



UNIVERSIDAD TÉCNICA AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**PROYECTO TÉCNICO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO**

TEMA:

**“ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE DE
HIDRÓGENO MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS VOLÚMENES
FINITOS”**

Autor: Carlos Stalin Zurita López

Tutor: Ing. Mg. Luis Eduardo Escobar Luna

AMBATO - ECUADOR

Enero– 2022

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor del Proyecto Técnico, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, con el tema: **“ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS”**, elaborado por el Sr. Carlos Stalin Zurita López portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 1803939089, estudiante de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente proyecto técnico es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, enero 2022

Ing. Mg. Luis Eduardo Escobar Luna
TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACION

Yo, **Carlos Stalin Zurita López** con C.I. 1803939089 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente proyecto técnico con el tema “**ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS**”, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, enero 2022



Carlos Stalin Zurita López

C.I: 1803939089

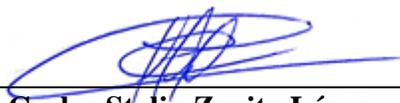
AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto Técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Proyecto Técnico, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, enero 2022



Carlos Stalin Zurita López

C.I: 1803939089

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Proyecto Técnico, realizado por el estudiante Carlos Stalin Zurita López. de la Carrera de Ingeniería Mecánica bajo el tema: **“ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS”**.

Ambato, enero 2022

Para constancia firman:

Ing. Mg. Santiago Paúl Cabrera Anda
Miembro Calificador

Ing. Diego Fernando Núñez Núñez, Msc
Miembro Calificador

DEDICATORIA

En el presente trabajo de investigación se lo dedico principalmente a mis padres Carlos Zurita y Marisol López por ser mis principales guías y ejemplos de vida. Apoyándome siempre alcanzar mis objetivos e inculcándome valores para ser una buena persona. Sin ellos esto no hubiera sido posible de corazón se lo agradezco mucho.

A mis hermanos, Yadira y Jacob por ser un apoyo y un pilar en mi vida. Por sus grandes consejos, por las lecciones de vida que hemos ido aprendiendo y sobre todo por llenar mis días de alegría y amor para conseguir mis objetivos.

Carlos Zurita López

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la sabiduría que me dado, a mis padres Carlos Zurita y Marisol López por su apoyo condicional y su gran amor que me han demostrado toda mi vida. A mis hermanos, Yadira y Jacob por el apoyo y cariño que siempre me han dado. A mi novia Karen Obando por mostrarme la alegría de la vida y sobre todo por su apoyo para culminar mis metas.

A la Universidad Técnica de Ambato por llenarme de sabiduría y conocimiento,

Al Ing. Luis Escobar por la paciencia, el tiempo y compartir sus conocimientos para poder culminar este proyecto.

A la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y a sus docentes quienes me ayudaron a lo largo de la carrera a dar los pasos necesarios para alcázar mi meta.

A mis amigos quien a lo largo de los años hemos ido aprendiendo juntos tanto de la carrera como de la propia vida y a mi gran amigo Christian Casco por estar presente y mostrando su apoyo en todo momento.

A agradamiento a todo mi familia y compañeros que formaron parte de este periodo de mi vida.

Carlos Zurita López

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACION	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
GLOSARIO DE TÉRMINOS	xvi
RESUMEN	xviii
ABSTRACT	xix
CAPÍTULO I	1
MARCO TEÓRICO	1
1.1 Tema	1
1.2 Justificación	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General	2
1.3.2 Objetivos Específicos	2
1.4 Antecedentes Investigación	3
1.5 Fundamento teórico	4
1.5.1 Energía	4
1.5.2 Química	4
1.5.3 Electroquímica	4
1.5.4 Celdas electrolíticas	5
1.5.5 Pilas de combustible	5
1.5.6 Tipos de pilas de combustible	9
1.5.7 Dinámica de fluidos computacional	15
1.5.8 Ecuaciones de Navier – Stokes	16
1.5.9 Estructura de dinámica de fluidos computacional	17
1.5.10 Mallado	18

1.5.11	Tipos de malla	18
1.5.12	Métrica de malla.....	20
1.5.13	Software libres y pagados.....	20
CAPÍTULO II	.....	21
METODOLOGÍA	.....	21
2.1 Materiales	.....	21
2.1.1	Materiales Batería de Hidrógeno (Físicos)	21
2.1.2	Materiales Virtuales.....	24
2.2 Métodos	.....	25
2.2.1	Diseño del Proyecto	28
2.2.2	Enfoque de la Investigación	28
2.2.3	Población y Muestra	28
2.2.4	Herramientas de Recolección y Procesamiento de Datos	29
2.2.5	Métodos	29
2.2.6	Detalles de la simulación.....	30
2.2.7	Diagrama de proceso de diseño.....	32
2.2.8	Diagrama de proceso de modelado	33
2.2.9	Diagrama de proceso de simulación	34
CAPÍTULO III	.....	35
ANÁLISIS DE RESULTADOS	.....	35
3.1 Selección de alternativas	.....	35
3.1.1	Alternativas propuestas para el desarrollo del trabajo de investigación.	35
3.1.2	Elección de Alternativas	39
3.2 Generalidades de la alternativa seleccionada	.....	42
3.2.1	Descripción	42
3.2.2	Principio químico de funcionamiento.....	42
3.2.3	Parámetros de funcionamiento	44
3.2.4	Área activa de la celda	45
3.3 Modelamiento de la batería mono celda de hidrógeno	.....	46
3.3.1	Placas exteriores	48
3.3.2	Placas de disipación	49
3.3.3	Placas de las cavidades	49

3.3.4 Membrana	51
3.3.5 Guías.....	53
3.3.6 Elementos de Sujeción	54
3.3.7 Modelo final.....	60
3.4 Simulación PEMFC	62
3.4.1 Preprocesado	62
3.4.1.1 Definición de geometría.....	62
3.4.1.2 Extracción del dominio del fluido.....	65
3.4.1.3 Desarrollo de malla	66
3.4.1.4 Delimitación de zonas de circulación de fluido.....	70
3.4.2 Procesado	72
3.4.3 Resultados de simulación.....	77
3.4.3.1 Membrana	85
3.4.3.2 Celda de combustible	86
3.6 Validación de los resultados de simulación.....	86
3.6.1 Curvas de polarización	86
3.6.1.1 Experimento 1	87
3.6.1.2 Experimento 2	88
3.6.1.3 Experimento 3	88
3.6.1.4 Experimento 4	89
3.6.1.5 Experimento 5	90
3.6.2 Resultados de densidad de corriente con variación de voltaje.....	91
3.6.3 Cálculo del error relativo	94
CAPÍTULO IV	96
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	96
4.1 Conclusiones	96
4.2 Recomendaciones	97
BIBLIOGRAFÍA.....	98
ANEXOS.....	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquematación de una celda electrolítica.	5
Figura 1.2 Diagrama de pila de combustible.	6
Figura 1.3 Esquematación combustión térmica y pilas de combustible.	6
Figura 1.4 Composición de una pila de combustible.	8
Figura 1.5 Componentes de una pila de combustible.	8
Figura 1.6 Diagrama del funcionamiento de pila AFC.	10
Figura 1.7 Esquematación del funcionamiento de una pila PEMFC.	11
Figura 1.8 Pila de combustible de ácido fosfórico.	12
Figura 1.9 Funcionamiento de una pila de combustible de carbonato fundido.	13
Figura 1.10 Funcionamiento de una pila.	14
Figura 1.11 Ejemplo de simulación CFD.	16
Figura 1.12 Pasos para el proceso CFD.	17
Figura 1.13 Tipo de elementos 2D y 3D.	18
Figura 1.14 Mallas estructurales tipo o y tipo C.	19
Figura 1.15 Ejemplo de una malla no estructurada.	19
Figura 1.16 Metrical de Skewness.	20
Figura 2.1 Hidrógeno.	21
Figura 2.3 Membrana de Intercambio.	21
Figura 2.3 Platino.	22
Figura 2.4 Placas de Grafito.	22
Figura 2.5 Placas de Cobre.	22
Figura 2.6 Meta crilato.	23
Figura 2.7 Tornillos.	23
Figura 2.8 Tuercas.	23
Figura 2.9 Racores.	24
Figura 2.10 Arandelas.	240
Figura 2.11 Hidrógeno.	25
Figura 2.12 Diseño CAD.	25
Figura 2.13 Ejemplificación de estudio CFD.	26

Figura 2.14 Método usado para la simulación.	26
Figura 2.15 Resultados de simulación.	27
Figura 2.16 Esquema del PEMFC.	30
Figura 2.17 Diagrama del proceso de simulación.....	32
Figura 2.18 Diagrama del proceso de simulación.....	33
Figura 2.19 Diagrama del proceso de simulación.....	34
Figura 3.1 Esquema de celda alcalina.....	36
Figura 3.2 Esquema de celda PEMFC.	36
Figura 3.3 Esquema de PAFC.....	37
Figura 3.4 Esquema de MCFC.....	38
Figura 3.5 Esquema de SOFC.....	38
Figura 3.6 Pasos a seguir para el modelado.	47
Figura 3.7 Cuerpo de la Pila.	48
Figura 3.8 Placa Exterior.	48
Figura 3.9 Placa de disipación.	49
Figura 3.10 Cavidades Comerciales.....	50
Figura 3.11 Placa de la Cavidad.....	50
Figura 3.12 Detalle de los canales.	51
Figura 3.13 Membrana Real.....	51
Figura 3.14 Características Técnicas de la Membrana.	52
Figura 3.15 Membrana.	53
Figura 3.16 Guías.....	53
Figura 3.17 Tuercas Modeladas.	54
Figura 3.18 Tornillos.	54
Figura 3.19 Arandelas.....	55
Figura 3.20 Juntas tóricas.	55
Figura 3.21 Válvula de Acople	56
Figura 3.22 Mangueras	56
Figura 3.23 Dispositivo de Control.....	56
Figura 3.24 Tipos de baterías disponibles.....	58
Figura 3.25 Modelo final de la pila PEM.....	61

Figura 3.26	Vista explosionada del modelo final.	61
Figura 3.27	Esquema para simplificación de geometría.	62
Figura 3.28	Croquis de canales.	63
Figura 3.29	Canal para extracción de volumen.	64
Figura 3.30	Pila para simulación.	64
Figura 3.31	Vista explosionada de la pila.	65
Figura 3.32	Aristas para extracción de volumen.	65
Figura 3.33	Volumen de los canales extraídos	66
Figura 3.34	Interfaz de mallado.	67
Figura 3.35	Definición de tipo de elemento.	67
Figura 3.36	Mallado automático.	68
Figura 3.37	Aplicación de métodos de malla.	68
Figura 3.38	Refinamiento en las placas.	69
Figura 3.39	Vista de corte en el mallado.	69
Figura 3.40	Métrica de malla.	70
Figura 3.41	Gráfica número de elementos vs métrica de malla.	70
Figura 3.42	Configuración de entradas al sólido.	71
Figura 3.43	Entradas, salidas y cuerpos de circulación de fluidos.	71
Figura 3.44	Interfaz de Fluent.	72
Figura 3.45	PEM Fuel Cell Model.	73
Figura 3.46	Parámetros PEMFC.	74
Figura 3.47	Delimitación de zonas de acuerdo al programa.	74
Figura 3.48	Configuración de resistencia en la pila.	75
Figura 3.49	Delimitación del área activa.	75
Figura 3.50	Presión de trabajo.	76
Figura 3.51	Condiciones de entrada.	77
Figura 3.52	Presión en los canales del cátodo.	81
Figura 3.53	Velocidad en los canales del cátodo.	82
Figura 3.54	Temperatura en los canales del cátodo.	82
Figura 3.55	Densidad de corriente en el cátodo.	83
Figura 3.56	Presión en los canales del ánodo.	83

Figura 3.57 Temperatura en los canales del ánodo.....	84
Figura 3.58 Velocidad en los canales del ánodo.....	84
Figura 3.59 Densidad de corriente en el ánodo.....	85
Figura 3.60 Contenido de agua en la membrana.....	85
Figura 3.61 Densidad de corriente en la celda (plano de sección intermedia).....	86
Figura 3.62 Curva de polarización a distinta temperatura.	87
Figura 3.63 Curvas de polarización a diferente humedad relativa de los gases reactivos en una pila PEM.....	88
Figura 3.64 Curvas de polarización a diferente temperatura	89
Figura 3.65 Comparación de curvas de polarización para diferentes valores de densidades de corriente de intercambio en electrodos de ánodo y cátodo.	90
Figura 3.66 Comparación de curvas de polarización para diferentes valores de densidades de corriente de intercambio en electrodos de ánodo y cátodo variando el electrodo.....	90
Figura 3.67 Curva de polarización del modelo propuesto.	92
Figura 3.68 Toma de datos de la curva experimental.	93
Figura 3.69 Comparación de curvas de polarización.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Raciones de las pilas de combustible.....	9
Tabla 1.2 Características de las pilas de combustión.....	15
Tabla 3.1 Criterio de evaluación para las alternativas	39
Tabla 3.2 Alternativas.	39
Tabla 3.3 Evaluación de criterios.....	40
Tabla 3.4 Evaluación de las alternativas según eficiencia.	40
Tabla 3.5 Evaluación de las alternativas según temperatura.....	40
Tabla 3.6 Evaluación de las alternativas según aplicaciones.	41
Tabla 3.7 Evaluación de las alternativas según el electrolito.....	41
Tabla 3.8 Prioridad de cada una de las alternativas.	41
Tabla 3.9 Reacciones químicas en la celda de combustible.....	42

Tabla 3.10 Principios de funcionamiento.....	44
Tabla 3.11 Valores Técnicos de la membrana NAFION 115.	52
Tabla 3.12 Características Técnicas de la Pila de Hidrógeno.	59
Tabla 3.13 Características Técnicas de la Pila de Hidrógeno Mono Celda.	60
Tabla 3.14 Condiciones de borde para la simulación.....	80
Tabla 3.15 Densidades de corriente respecto al voltaje.	91
Tabla 3.16 Valores del método experimental y valores simulados.....	93
Tabla 3. 17 Valores del método experimental y valores simulados.....	94

GLOSARIO DE TÉRMINOS

CO₂: Dióxido de carbono

CH₄: Metano

H₂: Hidrógeno molecular

PEMFC: Pila de combustible de intercambio protónico

CFD: Dinámica de fluidos computacionales

CAD: Dibujo asistido por computadora

G = Energía de Gibbs

F = Constante de Faraday

n_e = Cantidad de electrones presentes en la reacción

ΔV_o = Voltaje inicial de la celda

V_e = Voltaje de equilibrio de la celda

ΔP_c = Potencial del cátodo

ΔP_a = Potencial del ánodo

N_c = Número de celdas

V_{ca} = Voltaje de circuito abierto

V_c = Voltaje de la celda

I = Intensidad

P_n = Potencia nominal

A_a = área activa de la membrana

D_{cn} = Densidad de corriente nominal

Q_{sal} : Flujo de calor

N : número de moles que intervienen

$\overline{h}_{\circ f}$: entalpía de formación a condiciones estandar

\overline{h} : entalpía de formación a T de reacción o producto

h° : entalpía de corrección

RESUMEN

El presente proyecto técnico analiza electroquímicamente las características de una pila de combustible hidrógeno (PEM) mediante el método de volúmenes finitos. La pila modelada presenta características de las más comercialmente usadas en la industria, se trata de una pila de una sola celda debido a la complejidad de la simulación. La pila presenta un área activa de 70 centímetros cuadrados que fue modelada en un programa de diseño.

Para el estudio de método de volúmenes finitos se simplifica la geometría actual eliminando detalles como pernos, tornillos; dejando únicamente geometría acorde a donde se pueda observar el fenómeno. La malla presenta una estructura de calificación excelente dentro del método Skewness con lo cual garantiza los resultados.

Los resultados de la simulación detallan fenómenos como la caída de presión en los canales donde circula el fluido, además el aumento de temperatura a lo largo de la pila, se observa una densidad de corriente en los terminales. Para la validación de datos se realiza una curva de polarización variando el voltaje del terminal del cátodo y se compara con curvas de pilas anteriormente realizadas y puestas a pruebas de funcionamiento. Los valores entre curvas son muy similares y se encuentra la mayoría en un valor de 10 por ciento de error relativo.

Palabras claves: Pila, Combustible, PEM, Elementos finitos, Curva de polarización.

ABSTRACT

This technical project electrochemically analyzes the characteristics of a hydrogen fuel cell (PEM) using the finite element method. The modeled stack presents characteristics of the most commercially used in the industry, it is a single cell stack due to the complexity of the simulation. The pile has an active area of 70 centimeters squared that was modeled in a design program.

For the study of the finite element method, the current geometry is simplified by eliminating details such as bolts, screws; leaving only geometry according to where the phenomenon can be observed. The mesh has an excellent rating structure within the Skewness method, which guarantees results.

The results of the simulation detail phenomena such as the pressure drop in the channels where the fluid circulates, in addition to the increase in temperature along the stack, a current density is observed at the terminals. For data validation, a polarization curve is made by varying the voltage of the cathode terminal and it is compared with cell curves previously made and put to functional tests. The values between curves are very similar and most are found in a 10 percent relative error value.

Keywords: Cell, fuel, PEM, Finite elements, Polarization curve.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Tema

“ANÁLISIS ELECTROQUÍMICO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO MEDIANTE EL MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS”

1.2 Justificación

Las pilas o baterías de combustible hidrógeno vienen ganando terreno en el ámbito de la energía, debido a sus altas ventajas en comparación a los otros tipos de estas herramientas, el mundo de la industria viene fabricando este tipo en mayor escala. Uno de los principales defectos de la industria es su alto nivel de contaminación, las máquinas generan alto nivel de gases contaminantes y más residuos por lo que lo que se busca es mitigar este efecto. Ahora una pila de hidrogeno tiene ventajas como:

No produce emisiones nocivas. Como hemos visto, el hidrógeno más el oxígeno genera electricidad y a su vez vapor de agua, una emisión totalmente inofensiva, es más eficiente que los motores de combustión. La pila de hidrógeno no solo no contamina, sino que transforma la energía química en eléctrica de manera más eficiente. El motor de combustión debe convertir la energía química del combustible en calor, y este en energía mecánica que mueva el motor. Eso produce el llamado «cuello de botella térmico», que se evita con la conversión directa de energía que hace la pila de hidrógeno, la pila de hidrógeno no tiene partes móviles. Eso la hace mucho más fiable que un motor de combustión, que está compuesto de muchas piezas que pueden estropearse.

El funcionamiento de esta pila está dado por el hidrógeno presurizado (H_2), este entra en la pila por la parte del ánodo, forzando este gas a través del catalizador mediante presión. Cuando la molécula de H_2 toma contacto con el platino del catalizador, se divide en 2 iones (H^+) y 2 electrones. Los electrones son conducidos a través del ánodo para llegar al circuito externo. Allí, realizan la labor necesaria (como alimentar un motor eléctrico) y vuelven a la pila por la parte del cátodo. En el cátodo, el oxígeno (O_2) pasa a través del

catalizador y forma 2 átomos de oxígeno cargados muy negativamente. Eso atrae a los iones de antes (H^+) y se combinan junto con 2 electrones que vuelven del circuito externo. Todo junto forma una molécula de agua (H_2O) [1].

Para garantizar la fabricación las multinacionales desarrollan simulaciones, mismas que benefician estos proyectos debido a que predicen el fenómeno principal o simulan el funcionamiento que tendrá en su labor futura, con estas herramientas computacionales podemos mitigar fallas en su funcionamiento. ANSYS es hoy en día potencia mundial en el desarrollo de simulaciones de todo tipo, además posee un apartado denominado “FLUENT” mismo que ayuda a predecir comportamiento de fluidos, entre ellos reacciones químicas, electricidad y transferencia de calor. Por este motivo en el desarrollo de este proyecto se utilizará este software, también la Universidad Técnica de Ambato cuenta con los requisitos legales para dicho uso. Este trabajo beneficiará a la comunidad internacional y científica como un pequeño aporte para futuros estudios a nivel macro con el fin de tener una producción a gran escala.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- Analizar electroquímicamente una pila de combustible de hidrógeno mediante el método de los volúmenes finitos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Modelar una pila de combustible de hidrógeno de acuerdo modelos existentes
- Desarrollar simulaciones de la pila de combustible de hidrógeno mediante el método de volúmenes finitos con diferentes condiciones de borde.
- Validar los resultados obtenidos en la simulación mediante comparación con características con modelos existentes

1.4 Antecedentes de Investigación

En el siguiente texto se especifican 4 estudios involucrados en la investigación de nuevas fuentes de energía debido a que muchos países se centran en el uso de combustibles fósiles sobre todo el uso de petróleo y sus derivados. El empleo de esta combustible plantea un gran problema medioambiental, es el principal causante de la liberación de gases nocivos por ejemplo el CO_2 , CH_4 , NO_2 y SF_6 la mayoría de estos gases son los causantes del efecto invernadero culpables del cambio climático. [2]

Varios países se han enfocado en el desarrollo de tecnología que evite y reduzca las emisiones perjudiciales producidas por los combustibles fósiles. Los cuales indagan en nuevas tecnologías que sean beneficiarias para el medio ambiente y sobre todo en la parte de aspecto económico y energético del país. Algunas naciones se han orientado últimamente más hacia la tecnología de hidrogeno, estableciéndose posiblemente como un nuevo combustible del futuro, una de sus principales características es que se trata de un gas que no libera gases de efecto invernadero cuando se utiliza como combustible y otra ventaja es el poder calorífico de combustión que libera a comparación del gas natural o la del petróleo. Por este motivo muchas industrias se han enfocado en el desarrollo de patentes utilizando este tipo de gas. [3]

Uno de los prototipos relacionados con el hidrógeno que está en auge es el desarrollo de pilas de combustible de acuerdo con un estudio [4] reconoce que las celdas de combustible son una importante fuente de energía renovable y no renovables con un gran potencial para el desarrollo de nueva tecnología que reduzcan notoriamente la contaminación del aire siendo así la nueva tendencia del futuro. Durante las últimas décadas las pilas de combustible [5] han surgido como una tecnología preferida para el transporte de automóviles y la generación de energía porque es compacta, limpia, algunas con temperaturas de trabajo menores a $100\text{ }^\circ\text{C}$, permite una salida de potencia ajustable y puede comenzar con relativa rapidez. El hidrógeno se suministra en el ánodo y el aire se suministra en el cátodo produciéndose así energía. Por este motivo es importante la investigación de este tipo de fuente de energía que brinda grandes beneficios a la ingeniería y sobre todo al cuidado del medio ambiente.

1.5 Fundamento teórico

1.5.1 Energía

La energía dentro del campo científico se puede definir como la capacidad que poseen todos los cuerpos para poder realizar un trabajo. La energía posee multitud de formas de presentar se: cinética, nuclear, eléctrica, química, de campo magnético etc.

1.5.2 Química

La química es una de las ciencias más antiguas que han estado presente en la naturaleza del ser humano, ayudando a comprender fenómenos básicos como el fuego, los metales y el descubrimiento de nuevas tecnologías. Esta ciencia estudia la estructura, las propiedades y la transformación de la materia. El núcleo de esta ciencia son las reacciones químicas donde se estudia los cambios producidos por la energía en los elementos y las leyes que rigen dichas transformaciones. [6]

1.5.3 Electroquímica

La electroquímica se puede considerar como una de las ramas de la química en la que se encuentran relacionadas las reacciones químicas, electricidad y la metalurgia. Con ayuda de las reacciones químicas se puede producir electricidad o viceversa. Estos procesos se llevan a cabo mediante reacciones redox las cuales liberan energía convirtiéndose en electricidad o al contrario se utiliza energía eléctrica para producir reacciones químicas no espontáneas. [6]

La mayoría de este proceso se lleva a cabo en celdas electroquímicas, por ejemplo:

- **Celdas electrolíticas:** Se produce una reacción química no espontánea con ayuda de una fuente externa de electricidad.
- **Celdas voltaicas:** La reacción química es espontánea sin ayuda de agentes externos produciendo así energía eléctrica.

1.5.4 Celdas electrolíticas

El sistema general de una celda electrolítica se puede observar en la Figura 1.1:

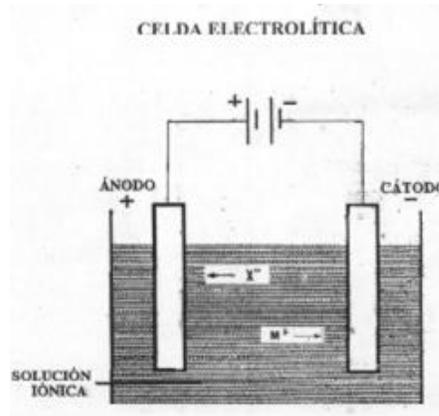


Figura 1.1 Esquemmatización de una celda electrolítica. [6]

Está constituida de un recipiente con los materiales de reacción y los electrodos que son elementos donde se produce la reacción y oxidación. Este tipo de electrodos dentro del sistema se les conoce como: ánodo es el electrodo donde se produce la oxidación y cátodo es donde se produce la reducción. [6]

1.5.5 Pilas de combustible

Las pilas de combustibles son aparatos electroquímicos cuya finalidad es producir energía eléctrica a partir de energía química. Es un dispositivo que genera electricidad de forma más amigable con el medio ambiente y sobre todo con alta eficiencia comparada con otro tipo de pilas. Este tipo de elementos está conformado por dos electrodos ánodo y cátodo que se encuentran separados por una membrana o electrolito donde se produce el intercambio de iones. Su funcionamiento principal es la oxidación del hidrogeno que se utiliza como combustible y la reducción del oxígeno que actúa como oxidante produciéndose así energía y calor. A comparación con las baterías este tipo de pilas puede alimentarse continuamente con el combustible y proporcionar una potencia eléctrica de forma indefinida [7]

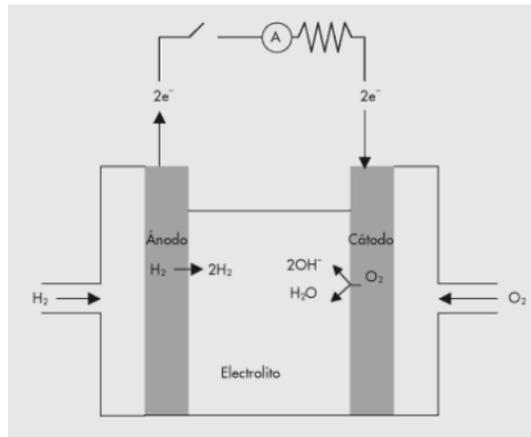


Figura 1.2 Diagrama de pila de combustible. [8]

1.5.5.1 Características generales de las pilas de combustible

Uno de los puntos fundamentales que poseen estas pilas es su transformación directa de energía química a energía eléctrica, es un proceso que solo conlleva un paso en comparación a los procesos térmicos tradicionales que tienen que pasar por diferentes etapas, de energía química a energía térmica después a mecánica y por último a energía eléctrica. [9] [10]

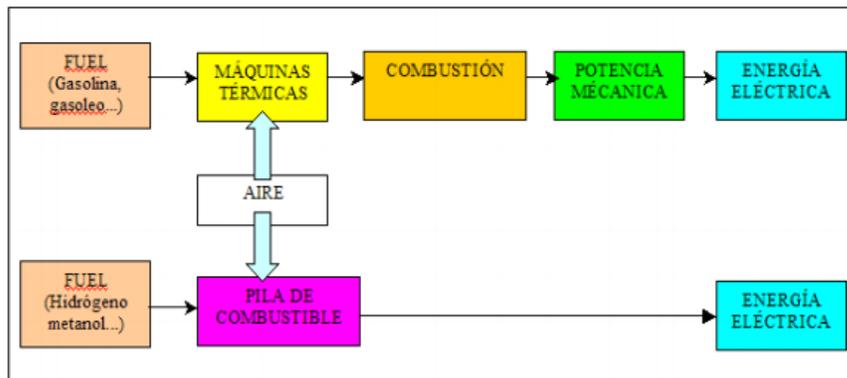


Figura 1.3 Esquemmatización combustión térmica y pilas de combustible. [9]

Aspectos importantes de las pilas de combustibles:

- **Respetuosas con el medio ambiente.** El uso de combustibles utilizados en estas pilas tiene un menor impacto medioambiental como es el caso del hidrogeno que

es el más utilizado en este tipo de elementos. Produciendo menor contaminantes en comparación con los generadores eléctricos habituales.

- **Alta eficiencia.** Debido a su transformación directa de energía electroquímica en energía eléctrica se pueden alcanzar rendimientos del 40 al 60% y este rendimiento puede aumentar hasta el 85% si se produce una cogeneración.
- **Facilidad de posición.** Al carecer de partes móviles este tipo de pilas son silenciosas y facilita mucho su instalación en diversas áreas, ya que no producen contaminación acústica. También al tratarse de elementos modulares se pueden ajustar a las necesidades requeridas aumentando o disminuyendo el número de módulos.
- **Diversidad de combustibles.** Se puede utilizar como combustible cualquier tipo de mezcla que pueda ser oxidado en el proceso del trabajo de la pila. Usualmente se consume hidrógenos, hidrocarburos o alcoholes.

1.5.5.2 Funcionamiento de las pilas de combustibles

El principal fundamento que utiliza este tipo de pilas es la reacción contraria al hidrolisis, como ya se mencionó antes, el primer paso se produce en el ánodo donde se lleva a cabo la oxidación catalítica del hidrógeno y en el cátodo se produce la reducción del oxígeno entonces entre estos electrodos se produce una diferencia de potencia. Esta potencia es aprovechada gracias al electrolito o membrana que se encuentra entre los dos electrodos. Trasladando esta potencia por un circuito externo y aprovechando así su energía.

De forma general las pilas de combustible están constituidas de celdas individuales conectadas entre sí. En las celdas es donde se produce el flujo de electrones y el número de estas dependerá mucho de la tensión total que se desee.

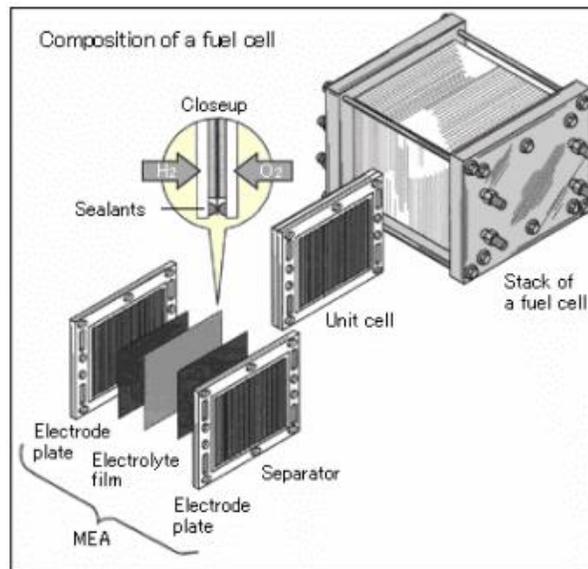


Figura 1.4 Composición de una pila de combustible. [11]

Las celdas están constituidas por dos placas bipolares en los bordes de la pila por donde se incorpora el combustible y el oxígeno también cuentan con conductos especiales para la salida de los productos de la reacción y elementos restantes no reaccionados en el proceso.

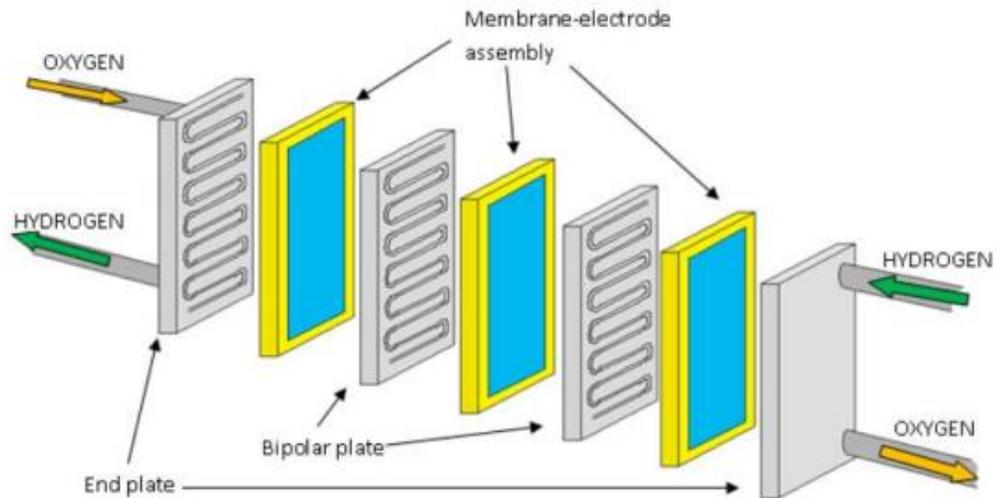


Figura 1.5 Componentes de una pila de combustible. [11]

En el interior se encuentra el ánodo y el cátodo cada uno se halla equipado de un elemento catalizador, el hidrogeno se oxida descomponiéndose en protones y electrones. El proceso de oxidación del combustible está dado por la siguiente formula: [11]



El ánodo envía los protones al cátodo mediante una membrana que se encuentra entre los dos electrodos que funciona como medio conductor de iones y a la vez los electrones circulan atreves del circuito eléctrico. Produciéndose así la reacción de reducción que corresponde con la siguiente ecuación [11]



Las pilas de combustibles por lo general se basan mucho en el uso de oxígeno y el hidrogeno sus reacciones van a depender mucho de los electros y del tipo de pila que se utilice como se puede observar en la siguiente tabla.

Tipo de pila de combustible	Reacción en el ánodo	Reacción en el cátodo
AFC	$H_2 + 2(OH)^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2(OH)^-$
PEMFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
PAFC	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
MCFC	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$
SOFC	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$	$\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$

Tabla 1.1 Raciones de las pilas de combustible. [12]

1.5.6 Tipos de pilas de combustible

La clasificación de las pilas de combustible se puede catalogar dependiendo del tipo del oxidante que se emplee o según la necesidad del tipo de membrana o electrolito ya que esta define el rango de temperatura que puede trabajar la pila de combustible. Según el tipo de membrana se pueden clasificar de la siguiente manera:

1.5.6.1 Pila de combustible alcalina (AFC)

Las pilas de combustible alcalina principalmente usan un electrolito de hidróxido de potasio (KOH) en una concentración del 85% del peso operando así a una temperatura de 250 °C la concentración de potasio definirá la variación de temperatura del sistema, si la concentración se encuentra alrededor del 35 a 50% en peso se producirán temperaturas bajas de 120°C. [9]

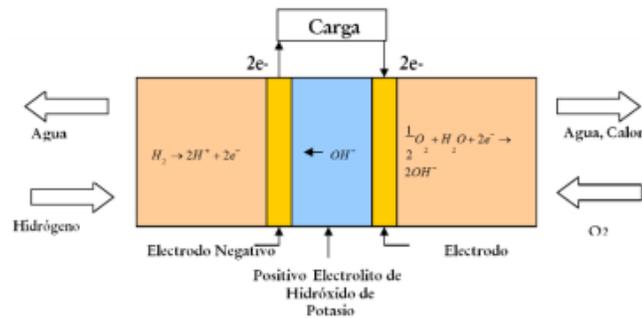


Figura 1.6 Diagrama del funcionamiento de pila AFC. [13]

Ventajas.

Desempeñan un gran funcionamiento en la utilización de hidrogeno (H_2) y oxigeno (O_2) a diferencia de los diferentes tipos de pilas de combustible y sobre todo a destacar su rápida reacción catódica que ayuda a la producción de corriente. Utiliza una gran variedad de catalizadores como níquel, óxidos metálicos y metales nobles [7]

Desventajas

El tipo de electrolito utilizado en esta pila es muy sensible al CO_2 por lo cual requiere concentraciones de hidrogeno muy puras y de oxígeno purificado para un adecuado funcionamiento. Debido a que la presencia de CO_2 deterioraría de forma muy rápida la membrana, pero su mayor desventaja es el tamaño y el costo del sistema [7]

1.5.6.2 Pilas de membrana polimérica (PEMFC)

La pila de membrana polimérica como su propio nombre la describe está constituida por un electrolito de polímero de ácido sulfónico fluorado, comercialmente conocido como Nafion. La cual ayuda a traspasar los protones liberados en el ánodo al cátodo. Uno de los subproductos obtenidos por este sistema es el agua y es fundamental en este tipo de membranas ya que requiere estar hidratada para conseguir un buen rendimiento por eso es importante que la pila trabaje en condiciones donde el agua no se evapore más rápido de lo que se produce. Trabaja a temperaturas menor de 100°C normalmente alrededor de 70 a 80°C [10]

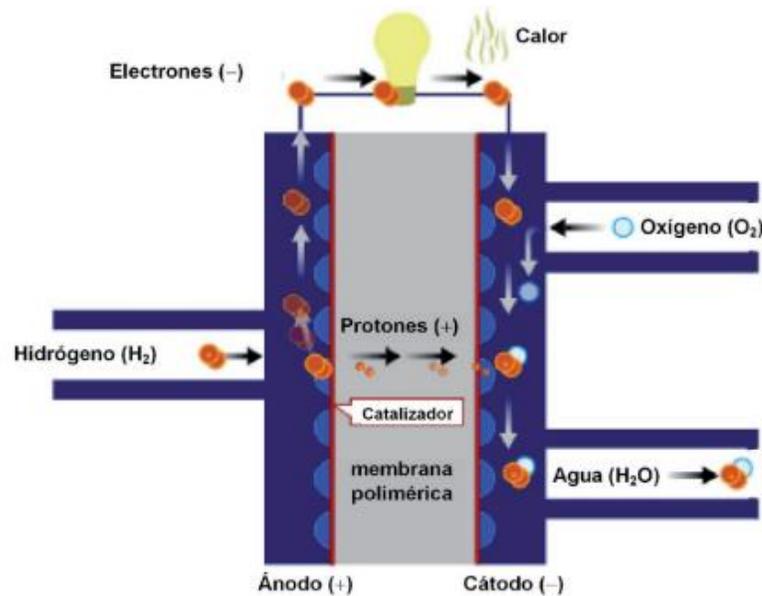


Figura 1.7 Esquemización del funcionamiento de una pila PEMFC. [14]

Ventajas

La principal ventaja es su fabricación es más sencilla a comparación con las otras pilas de combustible, no tiene problemas de corrosión ya que el único líquido que se genera o utiliza es el agua. Puede alcanzar altas densidades de corriente utilizando menor peso, volumen y sobre todo costo a comparación de las diferentes pilas de combustibles. Se puede utilizar aire sin problema en como oxidante porque la producción del dióxido de carbono no deteriora la membrana [7]

Desventajas

Necesita una alta cantidad de catalizador, un diseño adecuado para equilibrar la hidratación de la membrana sin inundar el electrolito o sin llegar a secarla. Son sensibles a la contaminación por azufre y amoníaco [7]

1.5.6.3 Pilas de combustible de ácido fosfórico H₃PO₄ (PAFC)

El electrolito en este tipo de pilas es 100% ácido fosfórico con una matriz de carburo de silicio. Suele trabajar en rangos de temperaturas de 150 a 220°C debido a que el ácido fosfórico es un iónico pobre en bajas temperaturas. Se puede conseguir una eficiencia del 80% utilizando el vapor de agua producido [15]

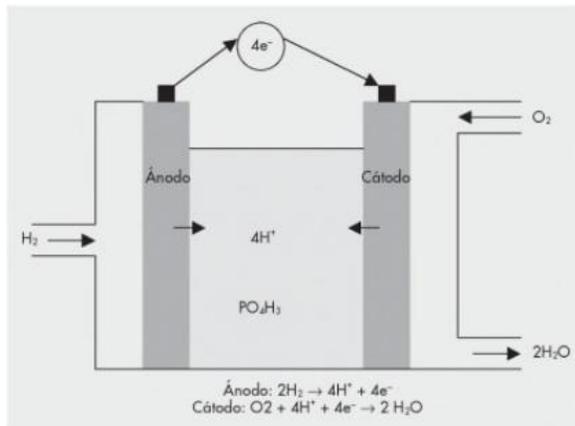


Figura 1.8 Pila de combustible de ácido fosfórico. [8]

Ventajas

Las pilas de combustible de ácido fosfórico resisten de mejor manera a las presencias de CO en el sistema en comparación con las pilas de combustible alcalinas (AFC). Se utiliza el calor residual en aplicaciones de cogeneración [7]

Desventajas

Al tratarse el ácido fosfórico de un material altamente corrosivo degrada de forma más rápida la vida útil de la pila, para evitar esto se utiliza materiales costosos para reducir la corrosión. Se necesita un combustible puro para evitar que las impurezas presentes en el sistema [7]

1.5.6.4 Pila de combustible de carbonato fundido (MCFC)

Esta pila está conformada por un electrolito de una combinación de carbonatos alcalinos los cuales se encuentran incrustados en una matriz cerámica de aluminato de litio (LiAlO_2). Este sistema no requiera el platino como en la mayoría de las pilas de combustible ayudando así a reducir el costo de fabricación. Los electrodos están conformados por Ni en el caso del ánodo y de NiO el caso del cátodo. Normalmente este tipo de sistemas trabaja en un rango de temperaturas entre 600°C y 700°C . La eficiencia de es muy parecida a de las pilas PAFC ya que puede alcanzar el 80% con cogeneración [12]

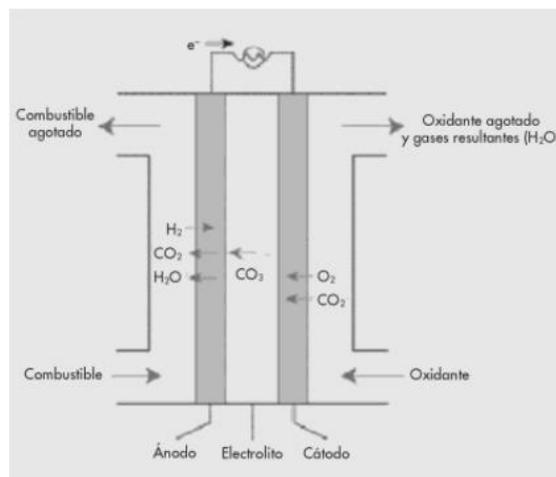


Figura 1.9 Funcionamiento de una pila de combustible de carbonato fundido.

Ventajas

Este tipo de pilas utiliza níquel en los electrodos proporcionando así una mejora actividad del sistema y evitando el uso de electrolizadores muy costosos como es el caso del Platino. [7]

Desventajas

Un punto desfavorable es este tipo de pilas es su alta temperatura que produce esto afecta mucho a la estructura de la pila y la vida útil de esta. Se produce mucha corrosión dentro del sistema por lo cual se necesita níquel y acero inoxidable de alta calidad. [7]

1.5.6.5 Pila de combustible de óxidos sólidos (SOFC)

Su electrolito está elaborado por un óxido metálico sólido no poroso el cual está conformado de óxido de zirconio (ZrO_2) y consolidado con óxido de itrio (Y_2O_3). Este tipo de pilas trabaja con temperaturas entre los 600 a 1000 °C. Sus electrodos están fabricados por materiales compuestos la combinación metales y cerámicos. [9]

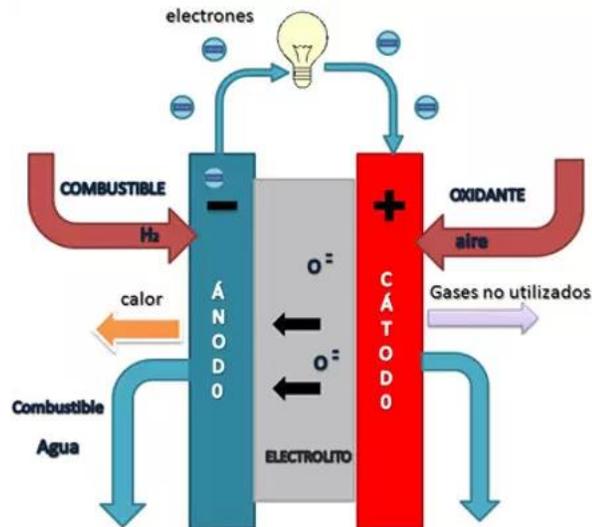


Figura 1.10 Funcionamiento de una pila. [10]

Ventajas

Al utilizarse un electrolito sólido facilita mucho el diseño de este tipo de pilas las cuales pueden tener varias formas las más comunes son planas, tubulares o monolíticas. Su fabricación es más económica y su alta producción de temperaturas permite aprovechar el calor residual para cogeneración y así aumentar la eficiencia del sistema. [7]

Desventajas.

La selección de materiales se ve muy limitado debido a las altas temperaturas a las cuales trabaja hay que escoger material adecuado que soporte dichas temperaturas y evitar también la corrosión producida en los materiales metálicos de la pila. [7]

A continuación, se puede observar en la tabla 1 con los diferentes tipos de pilas de combustible que existen con sus características principales y tipo de electrolito que utilizan ya que esta va depender de su rendimiento.

	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolito	KOH	Polímero	H ₃ PO ₄	Carbonato	Oxido sólido
Combustible	H ₂	H ₂ /CO/CH ₃ OH	H ₂ /CO	H ₂ /CO	H ₂ /CO
Temperatura	80-200 °C	60-120°C	18-210°C	600-700°C	800-1000°C
Eficiencia	50%	40-50%	40-80%	60-80%	65-85%
Aplicaciones	-Área espacial -Área Militar	-Transporte -GEP -GCE	-Transporte -GEP -GCE	-GEP -GCE	-GEP -GCE
Ventajas	-Reacción catódica más rápida -Alto rendimiento	-Baja temperatura -Arenque rápido -Baja corrosión	-Se utiliza H ₂ impuro -Alta eficiencia	-Alta eficiencia -Flexibilidad combustible	-Alta eficiencia -Flexibilidad combustible
Desventajas	-Reactivos caros necesita -Gases sin CO ₂	-Alta pureza combustible -Hidratación -Alto contenido en platino	-Electrolito corrosivo -Sistema voluminoso	-Altas temperaturas	-Dos flujos de gases -Altas temperaturas

Tabla 1.2 Características de las pilas de combustión. [9]

1.5.7 Dinámica de fluidos computacional

La dinámica de fluidos computacional (CFD) es una técnica que utiliza la mecánica de fluidos mediante el uso de computadoras y métodos numéricos para resolver problemas físicos, por ejemplo: transferencia de calor, reacciones químicas, movimientos de fluidos, etc. Es una herramienta en la que se engloba varias disciplinas como matemáticas, programación de ingeniería. Se puede obtener predicciones cuantitativas o cualitativas usando este método [16]

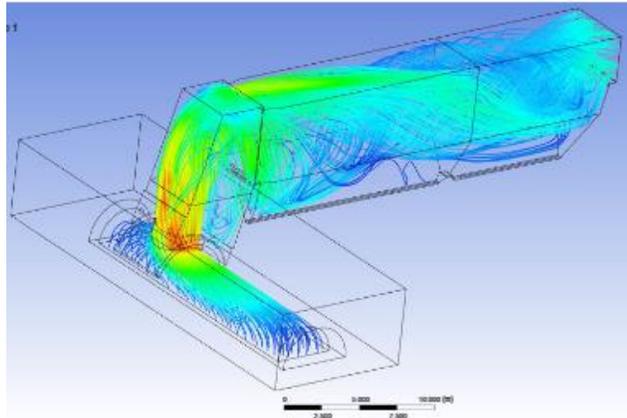


Figura 1.11 Ejemplo de simulación CFD. [17]

1.5.8 Ecuaciones de Navier – Stokes

Este tipo de ecuaciones juegan un valor muy importante en el estudio de los fluidos, gases y movimiento de los líquidos. Son los pilares fundamentales de la mecánica de fluidos computacionales. Elaborados y desarrolladas por el francés Claude-Lois y el irlandés George Stokes. La obtención de estas formula se basan sobre todo en el comportamiento dinámico de los fluidos es gobernado por las siguientes ecuaciones: [18]

- La conservación de la masa o ecuación de continuidad
- La conservación del momento cinético o de la cantidad del movimiento.
- La conservación de la energía.

Ecuación de movimiento:

$$\frac{Dp}{Dt} + p \frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0$$

Ecuación de movimiento:

$$p \frac{\partial U_i}{\partial X_i} + p U_i \frac{\partial U_i}{\partial X_i} = \frac{\partial P}{\partial X_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial X_i} + p g_i$$

Donde:

$$\tau_{ij} = -u \left(\frac{\partial U_j}{\partial X_i} + \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} u \frac{\partial U_k}{\partial X_k}$$

Ecuación de energía:

$$\rho C_u \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_u U_i \frac{\partial T}{\partial X_i} = -P \frac{\partial U_i}{\partial X_i} + \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial X_i^2} - \tau_{ij} \frac{\partial U_j}{\partial X_i}$$

En la última ecuación se puede observar los siguientes términos el primero representa el cambio de energía local con el tiempo, el siguiente es el término conectivo, tercero es el que corresponde al trabajo de presión, conjuntamente con el término de difusión de calor y por último la transferencia irreversible de energía mecánica en calor. [19]

1.5.9 Estructura de dinámica de fluidos computacional

Para la solución de un problema mediante el uso de dinámica de fluidos computacionales siguen tres pasos fundamentales. Pre-procesador, procedimiento o solver y post-procesado.

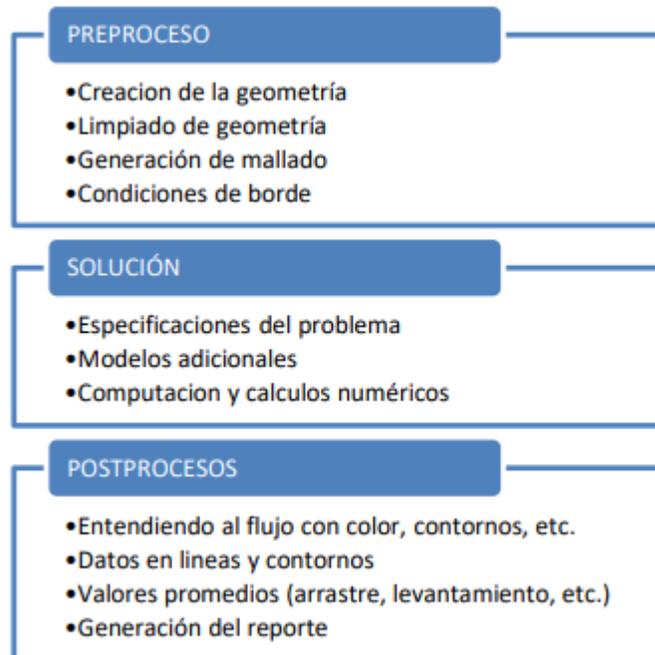


Figura 1.12 Pasos para el proceso CFD. [20]

1.5.10 Mallado

El mallado representa un conjunto de nodos que se sitúan alrededor del modelo que se va analizar. A la unión de estos nodos se les conoce como malla superficial las cuales podrán ser triángulos, cuadriláteros o una mezcla de ambos. A medida que se van creando las superficies estas crearan una malla de volumen que estará conformada de tetraedros, hexaedros, pentagonales. Para obtener resultados más acordes a la realidad lo que se hace es refinar la malla produciendo un mayor número de elementos.

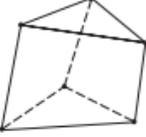
Tipo de elemento	Ninguno	Forma	Número de nodos	Aplicaciones
Superficie	Cuadrilátero de 4 nodos		4	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión
	Cuadrilátero de 8 nodos		8	Esfuerzo o deformación plana, placa plana o cascarón en flexión
	Triangular de 3 nodos		3	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión. Preferible cuadriláteros donde sea posible. Usado para transiciones de cuadriláteros
	Triangular de 6 nodos		6	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, placa plana o cascarón en flexión. Preferible cuadriláteros donde sea posible. Usado para transiciones de cuadriláteros
Sólido ^T	Hexagonal de 8 nodos (paralelepípedo o ladrillo)		8	Sólido, placa gruesa
	Pentagonal de 6 nodos (cuña)		6	Sólido, placa gruesa. Usado para transiciones
	Tetraedro de 4 nodos (tetra)		4	Sólido, placa gruesa. Usado para transiciones

Figura 1.13 Tipo de elementos 2D y 3D. [21]

1.5.11 Tipos de malla

Existen dos tipos de malla esta va a depender mucho del modelo que se vaya a analizar.

1.5.11.1 Malla estructural.1

Este tipo de malla son elemento que se encuentran situados de una forma más ordenadas se utiliza en modelos sencillos. Una de sus desventajas es la acumulación de elementos en zonas que no son de interés de estudio. Estas se pueden su clasificar en tres tipos: malla tipo O, tipo C o tipo H. Este tipo de mallas se utiliza en métodos de elementos finito. [20]

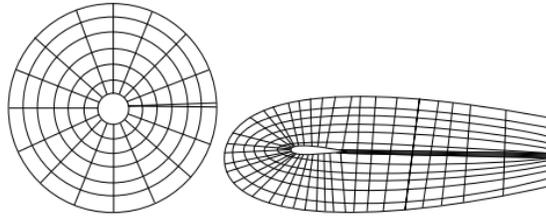


Figura 1.14 Mallas estructurales tipo o y tipo C. [20]

1.5.11.2 Malla no estructural

Este tipo de malla como su nombre indica no tiene una estructura definida es óptima para geometrías complejas se adapta en superficies con forma muy irregulares. Se utiliza mucho en método de volúmenes finitos. Una gran ventaja es el reducido tiempo que necesita la computadora para realizar la malla en comparación con una malla estructural [20].

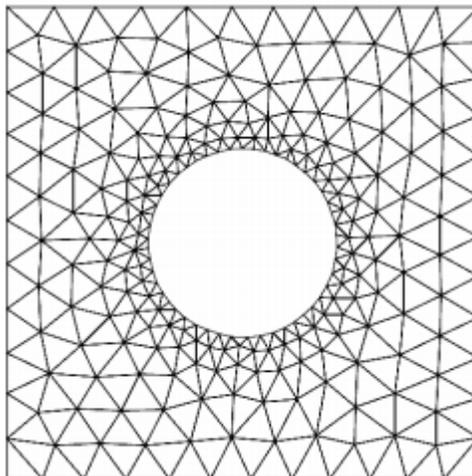


Figura 1.15 Ejemplo de una malla no estructurada. [20]

1.5.12 Métrica de malla

Para tener una evaluación de malla, para el método CFD es importante conocer y utilizar la métrica de Skewness que posee una serie de datos que nos informa de la calidad de mallado que se genera en un objeto o elemento. En la siguiente imagen se puede observar el rango de calidad de malla. [20]



Figura 1.16 Métrica de Skewness [20]

1.5.13 Software libres y pagados

En el mercado podemos conocer una infinidad de software para el estudio de simulación de diferentes elementos y estudios que se desee realizar en los cuales se puede encontrar software pagos como: Solidworks, Ansys, Inventor los cuales limitan las necesidades del usuario sin tener la posibilidad de modificar o cambiar el código de programación limitándose a las especificaciones y que el fabricante a haya diseñado pero no es un problema mayor debido a que este tipo de software cuenta con gran información para los múltiples estudios que se realizan en ellos sin la necesidad de obtener más recursos. Al contrario de los programas libres que es el caso de Open Fonts, Calculix, Code_Aster entre otros. Estos facilitan al usuario modificar y crear librerías a su necesidad incluso aportando mejoras al software.

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

2.1 Materiales

2.1.1 Materiales Batería de Hidrógeno (Físicos)

- Hidrógeno (H_2)

El Hidrógeno es uno de los elementos con mayor presencia dentro del Universo. Por su capacidad de reacción con el oxígeno se lo considera como un buen combustible.



Figura 2.1 Hidrógeno. [22]

- Electrolito

Uno de los electrolitos más utilizados en las baterías PEMFC es un polímero sólido (membrana). Comercialmente se la conoce como membrana de intercambio PFSA.



Figura 2.2 Membrana de Intercambio. [23]

- Catalizador

Dentro de los catalizadores se encuentra el Platino, siendo este el de principal ocupación.



Figura 2.3 Platino. [22]

- Placas Bipolares

Placas mecanizadas que permiten el flujo de Hidrógeno por sus canales cumpliendo el ciclo requerido. El material utilizado es de grafito.



Figura 2.4 Placas de Grafito [24]

- Electrodo

Placas de cobre cuya función se centra en la recolección de la corriente generada en el proceso.



Figura 2.5 Placas de Cobre [25]

- Tapas

Elementos destinados a la protección de la batería. Puede ser polímero o cualquier material relacionado.



Figura 2.6 Meta crilato [26]

- Tornillos

Destinados a la sujeción de los elementos constitutivos



Figura 2.7 Tornillos [27]

- Tuercas

Destinadas a la sujeción de los elementos constitutivos



Figura 2.8 Tuercas [27]

- Racores

Estos elementos darán la posibilidad de la realización de las conexiones de las tuberías.



Figura 2.9 Racores [28]

- Arandelas

Elementos de apoyo a la sujeción



Figura 2.10 Arandelas [27]

2.1.2 Materiales Virtuales

- Software de simulación

Programa de computación especializado en análisis CFD con el respectivo módulo para baterías del tipo PEMFC

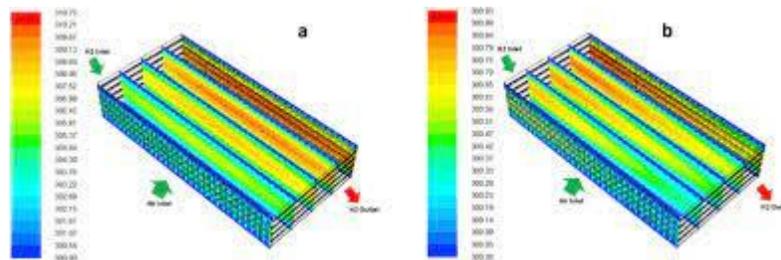


Figura 2.11 Hidrógeno. [29]

- Software de Diseño

Aplicación destinada al modelado y diseño de los elementos constitutivos de la batería, considerando todos los posibles materiales a utilizar.



Figura 2.12 Diseño CAD. [30]

2.2 Métodos

Para el presente trabajo se realizó un diseño de acuerdo a bibliografías de libros o artículos científicos, teniendo en cuenta que la tesis fue enfocada a la simulación, el diseño con el diseño se enfocó en poder observar el fenómeno electroquímico respetando criterios de diseño. El modelado se realizó en un software CAD. Tomando en cuenta ecuaciones REDOX y parte eléctrica [31].

Para la simulación se utilizó el método de volúmenes finitos, siendo este un estudio multifísico es decir contempla, reacciones de combustión, electricidad y estructural con transferencia de calor se opta por ocupar este software [32].

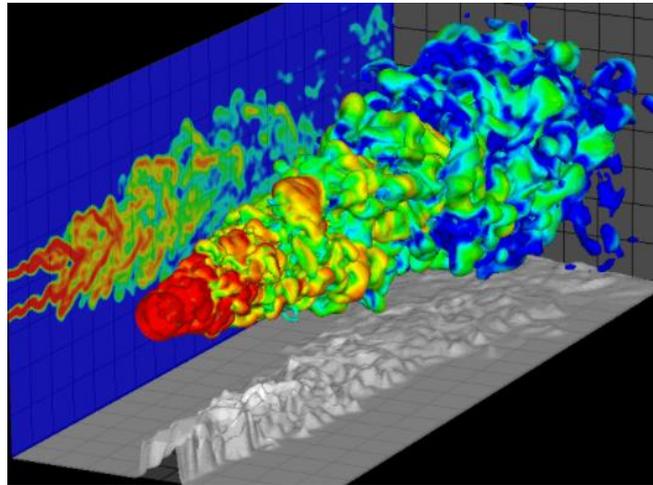


Figura 2.13 Ejemplificación de estudio CFD [32]

Para este estudio se optó por utilizar el método PEMFC que se presenta a continuación:

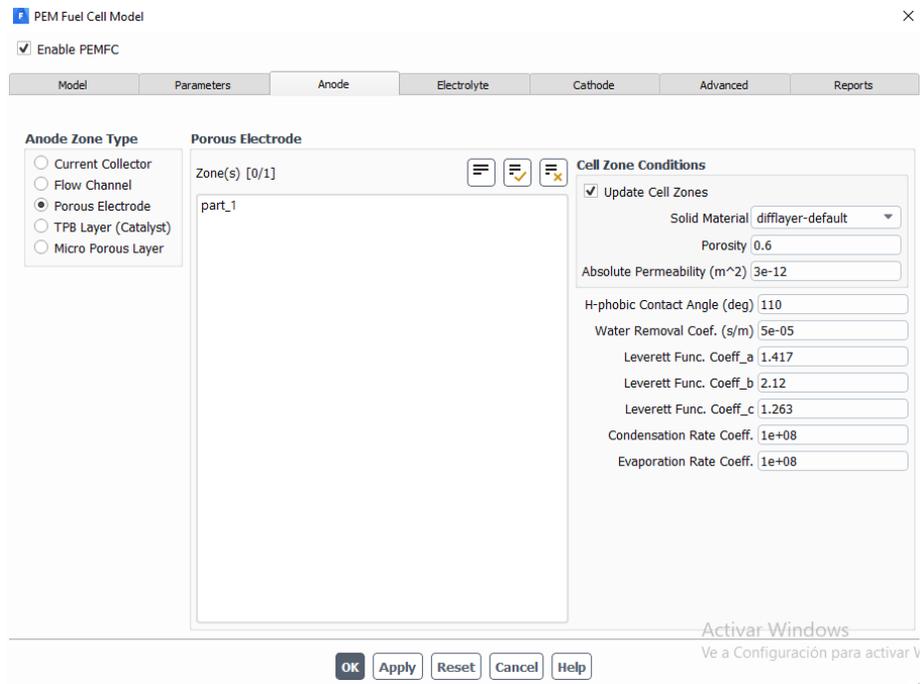


Figura 2.14 Método usado para la simulación. [Autor]

El mismo que nos permite variar valores tanto de flujo másico como de voltaje de oxígeno e hidrógeno/ ánodo o cátodo.

Condiciones de entrada

Para este trabajo experimental se usó las siguientes condiciones:

- Flujo másico de hidrógeno
- Flujo másico de oxígeno
- Voltaje ánodo
- Voltaje cátodo
- Temperatura de salida del ánodo
- Temperatura de salida del cátodo
- Presión de trabajo

Dichos valores se obtuvieron de acuerdo a igualaciones de ecuaciones de estequiometría, partiendo de la delimitación del diseño de la batería que se requiere

Para la validación de resultados se obtuvieron graficas de este tipo:

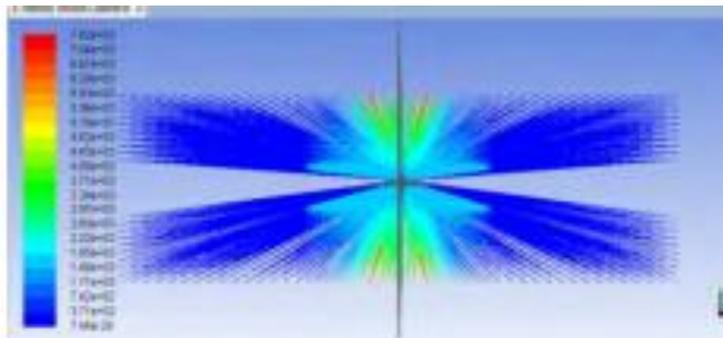


Figura 2.15 Resultados de simulación. [33]

Fueron valores de concentraciones, de flujos de corrientes y más los mismos que serán evaluados de acuerdo a cálculos teóricos buscando al final mediante un análisis estadísticos valores de error relativo y absoluto.

2.2.1 Diseño del Proyecto

La simulación de una batería de hidrógeno, como todas las demás, debe tener su sustento. A partir de lo mencionado, se procedió con el diseño teórico - experimental del modelo considerando tanto requerimientos eléctricos y químicos. Este diseño generó la posibilidad de tener una idea teórica del comportamiento de la batería. Al ser un proyecto de simulación una de las preocupaciones fundamentales radica en la optimización del modelo. Mencionado detalle se realizó con la ayuda de un software CAD con el objetivo de optimizar la simulación y, por lo tanto, obtener resultados con una confiabilidad elevada a lo largo del desarrollo de la simulación.

2.2.2 Enfoque de la Investigación

Al ser un trabajo del tipo cuantitativo como comparativo es necesario que tanto la población y la muestra sean estadísticamente representativas. Por ello, es necesario que este trabajo arroje datos numéricos y criterios de valor. De esta manera se podría comprobar si el comportamiento de la batería es adecuado y cumple con las expectativas. Siendo el enfoque cualitativo uno de los aspectos a tomar en cuenta.

2.2.3 Población y Muestra

Al ser un proyecto netamente computacional, y como se menciona anteriormente, es necesario que los parámetros de la batería (Condiciones de entrada) tengan un rango de variación los cuales nos permitan tener muestras que al ser analizadas sean lo suficientemente concluyentes para a partir de allí emitir cualquier criterio. Al menos es recomendable realizar 5 simulaciones.

2.2.4 Herramientas de Recolección y Procesamiento de Datos

La recolección de los datos tendrá como principal actor a la elaboración de fichas tanto de diseño como de simulación. El principal objetivo de este tipo de recolección de datos es poder generar ilustraciones estadísticas y/o descriptivas que permitan la generación de criterios de aceptación o rechazo. El procesamiento de la información es uno de los pasos muy importantes dentro de toda investigación, aquí se denotará tanto la calidad de información presentada como la validez de la misma.

2.2.5 Métodos

- **Método Comparativo**

El comportamiento de la simulación de la batería de hidrógeno debe ser respaldada mediante alguna comparación del tipo teórica o práctica. Para lo cual, y considerando, la bibliografía es imperativo el hecho de demostrar que el comportamiento del elemento en cuestión es el esperado o por lo menos cumple con el porcentaje de aceptación requerido.

- **Método Bibliográfico**

La recolección, análisis y generación de criterios con base en documentos científicos siempre será de vital importancia en la elaboración de cualquier proyecto. Para lo cual, es aconsejable la utilización de fuentes bibliográficas de alta confianza como los son: Papers, Tesis Doctorales, revistas científicas, entre otros. A partir de allí la información expuesta en el trabajo se podrá decir que es verídica y comprobable.

- **Método Cualitativo**

En el caso de la simulación de la batería de hidrógeno no todos los datos se podrán describir numéricamente (Concentraciones, reacciones químicas) por lo cual y a partir de datos cualitativos (gráficas de contornos) se podrá conocer las características de los ítems en cuestión.

- **Método de Modelación Teórica**

Con la ayuda de softwares de diseño asistido, se procederá con el dimensionamiento de los elementos requeridos y previamente diseñados. Posteriormente, se realizará la simulación sin antes haber pasado por un proceso de optimización, mejoramiento y preparación de la geometría.

2.2.6 Detalles de la simulación

- **Procedimiento computacional del PEMFC**

En esta ocasión se usa el método PEMFC (Pilas de combustible de membrana de intercambio de protones) mismo que ayuda en específico a este tipo de experimentos, módulo hecho idóneamente para este tipo de casos.

Con el modelo de pila de combustible y electrólisis, tanto el límite de la triple fase (TPB), también conocido como la capa de catalizador, como el electrolito conductor iónico (también conocido como la membrana en la terminología PEMFC) se incluyen en el dominio computacional. El módulo Celda de combustible y electrólisis le permite modelar PEMFC, SOFC y electrólisis de alta temperatura. Para determinar los dominios físicos que se incluyen en el módulo Celda de combustible y electrólisis, se muestra un esquema de una celda de combustible de membrana de electrolito polimérico

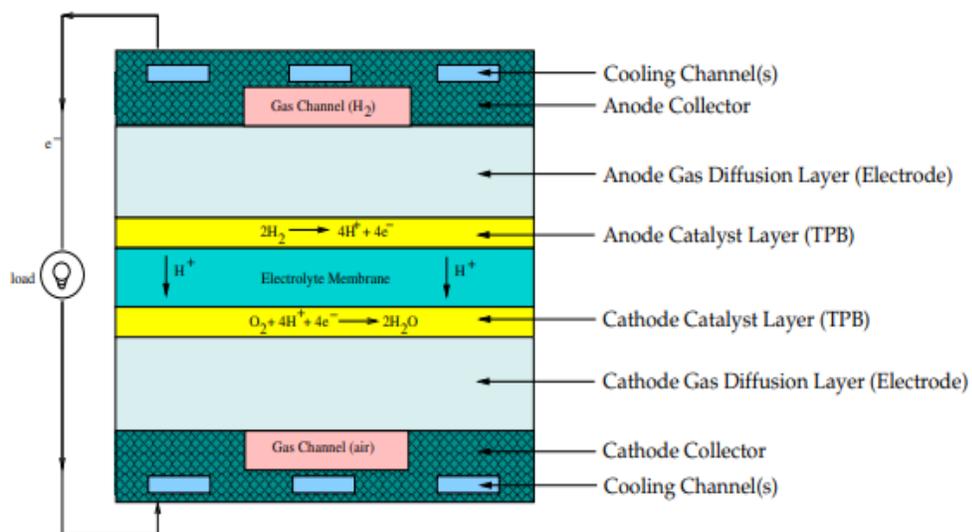


Figura 2.16 Esquema del PEMFC.

El hidrógeno fluye hacia la celda de combustible en el lado del ánodo. Se difunde a través de las capas de difusión de gas poroso y entra en contacto con la capa de catalizador. Aquí forma iones de hidrógeno y electrones. Los iones de hidrógeno se difunden a través de la membrana de electrolito de polímero en el centro, los electrones fluyen a través de la capa de difusión de gas hacia los colectores de corriente y hacia la carga eléctrica adjunta. Los electrones ingresan al lado del cátodo a través de los colectores de corriente y la capa de difusión de gas. En la capa de catalizador en el lado del cátodo, los electrones, los iones de hidrógeno y el oxígeno se combinan para formar agua.

En el modelo de pila de combustible y electrólisis a usarse, se resuelven dos campos de potencial eléctrico. Un potencial se resuelve en el electrolito y la capa de catalizador TPB. El otro se resuelve en la capa de catalizador TPB, el electrodo poroso y los colectores de corriente.

La velocidad de las reacciones electroquímicas se calcula en las capas de TPB tanto en el ánodo como en el cátodo. Según el voltaje de celda que prescribe, se calcula el valor de densidad de corriente.

2.2.7 Diagrama de proceso de diseño

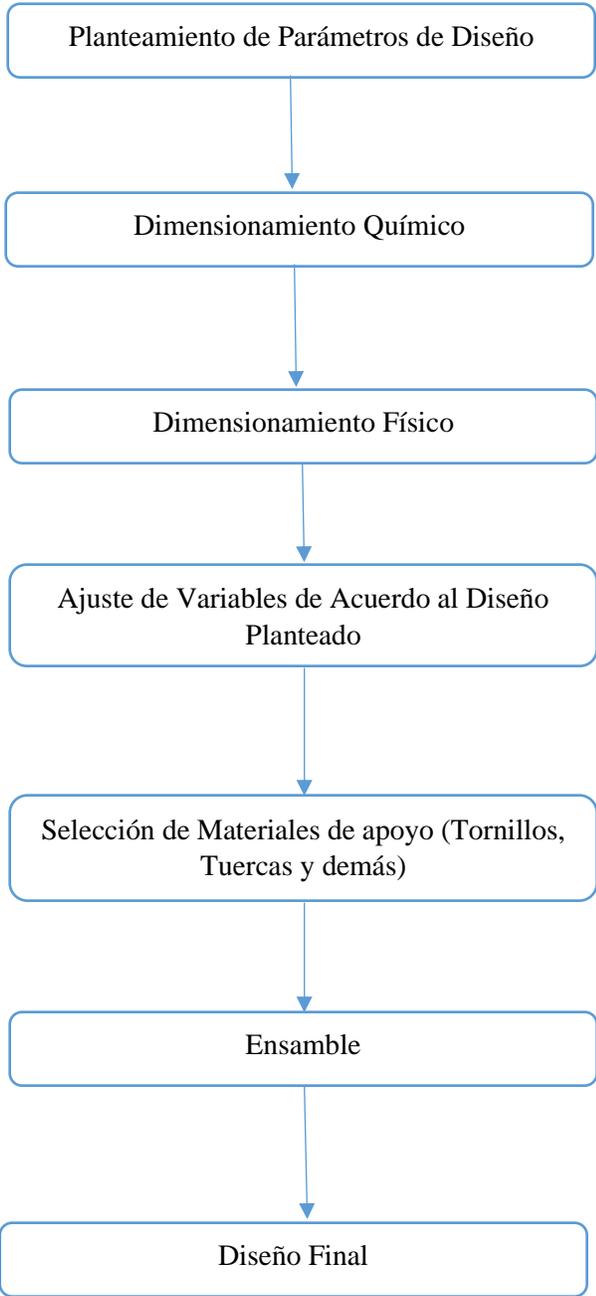


Figura 2.17 Diagrama del proceso de simulación. [Autor]

2.2.8 Diagrama de proceso de modelado

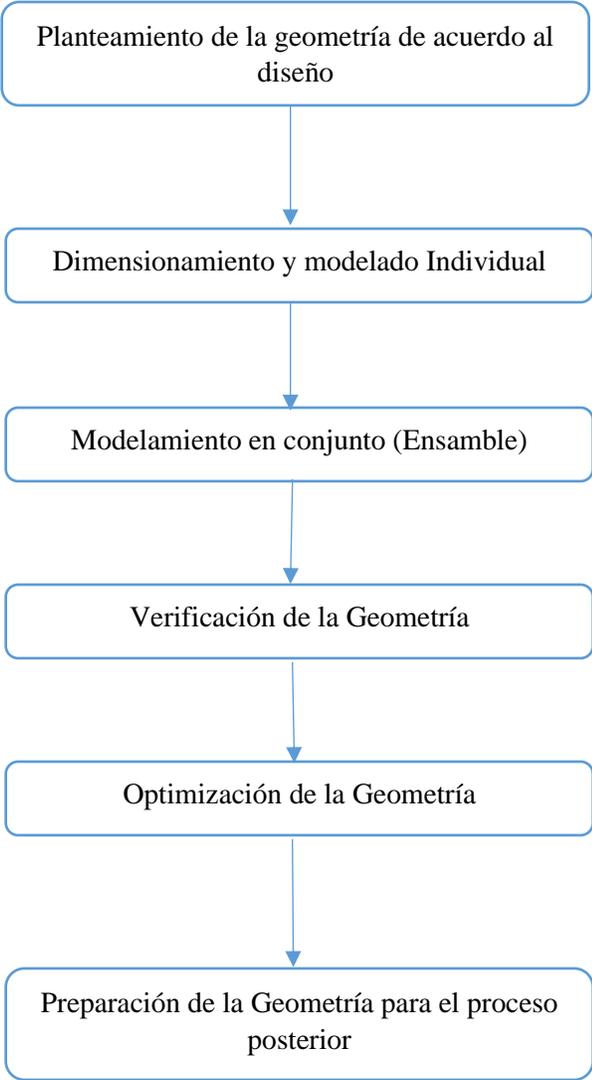


Figura 2.18 Diagrama del proceso de simulación. [Autor]

2.2.9 Diagrama de proceso de simulación

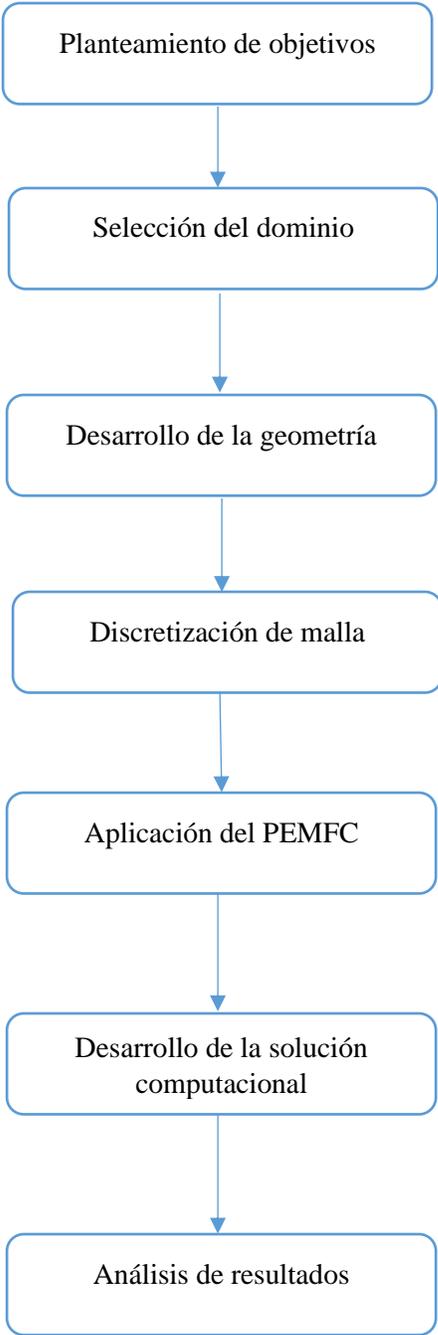


Figura 2.19 Diagrama del proceso de simulación. [Autor]

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Selección de alternativas

Factores de Relevancia destinados a la discriminación de alternativas.

Para la selección de la mejor alternativa se han planteado factores los cuales están estrictamente relacionados con el funcionamiento de la batería. En el diseño de la batería influyen cada uno de ellos.

1. **Eficiencia:** Capacidad de cumplimiento de la tarea a la cual fue destinada.
2. **Temperatura:** Temperatura generada en el proceso de funcionamiento de la batería.
3. **Aplicaciones:** Campos en los cuales pueden ser utilizadas las baterías (Transporte, Militar, Espacial, entre otras)
4. **Electrolito:** Electrolito utilizado por parte de la batería en su funcionamiento.

3.1.1 Alternativas propuestas para el desarrollo del trabajo de investigación.

Alternativa 1.

Pila de combustible alcalina (AFC)

Las pilas de combustible alcalina principalmente usan un electrolito de hidróxido de potasio (KOH) en una concentración del 85% del peso operando así a una temperatura de 250 °C.

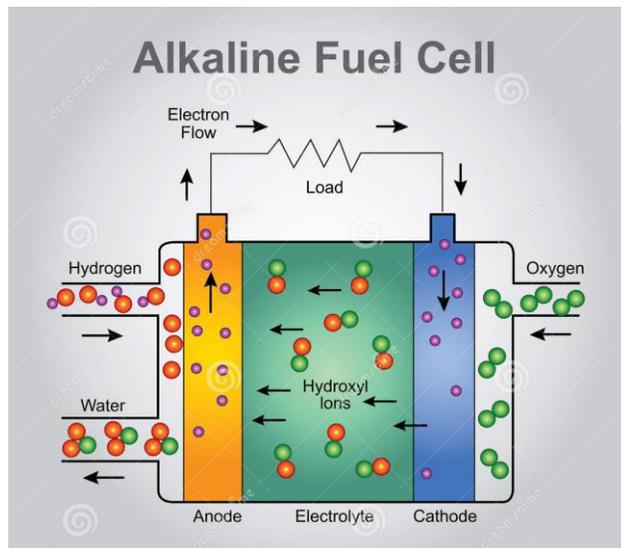


Figura 3.1 Esquema de celda alcalina.

Alternativa 2.

Pilas de membrana polimérica (PEMFC).

La pila de membrana polimérica como su propio nombre la describe está constituida por un electrolito de polímero de ácido sulfónico fluorado, comercialmente conocido como Nafion. La cual ayuda a traspasar los protones liberados en el ánodo al cátodo.

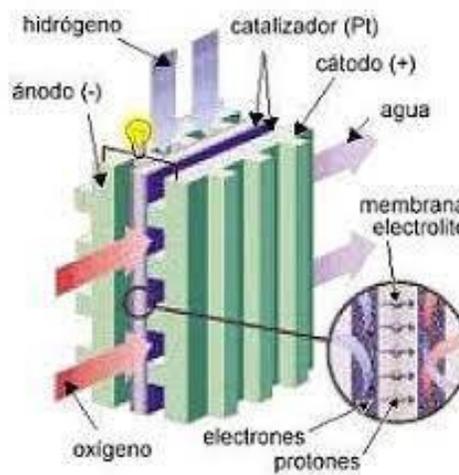


Figura 3.2 Esquema de celda PEMFC.

Alternativa 3.

Pilas de combustible de ácido fosfórico H₃PO₄ (PAFC)

El electrolito en este tipo de pilas es 100% ácido fosfórico con una matriz de carburo de silicio. Suele trabajar en rangos de temperaturas de 150 a 220°C.

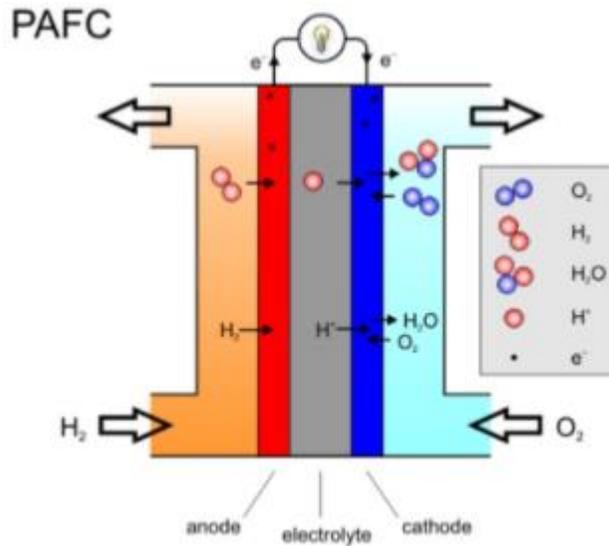


Figura 3.3 Esquema de PAFC.

Alternativa 4.

Pila de combustible de carbonato fundido (MCFC)

Esta pila está conformada por un electrolito de una combinación de carbonatos alcalinos los cuales se encuentran incrustados en una matriz cerámica de aluminato de litio (LiAlO₂). Este sistema no requiere el platino como en la mayoría de las pilas de combustible ayudando así a reducir el costo de fabricación.

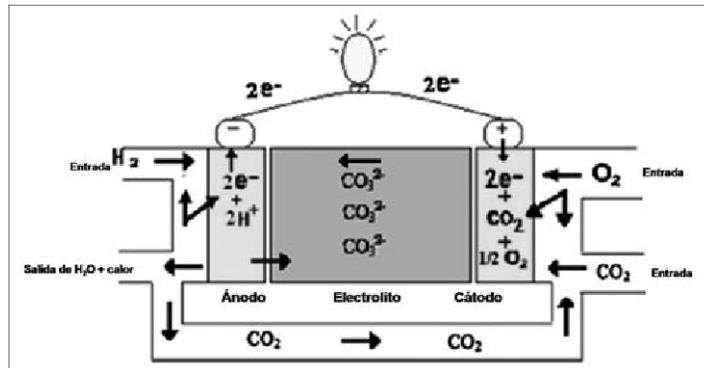


Figura 3.4 Esquema de MCFC.

Alternativa 5.

Pila de combustible de óxidos solidos (SOFC)

Su electrolito está elaborado por un óxido metálico sólido no poroso el cual está conformado de óxido de zirconio (ZrO_2) y consolidado con óxido de itrio (Y_2O_3). Este tipo de pilas trabaja con temperaturas entre los 600 a 1000 °C.

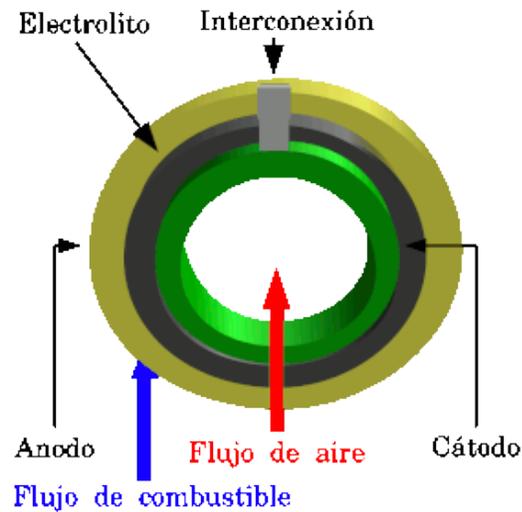


Figura 3.5 Esquema de SOFC.

3.1.2 Elección de Alternativas.

Con fundamento en el método "ordinal corregido de criterios ponderados", se propone la obtención de un resultado característico, instituyendo un peso a cada criterio determinado con anterioridad. Para ello se establece:

<i>Criterio</i>	<i>Características</i>
0	Criterio o solución de las filas superior o más importante que el de las columnas.
0,5	Criterio de filas es equivalente al de las columnas
1	Criterio de la fila inferior al de la columna

Tabla 3.1 Criterio de evaluación para las alternativas. [Autor]

La Tabla 3.2, señala las alternativas planteadas para la selección y diseño del proyecto a desarrollarse. De la Tabla 3.3 a la Tabla 3.7, se denota la discriminación de las alternativas de acuerdo con cada uno de los criterio y pesos establecidos anteriormente. Todo esto con el objetivo de determinar la mejor alternativa de aplicación, lo que finalmente se muestra en la tabla 3.8.

<i>Alternativa 1</i>	Pila AFC
<i>Alternativa 2</i>	Pila PEMFC
<i>Alternativa 3</i>	Pila PAFC
<i>Alternativa 4</i>	Pila MCFC
<i>Alternativa 5</i>	Pila SOFC

Tabla 3.2 Alternativas. [Autor]

<i>Criterio</i>	<i>Eficiencia</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Aplicaciones</i>	<i>Electrolito</i>	$\Sigma+I$	<i>Ponderación</i>
<i>Eficiencia</i>		0.5	1	0.5	3	0.3
<i>Temperatura</i>	0		0.5	0.5	2	0.2
<i>Aplicaciones</i>	0.5	0.5		0.5	2.5	0.25
<i>Electrolito</i>	0.5	0.5	0.5		2.5	0.25
<i>Suma</i>					10	1

Tabla 3.3 Evaluación de criterios. [Autor]

<i>Eficiencia</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	<i>Alternativa 4</i>	<i>Alternativa 5</i>	$\Sigma+I$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		0,5	0	0	0	1,5	0,158
<i>Alternativa 2</i>	0,5		0,5	0	0	2	0,211
<i>Alternativa 3</i>	0	0		1	1	3	0,316
<i>Alternativa 4</i>	0	0	0		1	2	0,211
<i>Alternativa 5</i>	0	0	0	0		1	0,105
<i>Suma</i>						9,5	1

Tabla 3.4 Evaluación de las alternativas según eficiencia. [Autor]

<i>Temperatura</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	<i>Alternativa 4</i>	<i>Alternativa 5</i>	$\Sigma+I$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		1	1	1	1	5	0,278
<i>Alternativa 2</i>	0		0	0	0	1	0,056
<i>Alternativa 3</i>	1	1		0	0	3	0,167
<i>Alternativa 4</i>	1	1	1		0	4	0,222
<i>Alternativa 5</i>	1	1	1	1		5	0,278
<i>Suma</i>						18	1

Tabla 3.5 Evaluación de las alternativas según temperatura. [Autor]

<i>Aplicaciones</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	<i>Alternativa 4</i>	<i>Alternativa 5</i>	$\Sigma+I$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		1	1	1	1	5	0,286
<i>Alternativa 2</i>	0		0,5	0	0	1,5	0,086
<i>Alternativa 3</i>	0	1		0,5	0,5	3	0,171
<i>Alternativa 4</i>	1	1	1		0,5	4,5	0,257
<i>Alternativa 5</i>	1	0,5	0,5	0,5		3,5	0,200
<i>Suma</i>						17,5	1

Tabla 3.6 Evaluación de las alternativas según aplicaciones. [Autor]

<i>Electrolito</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	<i>Alternativa 4</i>	<i>Alternativa 5</i>	$\Sigma+I$	<i>Ponderación</i>
<i>Alternativa 1</i>		1	0	0	1	3	0,250
<i>Alternativa 2</i>	0		0	0	0	1	0,083
<i>Alternativa 3</i>	0	1		0	1	3	0,250
<i>Alternativa 4</i>	0,5	1	0		0,5	3	0,250
<i>Alternativa 5</i>	0	1	0	0		2	0,167
<i>Suma</i>						12	1

Tabla 3.7 Evaluación de las alternativas según el electrolito. [Autor]

<i>Criterio</i>	<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>	<i>Alternativa 4</i>	<i>Alternativa 5</i>
<i>Eficiencia</i>	0,0474	0,0632	0,0947	0,0632	0,0316
<i>Temperatura</i>	0,0556	0,0111	0,0333	0,0444	0,0556
<i>Aplicaciones</i>	0,0714	0,0214	0,0429	0,0643	0,0500
<i>Electrolito</i>	0,0625	0,0208	0,0625	0,0625	0,0417
Σ	0,2369	0,1165	0,2334	0,2344	0,1788
<i>Prioridad</i>	5	1	3	4	2

Tabla 3.8 Prioridad de cada una de las alternativas. [Autor]

Alternativa Seleccionada: Alternativa 2

3.2 Generalidades de la alternativa seleccionada

3.2.1 Descripción

La pila de membrana polimérica como su propio nombre la describe está constituida por un electrolito de polímero de ácido sulfónico fluorado, comercialmente conocido como Nafion. La cual ayuda a traspasar los protones liberados en el ánodo al cátodo. Uno de los subproductos obtenidos por este sistema es el agua y es fundamental en este tipo de membranas ya que requiere estar hidratada para conseguir un buen rendimiento por eso es importante que la pila trabaje en condiciones donde el agua no se evapore más rápido de lo que se produce. Trabaja a temperaturas menor de 100°C normalmente alrededor de 70 a 80°C. [6]

3.2.2 Principio químico de funcionamiento

Toda pila de combustible obedece a un principio de funcionamiento, el modelo PEMFC teniendo como combustible el hidrógeno y de oxidante al oxígeno es uno de los medios de energía menos contaminantes, de acuerdo con [34], al encontrarse dos elementos de este tipo se produce una reacción química, misma que hace posible que la energía química que genera se transforme en energía eléctrica. Para esto cada celda posee un ánodo y un cátodo, en estos ocurre una reacción por elemento, es decir una reacción anódica y una catódica, a continuación, se presenta dichas reacciones:

Reacción en el ánodo	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^+$
Reacción en el cátodo	$0,5O_2 + 2H^+ + 2e^+ \rightarrow H_2O$
Reacción total	$H_2 + 0,5O_2 \rightarrow H_2O$

Tabla 3.1 Reacciones químicas en la celda de combustible. [34]

Además, dicha energía que se obtiene a partir de estas reacciones tiene un nombre en específico y es la energía libre de Gibbs, así corroboramos el principio de que la energía ni se crea ni se destruye, sino que se transforma. El intercambio de electrones permite crear esta energía que a su vez está asociada directamente con el voltaje que se tiene en la celda como se muestra en la siguiente ecuación:

$$G = -F * n_e * \Delta V_o \quad (\text{Ec 3.1})$$

Donde:

$G = \text{Energía de Gibbs}$

$F = \text{Constante de Faraday}$

$n_e = \text{Cantidad de electrones presentes en la reacción}$

$\Delta V_o = \text{Voltaje inicial de la celda}$

Cabe destacar que para encontrar un voltaje equilibrado de la celda de combustible se tiene la siguiente expresión:

$$V_e = \Delta P_c - \Delta P_a \quad (\text{Ec 3.2})$$

Donde:

$V_e = \text{Voltaje de equilibrio de la celda}$

$\Delta P_c = \text{Potencial del cátodo}$

$\Delta P_a = \text{Potencial del ánodo}$

Con esto tenemos que la diferencia de potenciales entre el ánodo y el cátodo nos da el voltaje con el que la celda se mantiene en equilibrio. [34]

3.2.3 Parámetros de funcionamiento

En todo diseño se establece un enfoque hacia donde se quiere llegar, en este caso la pila de combustible tiende a ser de baja potencia. Para este tipo de aplicaciones la potencia nominal es de 4 a 5 W. De acuerdo con [35], para el tipo de celda PEM, el rendimiento debe estar en el rango de 40 a 70 y la temperatura de trabajo no debe superar los 80 °C. Todo esto se encuentra en la tabla 3.10 para poder obtener más datos de funcionamiento de las celdas PEM.

	PEFC	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
Electrolito	Membrana de intercambio iónico	Matriz de asbesto inmovilizada con KOH	Matriz de SiC con fosforo liquido inmovilizado	Aleación de carbonato en LiAlO_2	Perovskita (cerámicos)
Electrodos	Carbono	Metales de transición	Carbono	Níquel y óxido de Níquel	Perovskita y aleaciones
Catalizador	Platino	Platino	Platino	Material electrodo	Material electrodo
Interfase	Carbono o metal	Metal	Grafito	Acero inoxidable o níquel	Cerámica de níquel o acero.
Temperatura de operación	40-80°C	65-220°C	205°C	650°C	600-1000°C
Portador de carga	H^+	OH^+	H^+	CO_3^-	O^-
Reformador externo	Si	Si	Si	No	No, para algunos combustibles y diseños de celdas
Conversión externa de CO a hidrogeno	Si, con purificación para remover trazas	Si, con purificación para remover trazas CO y CO_2	Si	No	No
Componentes esenciales de la celda	A base de Carbono	A base de Carbono	A base de grafito	A base de acero inoxidable	Cerámica
Manejo del agua como producto	Evaporación	Evaporación	Evaporación	Producto gaseoso	Producto gaseoso
Manejo del calor generado	Intercambiador de calor	Proceso de circulación Gas y electrolito	Intercambiador de calor o generación de vapor	Reformado interno y procesado del gas	Reformado interno y procesado del gas

Tabla 3.2 Principios de funcionamiento. [35]

Cabe mencionar que en un estudio [36] señala que si bien es cierto realizar estudios CFD para obtener un correcto diseño de una celda de combustible es importante, pero debido al enorme gasto computacional que esto genera es recomendable simular únicamente monoceldas.

Menciona también que la Ingeniería busca que se desarrollen computadores de gama potente para poder validar modelados de grandes “stacks” o para mejor comprensión busca poder validar múltiples celdas de una misma pila de combustible, por esta razón este trabajo se centra en diseñar una pila de combustible con una sola celda.

Con esto, en el trabajo [37] existe una relación matemática en la que interviene el número de celdas con el voltaje presente en la celda y el del circuito abierto, la expresión se detalla a continuación:

$$N_c = \frac{V_{ca}}{V_c} \quad (\text{Ec 3.3})$$

Donde:

$N_c = \text{Número de celdas}$

$V_{ca} = \text{Voltaje de circuito abierto}$

$V_c = \text{Voltaje de la celda}$

En el mismo texto menciona que de acuerdo a diferentes bibliografías el voltaje teórico de la celda es de 1,25 V, lo que no pasa en la vida real debido a la variación de parámetros físicos, entonces el voltaje estimado va a oscilar entre 0,8 y 0,9 V para lo cual se toma el voltaje promedio de estos para el cálculo [37].

3.2.4 Área activa de la celda

Para calcular el área activa de la membrana se toma en cuenta el voltaje de circuito abierto además de la potencia nominal de la pila, además se incluye la intensidad de corriente que se calcula a continuación, para esto se tiene la siguiente expresión matemática [37]:

$$I = \frac{P_n}{V_{ca}} \quad (\text{Ec 3.4})$$

Donde:

$I = \text{Intensidad}$

$P_n = \text{Potencia nominal}$

Entonces:

Con esto se calcula el área activa de la siguiente manera [37]:

$$A_a = \frac{I}{D_{cn}} \quad (\text{Ec 3.5})$$

Donde:

$A_a = \text{área activa de la membrana}$

$D_{cn} = \text{Densidad de corriente nominal}$

De acuerdo a [37] y [38] las densidades de corriente nominales de una pila PEMFC de baja potencia oscilan entre 0,02 y 0,1 $\frac{A}{cm^2}$,

3.3 Modelamiento de la batería mono celda de hidrógeno

Uno de los pasos fundamentales a la hora de modelar mediante un software CAD, cualquier tipo de elemento es iniciar a partir de modelos cuyo ensamble y diseño sean normados. Es decir, pilas cuya funcionalidad y diseño puedan tener su respectiva justificación [39].

A partir de ello y considerando tanto a [39], como a [40], se ha considerado el modelamiento de una pila de hidrógeno mono celda cuyas partes se encuentran en estrecha relación a las producidas por los anteriores autores mencionados. Cabe recalcar que existen ciertas adecuaciones que se pueden llevar a cabo por parte del usuario con el fin de obtener un mejor rendimiento, voltaje o funcionamiento del elemento en cuestión.

Como todo modelamiento se consideran varios pasos como o son:

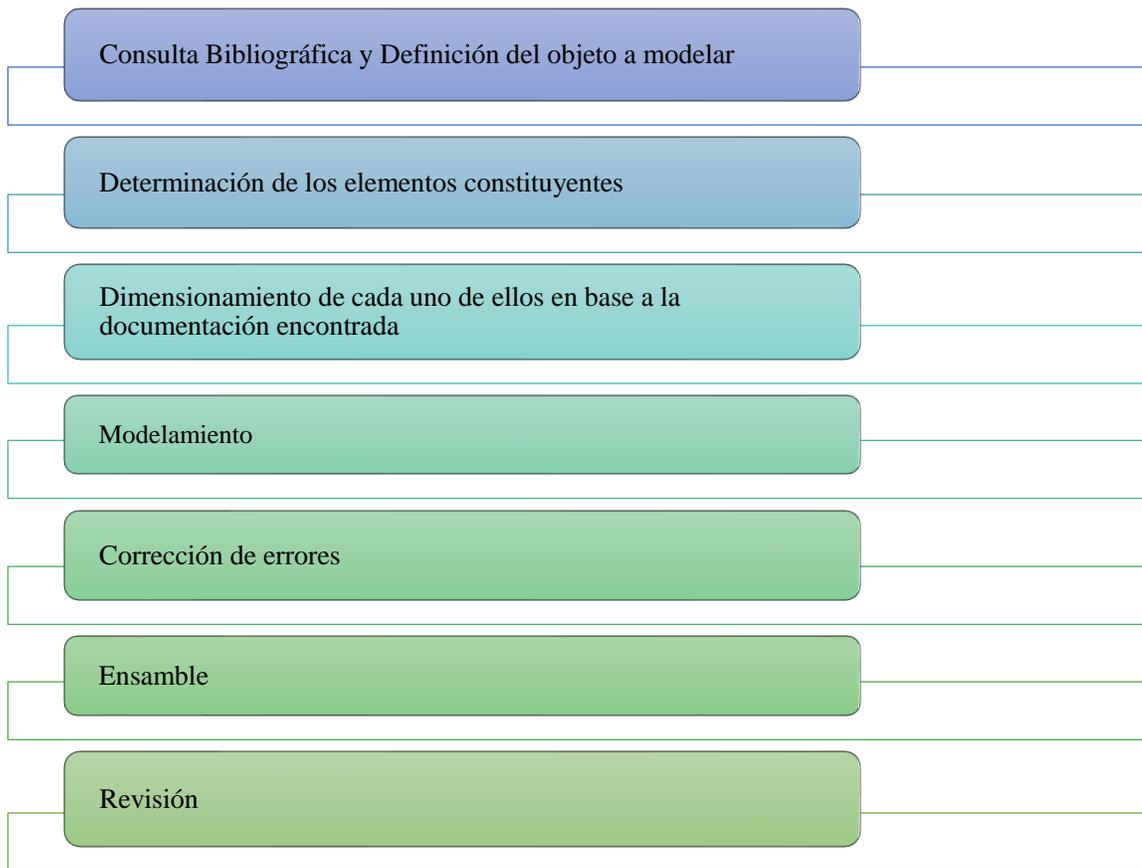


Figura 3.6 Pasos a seguir para el modelado.

Considerando todos y cada uno de ellos se tiene que las principales partes constituyentes del modelo se centran en:

- Placas exteriores
- Placas de disipación
- Placas de las cavidades
- Placas de soporte
- Membrana
- Guías
- Elementos de sujeción y sellantes (Tornillos, tuercas, arandelas, entre otros)

En la Figura 3.7, se proyecta las partes constituyentes de una batería comercial.

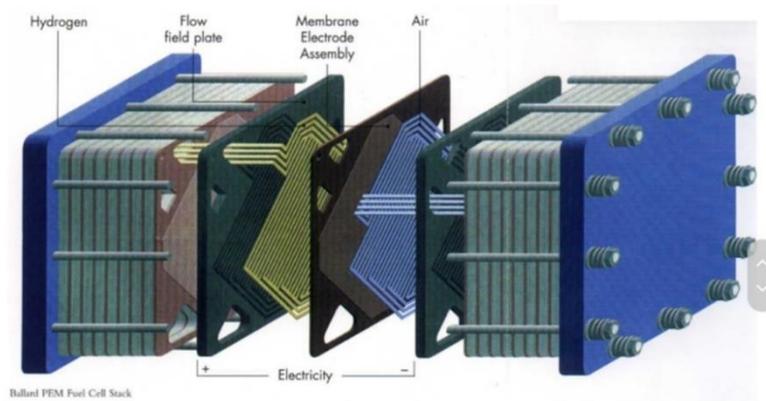


Figura 3.7 Cuerpo de la Pila. [1]

3.3.1 Placas exteriores

Las placas exteriores están destinadas a proveer tanto la sujeción como permitir el ingreso de los fluidos requeridos. Para ello se ha modelado placas de 5 mm de espesor cuyas dimensiones se encuentran en 160 x 120 mm (Según el modelo VET S 5W), el material elegido por el fabricante es el aluminio debido a sus buenas características como material resistente a la corrosión y como generador de hermeticidad dentro de la aplicación a requerir [39]. En estas placas además se recomienda tener varias sujeciones del tipo móvil y fijo. El objetivo de las diversas sujeciones se debe al hermetismo que se debe generar dentro de la pila. La figura 3.8, muestra la placa en el diseño CAD.

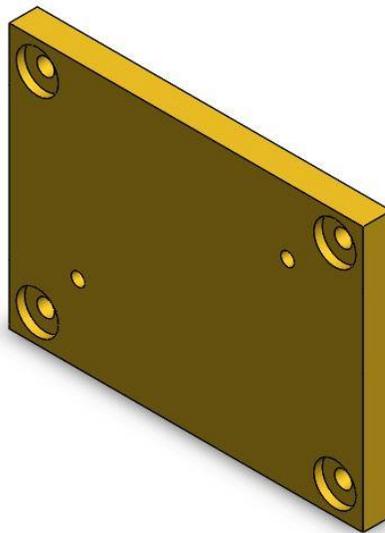


Figura 3.8 Placa Exterior. [Autor]

3.3.2 Placas de disipación

Las placas de disipación, están destinadas a la evacuación de calor generado dentro del proceso de generación de energía. Estas placas están apiladas posterior a las placas exteriores. Es recomendable la utilización de al menos 3 placas con el fin de que el calor no llegue hacia las placas exteriores y pueda comprometer ciertos componentes eléctricos y de sujeción de la batería. El modelo presentado para este trabajo consta de la utilización de 3 placas de disipación a cada lado es decir un total de 6 placas cuyas dimensiones rondan los 120 x 120 mm [39]. Al igual que las placas de sujeción, este tipo de piezas deben ser lo más hermético posible para evitar cualquier tipo de ingreso o pérdida de fluidos ajenos al proceso. La figura 3.9, detalla el modelamiento de la pieza.

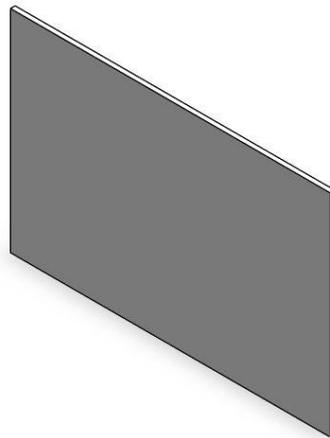


Figura 3.9 Placa de disipación. [Autor]

3.3.3 Placas de las cavidades

Según [39], las placas de las cavidades representan la pista por la que los fluidos de interacción circularán generando posteriormente el proceso deseado. La pista por la que se mueve el fluido debe ser lo suficientemente adecuada para que la circulación no se vea afectada por ningún motivo. Comercialmente [40], posee 5 tipos de cavidades que son de común utilización en la industria, la figura 3.10, muestra los principales tipos de canales utilizados.

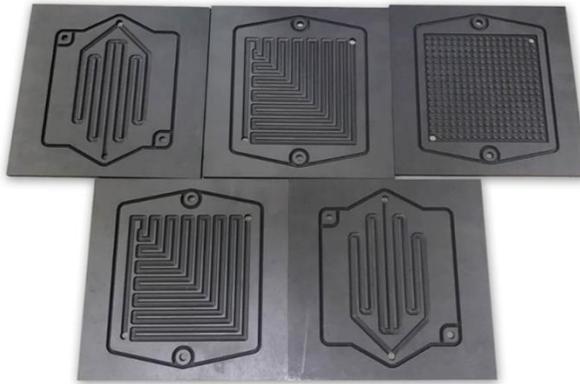


Figura 3.10 Cavidades Comerciales. [39]

Considerando la figura 3.10, para este proyecto se eligió la placa tipo 3. La placa tipo 3 posee los suficientes canales para que en la simulación se pueda observar el fenómeno correctamente expresado. Las dimensiones de los canales difieren dependiendo el modelo, para la placa que se modela (Figura 3.11) se utilizan dimensiones de ancho de canal de 3 mm, y una profundidad de 1 mm. Siendo esta profundidad mayor a la de otras placas cuya dimensión está en 0.5 mm.



Figura 3.11 Placa de la Cavity. [Autor]

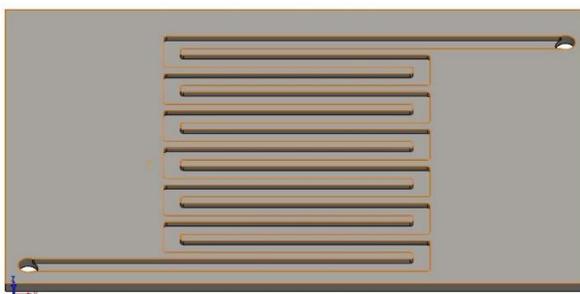


Figura 3.12 Detalle de los canales. [Autor]

3.3.4 Membrana

Las membranas, PFSA es uno de los componentes importantes de esta batería debido a que la misma contribuye activamente dentro del procesos de generación de energía. Según [40], las dimensiones de este tipo de elementos tienden a variar dependiendo la utilización y la generación que la batería vaya a tener. Esta membrana está localizada en la mitad de la batería es decir entre las cavidades de circulación del fluido. Al igual que las placas anteriores se busca que en esta zona exista una hermeticidad del 100%. Esto se lo logra con la utilización de las guías y soportes. Según [39], la membrana posee las características mostradas en la Figura 3.13, Además al ser elementos cuya área activa tiende a variar, es posible ubicar dimensiones varias. Para el modelo elegido anteriormente, se utiliza lo siguiente:



Figura 3.13 Membrana Real

Las características técnicas de la membrana están denotadas por:

Specifications of membrane electrode assembly:

- Thickness: 50 μm .
- Sizes: 5 cm^2 , 16 cm^2 , 25 cm^2 , 50 cm^2 or 100 cm^2 active surface areas.
- Catalyst Loading:
 - Anode = 0.5 mg Pt/ cm^2 .
 - Cathode = 0.5 mg Pt/ cm^2 .
- Membrane electrode assembly types: 3-layer, 5-layer, 7-layer (so before ordering, please clarify how many layers MEA you prefer, and also provide the MEA drawing).

Membrane electrode assembly features:

- Good chemical stability.
- Excellent working performance.
- Rigid design.
- Durable.

Membrane electrode assembly applications:

MEA is mainly used to make fuel cell stack and electrolyzers to produce hydrogen gas.

Figura 3.14 Características Técnicas de la Membrana.

Membrana NAFION 115		
	Valor	Unidad
Densidad de membrana seca	1968,5	Kg/m^3
Conductividad térmica	2	W/m.k
Conductividad eléctrica	1 E^{-16}	Simens/m
Ánodo GDL		
Densidad	377	Kg/m^3
Conductividad térmica	2	W/m.K
Conductividad eléctrica	265079	Simens/m
Porosidad	0,63	
Angulo de contacto	130	grados
Cátodo GDL		
Densidad	1351.8	Kg/m^3
Conductividad térmica	21.9	W/m.K
Conductividad eléctrica	2380000	Simens/m
Porosidad	0,63	
Angulo de contacto	70	grados
Capa de catalizador		
Porosidad	0.28	
Angulo de contacto	130	grados
Cátodo de carga de catalizador	4	mg/cm^2
Ánodo de carga de catalizador	4	mg/cm^2

Tabla 3.1 Valores Técnicos de la membrana NAFION 115. [41]

La figura 3.15, muestra el modelamiento mediante un software CAD de la membrana

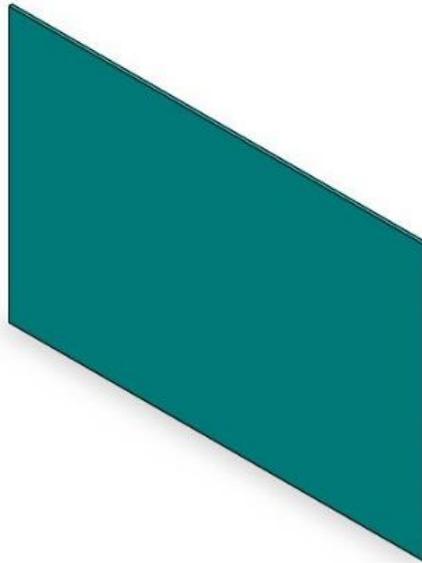


Figura 3.15 Membrana. [Autor]

3.3.5 Guías

Este tipo de elementos están centrados netamente en la alineación de todas y cada una de las placas. El objetivo principal de estos elementos es utilizar el área correspondiente para el proceso de electrolisis requerido. Además, pueden ser removidos una vez se hayan alineado todas y cada una de las placas esto principalmente buscando evitar cualquier tipo de contacto sobre materiales de otro tipo.

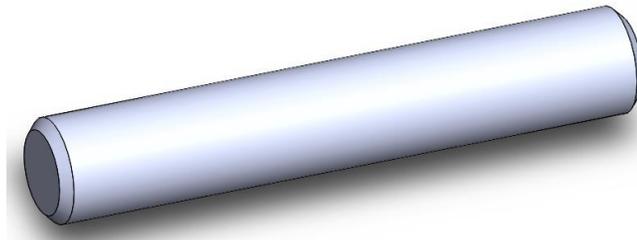


Figura 3.16 Guías. [Autor]

3.3.6 Elementos de Sujeción

Se considera como elementos de sujeción a todos aquellos que permitan obtener una buena fijación de todos los elementos constituyentes del conjunto. Las dimensiones de los elementos de sujeción tales como tuercas, pernos y demás están en estrecha relación a la dimensión de la batería y del espacio disponible. Las dimensiones pueden estar dentro del rango de $\frac{1}{2}$ in a $\frac{1}{4}$ in, considerando que pueden existir cambios especialmente en las placas de las cavidades se ha decidido utilizar tornillos de $\frac{1}{4}$ in. Además, según [41], al no existir elementos que generen cualquier tipo de esfuerzo no es necesario la realización de cálculos para la selección de este tipo de elementos.

En este trabajo se ha considerado como elementos de sujeción a:

- Tuercas (1/4 in)

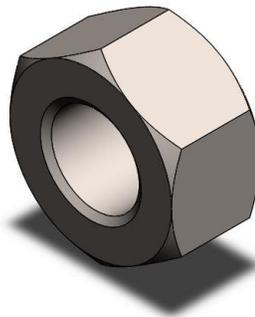


Figura 3.17 Tuercas Modeladas. [Autor]

- Pernos (1/4 in)



Figura 3.18 Tornillos. [Autor]

- Arandelas para pernos de ¼ in



Figura 3.19 Arandelas. [Autor]

- Juntas tóricas



Figura 3.20 juntas tóricas. [Autor]

Como se ha mencionado todos los elementos anteriormente descritos permitirán la generación de las uniones herméticas en todos y cada uno de los niveles de la pila.

Por otro lado, existen elementos complementarios como:

- Válvulas de acople



Figura 3.21 Válvula de Acople

- Mangueras



Figura 3.22 Mangueras

- Dispositivos de control



Figura 3.23 Dispositivo de Control

Estos dispositivos se centran en el control del proceso de generación de energía. Sin embargo, es conveniente que todos y cada uno de ellos sean los que se ha recomendado

por el fabricante debido a la exposición que tienen frente a los fluidos de trabajo, así como también a las diversas condiciones de servicio.

Todos estos elementos han sido modelados e incluidos en el diseño, con el fin, de tener una pila similar a las que comercialmente se utilizan.

Observación.

Según VET Technology Co [39], las mono celdas son elaboradas con el fin de obtener de 0.5 a 1 V. Estos voltajes son considerados muy bajos para aplicaciones del tipo industrial. Es por esa razón que la mayoría de pilas consisten en el apilamiento de varias mono celdas, de esta manera se puede aumentar el voltaje y la potencia que se obtiene.

La potencia de salida está en estrecha relación a tamaño de la misma. Mientras la superficie de la celda sea mayor, aumentará la corriente obtenida. Por otro lado, el diseño presentado anteriormente, corresponde a la utilización de los modelos:

- VET – S10 W
- VET – 600 W
- VET – S 60 W

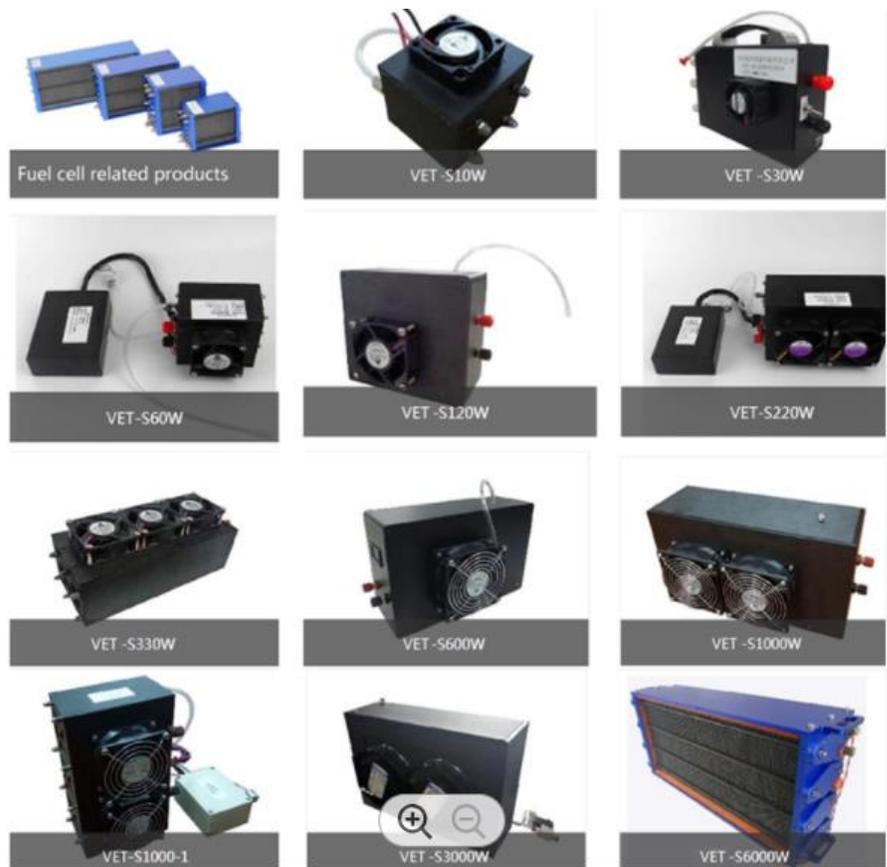


Figura 3.24 Tipos de baterías disponibles

Una de las características principales de ese tipo de modelos es la factibilidad de combinación del área activa de las membranas. La figura 3.24, muestra las posibles combinaciones del área normalizada que se puede obtener además el número de láminas que se pueden apilar en una batería.

Por otro lado, las pilas están ensambladas por una placa bipolar de metal que tiene una mejor conductancia eléctrica, conductancia térmica y propiedades mecánicas que la placa bipolar de grafito. Además, la placa bipolar de metal es muy adecuada para eliminar el grosor de la pila y mejorar la densidad de potencia de volumen. poder específico [1]. Es así como se puede lograr la obtención de voltajes como los mostrados en la tabla 3.13.

Inspecton Items & Parameter			
Standard			Analysis
Output performance	Rated power	6000W	6480W
	Rated voltage	72V	72V
	Rated current	83.3A	90A
	DC voltage range	60-120V	72V
	Efficiency	≥50%	≥53%
Fuel	Hydrogen purity	≥99.99%(CO<1PPM)	99.99%
	Hydrogen pressure	0.05~0.08Mpa	0.06Mpa
	Hydrogen consumption	69.98L/min	75.6L/min
Environmental characteristics	Working temperature	-5~35°C	28°C
	Working environment humidity	10%~95%(No mist)	60%
	Storage ambient temperature	-10~50°C	
	Noise	≤60dB	

Tabla 3.2 Características Técnicas de la Pila de Hidrógeno. [39]

Las características mostradas anteriormente corresponden al apilamiento de más de 15 celdas de hidrógeno.

De acuerdo a [39], las características técnicas de una monocelda de hidrógeno son bajas considerando lo que comercialmente se puede llegar a encontrar. Sin embargo, varias características de una monocelda (como la del presente trabajo) se presentan a continuación.

Inspection Items & Parameter			
Standard			Analysis
Output Performance	Efficiency	40 – 50%	50%
	Rated Voltage	1 V	1 V
	Rated Current	0,5 – 1,2 A approx.	0.6 A
	Dc Voltage Range	0.5 – 1 V	0.6 V
Fuel	Hydrogen Purity	>99,99% (CO<1 PPM)	99,99%
	Hydrogen Pressure	0.01 – 0.03 MPa	0.02 Mpa
	Hydrogen Consumption	0,165 L/min	0,223 L/min
Environmental Characteristics	Working Temperature	-5 – 35 C	28 C
	Working environment humidity	10% ~ 95% (No mist)	60%
	Storage Ambient Temperature	-10 – 50 C	
	Noise	<30 dB	

Tabla 3.3 Características Técnicas de la Pila de Hidrógeno Mono Celda. [39]

Todos los parámetros mostrados con anterioridad son referenciales y pueden tener una variación de entre el 15% y 20% [39]. Esa variación, hace referencia a las pérdidas que pueden existir dentro de la batería. Además, y en concordancia con [39] y [40], la variación puede depender del modelo de canales utilizados, profundidad y área efectiva de una batería.

3.3.7 Modelo final

La figura 3.25 muestra el ensamble final de todos los elementos antes mencionados, dando como resultado una pila de combustible tipo PEM, con las características de estudio especificado, más cercana a la realidad

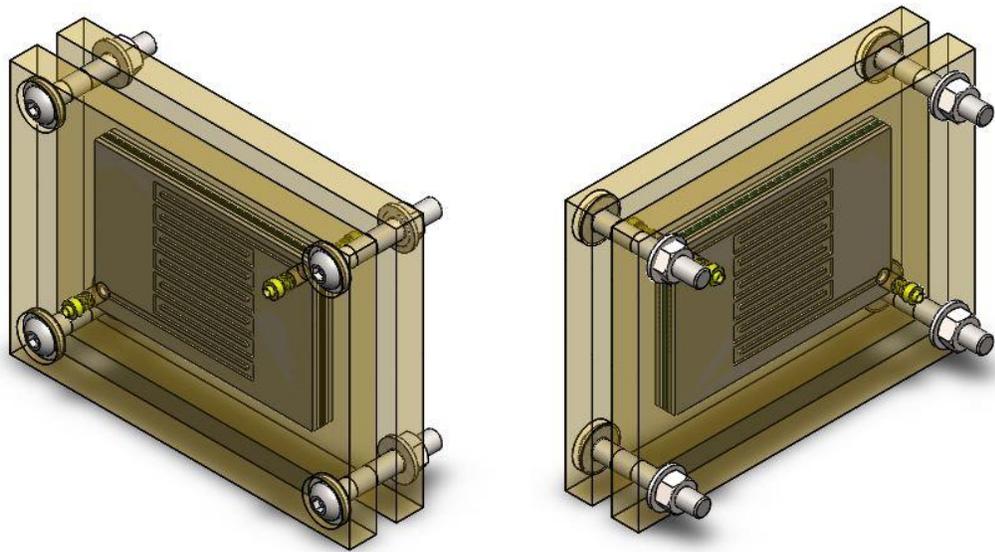


Figura 3.25 Modelo final de la pila PEM. [Autor]

En la Figura 3.26 se observa los elementos antes de ser ensamblados (Vista Explosionada).

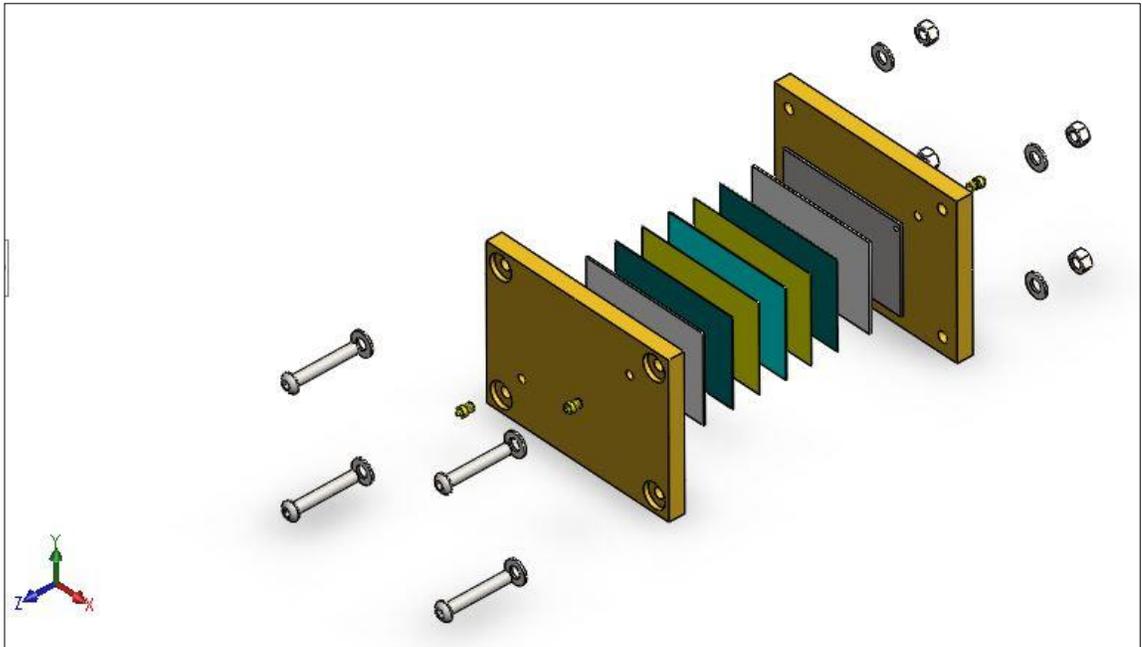


Figura 3.26 Vista explosionada del modelo final. [Autor]

3.4 Simulación PEMFC

3.4.1 Preprocesado

3.4.1.1 Definición de geometría

Con la finalidad de reducir el tiempo y gasto computacional en la simulación se toma en cuenta una simplificación de la geometría del modelo definido de la pila de combustible especificada, por ello, se utiliza como punto de partida la figura 3.27 , que es la representación esquemática actualizada de una de una celda de combustible de membrana de electrolito de polímero (PEMFC).

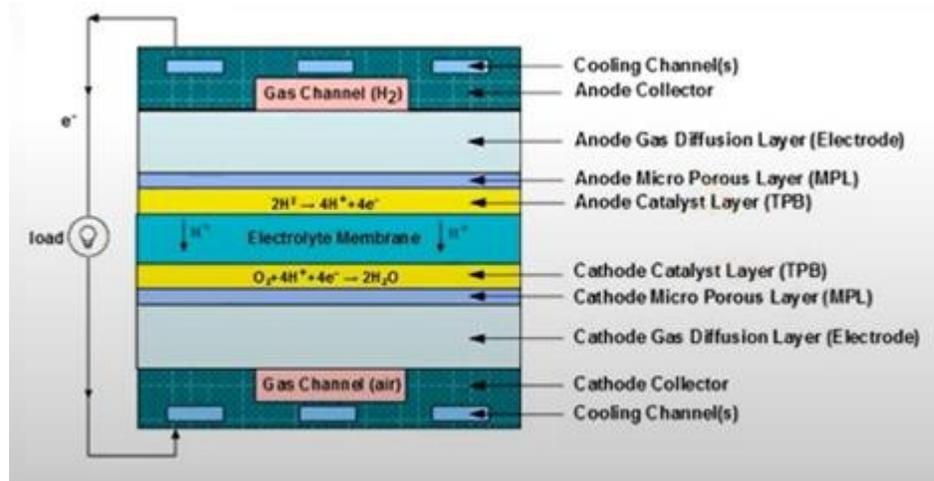


Figura 3.27 Esquema para simplificación de geometría.

Como se observa en la figura 3.27, únicamente, los componentes que tienen que estar presentes en el ensamble final y por tanto en la simulación son: la membrana de electrolitos, capa de catalizador del ánodo y del cátodo, capa micro porosa del ánodo y del cátodo, capa de difusión de gas (electrodo) del ánodo y del cátodo, y el colector de ánodos y cátodos. La primera consideración a tomar en cuenta para la realización de la simplificación de la geometría es la reducción tanto en el espesor como en el área de las placas ya mencionadas a excepción del colector, como se muestra en la figura 3.28 el área de las placas solo cubre los canales de gas de la pila, así como también se evidencia una reducción en el espesor respecto al colector.

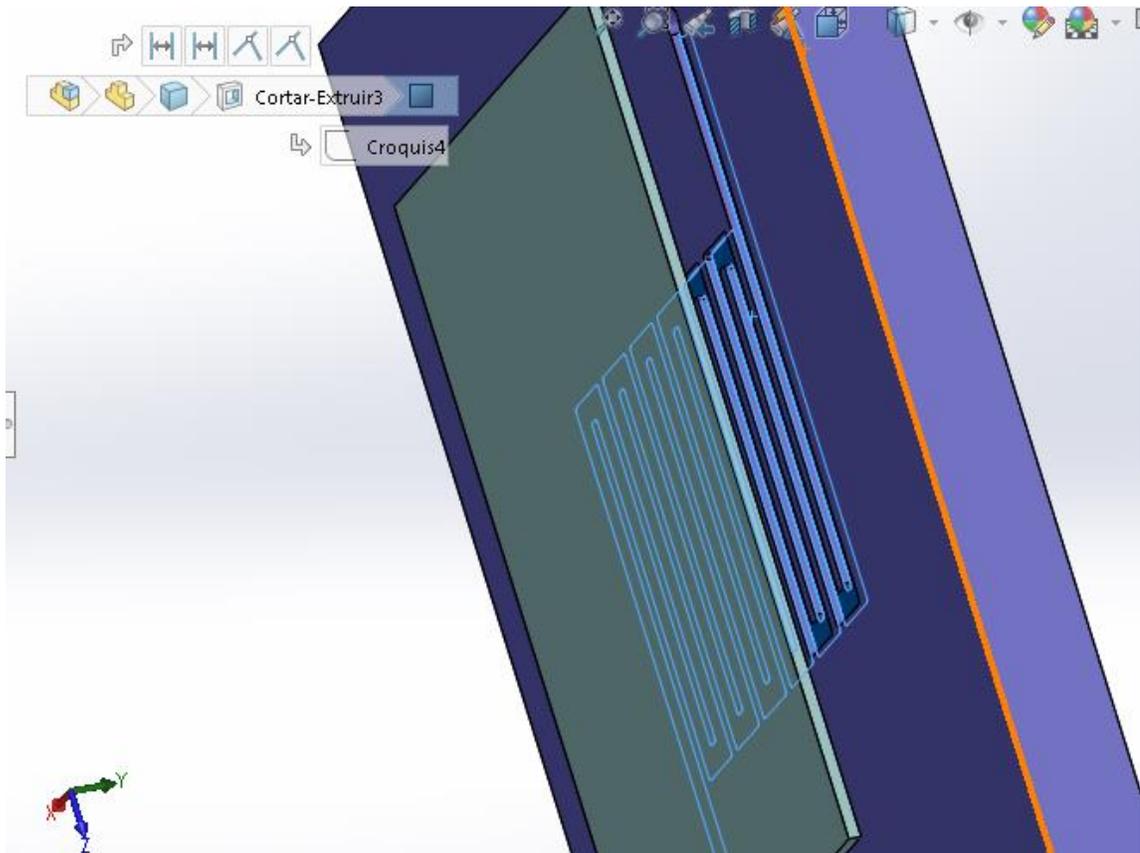


Figura 3.28 Croquis de canales. [Autor].

Otra de las consideraciones que se tomó en cuenta es el modelado de los canales de gas en el colector debido a que, es estrictamente necesario para extraer el volumen de la simulación CFD y a su vez tener un mallado más óptimo. Esto se muestra a continuación en la figura 3.29

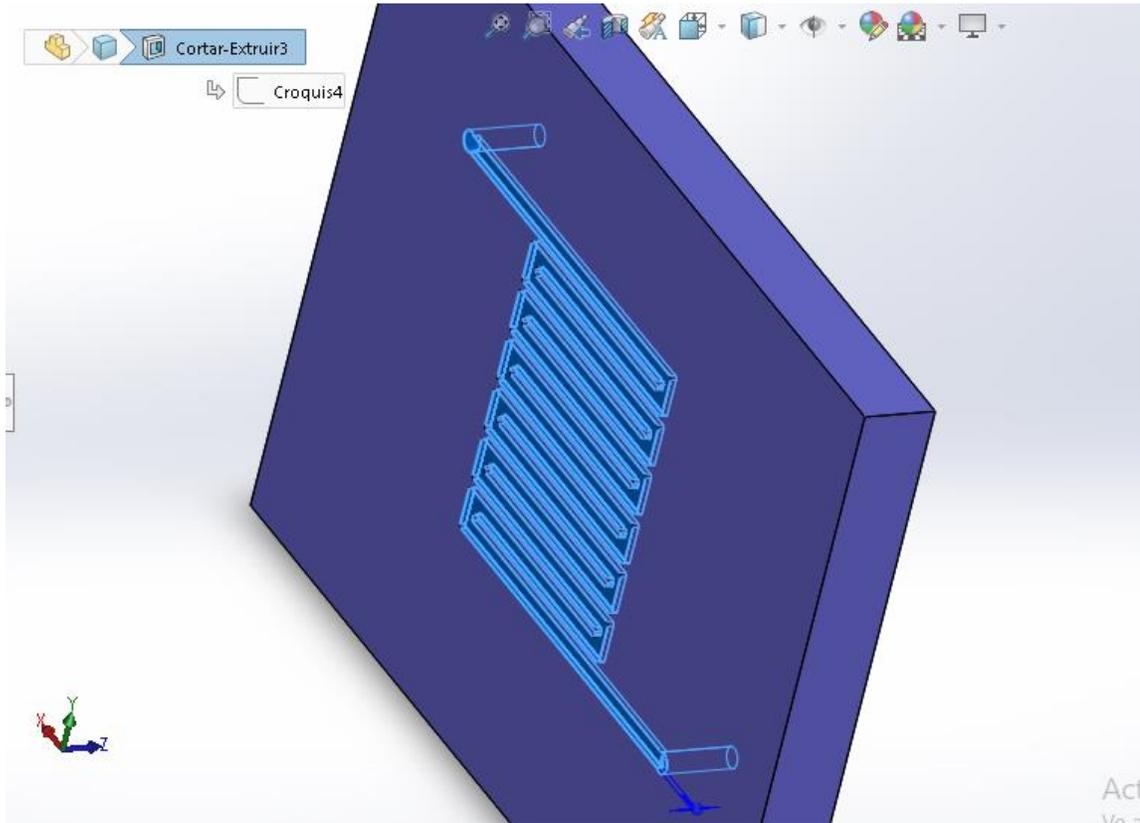


Figura 3.29 Canal para extracción de volumen. [Autor]

Finalmente, considerando lo anteriormente mencionado, la figura muestra el modelo de pila de combustible de membrana de electrolito de polímero (PEMFC) que va hacer simulado.

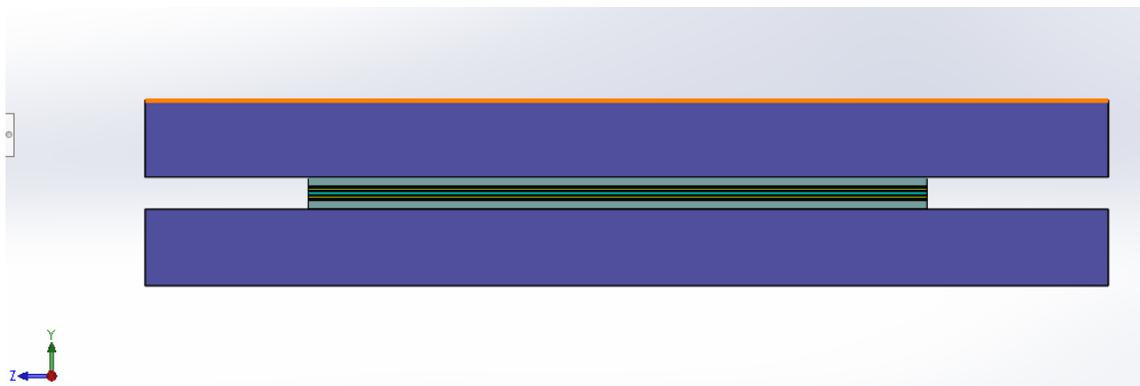


Figura 3.30 Pila para simulación. [Autor]

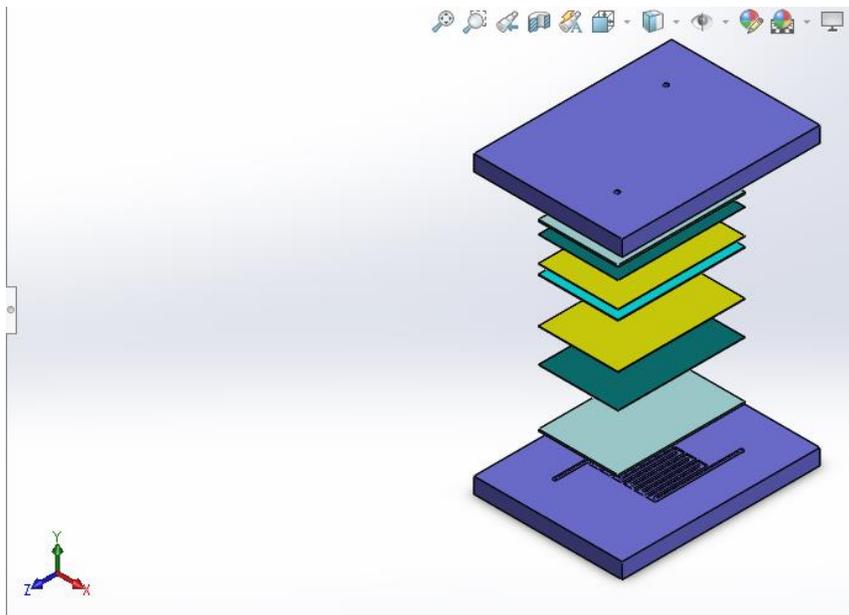


Figura 3.31 Vista explosionada de la pila. [Autor]

3.4.1.2 Extracción del dominio del fluido

El dominio de flujo viene establecido por el tamaño de los canales, el combustible y el oxígeno ingresan por estos conductos por lo cual para un estudio de dinámica de fluidos es necesario extraer el volumen de los mismos. Para esto es necesario señalar las aristas por donde va a ingresar y salir el fluido como se muestra en la figura 3.35.

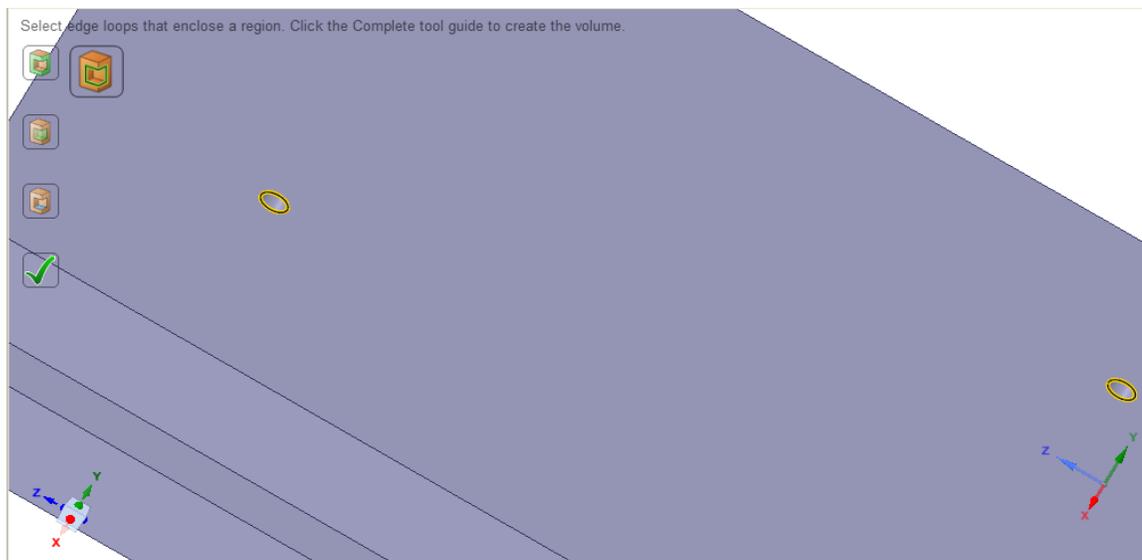


Figura 3.32 Aristas para extracción de volumen. [Autor]

Con esto el volumen se genera desde las aristas de entrada y recorre todo el trayecto de los canales. Obtenidos estos volúmenes tanto de ánodo como cátodo la geometría está lista para los siguientes pasos, los volúmenes se muestran a continuación.

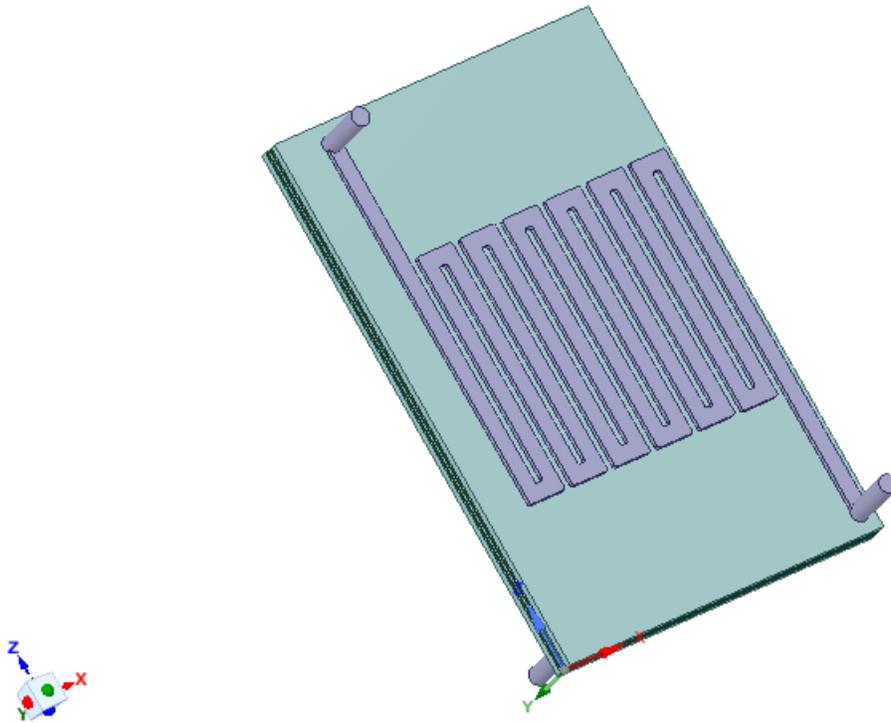


Figura 3.33 Volumen de los canales extraídos. [Autor]

Se necesita un tipo de topología compartida para que no haya problema en los contactos generados, esto con el fin de que el programa de análisis de fluido reconozca las interfaces correctas.

3.4.1.3 Desarrollo de malla

El programa incluye su módulo de mallado, siendo este un paso determinante para la simulación se aplica técnicas globales y locales para el mismo. El entorno es amigable y de fácil comprensión, en capítulos anteriores se menciona que la métrica de malla viene regida por el método Skewness, este ampliamente utilizado para estudios de dinámica de fluidos computacionales.

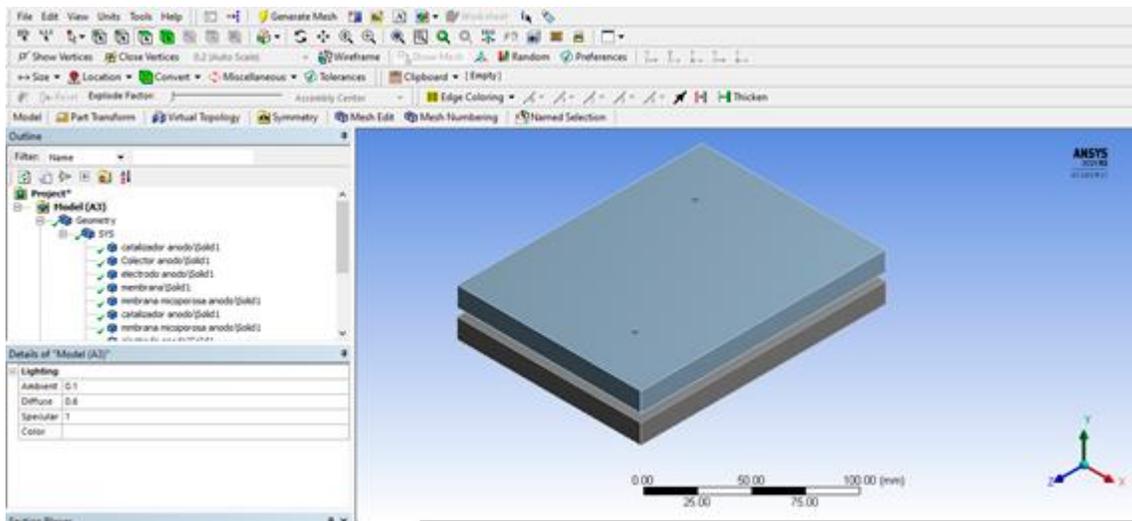


Figura 3.34 Interfaz de mallado. [Autor]

Para que la simulación se acorde a lo requerido únicamente el colector se toma como parte sólida, los demás componentes se acogen a régimen de fluido, para esto en geometría se define cada uno de estos.

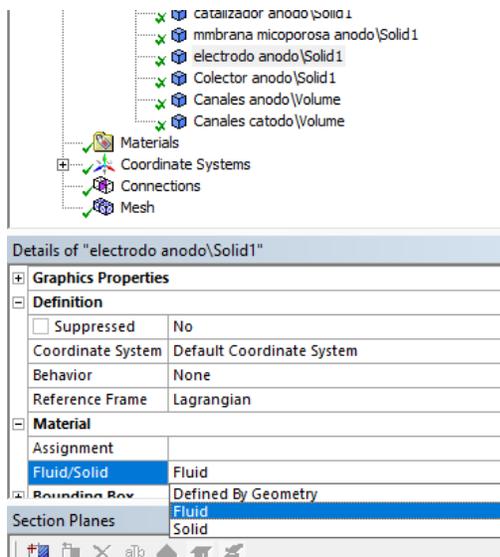


Figura 3.35 Definición de tipo de elemento. [Autor]

La malla que el programa nos genera de manera automática se presenta en la figura 3.40, en ella denota una estructura muy mala por lo que se requieren de métodos más minuciosos para esta.

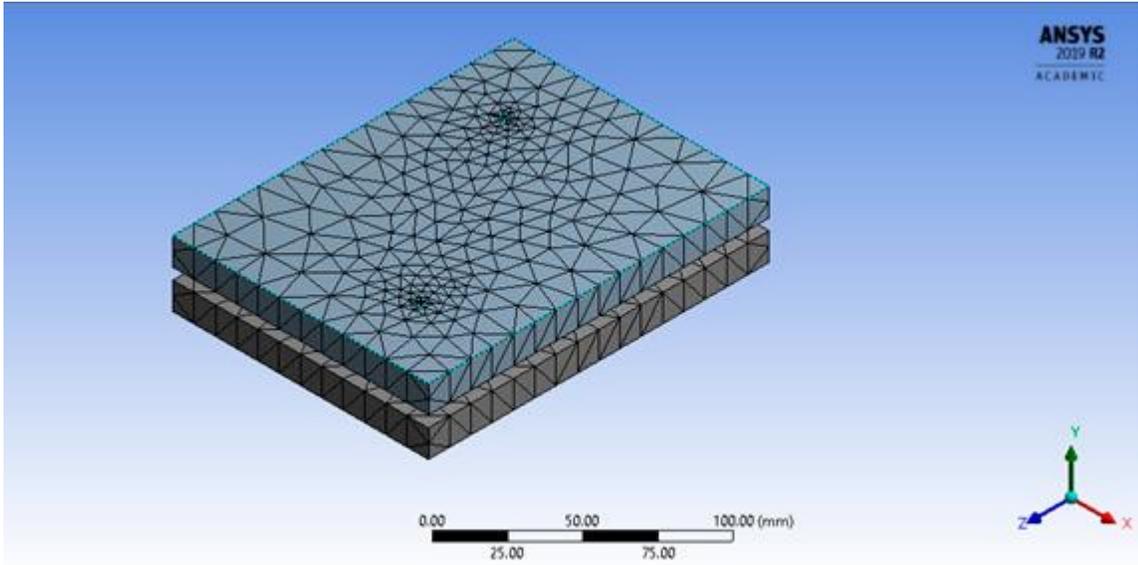


Figura 3.36 Mallado automático. [Autor]

El primer método que se aplica es el de los tetraedros, los resultados se presentan a continuación. Este método se aplica a las placas de mayor dimensión con el fin de encontrar una estructura idónea.

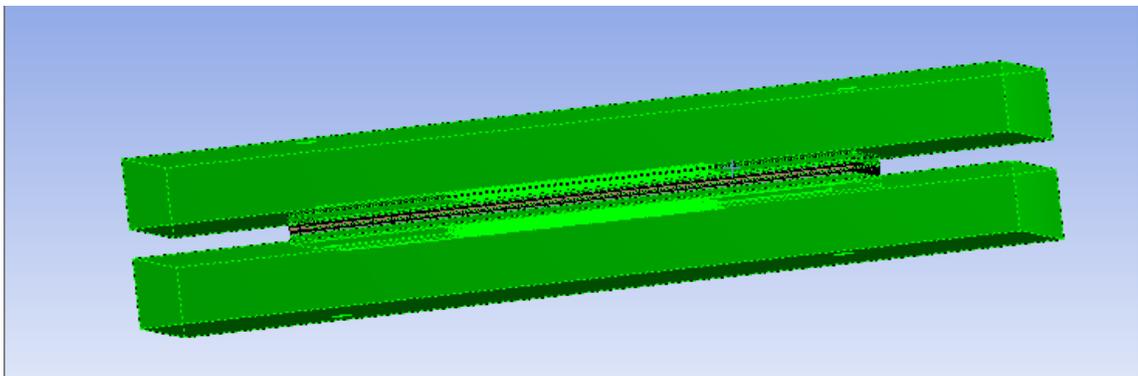


Figura 3.37 Aplicación de métodos de malla. [Autor]

Se realiza pasos similares para las demás placas dependiendo de sus dimensiones con el fin de obtener una buena malla.

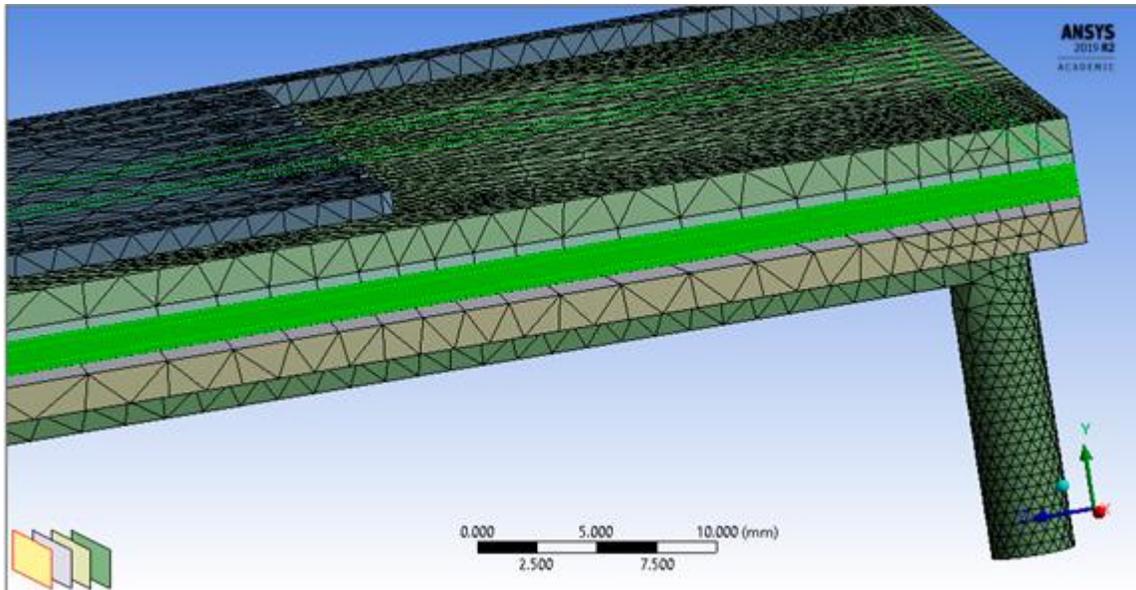


Figura 3.38 Refinamiento en las placas. [Autor]

Una vez que se realizan las modificaciones se tiene el siguiente resultado.

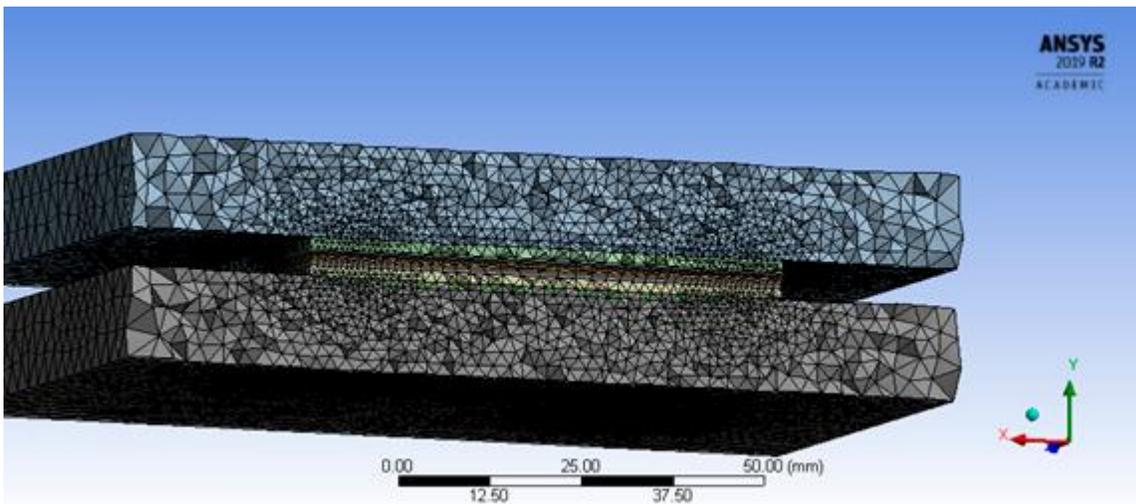


Figura 3.39 Vista de corte en el mallado. [Autor]

La métrica de malla obtenida mediante la aplicación de diferentes estrategias de mallado es de 0,24619; esta se encuentra en el rango de excelencia por lo cual se concluye que es un mallado estructurado.

Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	1.9053e-005
<input type="checkbox"/> Max	0.99871
<input type="checkbox"/> Average	0.24619
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.15273

Figura 3.40 Métrica de malla. [Autor]

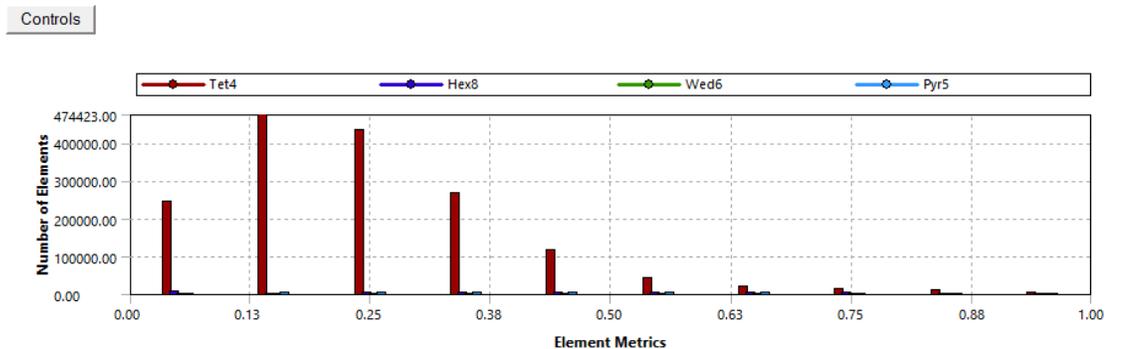


Figura 3.41 Gráfica número de elementos vs métrica de malla. [Autor].

Tomando en cuenta que la métrica de malla se riga a encontrar homogeneidad entre elementos la gráfica demuestra que existe mayor número de elementos en valores acordes a calificación de excelencia por lo cual el resultado es óptimo.

Con esto se garantiza que los resultados sean acordes o más próximos a la realidad en la simulación facilitando así una comprobación mediante métodos los métodos experimentales propuestos.

3.4.1.4 Delimitación de zonas de circulación de fluido

El módulo Fuel Cell incluido en el programa lee intuitivamente los elementos de la pila de combustible propuestos en la figura 3.31, para ello en el modelo propuesto se renombra a los elementos de acuerdo al esquema de una pila PEM.

Tanto elementos del ánodo como del cátodo son referenciados con el fin de poder distinguir las zonas de interfaces.

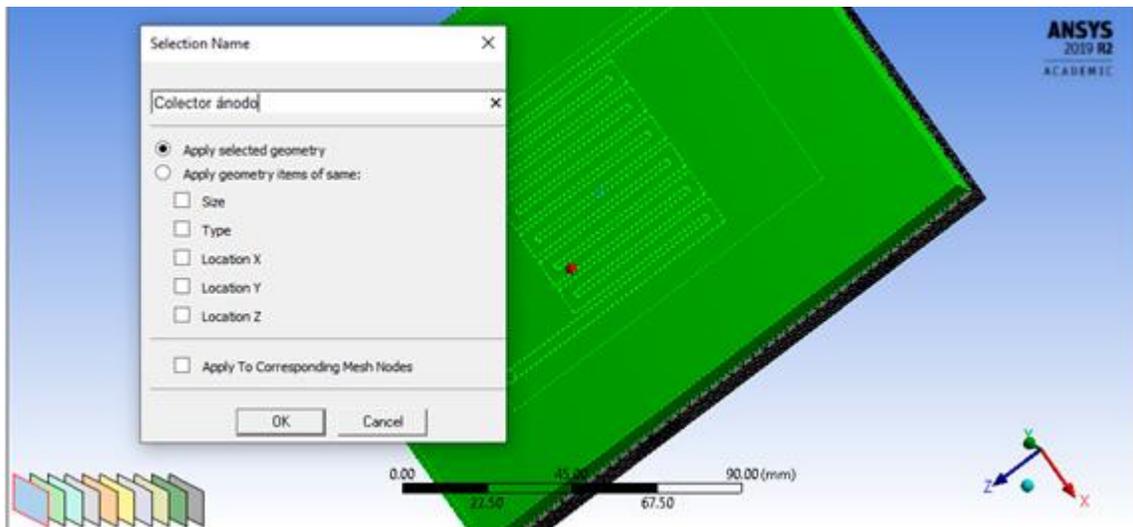


Figura 3.42 Configuración de entradas al sólido. [Autor]

El mismo procedimiento para cada elemento, tanto cuerpos sólidos como caras cada uno con su función respectiva, el resultado se muestra en la figura 3.47.

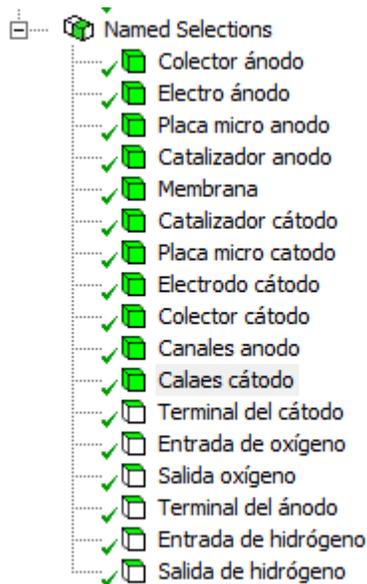


Figura 3.43 Entradas, salidas y cuerpos de circulación de fluidos. [Autor]

Estos pasos son todo en cuanto, al preprocesado, el siguiente paso es la configuración de la simulación acorde a las necesidades para esto se recurre al programa de CFD propuesto.

3.4.2 Procesado

Para la configuración del procesado se detalla los pasos más importantes para llegar a la convergencia de simulación. El interfaz es muy parecido al de mallado y en este caso se activa el módulo PEMFC como primer punto.

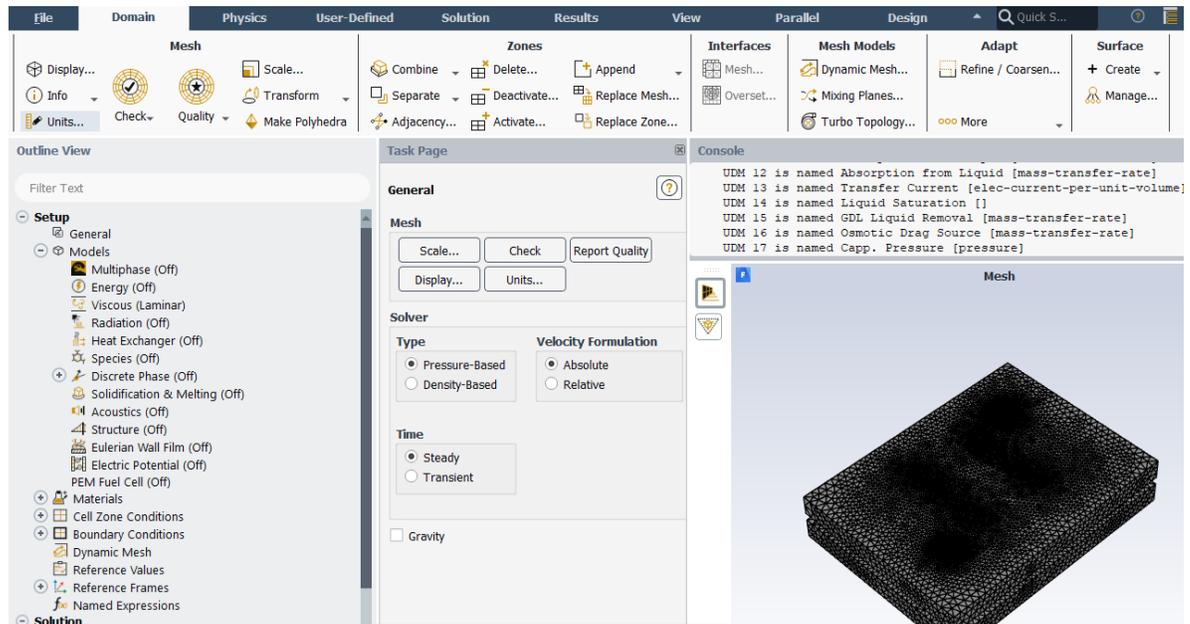


Figura 3.44 Interfaz de Fluent. [Autor]

Este módulo permite observar el comportamiento electrolítico de la pila de combustible hidrógeno, con una sucesión lógica de pasos arroja resultados de propiedades físicas simulando el funcionamiento real de una pila. Dependiendo de las condiciones de operación y de frontera requeridas los resultados serán corroborados con método experimentales. El programa viene predeterminado con valores que no se necesita ser cambiados sino a su vez acogernos a estos que aseguran resultados idóneos.

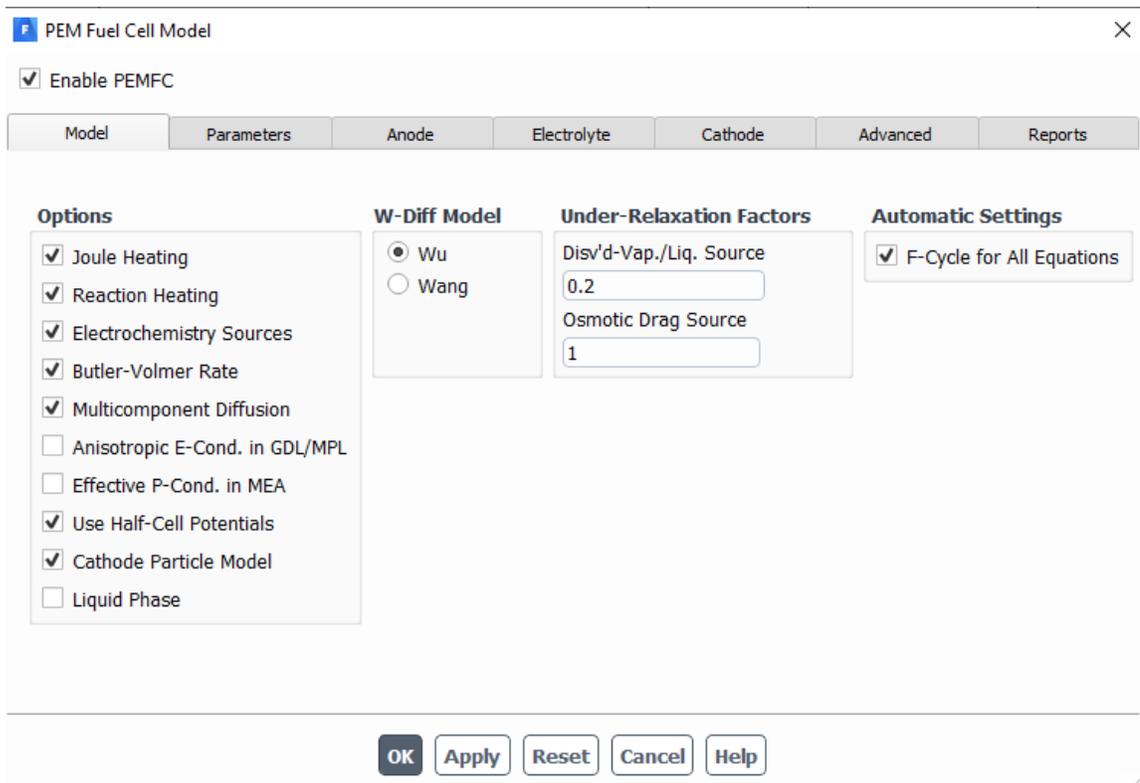


Figura 3.45 PEM Fuel Cell Model.

De acuerdo a la figura 3.33 el módulo contiene 7 opciones de edición, situándonos en la primera y segunda estas son las anteriormente mencionadas que no deben sufrir cambio alguno. Cada una de estas representas comportamientos de electrólisis regidos por la ciencia y los modelos matemáticos que permiten desarrollar códigos privados para obtener la solución

La segunda parte corresponden a parámetros de electroquímica tanto de funcionamiento de ánodo y cátodo, valores termodinámicos que se usan de manera implícita en el desarrollo de la simulación. La figura 3.50 muestra cada de uno de los parámetros antes mencionados.

Electrochemistry			Other Parameters
Anode	Cathode	Global	
J_ref (A/m ²)	J_ref (A/m ²)	I_leak (A/m ²)	Gas-Disv'ed Phase
10000	10	0	0.5
C_ref (kmol/m ³)	C_ref (kmol/m ³)	Std. Temp. for U0(K)	Mod. Coef. OSM_drag
1	1	298.15	1
Con. Exponent	Con. Exponent	Std. Press. for U0(Pa)	Eq. W. Cont. at a=1
1	1	100000	9.2
Exch. Coeff.(a)	Exch. Coeff. (a)		
1	1		
Exch. Coeff.(c)	Exch. Coeff. (c)		
1	1		
Std. State E0(V)	Std. State E0 (V)		
0	1.22884		
Entropy (j/kgmol-k)	Entropy (j/kgmol-k)		
0	-163300		

Figura 3.46 Parámetros PEMFC. [Autor]

A continuación, como uno de los pasos mas preponderantes está la selección de cada uno de los elementos de la pila acorde a lo que el programa propone.

F PEM Fuel Cell Model

Enable PEMFC

Model Parameters Anode

Anode Zone Type

Current Collector
 Flow Channel
 Porous Electrode
 TPB Layer (Catalyst)
 Micro Porous Layer

Flow Channel

Zone(s) [1/11]

calaes_c-todo
 canales_anodo
 catalizador_anodo
 catalizador_c-todo
 colector_-nodo
 colector_c-todo
 electro_-nodo
 electrodo_c-todo
 membrana
 placa_micro_anodo
 placa_micro_catodo

Figura 3.47 Delimitación de zonas de acuerdo al programa. [Autor]

Como se observa en la figura 3.51 se vincula a los que se ha nombrado como canales de ánodo con la opción Flow Channel, teniendo en cuenta que estamos en la opción de ánodo con esto se delimita las placas según su función. Cada una de las partes siguen el mismo procedimiento hasta llegar al cátodo.

Posterior a esto se coloca la resistencia en el contacto entre el colector y el electrodo, esta resistencia tiene el valor de $1 \times 10^{-6} \frac{Oh}{m^2}$.

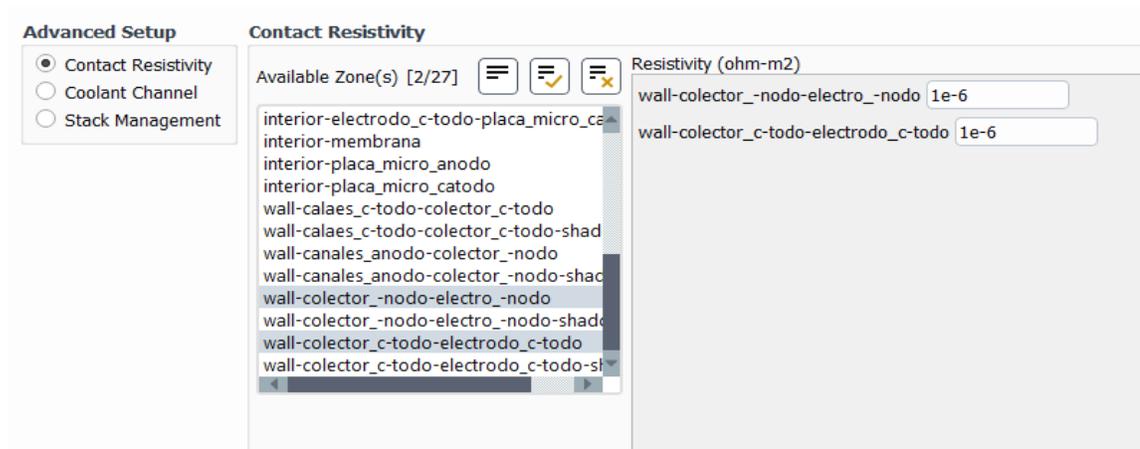


Figura 3.48 Configuración de resistencia en la pila. [Autor]

Como último punto de configuración del PEMFC se coloca el valor de área activa y se señalan los terminales de voltaje.

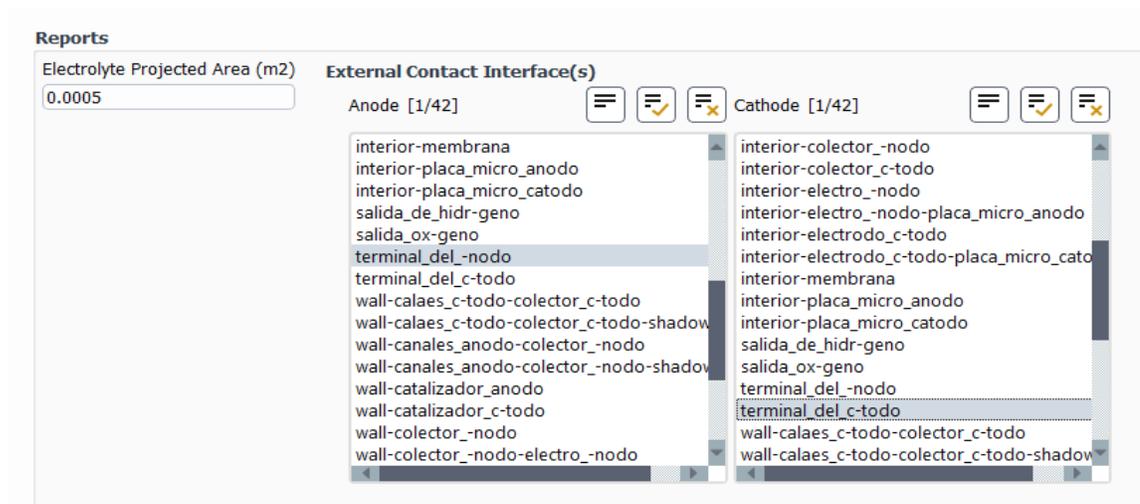


Figura 3.49 Delimitación del área activa. [Autor]

Con un valor de área activa ya señalado con anterioridad de 70 cm^2 se procede al siguiente paso.

En cuanto a condiciones de operación es recomendable utilizar la presión atmosférica para estudios de celdas de combustibles, en este caso el valor de la presión es de 74695 Pa en la provincia de Tungurahua de acuerdo a su altitud.

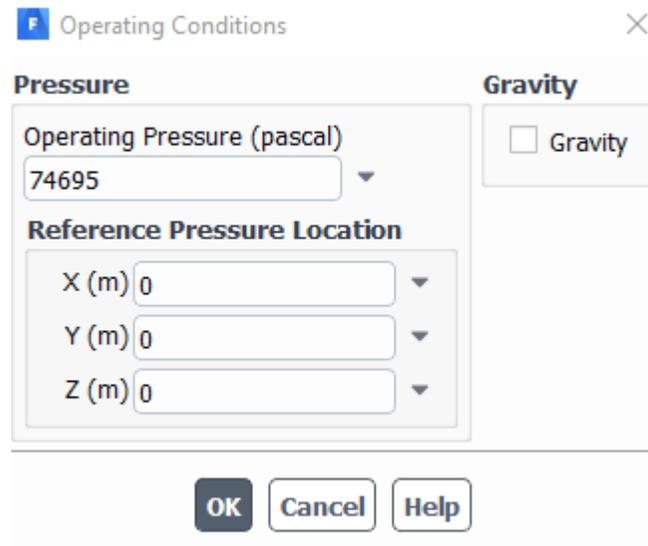


Figura 3.50 Presión de trabajo. [Autor]

En la opción de materiales le programa define unos por default, estos materiales se modifican de acuerdo al estudio requerido.

Las condiciones de borde son los flujos máxicos del hidrógeno y del oxígeno, además del voltaje en los terminales en este caso es el valor de 0 y 0,8 V que son valores estándar en este tipo de pilas. La temperatura de operación promedio de estas pilas es de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ pero esta puede tener una ligera variación.

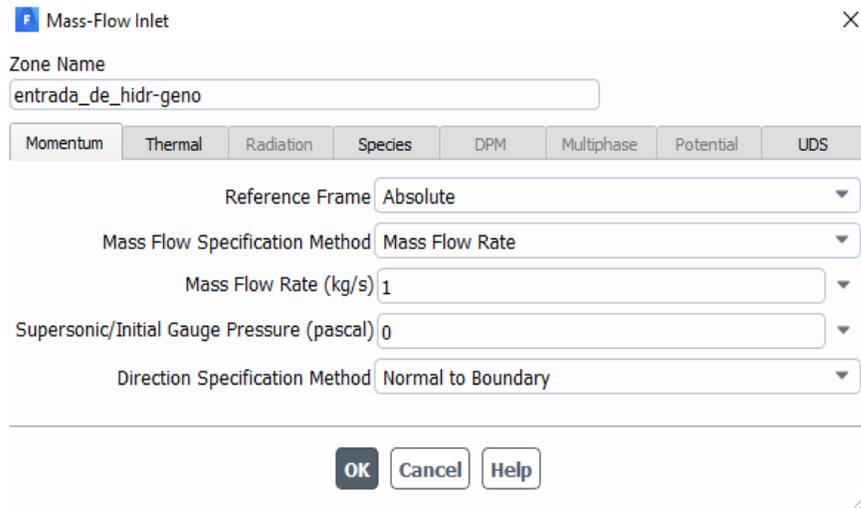


Figura 3.51 Condiciones de entrada. [Autor]

La figura 3.33 muestra en detalle el ingreso de las condiciones de flujo además de la temperatura, en la parte de especies se especifica el tipo de combustible o comburente.

Con todo el proceso configurado la simulación está lista para correr, es muy importante verificar la convergencia de solución, para esto de acuerdo a la gráfica de residuos la convergencia se da alrededor de la iteración 120.

3.4.3 Resultados de simulación

De acuerdo con una de nuestras curvas de polarización [46], las condiciones de borde para la simulación se presentan en la tabla 3.20, estos valores se encuentran en un intervalo estándar de parámetros de funcionamiento de pilas monocéllicas.

Las condiciones de operación como, el voltaje de la celda y la densidad de corriente, son de vital importancia para el cálculo de la celda de combustible simple, además de ello se toma en cuenta el factor de utilización del combustible y del oxidante $U_f = 0.8$ y $U_{ox} = 0.8$, respectivamente. Como la potencia de la celda es de 5 W el voltaje de operación se determinó que sean de 0.7 V, con ello, la corriente de la celda se calculó de la siguiente ecuación:

$$\text{Corriente (I)} = \frac{\text{Potencia (P)}}{\text{Voltaje de Celda (V)}} \quad (\text{Eu 3.6})$$

Donde:

$I = \text{Corriente de la celda [Amperios]}$

$P = \text{Potencia de la celda [Watt]}$

$V = \text{Voltaje de operación de la celda [Voltio]}$

$$\text{Corriente (I)} = \frac{5 \text{ W}}{0.7 \text{ V}}$$

$$\text{Corriente (I)} = 7,143 \text{ (A)}$$

La densidad de 0.1 A/cm² se utilizó en el cálculo del área activa total a través de la siguiente relación:

$$A = \frac{I}{\text{Densidad de corriente (i)}} \quad (\text{Ec 3.7})$$

Donde:

$A = \text{Área activa total de la celda [cm}^2\text{]}$

$I = \text{Corriente de la celda [Amperios]}$

$i = \text{Densidad de corriente [A/cm}^2\text{]}$

$$A = \frac{7,143(\text{A})}{0.1 \text{ A/cm}^2}$$

$$A = 71,43 \text{ cm}^2$$

La cantidad de hidrogeno consumida por dentro de la celda, tomando en cuenta la utilización realizada en el ánodo, se calcula por:

$$m_{H_2} = (\text{corriente})[\text{kA}] \left(\frac{0,037605[\text{KGH}_2]}{1[\text{kA}] * h} \right) \left(\frac{1}{U_f} \right) \quad (\text{Ec 3.8})$$

Donde:

m_{H_2} = Cantidad de hidrogeno consumida por dentro de la celda [Kg/s]

h = hora

U_f = factor de utilización del combustible

$$m_{H_2} = (0,007143)[\text{kA}] \left(\frac{0,037605[\text{KGH}_2]}{1[\text{kA}] * h} \right) \left(\frac{1}{0,8} \right)$$

$$m_{H_2} = 3,357 \times 10^{-4} \left(\frac{\text{KG}}{h} \right)$$

$$m_{H_2} = 9,325 \times 10^{-8} \left(\frac{\text{KG}}{s} \right)$$

La razón estequiométrica de hidrógeno y oxígeno es 2 a 1 o H₂O, para el requerimiento de suministro de aire, en consecuencia, la cantidad de moléculas de oxígeno solicitado para la reacción en la celda de combustible se calcula a continuación:

$$n_{O_2} = (9,716 \times 10^{-5}) \left(\frac{\text{kg mol } O_2}{h} \right) \left(\frac{1[\text{lb mol } O_{2, \text{sum}}]}{U_{ox}} \right) \quad (\text{Ec 3.9})$$

Donde:

n_{O_2} = Cantidad de moléculas de oxígeno [Kg/s]

U_{ox} = factor de utilización del oxígeno (0,8)

$$n_{O_2} = 1,2145 \times 10^{-4}$$

El aire contiene aproximadamente 21 % O₂ del volumen total. Debido a ello, el flujo másico requerido se calcula mediante la relación:

$$m_{\text{aire}} = (1,21 \times 10^{-4}) \left(\frac{1[\text{lbmolaire}]}{0,21[\text{lbO}_2]} \right) \left(\frac{29 [\text{lbaireseco}]}{1[\text{lbmolaire}]} \right) \quad (\text{Ec 3.10})$$

Donde:

$$m_{\text{aire}} = \text{Flujo másico de aire [Kg/s]}$$

$$m_{\text{aire}} = 0,0167$$

$$m_{\text{aire}} = 0,00464 \times 10^{-3}$$

Parámetro	Valor
Flujo másico de hidrógeno [kg/s]	9,3 E ⁻⁰⁸
Flujo másico de oxígeno [kg/s]	4,6 E ⁻⁰⁶
Voltaje en terminal del ánodo [V]	0
Voltaje en terminal del cátodo [V]	0,6
Temperatura de trabajo [°C]	70
Presión de trabajo [Pa]	75695

Tabla 3.11 Condiciones de borde para la simulación. [39]

Cabe recalcar que es recomendable trabajar a la presión atmosférica en este tipo de celdas de combustible, siendo el estudio en la provincia de Tungurahua ubicada a más 2500 msnm la presión es de 74695 Pa.

Los resultados de la simulación se presentan a continuación, estos representan contornos de velocidad, presión y fracciones molares en los distintos elementos que conforma la pila de hidrogeno. Esto tiene como finalidad observar el comportamiento de lo que interviene en la reacción además del comportamiento de cada uno de los elementos componentes de la pila de combustible hidrógeno.

En la figura 3.52 se puede observar que la presión que se produce en los canales va disminuyendo hasta alcanzar la presión atmosférica.

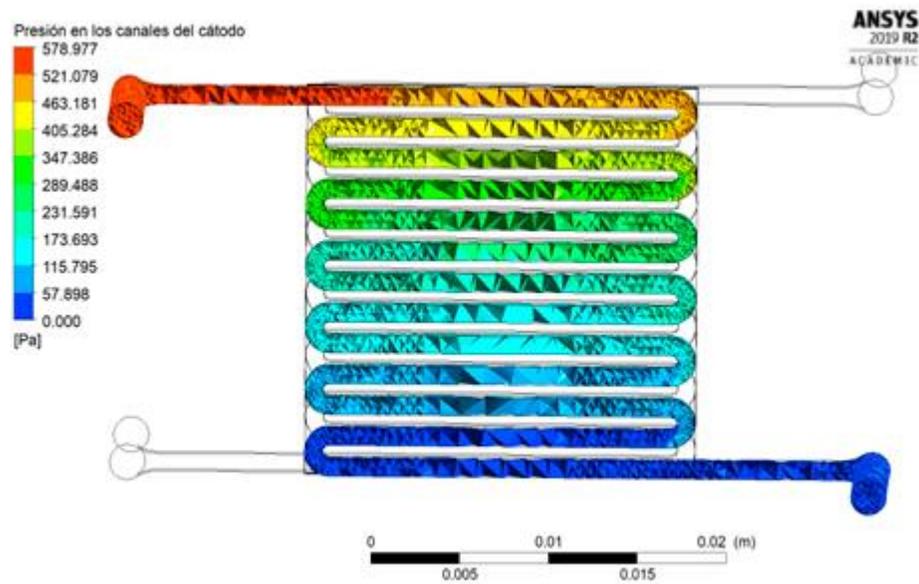


Figura 3.52 Presión en los canales del cátodo. [Autor]

En la figura 3.53 se puede observar cómo se encuentra distribuida la velocidad a lo largo de todo el canal

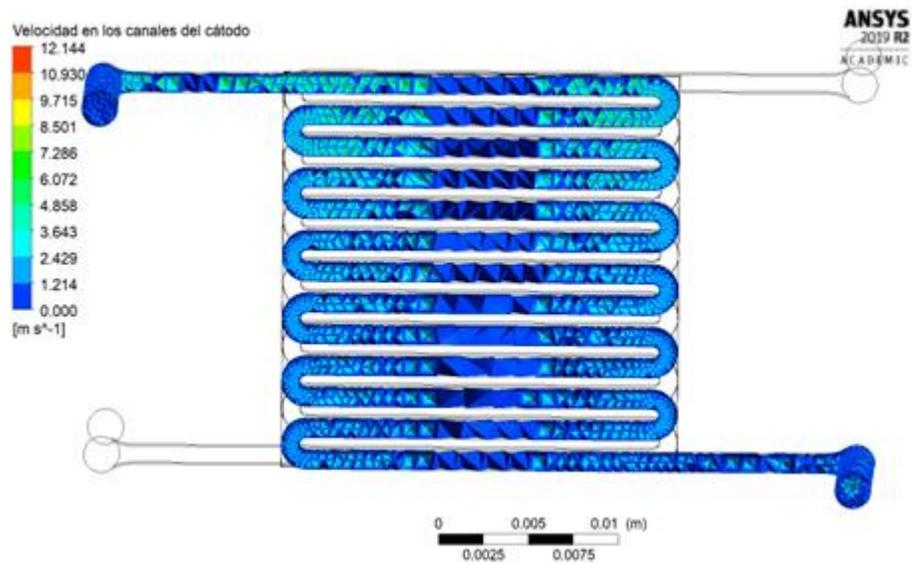


Figura 3.53 Velocidad en los canales del cátodo. [Autor]

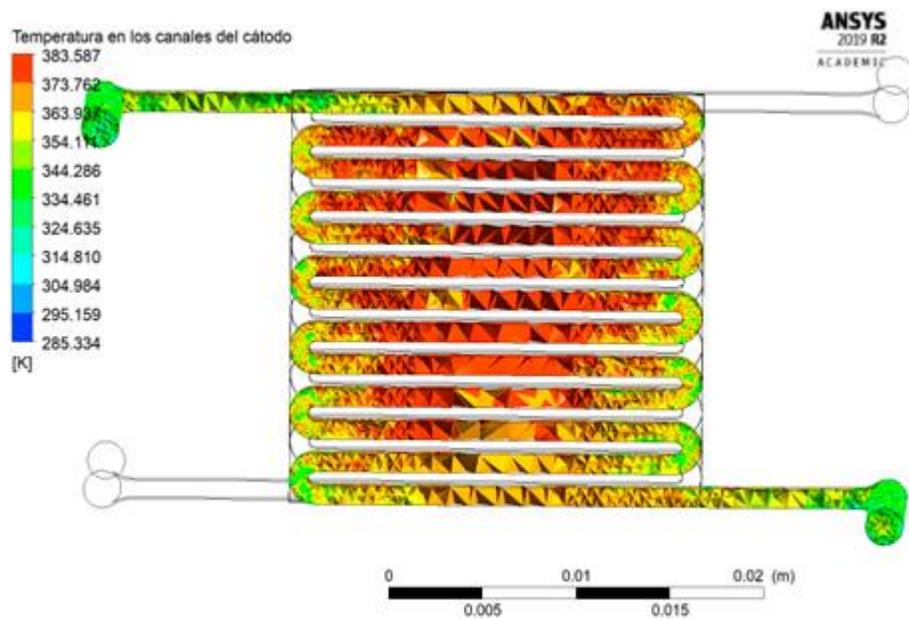


Figura 3.54 Temperatura en los canales del cátodo. [Autor]

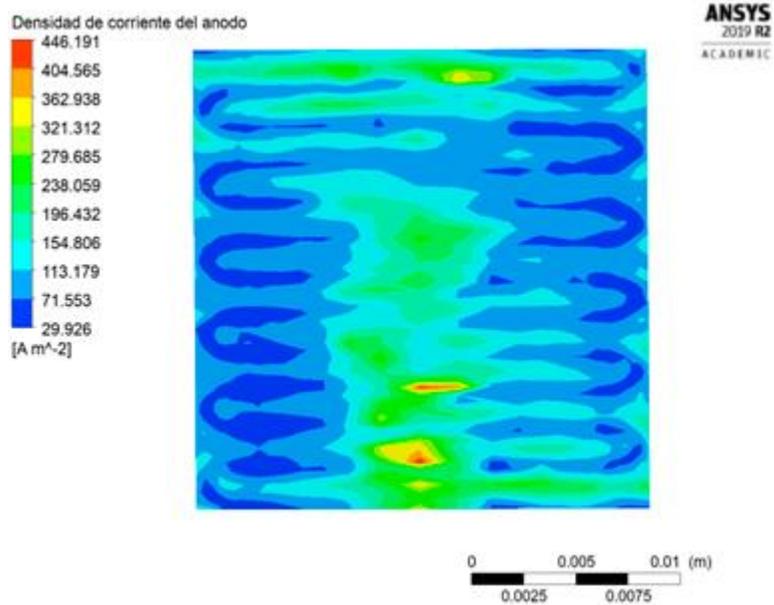


Figura 3.55 Densidad de corriente en el cátodo. [Autor]

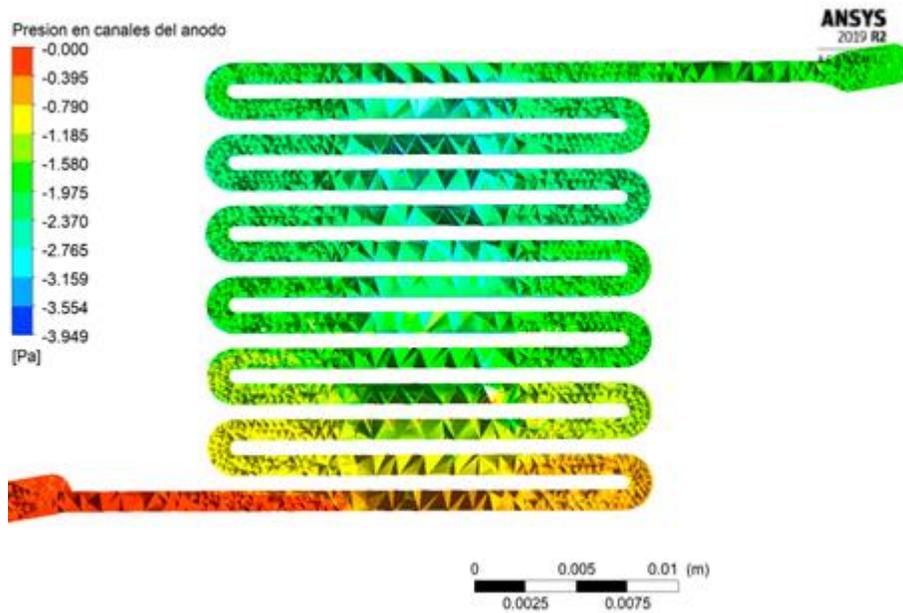


Figura 3.56 Presión en los canales del ánodo. [Autor]

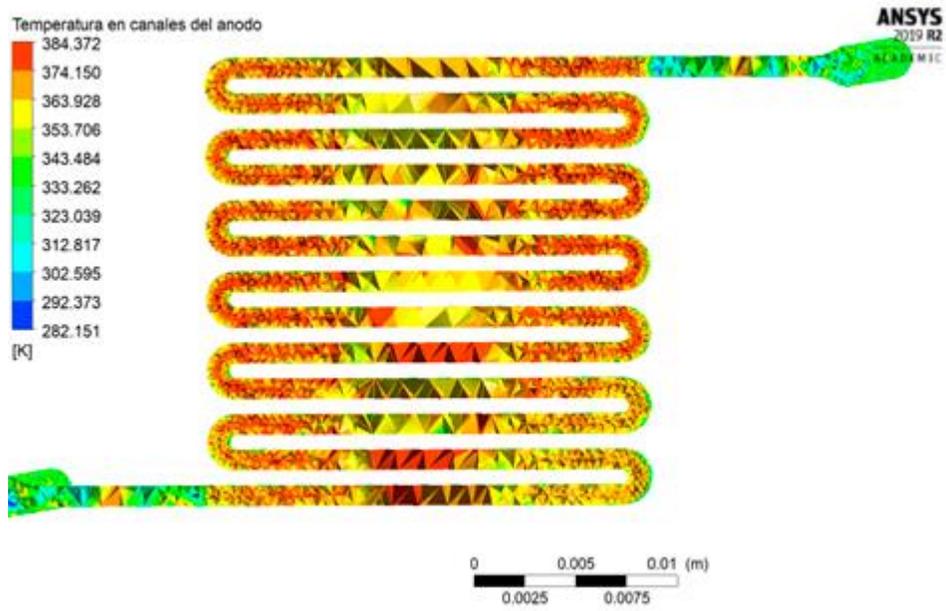


Figura 3.57 Temperatura en los canales del ánodo. [Autor]

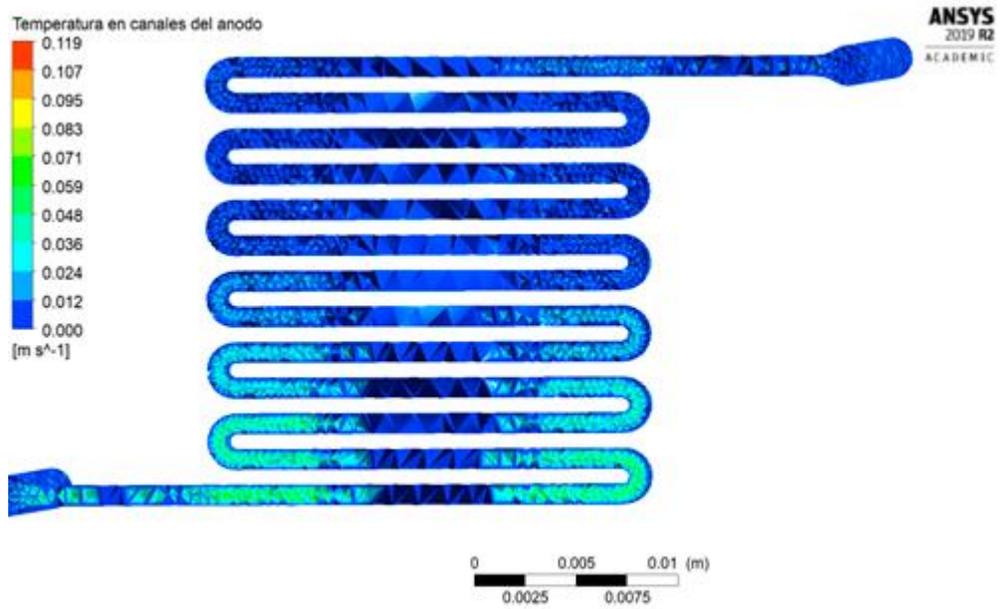


Figura 3.58 Velocidad en los canales del ánodo. [Autor]

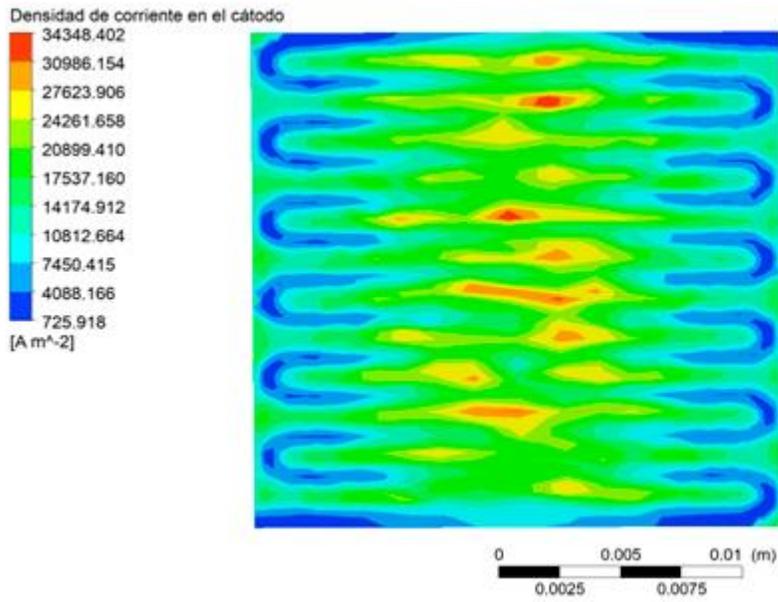


Figura 3.59 Densidad de corriente en el ánodo. [Autor]

3.4.3.1 Membrana

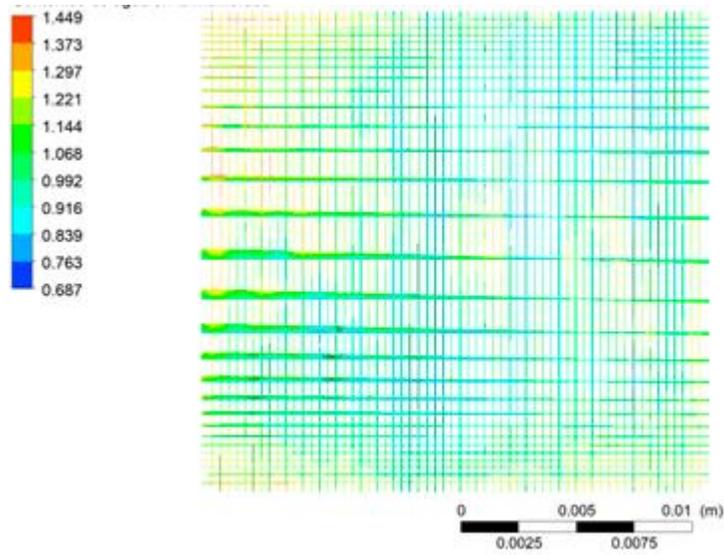


Figura 3.60 Contenido de agua en la membrana. [Autor]

3.4.3.2 Celda de combustible

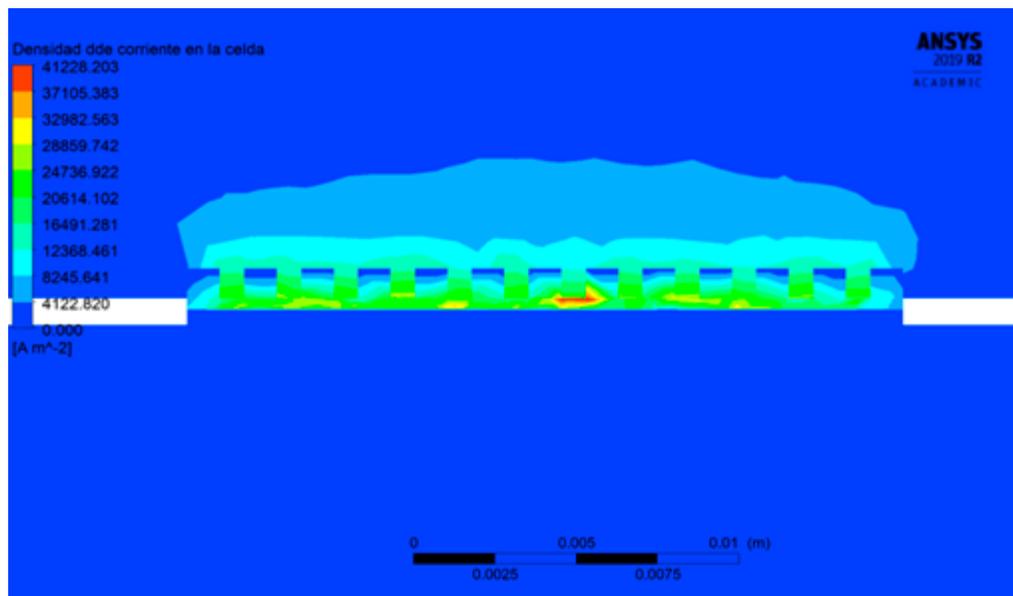


Figura 3.61 Densidad de corriente en la celda (plano de sección intermedia). [Autor]

3.6 Validación de los resultados de simulación

Para poder realizar una curva de polarización de debe variar el voltaje de forma descendente con el fin de poder tener las densidades de corriente en los terminales, para ellos se realizan varias simulaciones y los resultados se presentan a continuación.

3.6.1 Curvas de polarización

Representación gráfica de la variación del voltaje versus la intensidad, esta última generalmente se encuentra dividida por el área de la membrana (mayormente en cm^2), conocida también como densidad de corriente eléctrica, esta se expresa así para que el tamaño de la pila no sea un factor que afecte en los resultados obtenidos. Estas curvas tienen la finalidad de analizar el comportamiento de la pila combustible, en cuanto a su rendimiento e intensidad de potencia, de un modo cuantitativo y global [42]. Algunas curvas obtenidas por otros trabajos que se relacionan con la presente investigación son:

3.6.1.1 Experimento 1

En la investigación correspondiente a [42], se realizan varios experimentos para el análisis del comportamiento de una pila de combustible tipo PEM variando diferentes condiciones de funcionamiento, entre las que se destaca el efecto de la aplicación de diferentes temperaturas como 60°C, 80°C y 90°C, mientras que las otras consideraciones se mantuvieron fijas como el caudal del ánodo (10 cc/min), cátodo (1 l/min) y la humedad relativa del cátodo (100%). En la figura 1 se puede observar las curvas de polarización, comprobando que un aumento en la temperatura genera más rápido la activación de las reacciones electroquímicas, provocando un aumento en la densidad de corriente generada, lo que quiere decir que la pila genera mayor energía eléctrica, La curva que representa los 60°C tiene una caída brusca a medida que va aumentando la temperatura, todo lo contrario, ocurre con las temperaturas de 80°C y 90°C.

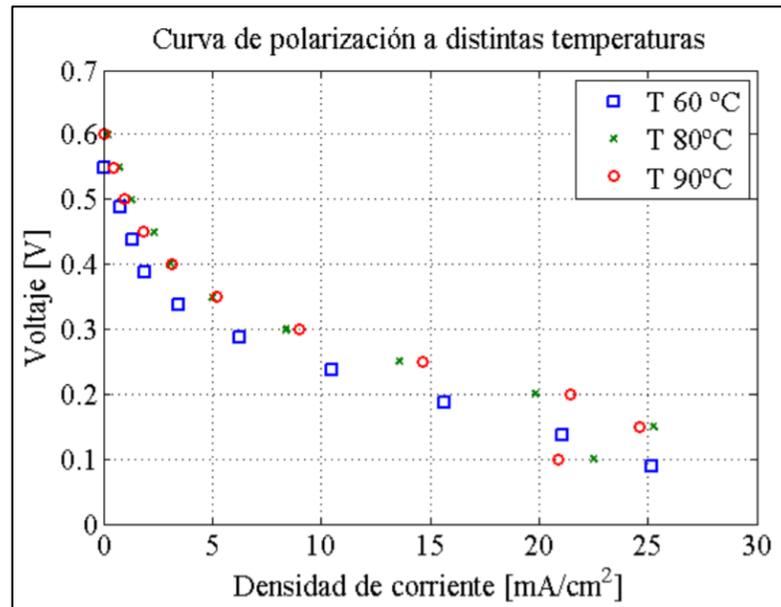


Figura 3.63 Curva de polarización a distinta temperatura. [43]

3.6.1.2 Experimento 2

Por otro lado, en [44] se aplican experimentos para analizar el comportamiento de la densidad de corriente en una pila PEM a diferentes humedades relativas de los gases reactantes, tanto en el ánodo como en el cátodo, mientras que se consideran como parámetros fijos a la temperatura de 80°C y las cantidades del ánodo y cátodo (1 mg/cm²). La comparación de las curvas de polaridad en la figura 1 muestran que se tiene un mejor rendimiento de la pila cuando la humedad relativa es del 100%.

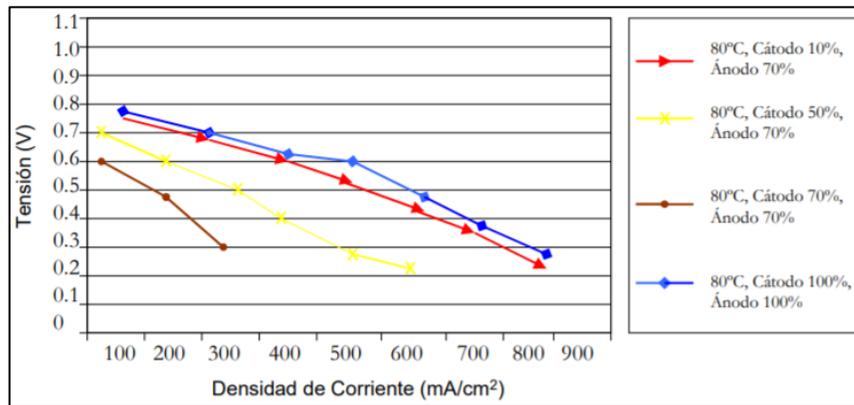


Figura 3.64 Curvas de polarización a diferente humedad relativa de los gases reactantes en una pila PEM [45]

3.6.1.3 Experimento 3

Al igual que en las investigaciones tratadas anteriormente en [46], se obtiene una comparación de las curvas de polarización al variar la temperatura en la pila combustible de tipo PEM. La celda de combustible empleada para los experimentos fue una celda única de “Elec troChem Inc.” (EFC25-01SP). Esta celda emplea una membrana “Nafion 115” (127 m de espesor), con un área activa de 25 cm². Papel carbón de 0,20 mm de espesor para el soporte; la capa de catalizador es del orden de aprox. 0.05 mm de espesor, por lo que el espesor total del electrodo es 0.25 ± 0.02 mm. La capa de catalizador está hecha de platino soportado sobre carbono, cargando 1 mg cm⁻² al 20% en peso de Pt/C. Como se muestra en la figura 1 la activación de las reacciones se facilita a temperaturas más altas

(menor sobrepotencial de activación) la resistencia celular es menor a temperaturas más altas (pendiente más baja de la curva).

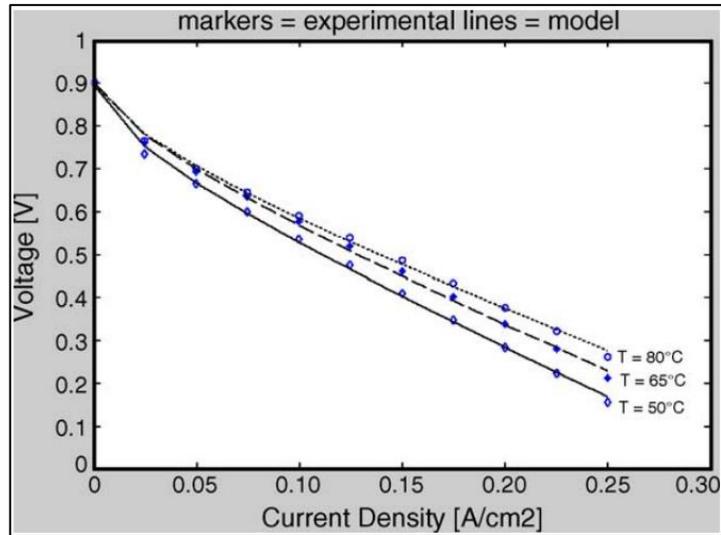


Figura 3.65 Curvas de polarización a diferente temperatura [46]

3.6.1.4 Experimento 4

En la investigación [43], a diferencia de los trabajos analizados con anterioridad, aquí la variación, en los experimentos simulados, se da por los valores diferentes de densidad de corriente de intercambio en cada electrodo, mientras que las condiciones fijas que se ocuparon en la pila de combustible fueron, la temperatura de la celda (53°C), la humedad relativa en el ánodo (66%), la humedad relativa en el cátodo (34%), el caudal másico de entrada de hidrógeno en el ánodo ($3 \text{ E}^{-09} \text{ kg/s}$) y el caudal másico de entrada de aire en el cátodo ($8.20 \text{ E}^{-07} \text{ kg/s}$). La figura 1 muestra las curvas de polarización obtenidas de la simulación para tres conjuntos diferentes de valores de densidades de corriente de intercambio, en donde el catalizador con el valor alto de densidad de corriente de intercambio produce una corriente alta en comparación con el catalizador con el valor más bajo de densidad de corriente de intercambio a la misma caída de voltaje. Estos resultados indican que un catalizador de mejor desempeño puede reducir las pérdidas de activación, lo que resultará en un mejor desempeño de la celda.

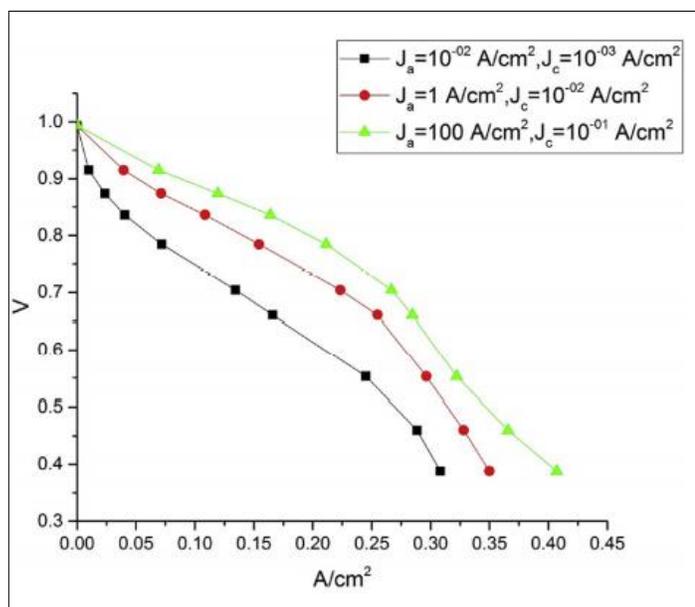


Figura 3.66 Comparación de curvas de polarización para diferentes valores de densidades de corriente de intercambio en electrodos de ánodo y cátodo. [43]

3.6.1.5 Experimento 5

El siguiente trabajo investigativo refleja el comportamiento de una pila alimentada con hidrógeno y oxígeno de acuerdo al uso de diferentes electrodos. [47]

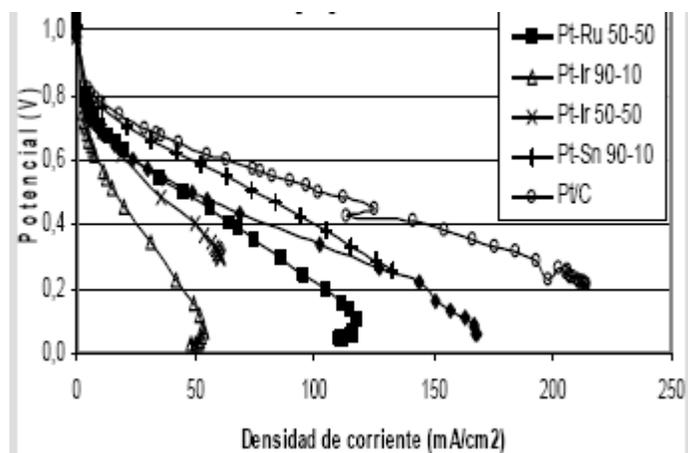


Figura 3.67 Comparación de curvas de polarización para diferentes valores de densidades de corriente de intercambio en electrodos de ánodo y cátodo variando el electrodo. [47]

3.6.2 Resultados de densidad de corriente con variación de voltaje

A continuación, se presentan los resultados de cada simulación.

Voltaje [V]	Densidad de corriente [A/cm^2]
0,8	ssc cathode Cell current density in A/cm2 [0.0001995262663366112] |
0,65	ssc cathode Cell current density in A/cm2 [0.006979226798563616] |
0,6	ssc cathode Cell current density in A/cm2 [0.01086929514107925] |
0,5	ssc cathode Cell current density in A/cm2 [0.01342718507126773] |
0,45	ssc cathode Cell current density in A/cm2 [0.0501169669609722] |
0,35	ssc cathode Cell current density in A/cm2 [0.06832317228153795] |
0,3	ssc cathode Cell current density in A/cm2 [0.07994720234098925] |
0,25	ssc cathode Cell current density in A/cm2 [0.1021700085118863] |

Tabla 3.11 Densidades de corriente respecto al voltaje. [Autor]

Con esto obtenemos la gráfica que se presenta a continuación.

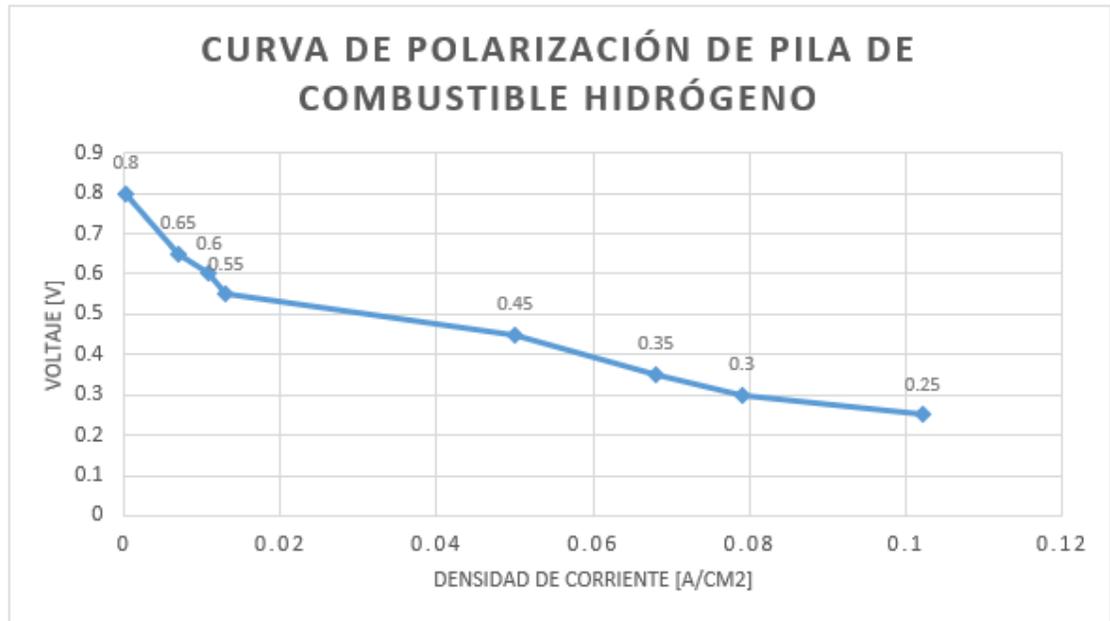


Figura 3.68 Curva de polarización del modelo propuesto. [Autor]

Se puede observar la curva de polarización son las típicas curvas que utilizan las pilas de tipo PEMFC. Al inicio de la curva podemos ver una caída de voltaje debido a proceso de activación electroquímica, también se puede observar que a medida que el voltaje descende por ley de conservación de la energía la densidad de corriente aumenta. Se aprecia un desnivel a medida que va aumentando la densidad de corriente esta se debe a una pérdida óhmica que se basa en el flujo iónico a través de la membrana, el flujo de los electrones que se trasladan hasta los materiales del electrodo. Y al final de la curva hay otro descenso debido a una pérdida difusiva debido a la dificultad que se presenta al momento del transporte de masa de los reactantes en la mayoría de los estudios se ha observado que el oxígeno suele ser el principal causante.

Con esto y tomando en cuenta el experimento 5, se procede a comparar las curvas de polarizaciones con el fin de verificar las tendencias y comparar los datos mediante un cálculo de error relativo. Lo datos se toman de acuerdo a la figura 3.70.

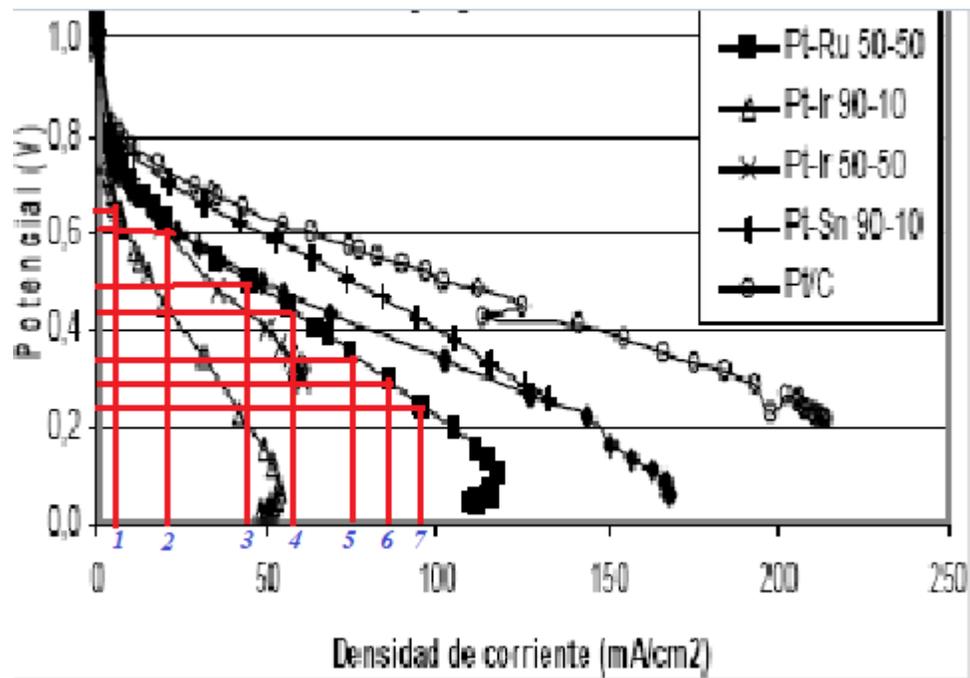


Figura 3.69 Toma de datos de la curva experimental. [Autor]

VOLTAJE	EXPERIMENTO 5	FLUENT
0.65	0.008	0.0069
0.6	0.018	0.01086
0.55	0.02	0.013
0.45	0.06	0.05
0.35	0.075	0.068
0.3	0.08	0.079
0.25	0.0992	0.1021

Tabla 3.12 Valores del método experimental y valores simulados. [Autor]

GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE CURVAS DE POLARIZACIÓN

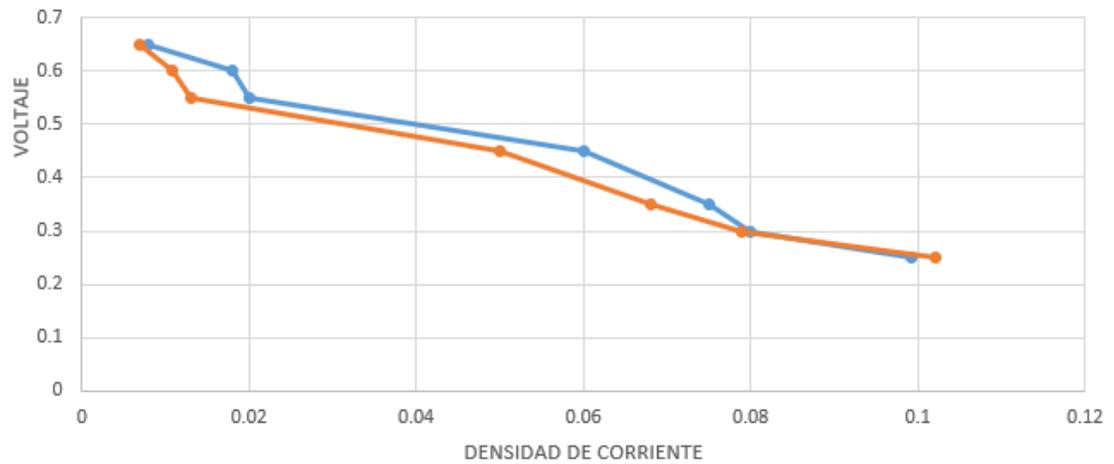


Figura 3.70

Comparación de curvas de polarización. [Autor]

3.6.3 Cálculo del error relativo

Para el cálculo se tomaron los valores de la tabla 3.17.

E. ABSOLUTO	E. RELATIVO	PORCENTAJE
0.0011	0.1375	13.75
0.00714	0.396666667	39.67
0.007	0.35	35.00
0.01	0.166666667	16.67
0.007	0.093333333	9.33
0.001	0.0125	1.25
0.0029	0.029233871	2.92

Tabla 3. 13 Valores del método experimental y valores simulados. [Autor]

Una vez obtenido el error para poder validar la simulación se puede corroborar que los valores reflejan semejanza, existen valores dentro del rango inferior o muy cercano al 15% que es lo recomendable y pequeños desfases en valores. Este desfase se da debido a que se encuentran al inicio del proceso es decir en la zona de activación donde el aumento de densidad de forma brusca mientras que se puede observar que los valores tienden a ser más normalizados en la zona de pérdidas óhmicas reflejando valores de error relativo bajos.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se escogió una pila PEM de área activa de 70 centímetros cuadrados modelo VET S 5W, este modelo tiene una temperatura de operación en el rango de 50 a 60 °C. La simplificación de la geometría de la pila de combustible de hidrógeno sirve para la optimización del modelado final, previo a la simulación, ayudando no solo a generar un menor gasto computacional y tiempo de análisis, sino que, también se evidencian resultados altamente confiables, debido a que, gracias a esto solo se estudia únicamente la parte de interés de la investigación, descartando el área que no interviene en el funcionamiento de la pila.
- Se realizaron las simulaciones de la pila de combustible donde se pudo observar varios fenómenos ocurridos en su interior, tanto en la parte del ánodo como en el cátodo; uno de ellos la caída de presión a lo largo del serpentín además se alcanzó una presión máxima de 578,9 Pa y una temperatura máxima de 383,7 K, se observó además que la velocidad decaía a medida que los flujos recorrían los canales. La densidad de corriente máxima se da en la zona del electrodo y la placa microporosa alcanzando un valor de $3,4 \frac{A}{m^2}$, también se observó la cantidad de agua contenida en la membrana.
- El error relativo en la zona de activación resulta ser mayor a un valor de 15% que es recomendable, esto debido a que es la zona de mayor inestabilidad en el funcionamiento de la pila de combustible hidrógeno, se reflejan valores de 9,33% a 16% en la zona llamada constante o de pérdidas óhmicas, de esta manera verificamos que es la zona donde se estabiliza la curva reflejando un valor de error relativo muy cercano al 10%, mientras que en la zona de concentración se reflejan valores menores al 3%, siendo estos valores considerados aceptables para que la simulación pueda ser validada.

4.2 Recomendaciones

- Optar por una revisión en investigaciones previas enfocadas en el diseño y fabricación de una pila de combustible, con características específicas, para comparar con el modelo de simulación y corregir los errores evidentes.
- Realizar una investigación suplementaria utilizando otros parámetros de entrada en la simulación de la pila de combustible de hidrógeno para que el análisis del estudio sea mucho más completo.
- Tener en cuenta el gasto computacional al realizar simulaciones de esta magnitud, con el fin de no tener complicaciones en el equipo y al mismo tiempo tener resultados acordes a la realidad.
- Verificar la concordancia de los valores de las condiciones de frontera debido a que un cambio leve puede llevar a que la simulación no se realice o se realice de forma incompleta.
- Para futuras investigaciones construir la pila de combustible y realizar experimentos mediante un banco de pruebas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. Cano, «Diseño y Fabricación de una Pila de hidrógeno de baja potencia,» *Universitat Politècnica de Catalunya*, pp. 23-25, 2015.
- [2] Ó. Gonzáles, «Estudi de la influencia de las condiciones atmosféricas en el rendimiento de pilas de combustibles de baja temperatura (PEMFC y DMFC) para su aplicación en aeronaves no tripuladas,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2017.
- [3] J. Rodríguez, «Modelado de una pila de combustible del tipo PEM para uso en la automoción.,» Univerdidad de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife , 2020.
- [4] O. Doñán y S. Sermeño, «Diseño de una pila de combustible de hidrógeno para producir una diferencia de potencia de voltios,» Universidad Don Bosco, El Salvador, 2008.
- [5] A. Fuent, «Fuel Cells Module Manual,» ANSYS, 2009.
- [6] M. Vera, «Química general,» Universidad Nacional del Nordeste, Argentina, 2010.
- [7] I. EG&G Technical Services, Fuel Cell Handbook (Seventh Edition), Morgantown: U.S. Department of Energy, 2004.
- [8] X. Elías y L. Jurado, El hidrógeno y las pilas de combustible, Madrid: Ediciones Díaz de Santos, 2012.
- [9] J. C. Ruiz, P. Juan, L. David, D. Pérez, P. F. Nuñez, B. Ballesteros, J. Canales y P. Gómez, «Pilas de combustible,» *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, nº 3, pp. 22-30, Septiembre 2006.
- [10] J. A. Asensio, J. Peña, D. Pérez, J. C. Ruiz, D. Morrero, P. Nuñez, B. Ballesteros, J. Canales, S. Borrós y P. Gómez, «Pilas de combustible de membrana polimérica,» *Afinidad*, vol. 68, nº 554, pp. 246-258, Julio 2011.
- [11] B. Ramírez, «Pilas de combustible en automoción: caraterización experimental de operación dinámica del "New European Driving Cucle" (NEDC),» Universidad de Sevilla, Sevilla, 2020.
- [12] L. Milena y C. Rojas, «Pilas de combustible y se desarrollo,» *Redalyc*, vol. 16, nº 1, pp. 247-263, Enero 2012.

- [13] S. Martínez, «Diseño y construcción de un sistema de humificación para un banco de celdas de combustibles tipo PEM,» Universidad Tecnológica San Juan del río, CHIHUAHUA, 2016.
- [14] F. Barreras y A. Lozano, «Hidrógeno. Pilas de combustible tipo PEM,» Universidad de Zaragoza, Zaragoza, 2012.
- [15] X. Salueña, «Diseño y fabricación de una pila de combustible de hidrógeno de baja potencia,» Universitat politècnica de catalunya, Barcelona, 2010.
- [16] J. Fernández, Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos, Barcelona: Reverté, S. A., 2012.
- [17] J. Pérez, Y. Aguilera, J. Hurtado y J. Vargas, «Modelación y simulación de fluidos-dinámica computacional de sistema de enfriamiento de gases para fundición de cobre mediante Coveridos Tiniente con endriador evaporativo,» *El sevier*, vol. 33, n° 4, pp. 179-187, 2017.
- [18] J. Sandino y A. Castrillón, «Conservación de masa y ecuación de Navier – Stokes para un fluido ideal desde la relatividad especial,» *Tumbaga*, vol. 1, n° 5, pp. 165-182, 2010.
- [19] L. Meneses, L. Díaz y G. González, «Dinámica de fluidos computacional en el análisis de intercambiadores de calor de coraza y tubos,» *UIS Ingenierías*, vol. 18, n° 2, pp. 237-244, 2019.
- [20] C. Aulestia, «Modelación numérica en tres dimensiones de flujo en las compuertas de al captación del proyecto Toachi-Pilatón aplicando dinámica de fluidos computacional (CFD),» Escuela politécnica nacional, Quito, 2017.
- [21] R. Buynas y K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, México: Mc Graw- Hill Interamericana, 2008.
- [22] Foro Nuclear, «Energía,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-energia-nuclear/que-es-el-hidrogeno/>.
- [23] Intelligy, «Materials,» 2018. [En línea]. Available: <https://intelligy.com>.
- [24] Geología eb, «Minerales,» 2014. [En línea]. Available: <https://geologiaweb.com/minerales/grafito/>.
- [25] world energy trade, «Metales,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.worldenergytrade.com/metales/cobre/cobre-material-indispensable-para-el-desarrollo-de-tecnologias-limpias>.

- [26] Imprenta Online, «Materiales,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.imprentaonline.net/blog/metacrilato/>.
- [27] Torni Tuercas y Herramienta, «Insumos,» 2020. [En línea]. Available: <https://tornituercasyherramientas.com/varios/>.
- [28] Festo, «Productos Festo MX,» 2020. [En línea]. Available: https://www.festo.com/cat/es-mx_mx/products__01198.
- [29] AFS, «Fluent Fuel Cells,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/fuelcells/node9.htm>.
- [30] P. Cavero, «Energías Renovables,» 2013. [En línea]. Available: <https://es.slideshare.net/pablocavero/modelamiento-matematico-bomba-de-ariete>.
- [31] O. E. D. VELASCO, «“DISEÑO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO”,» *UNIVERSIDAD DON BOSCO*, pp. 12-14, 2017.
- [32] S. d. C. A. Fluent, «Direct Industry,» ANSYS, 12 mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/ansys/product-9123-371824.html>.
- [33] G. Almeida, «Modelado y Simulación de una Celda de Combustible de Membrana de intercambio de protones,» *Escuela Superior Politécnica del Litoral*, pp. 5-7, Abril 2018.
- [34] A. R. P. EGAÑA, «EVALUACIÓN DE LA CELDA DE COMBUSTIBLE PLANTAMICROBIANA (PMFC) Y LAS CONDICIONES DE SU ENTORNO,» *UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA*, pp. 17-19, 2017.
- [35] R. A. A. Mendoza, «Celdas de Combustible Diseño, simulación, caracterización,» *ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA*, pp. 20-21, 2010.
- [36] J. A. S. Aguirre, «MODELADO Y VALIDACIÓN DE UNA MONOCELDA TIPO PEM,» *ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS*, pp. 43-50, 2018.
- [37] J. A. Cano, «Diseño y Fabricación de una Pila de combustible hidrógeno de baja potencia,» *Universitat Politècnica de Catalunya*, pp. 90-110, 2015.
- [38] I. R. d. I. T. Valdés, «Análisis y optimización de una celda de combustible de membrana de intercambio protónico,» *Scielo*, pp. 5-6, 2015.
- [39] Vet China, «Vet China supplies,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.vet-china.com/es/>.

- [40] CMC Carbon, «CMC Tech,» 2016. [En línea]. Available: https://www.cmcarbon.com/?gclid=EAIaIQobChMI1vfVsMqc8QIV2sDICH0VcA8QEAAAYASAAEgKodfD_BwE.
- [41] X. Wu, «The influence of active area and stacking on PEM fuel cell performance: A simulation modelling and experimental investigation,» RMIT University, 2017.
- [42] O. E. D. VELASCO, *DISEÑO DE UNA PILA DE COMBUSTIBLE DE HIDRÓGENO*, EL SALVADOR, 2008.
- [43] R. Álvaro Medina, Caracterización experimental de una pila de combustible de etanol directo, Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [44] A. Mayandía Aguirre, Descripción y modelado de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico, Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [45] S. M.G., M. Torchio y C. P., «Parameters estimation of a PEM fuel cell polarization curve and analysis of their behavior with temperature,» *Power Sources*, vol. 159, n° 2, pp. 824-835, 2006.
- [46] M. Arif, S. C.P. y J. A. Cheung, «A systematic approach for matching simulated and experimental polarization curves for a PEM fuel cell,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, n° 3, pp. 2206-2223, 2020.

ANEXOS

Anexo A-1. Modelo pila

A single fuel cell consists of a membrane electrode assembly (MEA) and two flow-field plates delivering about 0.5 and 1V voltage (too low for most applications). Just like batteries, individual cells are stacked to achieve a higher voltage and power. This assembly of cells is called a fuel cell stack, or just a stack.

The power output of a given fuel cell stack will depend on its size. Increasing the number of cells in a stack increases the voltage, while increasing the surface area of the cells increases the current. A stack is finished with end plates and connections for ease of further use.

Anexo A-2. Características técnicas

Tipos de celdas de combustible y características principales.

Tipo de celda	Electrolito	Aplicación inmediata	(MW)	Disponible comercialmente	Eficiencia con eléctrico (cogeneración)	Temp. de operación/ electrocatalizador
PEM	Membrana de intercambio protónico	Generación distribuida, transporte y aplic. móviles	Hasta 0.25	1997 (~1 kW) 2002 (transp.) 2001 (250 kW)	>40% (>70%)	80C/Pt
PAFC	Ácido fosfórico	Generación distribuida, cogeneración y transporte	0.2 - 10	1996 (200 kW) 1992 (transp.)	40% (80%)	200 C/Pt
MCFC	Carbonato fundido (sal fundida "ión móvil")	Generación distribuida, cogeneración, potes. central	0.25 - 100 (y mayor)	1997 2000	45% (70%)	650C/Ni
SOFC	Óxido sólido (cerámico)	G. distrib. potes. central	1 - 10 50 (y mayor)	2000	> 50% (> 80%)	1000C/ perovskitas

Anexo A3. Tornillos

Button Head Socket Screws

Inch

HIGH-GRADE ALLOY STEEL



Low heads streamline design. Use them in materials too thin to countersink; also for non-critical loading requiring heat treated screws

Equivalent Standard

ASME B18.3, BS 2470

Mechanical Properties

Material: Unbrako High Grade Alloy Steel

Thread Class: 3A

Max working temperature: -50°C to +300°C

Heat Treatment: Rc 39-44

Shear Strength: 96,000 lbf/in²

Min. Elongation: 9%

Length Tolerance

Diameter	to 1" Incl.	over 1" to 2" Incl.
To 1" incl.	-.03	-.04
Over 1" to 2"	-.03	-.06

Maximum Tightening Torques

Thread size nom.	Unplated		Plated	
	UNF	UNC	UNF	UNC
Maximum Tightening Torques (lbf. in.)				
#4	8.9	10	6.6	7.5
#5	13.0	14	9.7	10.0
#6	16.0	19	12.0	14.0
#8	30.0	32	22.0	24.0
#10	44.0	51	33.0	38.0
1/4	100.0	120	75.0	90.0
5/16	210.0	240	157.0	180.0
Maximum Tightening Torques (lbf. ft.)				
3/8	380.0	430	285.0	322.0
7/16	600.0	680	450.0	510.0
1/2	930.0	1050	697.0	787.0
5/8	1800.0	2000	1350.0	1500.0
3/4	3200.0	3560	2400.0	2670.0

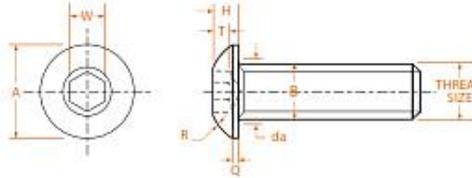
Head Marking



Head markings may vary slightly depending on manufacturing practice. UNBRAKO and 160 are recognized identifications for #10 diameter & larger.

Unbrako

50



Product Dimensions

Thread size nom.	Threads per inch		Head Diameter A		Hex Socket Size W	Head Height H		Socket Depth T
	UNC	UNF	max	min	min.	max	min	min
#0	-	80	.114	.104	.035	.032	.026	.020
#1	64	72	.139	.129	.050	.039	.033	.028
#2	56	64	.164	.154	.050	.046	.038	.028
#3	48	56	.188	.176	.0625	.052	.044	.035
#4	40	48	.213	.201	.0625	.059	.051	.035
#5	40	44	.238	.226	.0781	.066	.058	.044
#6	32	40	.262	.250	.0781	.073	.063	.044
#8	32	36	.312	.298	.0937	.087	.077	.052
#10	24	32	.361	.347	.1250	.101	.091	.070
1/4	20	28	.437	.419	.1562	.132	.122	.087
5/16	18	24	.547	.527	.1875	.166	.152	.105
3/8	16	24	.656	.636	.2187	.199	.185	.122
7/16	14	20	.750	.730	.2500	.232	.212	.138
1/2	13	20	.875	.851	.3125	.265	.245	.175
5/8	11	18	1.000	.970	.3750	.331	.311	.210
3/4	10	16	1.218	1.198	.5000	.398	.378	.272

Thread size nom.	thd. to hd max ref	Body Dia B		Transition			Tensile Load lbs.	
		max	min	Q max	Da max	R ref	UNC	UNF
#0	.500	.060	.0508	.010	.080	.070		
#1	.500	.073	.0695	.010	.093	.080		
#2	.500	.086	.0822	.010	.106	.099		
#3	.500	.099	.0949	.010	.119	.110		
#4	.500	.112	.1075	.015	.132	.135	960	1,040
#5	.500	.125	.1202	.015	.145	.141	1,260	1,310
#6	.625	.138	.1329	.015	.158	.158	1,440	1,620
#8	.750	.164	.1585	.015	.194	.185	2,220	2,240
#10	1.000	.190	.1840	.020	.220	.213	2,780	3,180
1/4	1.000	.250	.2435	.031	.280	.260	5,000	5,700
5/16	1.000	.3125	.3053	.031	.353	.309	8,350	9,250
3/8	1.250	.375	.3678	.031	.415	.368	12,400	14,000
7/16	1.500	.437	.4294	0.31	.478	.417	16,900	18,900
1/2	2.000	.500	.4919	.046	.560	.481	22,800	25,600
5/8	2.000	.625	.6163	.062	.685	.523	36,000	40,800
3/4	2.000	.750	.7406	0.78	.810	.670	53,200	59,300

N.B. Because of their head configurations, Button head screw tensile loads, are based on 160,000 lbf/in².

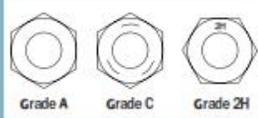
Heavy Hex Nuts



Product Description

A six sided internally threaded fastener, which is both thicker and wider than a same-sized finished nut. Nuts size 7/16 and smaller shall be double chamfered. Larger sizes are either double chamfered or chamfered on top with a washer faced bearing surface.

The strongest of all comparably graded nuts because of its greater length of thread engagement and greater resistance to dilation (widening or stretching). Grade-A nuts are used with low carbon heavy hex bolts. Grade-C nuts are recommended for use with A-325 structural bolts. Grade-2H nuts are recommended for use with bolts in high-pressure and high-temperature applications.



Heavy Hex Nuts Plain Steel & Zinc Plated

Grade A

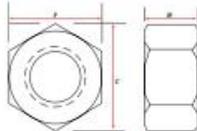
DIAMETER	GRADE A PLAIN STEEL	GRADE A ZINC PLATED	BOX QTY
3/8"	31CNHH	31CCNHZ	100
5/16"	31CNHH	31CCNHZ	100
3/8"	37CNHH	37CNHHZ	100
7/16"	43CNHH	43CNHHZ	100
1/2"	50CNHH	50CNHHZ	100
5/8"	62CNHH	62CNHHZ	25
3/4"	75CNHH	75CNHHZ	25
7/8"	87CNHH	87CNHHZ	15
1"	100CNHH	100CNHHZ	10
1-1/4"	125CNHH	125CNHHZ	5
1-1/2"	150CNHH	150CNHHZ	5

* Grade A Heavy Hex Nuts are also available in bulk cartons.

Heavy Hex Nuts Plain Steel

A563 Grade C/A194 Grade 2H

DIAMETER	A563 GRADE C PLAIN STEEL	A194 GRADE 2H PLAIN STEEL	QTY
1/2"	30CNA325	30CNH2H	1000
5/8"	62CNA325	62CNH2H	800
3/4"	75CNA325	75CNH2H	500
7/8"	87CNA325	87CNH2H	300
1"	100CNA325	100CNH2H	250
1-1/4"	125CNA325	125CNH2H	150
1-1/2"	150CNA325	150CNH2H	75



Dimensions

DIAMETER	WIDTH ACROSS FLATS (F)		WIDTH ACROSS CORNERS (C)		NUT THICKNESS (H)	
	SAGS	MIN.	MIN.	MAX.	SAGS	MIN.
3/8"	17/32"	.501	.658	.777	.506	.218
5/16"	9/32"	.562	.746	.850	.622	.280
3/8"	14/32"	.688	.909	1.034	.768	.341
7/16"	3/4"	.750	.978	1.106	.830	.403
1/2"	7/8"	.875	1.138	1.277	.969	.464
5/16"	15/16"	.938	1.211	1.357	1.037	.526
5/8"	1-1/16"	1.062	1.381	1.534	1.175	.587
3/4"	1-1/4"	1.250	1.512	1.671	1.382	.730
7/8"	1-7/16"	1.438	1.714	1.881	1.589	.833
1"	1-5/8"	1.625	1.917	2.092	1.796	.956
1-1/4"	2"	2.000	2.308	2.609	2.209	1.187
1-1/2"	2-3/8"	2.375	2.700	3.002	2.622	1.433

FASTENERS

Fasteners

FLAT WASHERS



U.S. STANDARD (USS)

Developed to satisfy engineering requirements in the majority of industrial application in all fields of manufacturing, maintenance and repair. The O.D., I.D. and thickness specifications were developed to meet the optimum of applications.

All listed sizes are available in plain and zinc plated.

Bolt Size In.	Outside Diameter In.	Inside Diameter In.	Thickness
3/16	3/16	1/4	.036/.065
1/4	3/4	3/16	.051/.080
3/16	7/8	3/8	.064/.104
1/2	1	7/16	.064/.104
7/16	1 1/4	1/2	.064/.104
1/2	1 3/8	9/16	.086/.132
9/16	1 1/2	3/4	.086/.132
5/8	1 3/4	11/16	.108/.160
3/4	2	13/16	.122/.177
7/8	2 1/4	15/16	.136/.192
1	2 1/2	1 1/16	.136/.192
1 1/8	2 3/4	1 1/4	.136/.192
1 1/4	3	1 3/8	.136/.192
1 3/8	3 1/4	1 1/2	.153/.213
1 1/2	3 1/2	1 5/8	.153/.213
1 5/8	3 3/4	1 3/4	.153/.213
1 3/4	4	1 7/8	.153/.213
1 7/8	4 1/4	2	.153/.213
2	4 1/2	2 1/8	.153/.213
2 1/4	4 3/4	2 3/8	.193/.248
2 1/2	5	2 5/8	.210/.280
2 3/4	5 1/4	2 7/8	.228/.310
3	5 1/2	3 1/8	.249/.327

S.A.E.

Specifications for S.A.E. washers were developed and specified by the Society of Automotive Engineers to meet the requirements in most of the applications in its field. They are smaller O.D. and thinner gauges than their counterpart bolt sizes of U.S. Standard washers.

Bolt Size In.	Outside Diameter In.	Inside Diameter In.	Thickness
#6	3/8	3/32	.036/.065
#8	7/16	3/16	.036/.065
#10	1/2	7/32	.036/.065
#12	9/16	1/4	.051/.080
1/4	3/4	3/16	.051/.080
3/16	11/16	11/32	.051/.080
1/2	1 1/8	13/32	.051/.080
7/16	1 1/4	13/32	.051/.080
1/2	1 1/8	17/32	.074/.121
9/16	1 3/8	19/32	.074/.121
5/8	1 1/2	21/32	.074/.121
3/4	1 3/4	13/16	.108/.160
7/8	1 3/4	13/16	.108/.160
1	2	1 1/16	.108/.160
1 1/8	2 1/4	1 1/16	.108/.160
1 1/4	2 1/2	1 1/16	.136/.192
1 3/8	2 3/4	1 7/16	.136/.192
1 1/2	3	1 9/16	.153/.213

ANSI specifications allow a tolerance of plus or minus a gauge on nominal thickness of commercial washers.

PRODUCT CATALOG 2009/10

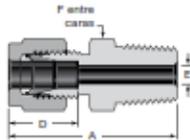
163

FASTENERS
 MASONRY ANCHORS
 DRILLS/SAWS & ABRASIVES
 TOOLS & ACCESSORIES
 CONTRACTOR & INDUSTRIAL
 SAFETY PRODUCTS
 CHEMICALS & JANITORIAL
 AUTO & ELECTRICAL
 STRUT & HANGERS

Anexo A6. Racor

Racores rectos

Conectores macho



NPT

Ø Ext. Tubo	Tamaño NPT	Referencia Básica	Dimensiones			
			A	D	E ^①	F
Dimensiones, pulg						
1/16	1/16	-100-1-1	0,94	0,34	0,05	5/16
	1/8	-100-1-2	1,03			7/16
	1/4	-100-1-4	1,22			9/16
1/8	1/16	-200-1-1	1,17	0,50	0,09	7/16
	1/8	-200-1-2	1,20			7/16
	1/4	-200-1-4	1,40			9/16
	3/8	-200-1-6	1,41			11/16
	1/2	-200-1-8	1,66			7/8
3/16	1/8	-300-1-2	1,23	0,54	0,12	7/16
	1/4	-300-1-4	1,43			9/16
1/4	1/16	-400-1-1	1,29	0,66	0,12	1/2
	1/8	-400-1-2	1,29			7/16
	1/4	-400-1-4	1,49			9/16
	3/8	-400-1-6	1,51			11/16
	1/2	-400-1-8	1,76			7/8
	3/4	-400-1-12	1,82			1 1/16
5/16	1/8	-500-1-2	1,34	0,64	0,19	9/16
	1/4	-500-1-4	1,52			9/16
	3/8	-500-1-6	1,54			11/16
3/8	1/8	-600-1-2	1,39	0,66	0,28	5/8
	1/4	-600-1-4	1,57			5/8
	3/8	-600-1-6	1,57			11/16
	1/2	-600-1-8	1,82			7/8
	3/4	-600-1-12	1,88			1 1/16
	1	-600-1-16	2,14			1 3/8
1/2	1/8	-810-1-2	1,53	0,90	0,19	13/16
	1/4	-810-1-4	1,71			13/16
	3/8	-810-1-6	1,71			13/16
	1/2	-810-1-8	1,93			7/8
	3/4	-810-1-12	1,99			1 1/16
	1	-810-1-16	2,25			1 3/8
5/8	1/4	-1010-1-4	1,74	0,96	0,28	15/16
	3/8	-1010-1-6	1,74			15/16
	1/2	-1010-1-8	1,93			15/16
	3/4	-1010-1-12	1,99			1 1/16
3/4	3/8	-1210-1-6	1,80	0,96	0,41	1 1/16
	1/2	-1210-1-8	1,99			1 1/16
	3/4	-1210-1-12	1,99			1 1/16
	1	-1210-1-16	2,25			1 3/8
7/8	1/2	-1410-1-8	1,99	1,02	0,47	1 3/16
	3/4	-1410-1-12	1,99			1 3/16
	1	-1410-1-16	2,25			1 3/8
1	1/2	-1610-1-8	2,26	1,23	0,47	1 3/8
	3/4	-1610-1-12	2,26			1 3/8
	1	-1610-1-16	2,45			1 3/8
1 1/8	1	B-1810-1-16	2,45	1,23	0,88	1 5/8
1 1/4	1	-2000-1-16	3,04	1,62	0,88	1 3/4
	1 1/4	-2000-1-20	3,04			1,09
1 1/2	1 1/2	-2400-1-24	3,50	1,97	1,34	2 1/8
2	2	-3200-1-32	4,47	2,66	1,81	2 3/4

① La dimensión E es el paso mínimo. Estos racores pueden taladrarse a un diámetro inferior mayor en la conexión roscada cónica o paralela.

Consulte las instrucciones de instalación que empiezan en la página 69

Ø Ext. Tubo	Tamaño NPT pulg	Referencia Básica	Dimensiones			
			A	D	E ^①	F
Dimensiones, mm						
2	1/8	-2MO-1-2	30,5	12,9	1,7	12
	1/4	-2MO-1-4	35,6			14
3	1/8	-3MO-1-2	30,5	12,9	2,4	12
	1/4	-3MO-1-4	35,6			14
4	1/8	-4MO-1-2	31,2	13,7	2,4	12
	1/4	-4MO-1-4	36,3			14
6	1/8	-6MO-1-2	32,8	15,3	4,8	14
	1/4	-6MO-1-4	37,9			14
	3/8	-6MO-1-6	38,4			18
	1/2	-6MO-1-8	44,7			22
8	1/8	-8MO-1-2	34,2	16,2	4,8	15
	1/4	-8MO-1-4	38,7			15
	3/8	-8MO-1-6	39,3			18
	1/2	-8MO-1-8	45,6			22
10	1/8	-10MO-1-2	36,3	17,2	4,8	18
	1/4	-10MO-1-4	40,9			18
	3/8	-10MO-1-6	40,9			18
	1/2	-10MO-1-8	46,5			22
12	1/8	-12MO-1-2	38,8	22,8	4,8	22
	1/4	-12MO-1-4	43,4			22
	3/8	-12MO-1-6	43,4			22
	1/2	-12MO-1-8	49,0			22
14	1/8	-14MO-1-2	41,1	24,4	7,1	24
	1/4	-14MO-1-4	44,1			24
	3/8	-14MO-1-6	44,1			24
	1/2	-14MO-1-8	49,0			24
15	1/2	-15MO-1-8	49,0	24,4	11,9	24
	3/8	-16MO-1-6	44,1			24
	1/2	-16MO-1-8	49,0			24
	3/4	-16MO-1-12	50,5			27
18	1/2	-18MO-1-8	50,5	24,4	11,9	27
	3/4	-18MO-1-12	50,5			27
20	1/2	-20MO-1-8	52,3	26,0	11,9	30
	3/4	-20MO-1-12	52,3			30
	1	-22MO-1-16	57,1			35
22	3/4	-22MO-1-12	52,3	26,0	15,9	30
	1	-22MO-1-16	57,1			35
	1	-25MO-1-16	62,3			35
25	1/2	-25MO-1-8	57,5	31,3	11,9	35
	3/4	-25MO-1-12	57,5			35
	1	-25MO-1-16	62,3			35
28	1	-28MO-1-16	72,4	36,6	21,8	41
	1 1/4	-28MO-1-20	73,1			46
	1	B-28MO-1-16	75,0			41
30	1 1/4	B-28MO-1-20	77,3	31,6	24,6	46
	1 1/4	-30MO-1-20	77,2			46
32	1 1/4	-32MO-1-20	79,6	42,0	28,6	46
	1 1/2	-38MO-1-24	91,6			55

① La dimensión E es el paso mínimo. Estos racores pueden taladrarse a un diámetro inferior mayor en la conexión roscada cónica o paralela.



Anexo A.7 Junta

60 Racores para Tubo Galgables y Adaptadores

Piezas de repuesto

Juntas planas para roscas ISO/BSP Paralelas



Junta RS/RSD

Acero al carbono y acero inoxidable (racores RS)

Las juntas de acero al carbono para racores RS crean el cierre en roscas ISO/BSP paralelas.



La junta RS consiste en un anillo interior de FKM fluorocarbono ligado a un anillo exterior de acero al carbono.

La junta RSD (tipo DIN) consiste en un anillo interior de FKM fluorocarbono ligado a un anillo exterior de acero inoxidable o de acero al carbono según la norma ISO 1179-1973. Se puede utilizar con conexiones finales diseñadas según DIN 3852 Parte 2.

La junta RSNB es un anillo metálico de acero inoxidable 304L similar a DIN 7603 clase D.



Junta RSNB



Cobre (racores RP y RS)

La junta de cobre para racores RP y RS crea el cierre en roscas ISO/BSP paralelas.



Cobre y níquel (racores RG para manómetros)

La junta para racores RG crea el cierre en manómetros con roscas macho ISO/BSP paralelas.

Tamaño Rosca ISO, pulg	Referencia	
	Cobre	Níquel
1/4	CU-4-RG-2	NI-4-RG-2
3/8	CU-6-RG-2	NI-6-RG-2
1/2	CU-8-RG-2	NI-8-RG-2

Tamaño Rosca ISO, pulg	Referencia		
	Junta RS ¹	Junta RSD ²	Junta RSNB
1/8	S-2-RS-2V	SS-2-RSD-2V	304L-2-RSNB-2
1/4	S-4-RS-2V ³	SS-4-RSD-2V	304L-4-RSNB-2
3/8	S-6-RS-2V ³	SS-6-RSD-2V	304L-6-RSNB-2
1/2	S-8-RS-2V ³	SS-8-RSD-2V	304L-8-RSNB-2
3/4	S-12-RS-2V	SS-12-RSD-2V	304L-12-RSNB-2
1	S-16-RS-2V	SS-16-RSD-2V	304L-16-RSNB-2
1 1/4	S-20-RS-2V	SS-20-RSD-2V	304L-20-RSNB-2
1 1/2	S-24-RS-2V	SS-24-RSD-2V	304L-24-RSNB-2

¹ También disponible con anillo interior de Buna. Para pedirlos sustituya la V por una B en la referencia.

Ejemplo: S-2-RS-2B

² También disponibles con anillo exterior de acero al carbono. Para pedirlos sustituya la SS por una S en la referencia.

Ejemplo: S-8-RSD-2V

³ También disponibles con anillo exterior de acero inoxidable. Para pedirlos sustituya la S por una SS en la referencia.

Ejemplo: SS-8-RS-2V

Tamaño Rosca ISO, pulg	Referencia
1/8	CU-2-RP-2
1/4	CU-4-RP-2
3/8	CU-6-RP-2
1/2	CU-8-RP-2
3/4	CU-12-RP-2
1	CU-16-RP-2
1 1/4	CU-20-RP-2
1 1/2	CU-24-RP-2



PTFE (Racores RJ)

Las juntas de PTFE para racores RJ efectúan el cierre en las roscas macho ISO/BSP paralelas.

Tamaño Rosca ISO, pulg	Referencia
Juntas estándar	
1/4	T-4-RJ-2
3/8	T-6-RJ-2
1/2	T-8-RJ-2
Juntas gruesas	
1/4	T-4-RJ-2-T
3/8	T-6-RJ-2-T
1/2	T-8-RJ-2-T

Contacte con su representante autorizado de Swagelok para las dimensiones de las juntas.

Swagelok