de celdas MHD con COMSOL Multiphysics®.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del modelado de los generadores MHD solares. Cabe señalar, que el modelado se centró específicamente en las celdas MHD, ya que en estos elementos es donde se lleva a cabo el proceso de conversión directa de energía. Mediante el software Comsol Multiphysics®, fue posible simular el comportamiento interno de las celdas, con lo cual se obtuvo la densidad de corriente generada por cada una de ellas. Para ello se establecieron como condiciones de frontera los valores experimentales obtenidos de presión, temperatura y campo magnético.

#### 4.1 Modelo Teórico de la densidad de corriente de una celda MHD.

El análisis del comportamiento eléctrico de la celda MHD se realizó mediante una aproximación de la función de densidad de corriente. Esta función satisface la ecuación de continuidad y es válida en dinámica de fluidos y teoría electromagnética [44]. Las celdas MHD propuestas en este trabajo son celdas lineales de tipo Faraday, en la que los electrodos se colocan en paralelo entre ellos y perpendiculares al campo magnético.

Un conjunto de ecuaciones de dinámica de fluidos y ecuaciones de Maxwell relacionan la densidad de masa del fluido conductor ( $\rho$ ), la velocidad del fluido ( $\mathbf{u}$ ), la presión ( $P$ ), la densidad de corriente eléctrica ( $\mathbf{J}$ ) y el campo magnético ( $\mathbf{B}$ ) presente en el fenómeno MHD [45]. La ecuación 35 describe a la continuidad en masa y establece que la materia no se crea ni se destruye.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad Eq. 35$$

En el fenómeno MHD, los iones y electrones se ven obligados a actuar al unísono debido a la acción de un campo magnético. Esto permite que el plasma se considere como un fluido simple cuyas condiciones de difusión son nulas [46]. El comportamiento dinámico del

fluido se describe mediante la ecuación de Navier-Stokes (Ec. 36) y representa el movimiento de un elemento del fluido; cuya solución determina la velocidad y no una posición de la solución electrolítica.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla P + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad \text{Eq. 36}$$

La Ley de Ohm está representada por la ecuación. 37, donde  $\sigma$  es la conductividad eléctrica y  $\mathbf{E}'$  es el campo eléctrico experimentado por el elemento fluido en su marco de referencia.

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}' \quad \text{Eq. 37}$$

De esta forma, cuando el fluido se mueve a una velocidad  $u$ , en dirección perpendicular al campo magnético externo, se produce la Fuerza de Lorentz (Ec. 38) donde  $\mathbf{E}$  es el campo eléctrico generado debido a  $\mathbf{B}$ .

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}) \quad \text{Eq. 38}$$

Lo anterior permite que la Ley de Ohm se reescriba conforme a la ecuación 39 donde se aplicó la transformación de Lorentz ( $\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}$ ).

$$\mathbf{J} = \sigma[\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}] \quad \text{Eq. 39}$$

La densidad de corriente eléctrica también se puede expresar a través del campo magnético  $\mathbf{B}$ . Para ello, se consideraron las siguientes ecuaciones de Maxwell: la Ley de Ampere (Ec. 40) que relaciona el campo magnético estático con la misma causa que lo produce. En esta ecuación la variación de un campo eléctrico con respecto al tiempo se suma a la corriente de desplazamiento. La inexistencia de monopolos magnéticos representados en la ecuación 41 y la Ley de Faraday presentada en la ecuación 42.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \text{Eq. 40}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{Eq. 41}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{Eq. 42}$$

De acuerdo con lo anterior, la densidad de corriente eléctrica puede representarse mediante la ecuación 43. Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad eléctrica y  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética.

$$\mathbf{J} = 1/\mu_0 \nabla \times \mathbf{B} - \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad \text{Eq. 43}$$

Estas ecuaciones son resueltas simultáneamente mediante el método de elementos finitos con el software COMSOL Multiphysics®. De esta forma se obtuvo la densidad de corriente eléctrica generada por la celda MHD, así como, los valores de velocidad del fluido, de campo magnético y de densidad de corriente representadas desde su interior.

#### 4.2 Aplicación del software COMSOL Multiphysics®.

El Software Comsol Multiphysics@ es una poderosa herramienta interactiva, que permite simular diferentes fenómenos físicos y químicos bajo el uso de diversas paqueterías. A través del análisis del elemento finito, en conjunto con un mallado adaptativo y un control de errores numéricos, Comsol da solución a una amplia gama de ecuaciones [47]. El software provee un número de modos de aplicación que consiste en plantillas predefinidas e interfaces de usuario ya configuradas con ecuaciones y variables específicas para cada área [48, 49]. El modelado de la celda MHD se realizó a través de tres módulos: Magnetic Fields, Fluid Flow y Current Distribution, los cuales se describen a continuación.

##### 4.2.1 Campo Magnético (Magnetic Field).

El primer módulo permitió establecer el campo magnético determinado por los imanes de neodimio. Este es definido a través de la relación de la excitación magnética y la ley de Gauss, como se muestra en las ecuaciones 44 y 45. Donde  $H$  corresponde a la

intensidad de campo magnético,  $V_m$  al potencial escalar magnético y  $\mathbf{B}$  a la densidad del flujo magnético.

$$\mathbf{H} = -\nabla V_m \quad Ec. 44$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad Ec. 45$$

La conservación de flujo magnético estacionario esta dado por las siguientes relaciones matemáticas. Donde  $\mu_r$  hace referencia a la permeabilidad magnética relativa. En física se le denomina permeabilidad magnética a la capacidad que tienen los materiales, medios o sustancias de afectar y ser afectados por los campos magnéticos. Así como, la capacidad de convertirse en fuentes de éstos, es decir, capacidad para crearlos sin la necesidad de corrientes externas.

$$\mathbf{H} = -\nabla V_m \quad Ec. 46$$

$$\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \mathbf{H}) = 0 \quad Ec. 47$$

#### 4.2.2 Fluidos (Fluid Flow).

Con el segundo módulo, fue posible representar el fluido electrolítico. Para efectos de simulación, la solución electrolítica se definió como un flujo laminar, y se consideró su concentración, viscosidad y conductividad. Este módulo se vale de la ecuación de conservación de la masa, las ecuaciones de equilibrio del momento y la ecuación Navier Stokes.

El módulo define al flujo electrolítico como un fluido laminar e incompresible, que se rige por las siguientes ecuaciones.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot (-P + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)) + \mathbf{F} \quad Ec. 48$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad Eq. 50$$

Las condiciones de frontera iniciales para simular el fluido electrolítico corresponden a los valores de presión, temperatura y velocidad del fluido, las cuales fueron determinadas a partir de los resultados experimentales obtenidos por la interfaz de adquisición de datos. Posteriormente, el fluido de trabajo fue clasificado dentro de una serie de condiciones propias del medio en el que se desenvuelve, como se muestra a continuación.

**Tabla 5. Condiciones predeterminadas por el software Comsol Multiphysics® para el análisis de fluidos.**

Condición	Descripción	Simbología
<b>Fluid Properties</b>	Permite elegir entre un fluido de trabajo laminar ó un fluido turbulento.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Laminar</li> </ul> $Re = \frac{\rho UL}{\eta} < 2000$
<b>Slip Wall</b>	Esta condición asume que el fluido es capaz de desplazarse por las paredes del elemento que contiene el fluido.	$\mathbf{k} - (\mathbf{k} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = 0$
<b>Inlet</b>	Se refiere a los parámetros con los cuales el fluido ingresa a la celda fluido.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Posición (<math>\mathbf{u}=\mathbf{n}\cdot\mathbf{u}_0</math>)</li> <li>Presión (<math>p=p_0</math>)</li> </ul>
<b>Gravity</b>	Esta condición permite incluir la fuerza de gravedad en el fluido.	$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} =$ $0 \nabla \cdot (-P + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \mathbf{F} + \rho \mathbf{g}$

#### 4.2.3 Distribución de corriente (Current Distribution).

Mediante el tercer módulo fue posible relacionar las condiciones de los dos módulos anteriores y simular la densidad de corriente generada por la celda MHD. La interfaz de distribución de corriente define el transporte de iones cargados en un electrolito de composición uniforme, así como la conducción de corriente en electrodos utilizando la ley de Ohm en combinación con un equilibrio de carga.

Para su implementación se debe establecer como condiciones de frontera el valor de la conductividad de los electrodos, delimitar el área de contacto de los electrodos con el

fluido, así como las propiedades físicas de los electrodos. La tabla 6 muestra condiciones predeterminadas en este módulo.

**Tabla 6. Condiciones predeterminadas por el software Comsol Multiphysics® para el análisis de distribución de corriente.**

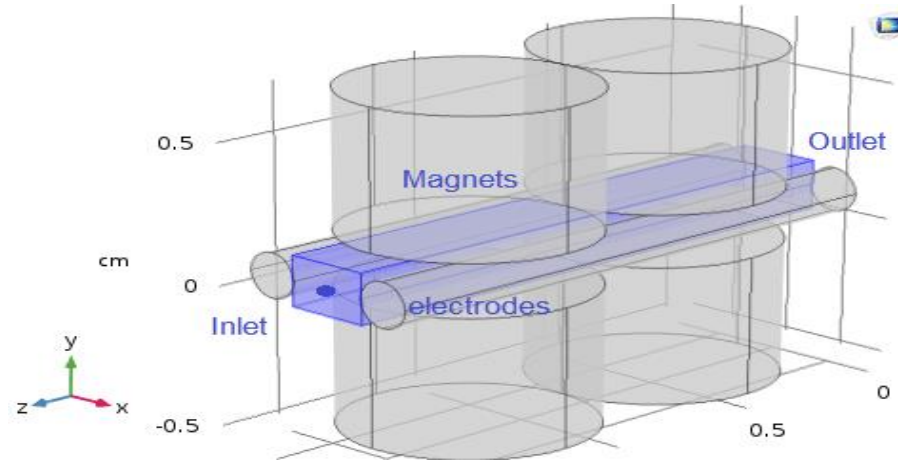
Condición	Descripción	Simbología
<b>Equation</b>	Esta condición muestra las ecuaciones bajo las cuales se llevará a cabo la simulación.	$\mathbf{J} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B} - \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ $\int_{\partial\Omega} \mathbf{i}_t \cdot \mathbf{n} ds = I_{electrodos}$
<b>Electrolite</b>	A través de este comando se establecen las condiciones de frontera del fluido de trabajo.	Conductividad ( $\sigma$ ) Densidad ( $\rho_e$ ) Trayectoria ( $\mathbf{n}_e$ )
<b>Electrodes</b>	Permite establecer los parámetros físicos de los electrodos aplicados.	Conductividad ( $\sigma$ )
<b>Electrode Surface</b>	Esta condición consiste en delimitar el área activa de los electrodos.	Área electródica ( $l$ )

#### 4.3 Modelado de la celda del generador MHD solar de baja concentración.

Como se mencionó previamente el generador MHD solar de baja concentración se compone de dos elementos, el sistema térmico solar y la celda MHD. Sin embargo, para efectos de simulación se prestó especial atención al modelado de la celda MHD. El estudio realizado a la celda, consideró como condiciones de frontera los valores de presión, velocidad y temperatura obtenidos de forma experimental en cada uno de los generadores.

Para propósitos de simulación se empleó el software COMSOL Multiphysics®, y a través de sus herramientas geométricas se dibujaron cada uno de los elementos que conforman la celda MHD. En la figura 32 se muestran la configuración interna de la celda;

sobre el plano  $z$  se trazan cuatro imanes cilíndricos de neodimio de 0.8 mm de diámetro, en medio de ellos se encuentra un canal interelectródico de 2 mm de ancho y 18 mm de largo representado por un prisma rectangular, en el cual, en sus extremos paralelos al eje  $y$  se trazaron dos cilindros horizontales de 4 mm de diámetro que corresponden a los electrodos de acero inoxidable.



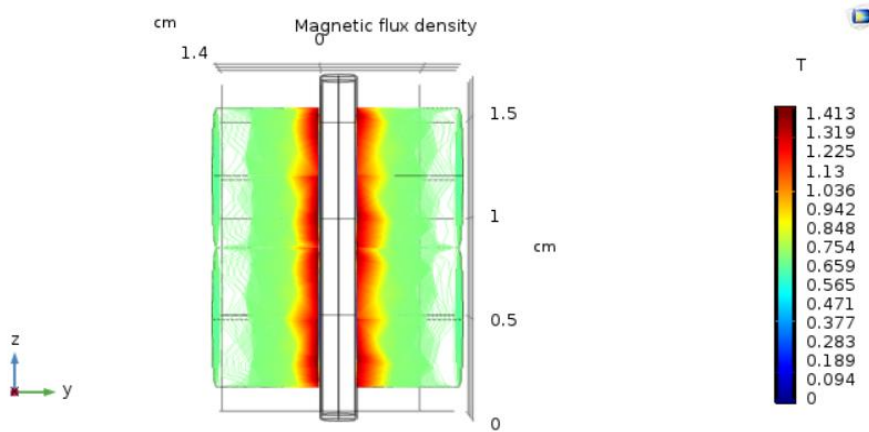
**Figura 32. Geometría 3D del interior de la celda MHD del generador MHD solar de baja concentración.**

Posteriormente se consideraron los valores experimentales obtenidos a 383 K como se muestra en la tabla 1. Esta temperatura es relevante, debido a que en esta condición el fluido se mantiene en fase vapor y se obtuvo el valor de corriente máxima generada por la celda MHD. Estos parámetros son de suma importancia en el proceso de simulación, ya que son implementados como condiciones de frontera para llevar a cabo el modelado de la celda MHD solar.

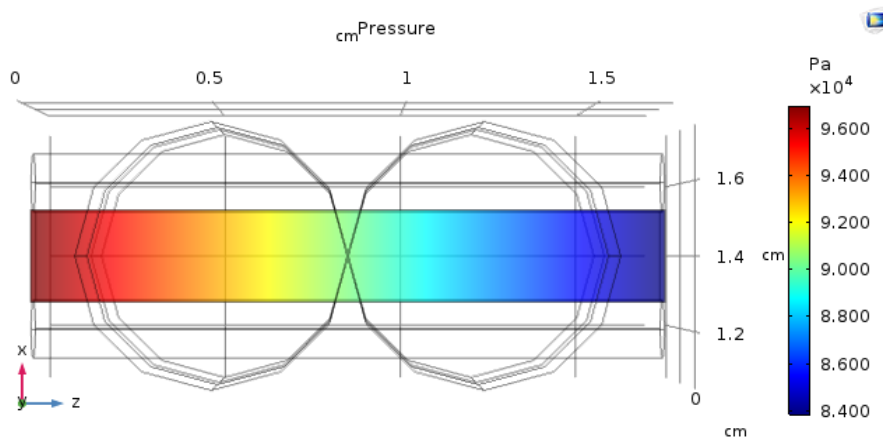
**Tabla 7 Resultados experimentales de la celda MHD a 383 K.**

Variable	Magnitud	Descripción
$P_i$	96.0 kPa	Presión en la entrada de la celda
$P_o$	84.0 kPa	Presión en la salida de la celda
$T$	383 K	Temperatura en la entrada de la celda
$B$	1.20 T	Densidad de flujo magnético
$v$	0.970 m/s	Velocidad del fluido

El software COMSOL Multiphysics® permite simular el comportamiento de la celda MHD desde su interior y la figura 33 muestra el resultado de la densidad de flujo magnético simulado por los cuatro imanes de neodimio. Se observa que, la densidad de flujo magnético se intensifica en las paredes del canal interelectrónico donde se posicional los electrodos colectores de iones; el valor promedio corresponde a 1.2 T, magnitud equiparable con la hoja de datos de los imanes empleados.



**Figura 33. Campo magnético de la celda MHD del generador MHD de baja concentración.**

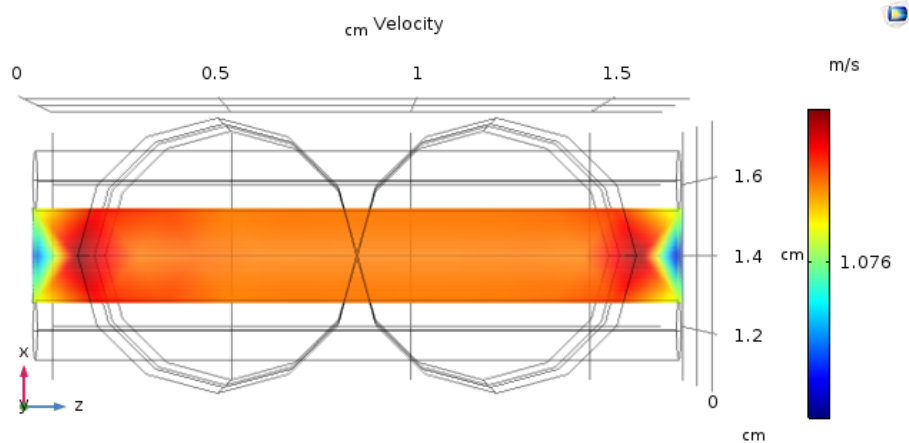


**Figura 34. Magnitudes de presión de la celda MHD del generador MHD solar de baja concentración.**

La figura 34 muestra los resultados obtenidos por el software para las magnitudes de presión de la celda MHD a la temperatura especificada de 383 K; donde se observa una diferencia entre los valores de presión en la entrada y salida de la misma. El extremo

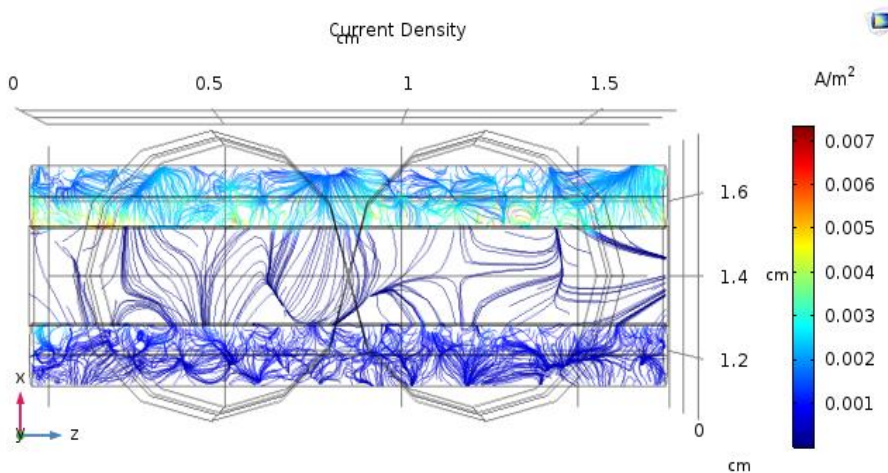
izquierdo muestra una presión correspondiente a 96.0 KPa y en el extremo derecho se muestra un valor de 84.0 KPa; cabe señalar que dichos valores pertenecen a las presiones obtenidas de forma experimental.

La velocidad con la cual el fluido ingresa a la celda MHD medida de forma experimental por medio del flujómetro Omega FT-042-07-GI-VN y corresponde a 0.970 m/s. Sin embargo, debido al efecto Venturi originado por la geometría de la celda MHD en su interior, el resultado del modelado presenta un incremento con respecto a la velocidad experimental. Este valor corresponde a una velocidad promedio de 1.076 m/s como se muestra en la figura 35, y es consecuencia de la diferencia de diámetros entre la tubería del panel y del canal interelectródico de la celda MHD por la cual se desplaza el fluido.



**Figura 35. Velocidad del fluido dentro de la celda MHD del generador solar de baja concentración.**

La figura 36 muestra el comportamiento del fluido electrolítico de NaCl 20% dentro de la celda MHD; se observa que, conforme el fluido atraviesa el canal interelectródico, éste presenta una fuerte interacción con las paredes de los electrodos. Las líneas que cruzan el canal interelectródico muestran dicha interacción. Por otra parte, la escala que se encuentra del lado derecho muestra la densidad de corriente generada en los electrodos; cuyo valor promedio corresponde a 4.30 mA/m<sup>2</sup>.



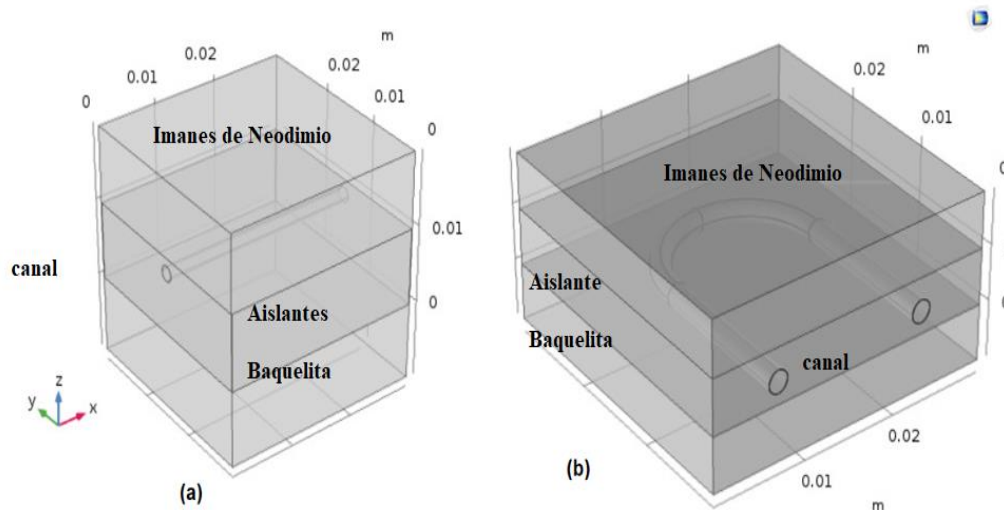
**Figura 36. Densidad de corriente de la celda del generador MHD solar de baja concentración.**

Tomando en cuenta la similitud que existe entre la densidad de corriente experimental y la corriente teórica obtenida por simulación, se deduce que el modelo propuesto para la celda MHD mediante el software Comsol Multiphysics® es correcto. Por lo tanto, este modelo es viable para hacer estudios futuros de variación de parámetros, como son: la temperatura, presión y distancia interelectródica; e inclusive el uso de otro tipo de electrolitos y electrodos de diferentes materiales. La trascendencia de estos estudios radica en trabajar en la mejora del rendimiento de un Generador MHD que va de la mano con el uso de las energías renovables, pues en este sistema se implementó la energía solar como fuente de calentamiento.

#### 4.4 Modelado de la celda del generador MHD solar de radiación concentradaa.

Para modelar el comportamiento de las celdas del generador MHD solar de radiación concentrada, fue necesario esquematizar a través del módulo de geometría cada uno de los elementos que las conforman. La implementación de dominios y superficies, permitieron delimitar a cada material que compone a la celda, la figura 37 muestra la geometría de las celdas MHD lineal y curva. Los bloques superiores e inferiores corresponden a los imanes de neodimio, entre ellos se localiza el bloque de trabajo donde se limita la placa de baquelita

y los elementos aislantes (resina epóxica y 100  $\mu\text{m}$  de  $\text{AL}_2\text{O}_3$ ). Los recorridos en forma de túnel corresponden al canal electródico formado para cada celda.



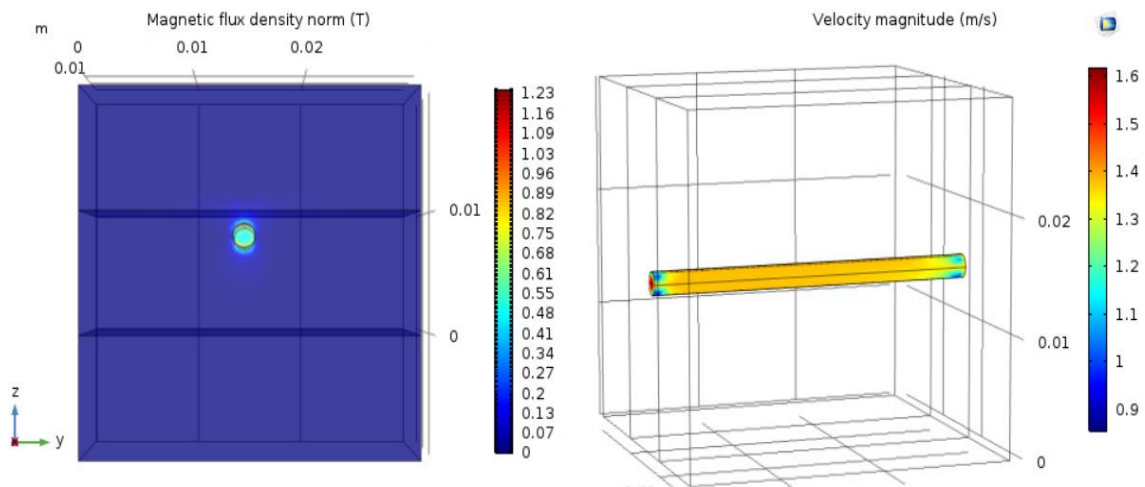
**Figura 37. Geometría 3D de las celdas MHD del generador MHD solar de radiación concentrada.**

Para continuar con la simulación fue necesario establecer las condiciones de frontera; la tabla 8 muestra los valores de campo magnético, velocidad, y temperatura obtenidos de forma experimental. Como se mencionó en el capítulo anterior los valores de presión y temperatura registrados en el sistema solar térmico, distan de ser los valores reales con los cuales el fluido ingrese la celda MHD. Por tal motivo, fue considerado el valor de la presión atmosférica como la presión de salida del sistema, con el propósito de conocer el valor de Temperatura real con la el fluido ingresa a la celda MHD.

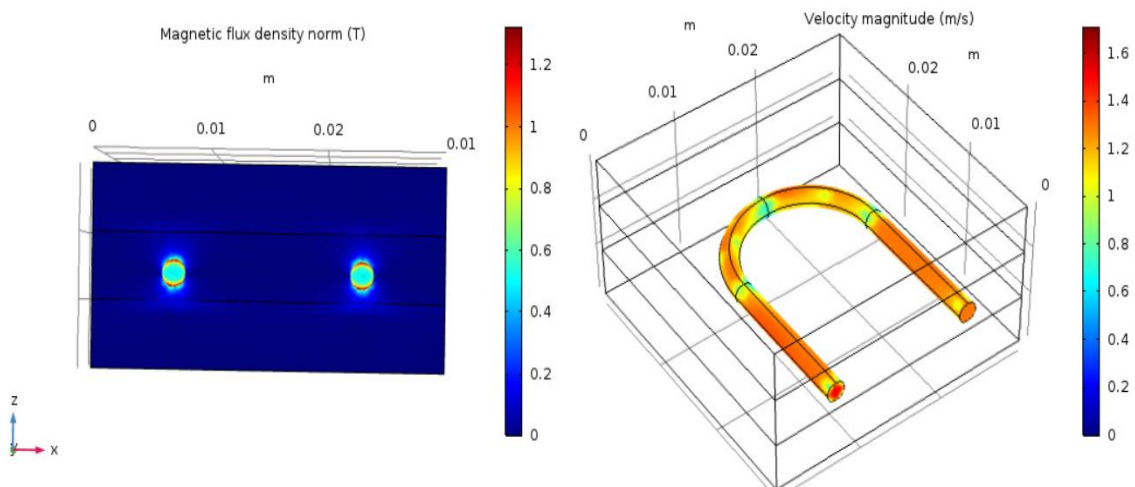
**Tabla 8. Resultados experimentales obtenidos del generador MHD solar de radiación concentrada a 500K.**

Variable	Magnitud	Descripción
$B$	1.2 T	Densidad de flujo magnético
$V$	1.4 m/s	Velocidad del fluido
$P_f$	80 kPa	Presión atmosférica promedio
$T$	500K	Temperatura del sistema solar térmico

La figura 38, representa los parámetros de operación de la celda MHD de recorrido lineal. De lado izquierdo se observa al campo magnético generado por los imanes de neodimio, donde el valor máximo corresponde a 1.23T. El círculo central de color claro representa al canal inter electrodico, en cuyas paredes resalta la fuerza de atracción producidas por el campo. De lado derecho, se muestra la velocidad a la cual el fluido se desplaza a través de la celda MHD y corresponde a 1.35 m/s.



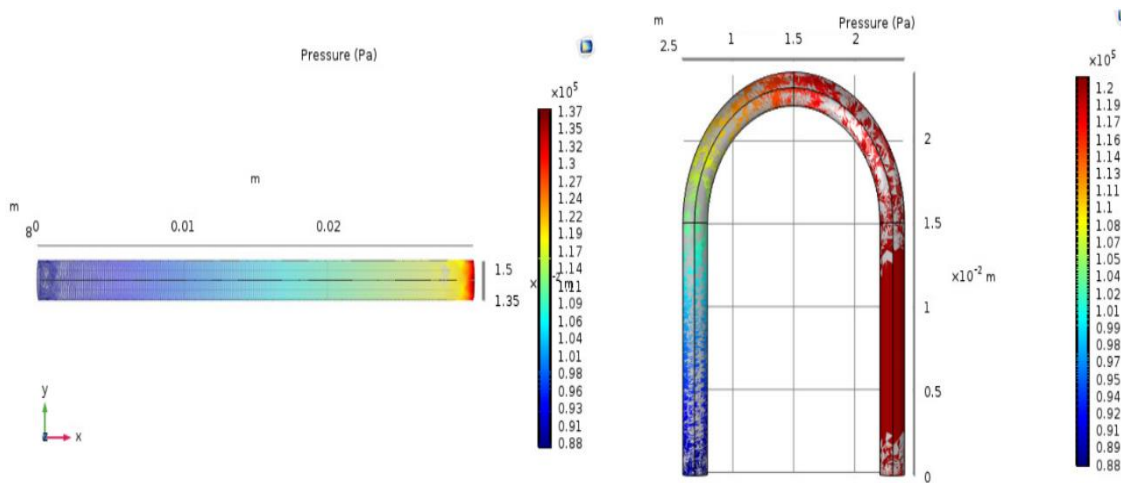
**Figura 38. Parámetros de operación de la celda MHD lineal tipo “I”. a) Densidad de flujo magnético y b) Velocidad de desplazamiento del fluido de trabajo.**



**Figura 39. Parámetros de operación de la celda MHD tipo “U”. a) Densidad de flujo magnético y b) Velocidad de desplazamiento del fluido de trabajo.**

Los resultados obtenidos mediante simulación para la celda con recorrido curvo se muestran en la figura 39. De lado izquierdo se muestra la fuerza del campo magnético (1.23 T) producido por los imanes de neodimio en relación con los electrodos; los dos círculos paralelos ubicados en el centro de la celda, corresponden a la entrada y salida del canal interelectródico. La imagen de lado derecho, muestra la velocidad con la cual el fluido se desplaza dentro de la celda, cuyo valor varía de acuerdo a la posición. En los puntos donde se produce un cambio de la trayectoria del fluido la velocidad disminuye hasta 0.09 m/s, dicho efecto se verá reflejado en la baja generación de corriente eléctrica.

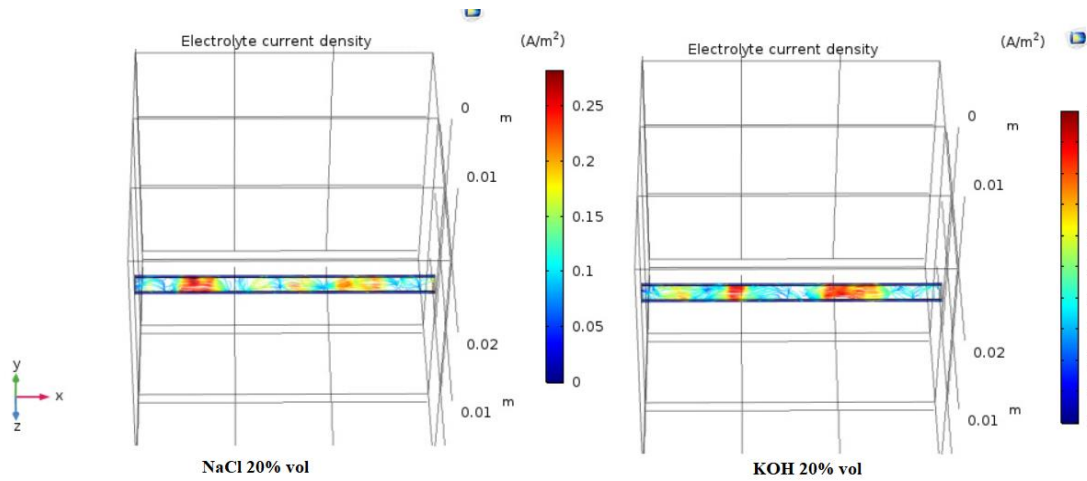
El comportamiento de la presión dentro de las celdas MHD se muestra en la figura 40. Se observa que para la celda de recorrido lineal el fluido de trabajo ingresa a una presión de 0.13 MPa, esta presión corresponde a una temperatura de 381 K. Por otra parte, la presión de entrada en la celda de recorrido curvo es ligeramente menor (0.12MPa), cuyo valor de temperatura corresponde a 375 K. A partir de estos los resultados, es posible comprobar que en la celda de recorrido curvo el fluido se desplaza con dificultad, y pierde energía cinética justo a la mitad del recorrido cuando cambia su trayectoria de desplazamiento.



**Figura 40. Comportamiento de la Presión dentro de las celdas del generador MHD solar de radiación concentrada.**

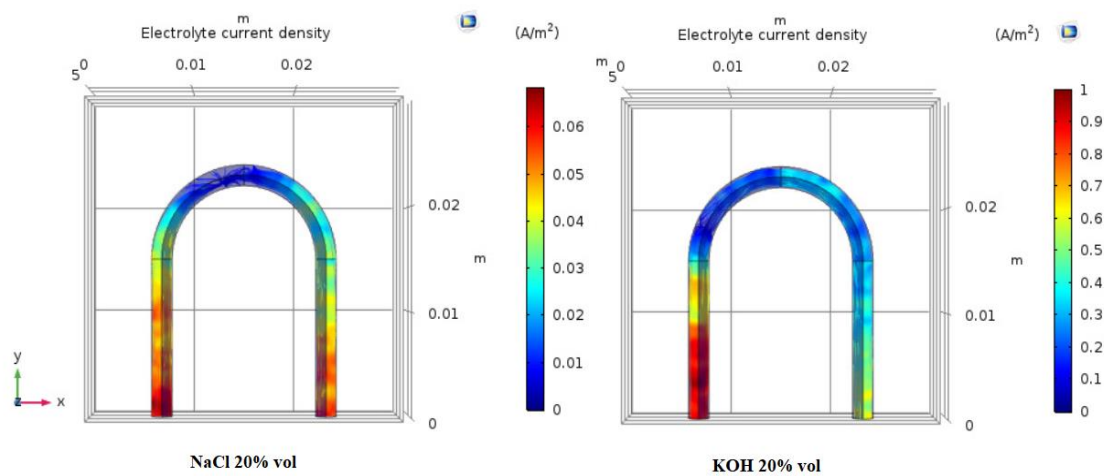
Los resultados de densidad de corriente generada por la celda de recorrido lineal se muestran en la figura 41. Donde se observa que la solución electrolítica de KOH presenta un

mejor resultado con respecto a la solución de NaCl. Esto se debe a que la solución de KOH tiende a ser más conductiva, de acuerdo con la literatura, en condiciones optimas la conductividad de la solución de KOH puede alcanzar una conductividad de hasta  $0.6 \text{ /m}^2$  [ $\text{S/m}^2$ ].



**Figura 41 Densidad de corriente máxima generada por la celda MHD de recorrido lineal.**

La figura 42, muestra los resultados de la densidad de corriente producida por las celdas de recorrido curvo, donde se observa su bajo rendimiento con respecto a las celdas lineales. Esta tendencia prevalece tanto en los resultados experimentales como en los simulados, por lo que se descarta este tipo de geometría en celdas MHD planas.



**Figura 42. Densidad de corriente máxima generada por la celda MHD de recorrido curvo.**

La tabla 9 muestra una comparación de los resultados experimentales con respecto a los resultados obtenidos mediante simulación de las celdas MHD. Cabe señalar que la diferencia principal entre unos y otros, radica en que los resultados experimentales son medidos afuera de la celda y los datos simulados muestran el comportamiento desde el interior de la celda. Con respecto a la velocidad del fluido, los resultados simulados son ligeramente menores en las celdas de canal lineal, en comparación con las celdas de canal curvo. Este fenómeno es atribuido al cambio de trayectoria que enfrenta el fluido debido a la geometría curva del canal. Por otra parte, la densidad de corriente simulada es levemente mayor a la densidad real, es preciso recalcar que los errores experimentales son ineludibles y dependen básicamente del procedimiento elegido y la tecnología disponible para realizar la medición.

**Tabla 9. Comparación de los resultados simulados con respecto a los experimentales de las celdas del generador MHD solar de radiación concentrada.**

<b>Celda</b>	<b>Electrolito (20% vol.)</b>	<b>Velocidad experimental</b>	<b>Velocidad Promedio (Comsol ®)</b>	<b>Densidad de corriente experimental</b>	<b>Densidad de corriente (Comsol ®)</b>
I	NaCl	1.40 m/s	1.35 m/s	0.23 A/m <sup>2</sup>	0.25 A/m <sup>2</sup>
I	KOH	1.40 m/s	1.35 m/s	1.80 A/m <sup>2</sup>	2.00 A/m <sup>2</sup>
U	NaCl	1.40 m/s	1.05 m/s	0.04 A/m <sup>2</sup>	0.06 A/m <sup>2</sup>
U	KOH	1.40 m/s	1.05m/s	0.93 A/m <sup>2</sup>	1.00 A/m <sup>2</sup>

La tabla 10 muestra los valores de Presión – Temperatura medidos de forma experimental en el sistema térmico solar, con respecto a la celda MHD. Donde se observa que los primeros valores son significativamente mayores a los valores registrados desde interior de la celda. Cabe subrayar que el sistema térmico solar es quien recibe directamente la radiación solar concentrada, la celda MHD en cambio solo recibe al fluido de trabajo con alta energía cinética.

**Tabla 10. Comparación de los valores de Presión y Temperatura del Sistema solar térmico con respecto a los valores simulados dentro de la celda del generador MHD de radiación concentrada.**

<b>Celda</b>	<b>Electrolito (20% vol.)</b>	<b>Temperatura Sistema Solar Térmico</b>	<b>Temperatura (Comsol ®)</b>	<b>Presión Sistema Solar Térmico</b>	<b>Presión (Comsol ®)</b>
I	NaCl	500 K	381 K	2.5 MPa	0.13 MPa
I	KOH	500 K	381 K	2.5 MPa	0.13 MPa
U	NaCl	500 K	375 K	2.5 MPa	0.12 MPa
U	KOH	500 K	375 K	2.5 MPa	0.12 MPa

## Capítulo 5

### Conclusiones

Al término del presente trabajo de tesis, en el cual se planteó como objetivo primario el desarrollo de un generador MHD que opere con radiación solar concentrada, se concluye lo siguiente:

Durante la realización de este proyecto, se desarrollaron dos generadores MHD que aprovechan la energía solar como fuente de calentamiento. El primero es un generador MHD solar de baja concentración y el segundo es un generador MHD que trabaja con radiación solar concentrada.

El fluido de trabajo empleado en ambos generadores solares, corresponde a soluciones electrolíticas de NaCl y KOH al 20% vol. Esto se debe a que tanto el diseño, como los materiales empleados en la fabricación de los generadores MHD, son factibles a trabajar con este tipo de fluidos.

Se desarrollaron nuevas técnicas de fabricación de celdas MHD. Resultado de lo anterior es la fabricación de celdas MHD sobre placas de Baquelita. Las cuales fueron maquinadas a través de una perforadora CNC para generar el canal electródico, recubiertas con 100  $\mu\text{m}$  de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mediante ALD (Atomic, Layer Deposition) para evitar su oxidación y encapsuladas con resina epóxica para brindarle resistencia en su manejo.

Para parametrizar las variables con las cuales operaron los generadores MHD, se implementaron sistemas de caracterización a través de sensores de irradiancia, presión, y temperatura. Así como el desarrollo de un módulo interfaz de adquisición de datos con el cual fue posible cuantificar la corriente eléctrica.

Mediante el uso del software Comsol Multiphysics® fue posible simular el comportamiento interno de las celdas MHD, así como la densidad de corriente producida por las mismas. Para ello se implementaron como condiciones de frontera los valores de presión, temperatura y velocidad del fluido obtenidas de forma experimental. Cabe señalar, que el modelado se realizó únicamente a las celdas MHD, ya que es en esta etapa del generador MHD solar donde se lleva a cabo la conversión directa de energía; a través de la interacción de las partículas ionizada con los electrodos y el campo magnético.

Se comprobó de forma experimental y por simulación que la solución electrolítica de KOH 20 % vol., presenta un mejor rendimiento en el proceso de generación de corriente eléctrica dentro del generador MHD solar de radiación concentrada. De acuerdo a las simulaciones realizadas, la celda MHD de cavidad lineal alcanza una densidad de corriente máxima de 1.8 A/m<sup>2</sup> cuando opera a una temperatura de 381K y a una presión de 0.81 MPa.

La comparación de los resultados experimentales de la densidad de corriente con respecto a los resultados obtenidos por simulación del generador MHD solar de baja concentración. Muestra que el modelo se relaciona satisfactoriamente; en particular para una temperatura de operación de 383K, con la cual se obtiene un gradiente de presión 13 kPa y una densidad de corriente máxima de 4.30 mA/m<sup>2</sup>.

En análisis de los resultados experimentales con respecto a los resultados obtenidos por simulación, establece que el generador MHD solar de radiación concentrada trabaja con mayor eficiencia en comparación con el generador MHD solar de baja concentración.

Las simulaciones desarrolladas con el software Comsol Multiphysics® de las celdas MHD se ajustan satisfactoriamente al comportamiento real de las mismas. Esto permite evaluar de forma virtual el desempeño de las celdas MHD con diferentes materiales en su composición, sin que represente un gasto adicional al proyecto.

Como trabajo a futuro relacionado con este proyecto de tesis se derivan los siguientes temas de investigación:

- Estudio y análisis de procesos de innovación que mejoren el rendimiento del generador MHD solar de radiación solar concentrada.
- Estudio de factibilidad del generador MHD solar de radiación solar concentrada implementando agua marina como fluido de trabajo.
- Diseño y fabricación de celdas MHD elaborada con materiales semiconductores.
- Estudio y simulación del desempeño de una celda MHD mediante la variación de fluidos de trabajo.

## Referencias

- [1] Tillak M.S., Morley N.B. (1998). Magnetohydrodynamic, Standard Handbook for electrical engineers, New England, Mc. Graw Hill.
- [2] Kantrowitz A. R. (Ed.). (1962). The Magnetohydrodynamic Power Generation-Basic Principles, IEEE.
- [3] Smirnov B. M. (2001). Physics of Ionized Gases., United Kingdom, Wiley-Interscience.
- [4] Tanaka M., Okuno Y. (2016). Plasma behavior in a High-Temperature Noble Gas Plasma Disk- Shaped MHD Power Generator. Electrical Engineering in Japan. Vol 197 No. 2.
- [5] Vásquez A.L. (2015). Development and prospects of renewable energy in Mexico. Informal Economy Magazine, 390, 132-153. (Spanish).
- [6] Dwivwidi Y. D., Koteswar Rao, (Ed.). (October 2014). Environment Friendly MHD Generator - A Sequel. International Journal of Renewable Energy and Environmental Engineering, 02, 271 -278.
- [7] Vishal. D. D., Saurav A. (2013). The future power generation with MHD generators. International Journal of Advanced Electrical and Electronics Engineering (IJAE), 2, 101-105.
- [8] Majid M.F.M.A., Muhamad A., Apandi M., Sabri M., Shahrill M. (2015). Fundamental studies on development of MHD generator implement on wave energy harvesting. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 1, 114-123.
- [9] Choudhuri-Arnab R. (1998). The Physics of Fluids and Plasmas: An Introduction for Astrophysicists. United Kingdom. Cambridge University Press. 3-51.
- [10] Morozov A.I. (2013) Introduction to plasma dynamics. United States. CRC Press. Ch.2.
- [11] Krall N. A. and Trivelpiece A. W. (1986). Principles of plasma Physics. United States. San Francisco Press. Section 3.6.
- [12] Inan U., Golkowski M. (2011). Principles of Plasma Physics for Engineers and Scientists. United Kingdom. Cambridge University Press, 116-170.
- [13] Bittencourt J.A. (2004). Fundamentals of Plasma Physics. New York. Springer-Verlag, 325-50.
- [14] Lister G. G. (2004). The physics of discharge lamps. Rev. Mod. Phys., 76 (541-98)

- [15] Holma J. P. (1990). Heat Transfer. New York. Mc Graw Hill. Ch.2
- [16] Yaduvanshi R. Parthasarthy H. (2011). Exact solution of MHD system non linearity analysis. Journal of Advanced Computer Science and Applications. 1. (4).
- [17] Ajith K., Jinsha B. S. (2011) Magnetohydrodynamic Power Generation. International Journal of Scientific Research Publications. 3 (6).
- [18] Serway R., Jewett J. (2019). Physics: Electricity and Magnetism. United States. Cengage Learning.
- [19] Mahanthesh, B., Gireesha, B. J., Animasaun, I. L., Muhammad, T., & Shashikumar, N. S. (2019). MHD flow of SWCNT and MWCNT nanoliquids past a rotating stretchable disk with thermal and exponential space dependent heat source. Physica Scripta, 94(8), 085214.
- [20] Harada, N. (1999). Characteristics of a disk MHD generator with inlet swirl. Energy conversion and management, 40(3), 305-318.
- [21] Inoue, I., Inui, Y., Hayanose, N., & Ishikawa, M. (2003). Transient stability analysis of commercial scale open cycle disk MHD generator connected to power system. Energy conversion and management, 44(5), 731-741.
- [22] Murakami, T., Okuno, Y., & Yamasaki, H. (2005). Performance of rf-assisted magnetohydrodynamics power generator. Physics of plasmas, 12(11), 113503.
- [23] Murakami, T., & Okuno, Y. (2018). High-performance nonequilibrium-plasma magnetohydrodynamic electrical power generator using slightly divergent channel configuration: I. Calculation. Journal of Physics D: Applied Physics, 41(12), 125211.
- [24] Carcangiu, S., Forciniti, R., & Montisci, A. (2017). Sumulink model of an inductive MHD generator. Magnetohydrodynamics (0024-998X), 53(2).
- [25] Huang, H., Li, L., Zhu, G., & Li, L. (2018). Performance investigation of plasma magnetohydrodynamic power generator. Applied Mathematics and Mechanics, 39(3), 423-436.
- [26] Sonsky, J., Tesar, V., Gruber, J., & Maslani, A. (2017). Implosive thermal plasma source for energy conversion. PLASMA PHYSICS AND TECHNOLOGY, 4(1), 87-90.
- [27] Tanaka, M., & Okuno, Y. (2017). Performance of a seed-free disk magnetohydrodynamic generator with self-excited joule heating in the nozzle. IEEE transactions on plasma science, 45(3), 454-460.

- [28] Liberati, A., & Okuno, Y. (2008). Improvement of plasma-flow behavior and performance of a disk mhd generator under high magnetic flux densities. *IEEJ Transactions on Power and Energy*, 128(2), 493-49.
- [29] Ahmed, F. E., Hashaikeh, R., & Hilal, N. (2019). Solar powered desalination–Technology, energy and future outlook. *Desalination*, 453, 54-76.
- [30] Fischer-Kowalski, M., Löw, M., Noll, D., Petridis, P., & Skoulikidis, N. (2020). Samothraki in Transition: A Report on a Real-World Lab to Promote the Sustainability of a Greek Island. *Sustainability*, 12(5), 1932.
- [31] Vallentin, D., & Viebahn, P. (2010). Economic opportunities resulting from a global deployment of concentrated solar power (CSP) technologies—the example of German technology providers. *Energy Policy*, 38(8), 4467-4478.
- [32] Mahmud, M. A., Huda, N., Farjana, S. H., & Lang, C. (2018). Environmental impacts of solar-photovoltaic and solar-thermal systems with life-cycle assessment. *Energies*, 11(9), 2346.
- [33] Battisti, R., & Corrado, A. (2005). Environmental assessment of solar thermal collectors with integrated water storage. *Journal of Cleaner Production*, 13(13-14), 1295-1300.
- [34] Atkins, M. J., Walmsley, M. R., & Morrison, A. S. (2010). Integration of solar thermal for improved energy efficiency in low-temperature-pinch industrial processes. *Energy*, 35(5), 1867-1873.
- [35] Badr, O., Probert, S. D., & O'callaghan, P. W. (1985). Selecting a working fluid for a Rankine-cycle engine. *Applied Energy*, 21(1), 1-42.
- [36] Palao, J. P., Correa, L. A., Adesso, G., & Alonso, D. (2016). Efficiency of inefficient endoreversible thermal machines. *Brazilian Journal of Physics*, 46(3), 282-287.
- [37] Çengal, Y. A., & Boles, M. A. (2002). The Second Law of Thermodynamics. *Thermodynamics an Engineering Approach*, 283-336.
- [38] Sarasua, L. G., & Abal, G. (2016). Equivalence of the Kelvin–Planck statement of the second law and the principle of entropy increase. *European Journal of Physics*, 37(5), 055103.

- [39] Van Helden, W. G., Van Zolingen, R. J. C., & Zondag, H. A. (2004). PV thermal systems: PV panels supplying renewable electricity and heat. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 12(6), 415-426.
- [40] Kalogirou, S. A., Karellas, S., Badescu, V., & Braimakis, K. (2016). Exergy analysis on solar thermal systems: a better understanding of their sustainability. *Renewable Energy*, 85, 1328-1333.
- [41] Tian, Y., & Zhao, C. Y. (2013). A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Applied energy*, 104, 538-553.
- [42] Luna, J. G. P., Coria, L. A. M., Iniesta, S. A., Xochimitl, S. J., & González, A. E. J. Curve plotter module to characterize elements or devices in the range of nanoamps.
- [43] Hara, T., & Umoto, J. (1979). Three-dimensional effects of electrode configuration on diagonal MHD generator performance. *Journal of Energy*, 3(1), 16-22.
- [44] Stratton, J. A. (2007). *Electromagnetic theory* (Vol. 33). John Wiley & Sons.
- [45] Monk, P. (2003). *Finite element methods for Maxwell's equations*. Oxford University Press.
- [46] Murakami, T., Okuno, Y., & Yamasaki, H. (2004). Plasma structure and behavior in a disk magnetohydrodynamic generator. *Journal of applied physics*, 96(10), 5441-5449.
- [47] Zimmerman, W. B. (2006). *Introduction to COMSOL Multiphysics. Multiphysics Modeling with Finite Element Methods*. Citation Key: Zimmerman2006. World Scientific Publishing Company, 1-26.
- [48] Guide, I. (1998). *COMSOL Multiphysics®*.
- [49] BR, C. R., & Venkateswaran, P. *COMSOL MULTIPHYSICS®*.
- [50] Bedick, C. R., Kolczynski, L., & Woodside, C. R. (2017). Combustion plasma electrical conductivity model development for oxy-fuel MHD applications. *Combustion and Flame*, 181, 225-238.
- [51] Sonsky, J., Tesar, V., Gruber, J., & Maslani, A. (2017). Implosive thermal plasma source for energy conversion. *PLASMA PHYSICS AND TECHNOLOGY*, 4(1), 87-90.
- [52] Butov, V. G., Afonin, A. G., Sinyaev, S. V., Solonenko, V. A., Panchenko, V. P., Yakushev, A. A., ... & Nosova, M. G. (2017, June). Compact electric energy storage system

based on a powerful pulsed MHD generator. In 2017 IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC) (pp. 1-6). IEEE.

[53] Ciaio, F. A. (1990). U.S. Patent No. 4,906,877. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

[54] Shah, Z., Kumam, P., Dawar, A., Alzahrani, E. O., & Thounthong, P. (2019). Study of the couple stress convective micropolar fluid flow in a hall MHD generator system. *Front. Phys.* 7: 171. doi: 10.3389/fphy.

[55] Tanaka, M., Aoki, Y., Zhao, L., & Okuno, Y. (2016). Experiments on high-temperature xenon plasma magnetohydrodynamic power generation. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 44(7), 1241-1246.

[56] Harada, N. (1999). Characteristics of a disk MHD generator with inlet swirl. *Energy conversion and management*, 40(3), 305-318.

[57] Ali, U., Rehman, K. U., & Malik, M. Y. (2019). The influence of MHD and heat generation/absorption in a Newtonian flow field manifested with a Cattaneo–Christov heat flux model. *Physica Scripta*, 94(8), 085217.

[58] Inoue, I., Inui, Y., Hayanose, N., & Ishikawa, M. (2003). Transient stability analysis of commercial scale open cycle disk MHD generator connected to power system. *Energy conversion and management*, 44(5), 731-741.

# Anexos

## A. Propiedades del agua saturada: Tablas de presión.

Presión bar	Temp. °C	Volumen específico m <sup>3</sup> / kg		Energía interna kJ / kg		Entalpía kJ / kg			Entropía kJ / kg · K	
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor vaporiz.	Vapor sat.	Líquido sat.	Vapor sat.
		$v_f \times 10^3$	$v_g$	$u_f$	$u_g$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$s_f$	$s_g$
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746
0,06	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304
0,08	41,51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	2577,0	0,5926	8,2287
0,10	45,81	1,0102	14,674	191,82	2437,9	191,83	2392,8	2584,7	0,6493	8,1502
0,20	60,06	1,0172	7,649	251,38	2456,7	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,9085
0,30	69,10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	2625,3	0,9439	7,7686
0,40	75,87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	2636,8	1,0259	7,6700
0,50	81,33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	2645,9	1,0910	7,5939
0,60	85,94	1,0331	2,732	359,79	2489,6	359,86	2293,6	2653,5	1,1453	7,5320
0,70	89,95	1,0360	2,365	376,63	2494,5	376,70	2283,3	2660,0	1,1919	7,4797
0,80	93,50	1,0380	2,087	391,58	2498,8	391,66	2274,1	2665,8	1,2329	7,4346
0,90	96,71	1,0410	1,869	405,06	2502,6	405,15	2265,7	2670,9	1,2695	7,3949
1,00	99,63	1,0432	1,694	417,36	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	7,3594
1,50	111,4	1,0528	1,159	466,94	2519,7	467,11	2226,5	2693,6	1,4336	7,2233
2,00	120,2	1,0605	0,8857	504,49	2529,5	504,70	2201,9	2706,7	1,5301	7,1271
2,50	127,4	1,0672	0,7187	535,10	2537,2	535,37	2181,5	2716,9	1,6072	7,0527
3,00	133,6	1,0732	0,6058	561,15	2543,6	561,47	2163,8	2725,3	1,6718	6,9919
3,50	138,9	1,0786	0,5243	583,95	2546,9	584,33	2148,1	2732,4	1,7275	6,9405
4,00	143,6	1,0836	0,4625	604,31	2553,6	604,74	2133,8	2738,6	1,7766	6,8959
4,50	147,9	1,0882	0,4140	622,25	2557,6	623,25	2120,7	2743,9	1,8207	6,8565
5,00	151,9	1,0926	0,3749	639,68	2561,2	640,23	2108,5	2748,7	1,8607	6,8212
6,00	158,9	1,1006	0,3157	669,90	2567,4	670,56	2086,3	2756,8	1,9312	6,7600
7,00	165,0	1,1080	0,2729	696,44	2572,5	697,22	2066,3	2763,5	1,9922	6,7080
8,00	170,4	1,1148	0,2404	720,22	2576,8	721,11	2048,0	2769,1	2,0462	6,6628
9,00	175,4	1,1212	0,2150	741,83	2580,5	742,83	2031,1	2773,9	2,0946	6,6226
10,0	179,9	1,1273	0,1944	761,68	2583,6	762,81	2015,3	2778,1	2,1387	6,5863
15,0	198,3	1,1539	0,1318	843,16	2594,5	844,84	1947,3	2792,2	2,3150	6,4448
20,0	212,4	1,1767	0,09963	906,44	2600,3	908,79	1890,7	2799,5	2,4474	6,3409
25,0	224,0	1,1973	0,07998	959,11	2603,1	962,11	1841,0	2803,1	2,5547	6,2575
30,0	233,9	1,2165	0,06668	1004,8	2604,1	1008,4	1795,7	2804,2	2,6457	6,1869
35,0	242,6	1,2347	0,05707	1045,4	2603,7	1049,8	1753,7	2803,4	2,7253	6,1253
40,0	250,4	1,2522	0,04978	1082,3	2602,3	1087,3	1714,1	2801,4	2,7964	6,0701
45,0	257,5	1,2692	0,04406	1116,2	2600,1	1121,9	1676,4	2798,3	2,8610	6,0199
50,0	264,0	1,2859	0,03944	1147,8	2597,1	1154,2	1640,1	2794,3	2,9202	5,9734
60,0	275,6	1,3187	0,03244	1205,4	2589,7	1213,4	1571,0	2784,3	3,0267	5,8892
70,0	285,9	1,3513	0,02737	1257,6	2580,5	1267,0	1505,1	2772,1	3,1211	5,8133
80,0	295,1	1,3842	0,02352	1305,6	2569,8	1316,6	1441,3	2758,0	3,2068	5,7432
90,0	303,4	1,4178	0,02048	1350,5	2557,8	1363,3	1378,9	2742,1	3,2858	5,6772
100	311,1	1,4524	0,01803	1393,0	2544,4	1407,6	1317,1	2724,7	3,3596	5,6141
110	318,2	1,4886	0,01599	1433,7	2529,8	1450,1	1255,5	2705,6	3,4295	5,5527
120	324,8	1,5267	0,01426	1473,0	2513,7	1491,3	1193,6	2684,9	3,4962	5,4924
130	330,9	1,5671	0,01278	1511,1	2496,1	1531,5	1130,7	2662,2	3,5606	5,4323
140	336,8	1,6107	0,01149	1548,6	2476,8	1571,1	1066,5	2637,6	3,6232	5,3717
150	342,2	1,6581	0,01034	1585,6	2455,5	1610,5	1000,0	2610,5	3,6848	5,3098
160	347,4	1,7107	0,009306	1622,7	2431,7	1650,1	930,6	2580,6	3,7461	5,2455
170	352,4	1,7702	0,008364	1660,2	2405,0	1690,3	856,9	2547,2	3,8079	5,1777
180	357,1	1,8397	0,007489	1698,9	2374,3	1732,0	777,1	2509,1	3,8715	5,1044
190	361,5	1,9243	0,006657	1739,9	2338,1	1776,5	688,0	2464,5	3,9388	5,0228
200	365,8	2,036	0,005834	1785,6	2293,0	1826,3	583,4	2409,7	4,0139	4,9269
220,9	374,1	3,155	0,003155	2029,6	2029,6	2099,3		2099,3	4,4298	4,4298

## **B. Características Técnicas del Acero Inoxidable.**

El acero es una aleación de hierro y carbono en un porcentaje de este último elemento variable entre el 0,08% y el 2% en masa de su composición, y su densidad media es de 7850 kg/m<sup>3</sup>.

En función de la temperatura el acero se puede contraer, dilatar o fundir. El punto de fusión del acero depende del tipo de aleación y los porcentajes de elementos aleantes. El de su componente principal, el hierro es de alrededor de 1510 °C en estado puro (sin alear), sin embargo, el acero presenta frecuentemente temperaturas de fusión de alrededor de 1375 °C, y en general la temperatura necesaria para la fusión aumenta a medida que se aumenta el porcentaje de carbono y de otros aleantes. (excepto las aleaciones eutécticas que funden de golpe).

Por otra parte, el acero funde a 1650 °C Su punto de ebullición es de alrededor de 3000 °C. Es un material muy tenaz, especialmente en alguna de las aleaciones usadas para fabricar herramientas. Relativamente dúctil, con él se obtienen hilos delgados llamados alambres. Es maleable, se pueden obtener láminas delgadas llamadas hojalata.

La dureza de los aceros varía entre la del hierro y la que se puede lograr mediante su aleación u otros procedimientos térmicos o químicos entre los cuales quizá el más conocido sea el templado del acero, aplicable a aceros con alto contenido en carbono, que permite, cuando es superficial, conservar un núcleo tenaz en la pieza que evite fracturas frágiles.

Posee una alta conductividad eléctrica. Aunque depende de su composición es aproximadamente de  $3 \times 10^6$  S/m. En las líneas aéreas de alta tensión se utilizan con frecuencia conductores de aluminio con alma de acero proporcionando este último la resistencia mecánica necesaria para incrementar los vanos entre las torres y optimizar el coste de la instalación.

### C. Propiedades del Cobre.

Elemento químico, de símbolo Cu, con número atómico 29; uno de los metales de transición e importante metal no ferroso. Su utilidad se debe a la combinación de sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, así como a sus propiedades eléctricas y su abundancia.

La mayor parte del cobre del mundo se obtiene de los sulfuros minerales como la calcocita, covelita, calcopirita, bornita y enargita. Los minerales oxidados son la cuprita, tenorita, malaquita, azurita, crisocola y brocantita. El cobre natural, antes abundante en Estados Unidos, se extrae ahora sólo en Michigan. El grado del mineral empleado en la producción de cobre ha ido disminuyendo regularmente, conforme se han agotado los minerales más ricos y ha crecido la demanda de cobre.

El cobre es el primer elemento del subgrupo Ib de la tabla periódica y también incluye los otros metales de acuñación, plata y oro. Su átomo tiene la estructura electrónica  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^1$ . El bajo potencial de ionización del electrón  $4s^1$  da por resultado una remoción fácil del mismo para obtener cobre(I), o ion cuproso,  $Cu^+$ , y el cobre(II), o ion cúprico,  $Cu^{2+}$ .

Un metal comparativamente pesado, el cobre sólido puro, tiene una densidad de  $8.96 \text{ g/cm}^3$  a  $20^\circ\text{C}$ , mientras que el del tipo comercial varía con el método de manufactura, oscilando entre 8.90 y 8.94. El punto de fusión del cobre es de  $1083.0 (+/-) 0.1^\circ\text{C}$  ( $1981.4 +/- 0.2^\circ\text{F}$ ). Su punto de ebullición normal es de  $2595^\circ\text{C}$  ( $4703^\circ\text{F}$ ). El cobre no es magnético; o más exactamente, es un poco paramagnético. Su conductividad eléctrica es de  $58 \times 10^6 \text{ S/m}$ . Es uno de los metales que puede tenerse en estado más puro, es moderadamente duro, es tenaz en extremo y resistente al desgaste. La fuerza del cobre está acompañada de una alta ductilidad. Las propiedades mecánicas y eléctricas de un metal dependen en gran medida de las condiciones físicas, temperatura y tamaño de grano del metal.

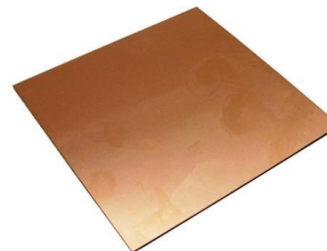
## D. Propiedades de la Baquelita

Una Baquelita Placa Fenólica PCB es una lamina de cobre recubierta por un sustrato aislante. La baquelita es un plástico sintético que Baekeland creó en 1907, aunque hubo algunos experimentos previos realizados por el alemán Adolf Von Baeyer. Dos años después de su hallazgo, Baekeland lo dio a conocer a nivel formal y luego fundó una empresa para explotar comercialmente la baquelita.

La baquelita es un polímero: una macromolécula que se obtiene a partir de la vinculación de otras moléculas más simples que reciben el nombre de monómeros. Esta sustancia está considerada como la primera resina plástica que es absolutamente sintética. En términos más técnicos, podemos decir que la baquelita se sintetiza partiendo de moléculas de formaldehído y fenol, siguiendo un proceso que lleva el mismo nombre de su creador, en una proporción de dos a tres: el formaldehído hace las veces de puente entre las moléculas de fenol, y pierde el oxígeno a causa de las condensaciones que sufre de forma sucesiva.

El fenol, por otro lado, pierde entre dos y tres átomos de hidrógeno, de manera tal que cada molécula de formaldehído entabla una conexión con dos de fenol, y cada una de estas últimas, con dos o tres de formaldehído, abriendo las puertas a los denominados entrecruzamientos. Cuando el fenol se presenta en exceso, se pueden obtener fenoles que conecten solamente con dos formaldehídos a través de la misma reacción de condensación.

La baquelita tiene varias propiedades que la convierten en una resina muy utilizada en diversos ámbitos de la industria. Puede decirse que este plástico es termoestable: es insoluble (no puede disolverse) e infusible (no puede fundirse). Mientras se forma es posible moldearla y luego se solidifica. La baquelita se diferencia claramente de los polímeros termoplásticos, los cuales pueden moldearse y fundirse más de una vez. La baquelita resiste el accionar de los solventes y del agua. Por otra parte, no es un material conductor de la electricidad (por eso se la utiliza para aislar las terminales eléctricas).



## E. Fichas técnicas de los imanes de Neodimio.



### Data sheet article S-08-08-N

Technical data and application safety

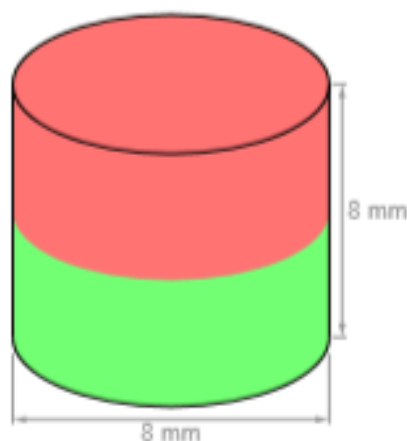
Webcraft GmbH  
Industriepark 206  
78244 Gottmadingen, Germany

Phone: +49 7731 939 839 2  
Fax: +49 7731 939 839 9

[www.supermagnete.de](http://www.supermagnete.de)  
[support@supermagnete.de](mailto:support@supermagnete.de)


#### 1. Technical information

Article ID	S-08-08-N
EAN	7640155437462
Material	NdFeB
Shape	Disc
Diameter	8 mm
Height	8 mm
Tolerance	+/- 0,1 mm
Direction of magnetisation	axial (parallel to height)
Coating	Nickel-plated (Ni-Cu-Ni)
Manufacturing method	sintered
Magnetisation	N45
Strength	approx. 2,5 kg (approx. 24,5 N)
Max. working temperature	80°C
Weight	3,0561 g
Curie temperature	310 °C
Residual magnetism Br	13200-13700 G, 1.32-1.37 T
Coercive field strength bHc	10.8-12.5 kOe, 860-995 kA/m
Coercive field strength iHc	≥ 12 kOe, ≥ 955 kA/m
Energy product (BxH)max	43-45 MGOe, 342-358 kJ/m <sup>3</sup>



Pollutant-free according to RoHS Directive 2011/65/EU.

#### 2. Safety tips

	<b>Danger</b>
	<b>Swallowing</b>
	Children could swallow small magnets. if several magnets are swallowed, they could get stuck in the intestine and cause perilous complications. Magnets are not toys! Make sure that children don't play with magnets.

# Ficha técnica del artículo Q-50-15-15-N

## Datos técnicos y seguridad de uso

Webcraft GmbH  
Industriepark 206  
78244 Gottmadingen, Alemania

Teléfono: +49 7731 939 839 1  
Fax: +49 7731 939 839 9

www.supermagnete.es  
support@supermagnete.es


### 1. Datos técnicos

Cód. artículo	Q-50-15-15-N
EAN	7640155436533
Material	NdFeB
Forma	Bloque
Tamaño	50 x 15 x 15 mm
Página 1	50 mm
Página 2	15 mm
Página 3	15 mm
Superficies polares	50 x 15 mm
Tolerancia	+/- 0,1 mm
Sentido de magnetización	Eje 15 mm
Revestimiento	niquelado (Ni-Cu-Ni)
Tipo de fabricación	sinterizado
Magnetización	N48
Fza. sujec.	aprox. 33 kg (aprox. 324 N)
Temperatura de servicio máx.	80°C
Peso	85,5000 g
Temperatura de Curie	310 °C
Remanencia Br	13700-14200 G, 1.37-1.42 T
Coercitividad bHc	10.8-12.5 kOe, 860-995 kA/m
Coercitividad iHc	≥12 kOe, ≥955 kA/m
Producto energético (BxH)max	45-48 MGOe, 358-382 kJ/m³



Sin sustancias nocivas conforme a la directiva RoHS 2011/65/UE.

### 2. Advertencias

<b>Advertencia</b> 	<b>Contusiones</b> Los imanes grandes tienen una fuerza de atracción enorme. • En caso de uso imprudente, podría pillarse los dedos o la piel entre dos imanes. Esto puede provocar contusiones y hematomas en las áreas afectadas. • Los imanes muy grandes pueden causar fracturas óseas debido a su fuerza. A la hora de manipular imanes grandes, póngase unos guantes protectores gruesos.
---	---