



**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE PUEBLA**

Facultad de Ciencias de la Electrónica

**“Propuesta de diseño biomimético en canales de flujo catódicos
de una celda de combustible PEM”**

TESIS

Que para obtener el título de:
Licenciado en Ingeniería en Energías Renovables

PRESENTA

Cristopher Aguila Anguiano

Directora de tesis: Dra. Nallely Téllez Méndez

Co Asesor: Dr. Jorge Cotzomi Paleta

Puebla, Pue. Abril del 2024

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres: María de la luz Anguiano y Héctor Aguila quienes me han apoyado en todo momento y en cada aspecto de mi vida, las bases que hoy me forman son resultado de sus enseñanzas y de ellos he aprendido a ser resiliente en momentos difíciles en la vida, espero pronto retribuirles todo lo que me han dado con tanto amor. También dedico este trabajo a mis hermanos y hermanas: Agustín, Fabiola, Danuzia y Fabián de quienes, al ser yo el más pequeño, aprendí de sus experiencias y adquirí de cada uno de ellos rasgos para formar mi propia personalidad que serán parte de mi hasta el último momento. Dedico también este trabajo a mis sobrinos quienes tienen una claridad del presente y futuro que habría deseado tener a su edad, con la que seguramente lograrán cualquier cosa que se propongan, en general lo dedico a mi familia de quien he aprendido a seguir adelante en momentos difíciles de enfermedad, pérdidas o incertidumbre.

Especialmente dedico este trabajo a mi novia y mi mejor amiga Arleth Melisa a quien conocí a mitad de la carrera y quien se convirtió rápidamente en mi mayor apoyo en esta etapa de mi vida y espero que en muchas más, le agradezco mucho haber estado en momentos de incertidumbre, como lo fue la pandemia, en los que ambos pensamos en algún momento en abandonar, pero gracias a que siempre estuvimos ahí el uno para el otro, hoy compartimos el gozo de haber logrado concluir la carrera juntos.

-"En la infinidad del tiempo y la inmensidad del espacio, es mi alegría compartir un planeta y una época con ustedes."-

(Carl Sagan)

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla y especialmente a las profesoras y profesores de la Facultad de Ciencias de la Electrónica, grandes maestros y mejores personas de las que aprendí mucho, y cuyas enseñanzas en muchos casos impactaron no solo en mi conocimiento sino también en mi persona. Agradezco especialmente a mi asesora la Dra. Nallely Téllez Méndez, quien me impartió clases muy temprano en la carrera y me apoyó en la realización de este trabajo en el final de esta.

Finalmente agradezco de nuevo a mi familia, a mi novia, pero también a los amigos que hice durante la carrera, quienes hicieron más divertida esta etapa, y al final la mayoría de los recuerdos que tengo de esta son los que compartí con ellos durante las clases y las horas libres.

ÍNDICE DE CONTENIDO:

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 ANTECEDENTES	9
1.2 HIPÓTESIS	9
1.3 JUSTIFICACIÓN	10
1.4 OBJETIVOS	12
1.4.1 Objetivo general:	12
1.4.2 Objetivos específicos:	12
1.5 DESCRIPCIÓN	13
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	15
2.1 HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO	15
2.1.1 Producción y clasificación del hidrógeno.	16
2.1.2 Almacenamiento del hidrógeno.....	18
2.2 CELDAS DE COMBUSTIBLE	20
2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE	21
2.3.1 Celdas de Combustible Alcalina (AFC).....	21
2.3.2 Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico	23
2.3.3 Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)	24
2.3.4 Celdas de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC)	25
2.3.5 Celdas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)	27
2.3.6 Micro pilas de combustible	28
2.3.7 Celdas de combustible biológicas.....	29
2.4 OXIDANTE EN CELDAS DE COMBUSTIBLE	30

2.5 TASAS DE SUMINISTRO DE OXÍGENO	31
2.5.1 Consumo directo de oxígeno	31
2.5.2 Tasas de suministro de aire	32
2.6 COMPONENTES DE UNA CELDAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEM)	33
2.7 PLACAS DE FLUJO DE CAMPO	35
2.7.1 Materiales de placas de flujo de campo.....	37
2.8 GEOMETRÍA DE LOS CANALES DE FLUJO (FFP)	39
2.8.1 Patrón de flujo tipo serpiente	40
2.8.2 Patrón de flujo tipo Pin o Malla	41
2.9 CRITERIOS GEOMÉTRICOS DE DISEÑO.....	42
2.10 PERDIDAS EN CELDAS DE COMBUSTIBLE	45
2.10.1 Perdidas por activación.....	47
2.10.2 Perdidas óhmicas.....	47
2.10.3 Perdidas por concentración o transporte de masa.....	48
2.11 CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN	48
2.11.1 Temperatura.....	49
2.11.2 Humedad relativa.....	50
2.11.3 Presión.....	51
2.11.4 Velocidad de suministro del aire en el cátodo.....	52
2.12 DISEÑO BIOMIMÉTICO	53
2.13 LEYES DE MURRAY.....	55
2.14 LEY DE FINET	57

2.14.1	Aplicaciones médicas de la ley de Finet.	58
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA		60
3.1 CONDICIONES INICIALES Y CONSIDERACIONES		62
CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....		64
4.1 DISEÑO DEL PATRÓN DE FLUJO TIPO SERPENTÍN		64
4.1.1	Simulación del diseño tipo serpentín.	66
4.2 PATRÓN DE FLUJO TIPO PIN O MALLA		68
4.2.1	Simulación del diseño tipo malla.....	70
4.3 PROPUESTA DE DISEÑO BIOINSPIRADO		72
4.3.1	Diseño final inspirado en escamas:	74
4.3.2	Simulación del diseño bioinspirado (escamas):.....	76
4.4 PROPUESTA DE DISEÑO BIOMIMÉTICO		78
4.4.1	Desarrollo del diseño biomimético	80
4.4.2	Simulación del diseño biomimético:	86
4.5 SIMULACIÓN DE VISCOSIDAD DINÁMICA.....		88
4.6 SIMULACIÓN DE MECANIZADO DE CONTROL NUMÉRICO POR COMPUTADORA (CNC).		91
4.6.1	Mecanizado del modelo tipo serpentín.	91
4.6.2	Mecanizado del modelo tipo arterias.	92
4.6.3	Mecanizado del modelo tipo malla.....	93
4.6.4	Mecanizado del modelo tipo malla.....	94
CAPÍTULO 5 ANÁLISIS.....		96
5.1 ANÁLISIS DE PRESIÓN		96

5.2 ANÁLISIS DE TEMPERATURA.....	97
5.3 ANÁLISIS DE FRACCIÓN MÁSCICA DE AGUA CONDENSADA	99
CONCLUSIONES	101
SUGERENCIAS	103
BIBLIOGRAFÍA	103

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES:

Ilustración 1.3.1 Objetivo de desarrollo sostenible	11
Ilustración 2.1.1 Métodos de almacenamiento del hidrógeno.....	20
Ilustración 2.2.1 Forma básica de una celda de combustible	21
Ilustración 2.3.1 Diagrama de celda de combustible Alcalina.....	22
Ilustración 2.3.2 Diagrama de celda de combustible PEM	24
Ilustración 2.3.3 Diagrama de Celda de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC).....	25
Ilustración 2.3.4 Diagrama de Celda de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC).....	26
Ilustración 2.3.5 Diagrama de Celda de Combustible de Óxido Sólido (SOFC).....	27
Ilustración 2.3.6 Micro fuel cells	28
Ilustración 2.3.7 Esquema de celda de combustible biológica	29
Ilustración 2.6.1 Componentes de una PEMFC.....	34
Ilustración 2.7.1 Placa de flujo empleada en PEMFC.....	36
Ilustración 2.8.1 Diseños convencionales de FFP	39
Ilustración 2.8.2 Esquema de diseño tipo Serpentin.	41
Ilustración 2.8.3 Esquema de diseño tipo Pin o Malla.	42
Ilustración 2.9.1 Vista de sección del canal y diferentes configuraciones geométricas posibles ..	43
Ilustración 2.9.2 Geometría de canal obtenida mediante optimización	44
Ilustración 2.9.3 Casos de estudio en canales de flujo.....	45
Ilustración 2.9.4 5 Curvas de polarización para los escenarios propuestos por Ahmadi & Sajad	45
Ilustración 2.10.1 Curva de polarización ideal de una celda de combustible	46

Ilustración 2.11.1 Curvas de polarización de una pila de combustible en diferentes temperatura	49
Ilustración 2.11.2 Variación de la resistencia iónica con diferentes valores de humedad relativa.	50
Ilustración 2.11.3 Curvas de polarización con diferentes presiones de operación.	51
Ilustración 2.11.4 Curvas de polarización con diferentes velocidades de suministro de aire.	52
Ilustración 2.12.1 Espiral de diseño biomimético.	54
Ilustración 2.14.1 Representación gráfica de la ley de Finet	58
Ilustración 2.14.2 Angioplastia coronaria	59
Ilustración 2.14.3 Baipás de arteria.....	60
Ilustración 4.1.1 Planos del diseño tipo serpiente.	64
Ilustración 4.1.2 Diseño final de canales de flujo tipo serpiente	65
Ilustración 4.1.3 Análisis de presión (Diseño serpiente).....	66
Ilustración 4.1.4 Análisis de Temperatura (Diseño serpiente)	67
Ilustración 4.1.5 Fracción másica de agua condensada (Diseño serpiente).	67
Ilustración 4.1.6 Distribución del oxígeno (modelo serpiente).	68
Ilustración 4.2.1 Planos del diseño tipo malla.	69
Ilustración 4.2.2 Diseño final de canales de flujo tipo malla.	70
Ilustración 4.2.3 Análisis de presión (Diseño tipo Malla).	71
Ilustración 4.2.4 Análisis de temperatura (Diseño tipo Malla).....	71
Ilustración 4.2.5 Fracción másica de agua condensada y distribución del oxígeno (Diseño tipo malla).....	72
Ilustración 4.3.1 Coeficientes de resistencia de formas comunes.	73
Ilustración 4.3.2 Escamas cicloides de un rutilo (Rutilus rutilus)	74
Ilustración 4.3.3 Planos del diseño inspirado en escamas.	74
Ilustración 4.3.4 Diseño final de canales de flujo inspirados en escamas.....	75
Ilustración 4.3.5 Análisis presión (Diseño bioinspirado).	76
Ilustración 4.3.6 Análisis de Temperatura (Diseño bioinspirado).	77
Ilustración 4.3.7 Fracción másica de agua condensada y distribución del oxígeno (Diseño bioinspirado).....	77

Ilustración 4.4.1 Ejemplo de sistemas ramificados en la naturaleza (nervadura de hoja de limón)	78
Ilustración 4.4.2 Ejemplo de sistemas ramificados en la naturaleza (Sistema linfático)	79
Ilustración 4.4.3 Esquema de bifurcación en una arteria.	80
Ilustración 4.4.4 Bifurcación tipo Y	82
Ilustración 4.4.5 Bifurcación tipo T	82
Ilustración 4.4.6 Planos del diseño biomimético	83
Ilustración 4.4.7 Dimensiones obtenidas aplicadas al diseño (sección).	84
Ilustración 4.4.8 Diseño final de canales de flujo biomiméticos (arterias)	85
Ilustración 4.4.9 Análisis presión (Diseño Biomimético).	86
Ilustración 4.4.10 Análisis de porcentaje de agua condensada (Diseño biomimético).	87
Ilustración 4.4.11 Análisis de Temperatura (Diseño biomimético).	87
Ilustración 4.5.1 Viscosidad dinámica (modelo serpentín)	89
Ilustración 4.5.2 Viscosidad dinámica (modelo tipo malla)	89
Ilustración 4.5.3 Viscosidad dinámica (Diseño tipo bioinspirado).	90
Ilustración 4.5.4 Viscosidad dinámica (diseño biomimético)	90
Ilustración 4.6.1 Simulación de mecanizado del modelo tipo serpentín	91
Ilustración 4.6.2 Simulación de mecanizado del modelo tipo arterias.	92
Ilustración 4.6.3 Simulación de mecanizado del modelo tipo malla.	93
Ilustración 4.6.4 Simulación de mecanizado del modelo tipo escamas	94
Ilustración 5.1.1 Resultados de la simulacion de presión	97
Ilustración 5.2.1 Resultados de la simulacion de temperatura	98
Ilustración 5.3.1 Resultados de la simulacion de fracción másica de agua condensada y distribución del oxígeno	100

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Debido a la creciente preocupación mundial por la contaminación ambiental y el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles, se necesitan con urgencia soluciones para la generación de energía limpia. En los últimos años, las celdas de combustible se han convertido en uno de los métodos más prácticos para producir energía limpia.

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten directamente energía química en eléctrica, en estas a diferencia de las celdas galvánicas convencionales los reactivos (generalmente hidrógeno y oxígeno) no están almacenados en su interior, sino que fluyen constantemente desde un suministro externo. Su alta eficiencia, baja temperatura de funcionamiento, alta densidad de potencia, y rápida puesta en marcha han fomentado su interés en campos de aplicación como la industria del motor, la generación de energía estacionaria, aplicaciones portátiles entre otras. (Barreras & Lozano, 2015; Spiegel, 2007)

1.2 HIPÓTESIS

La implementación de diseños inspirados en la naturaleza en una placa de flujo catódica de una celda de combustible de membrana polimérica (PEM) mejora la distribución del oxidante en el área activa y evita grandes caídas de presión en comparación con un diseño convencional.

1.3 JUSTIFICACIÓN

En función de la geometría del canal las celdas PEM son susceptibles a sufrir caídas de presión, una distribución desigual del gas e inundaciones de agua, lo cual llevaría a un rendimiento inferior. Una de las formas más eficaces de aumentar la potencia es implementar un patrón de canales de flujo que proporcionen suficiente oxígeno e hidrógeno y una baja caída de presión, por lo tanto, existe un gran potencial en el diseño de geometrías alternativas como herramienta de optimización, entre las cuales se encuentra el diseño biomimético.

Además, la investigación y el desarrollo de las celdas de combustible podría contribuir a solucionar algunos de los problemas más críticos que afronta la sociedad actualmente en los ámbitos social, económico y ambiental, su implementación impacta directa e indirectamente en algunos de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

(Es importante considerar que la sustentabilidad y la consideración de energía limpias asociadas a las celdas de combustible están relacionadas a su operación y no a su ciclo de vida completo, pues depende de factores como la procedencia de sus materiales, combustibles, y desechos.)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) u Objetivos Globales son 17 objetivos globales establecidos en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas y son los siguientes: **(Los objetivos impactados directamente durante la utilización de celdas de combustible como generación de energía se destacan en negritas).**



*Ilustración 1.3.1 Objetivo de desarrollo sostenible
Fuente: Organización de las Naciones Unidas, 2015.*

1. Fin de la pobreza
2. Hambre cero
3. Salud y bienestar
4. Educación de calidad
5. Igualdad de género
6. Agua limpia y saneamiento
- 7. Energía asequible y no contaminante**
8. Trabajo decente y crecimiento económico
- 9. Industria, innovación e infraestructura**
10. Reducción de las desigualdades
- 11. Ciudades y comunidades sostenibles**

12. Producción y consumo responsables

13. Acción por el clima

14. Vida submarina

15. Vida de ecosistemas terrestres

16. Paz, justicia e instituciones sólidas

17. Alianzas para lograr los objetivos.

(Organización de las Naciones Unidas, 2023)

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo general:

- Diseñar los canales de flujo catódicos implementando un patrón inspirado en la naturaleza para una celda tipo PEM, mediante diseño asistido por computadora y dinámica de fluidos computacional, esto con el fin de mejorar la distribución del oxígeno y agua respecto a patrones convencionales.

1.4.2 Objetivos específicos:

- Diseñar y simular el comportamiento de una placa con un canal de flujo convencional el cual se tomará como referencia.
- Diseñar y simular una placa con canales de flujo inspirados en patrones geométricos presentes en la naturaleza (diseño bioinspirado).

- Diseñar y simular una placa con canales de flujo inspirados en sistemas presentes en la naturaleza cuya función sea la de distribuir fluidos (diseño biomimético).
- Comparar la presión, temperatura, distribución del oxidante y distribución de agua líquida en los diseños propuestos contra el diseño convencional.
- Analizar el tiempo y costo de maquinado para cada modelo.

1.5 DESCRIPCIÓN

En esta investigación se hará revisión del estado del arte de los patrones de flujo y de las celdas de combustible en general, con el fin de evaluar las tecnologías disponibles, sus ventajas y desventajas, y principalmente comparar el desempeño de los diseños convencionales con el de diseños alternativos.

Se elegirá uno de los diseños más comunes empleados en la actualidad, este se modelará y simulará mediante SolidWorks, con el fin de tomarlo como modelo de referencia. Se eligió utilizar SolidWorks ya que este software cuenta con licencias de estudiante lo cual lo hace de fácil acceso, además de ser uno de los más implementados en la industria ya que brinda tanto herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), manufactura (CAM) y simulación en un entorno integrado, específicamente para este último apartado se utilizara la extensión “FlowSimulation”, herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD) la cual brinda la opción de analizar la viabilidad del prototipo desde la etapa de diseño.

Posteriormente se propondrán un par de diseños los cuales tomaran inspiración de la naturaleza, tratando de imitar patrones cuyo fin es optimizar la distribución de fluidos, por

ejemplo: sistemas vasculares tales como raíces, venas, nervaduras de planta o bronquios entre otros, también se analizarán patrones cuyo fin no es necesariamente el de distribuir fluidos pero que de cierta forma podrían ser útiles dada su geometría por ejemplo el patrón de un panal. Los diseños propuestos se modelarán en SolidWorks y posteriormente se hará uso de la herramienta FlowSimulation antes mencionada, con el fin de verificar el comportamiento del oxidante en el cátodo (oxígeno) a partir de las condiciones de entrada.

Una vez realizado el computo se analizarán los valores determinantes, los cuales son la presión a lo largo de los canales de flujo, la velocidad y la distribución homogénea del fluido, esperando mejorar los valores del diseño convencional, con el fin de obtener los mejores resultados.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO

Un vector energético es un dispositivo o sustancia que tienen la capacidad de almacenar energía, la cual posteriormente será liberada de forma planeada y controlada. El hidrógeno se perfila como uno de los vectores energéticos más importantes y prometedores en la transición a las energías limpias.

El hidrógeno es el elemento químico más sencillo que existe y el que más se encuentra en el universo (75% de la materia visible), pero no está presente en la tierra de forma aislada (0,9% de la corteza terrestre), sino que se combina con otros átomos para formar compuestos, como el agua o los hidrocarburos. Por eso, no es un combustible que se pueda extraer directamente de la naturaleza y hay que producirlo. En condiciones normales, es decir, a 25° C y una atmósfera de presión, constituye el gas diatómico H₂, que no tiene color, olor, sabor ni toxicidad. (Ramos & Cruz, 2015)

TABLA 1. EQUIVALENCIA MÁSICA Y VOLUMÉTRICA DEL HIDRÓGENO CONTRA DIFERENTES COMBUSTIBLES.

	HIDRÓGENO	GASOLINA	GASÓLEO	METANOL
KILOGRAMOS	1	2.78	2.80	6.09
LITROS	1	0.27	0.24	0.43

Nota: Información de (Ramos & Cruz, 2015)

Una de las ventajas del hidrógeno como fuente de energía es que tiene un alto valor energético por unidad de peso en comparación con otros combustibles (Tabla 1), (es decir la cantidad masa y volumen necesaria para transformar la misma cantidad de energía) y que al combinarse con el oxígeno para liberar su energía, no produce emisiones contaminantes, sino solo agua.

Sin embargo, el hidrógeno también presenta algunos inconvenientes, como su llama casi incolora, que dificulta su detección y extinción en caso de incendio o explosión, y su gran capacidad de difusión, que hace que se pierda o escape más fácilmente que otros gases como el metano o el gas natural. Además, si el hidrógeno reemplazara a los combustibles fósiles, habría que tener en cuenta el posible impacto ambiental de una mayor generación de vapor de agua (producto de la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno), que se liberaría a la atmósfera ya que el vapor de agua también es un gas de efecto invernadero.

2.1.1 Producción y clasificación del hidrógeno.

Una forma de obtener hidrógeno es separarlo de los compuestos que lo contienen mediante diferentes métodos, que se pueden agrupar en las siguientes categorías:

Hidrógeno verde:

Se produce al usar electricidad renovable para descomponer el agua en sus elementos mediante la electrolisis (proceso que aplica una corriente eléctrica para romper la molécula de agua). Actualmente, este método solo representa el 4% de la producción de hidrógeno. También se puede obtener por medio de otros procesos como la conversión

bioquímica de la biomasa (conjunto de procesos biológicos y termoquímicos que transforman la biomasa en H₂ y otros compuestos), siempre que se cumplan los criterios de sostenibilidad establecidos. (Barreras & Lozano, 2015)

Hidrógeno gris:

Se genera al partir de gas natural u otros hidrocarburos como el metano, mediante procesos de reformado (proceso que trata los hidrocarburos con vapor de agua a alta temperatura y presión moderada), oxidación parcial (oxidación incompleta de un hidrocarburo) y gasificación del carbón (proceso que reacciona el carbón con agua y oxígeno para producir el llamado gas de síntesis (mezcla de H₂ y CO)). La mayor parte del hidrógeno que se produce hoy en día se obtiene mediante reformado. Este método genera altas emisiones de CO₂.

Hidrógeno azul:

Una forma de obtener hidrógeno azul es mediante el mismo proceso que el hidrógeno gris, pero capturando y almacenando el CO₂ que se emite, lo que permite disminuir hasta en un 95% su impacto ambiental. Sin embargo, el hidrógeno azul tiene algunos inconvenientes, como el alto costo de la captura y el almacenamiento del CO₂, la dependencia de los combustibles fósiles y el riesgo de fugas de metano.

TABLA 2 . PRODUCCIÓN Y CLASIFICACIÓN DEL HIDRÓGENO

FUENTE	PROCESO	CAPTURA DE CO ₂
Fuentes de energía renovables	Electrolisis	Con captura de CO ₂
Biomasa	Conversión bioquímica	
Hidrocarburos	Reformado Oxidación parcial	Con captura de CO ₂
Carbón	Gasificación	
Hidrocarburos	Reformado Oxidación parcial	Sin captura de CO ₂
Carbón	Gasificación	

Nota: Elaboración propia con información de (Tourinho, 2021)

2.1.2 Almacenamiento del hidrógeno.

Si bien el hidrógeno tiene una elevada densidad energética en relación con su masa, en cuanto a volumen esta es mucho menor que la de los combustibles fósiles, esto implica un desafío para las aplicaciones que requieren un espacio reducido para el combustible, como las relacionadas con el transporte. Por ello, para avanzar hacia una economía sustentada en el hidrógeno, se necesita desarrollar métodos de almacenamiento que sean eficaces, seguros y compactos. Esto implica el uso de sistemas que permitan comprimir o licuar el hidrógeno para incrementar su densidad y disminuir su volumen. (Tourinho, 2021)

Almacenamiento en estado gaseoso

El hidrógeno tiene la capacidad de ser almacenado en forma gaseosa dentro de contenedores que soportan alta presión (200, 350 y 700 bares). Los recipientes de almacenamiento son construidos con compuestos de materiales que pueden resistir las altas presiones a las que está sometido el hidrógeno, y también prevenir su difusión al exterior. Esto es debido a que el hidrógeno, por el reducido tamaño de su molécula, puede permeabilizar a través de una gran cantidad de materiales.

Almacenamiento en estado líquido

La segunda alternativa de almacenamiento implica convertir el hidrógeno en líquido, lo cual se logra manteniéndolo a una temperatura de -253°C en contenedores conocidos como criostatos. Este método de almacenamiento puede ser costoso y puede resultar en pérdidas si el aislamiento térmico de los contenedores no es adecuado.

Almacenamiento en estado sólido

El tercer método de almacenamiento se fundamenta en la habilidad de ciertos materiales sólidos (como hidruros metálicos, nanotubos de carbono, compuestos organometálicos, etc.) para alojar hidrógeno dentro de su estructura. Este método aún está en desarrollo y para que pueda ser utilizado a nivel comercial, será necesario aumentar la capacidad de absorción de estos materiales. Actualmente, el porcentaje de hidrógeno que se retiene dentro de estos materiales es muy pequeño.

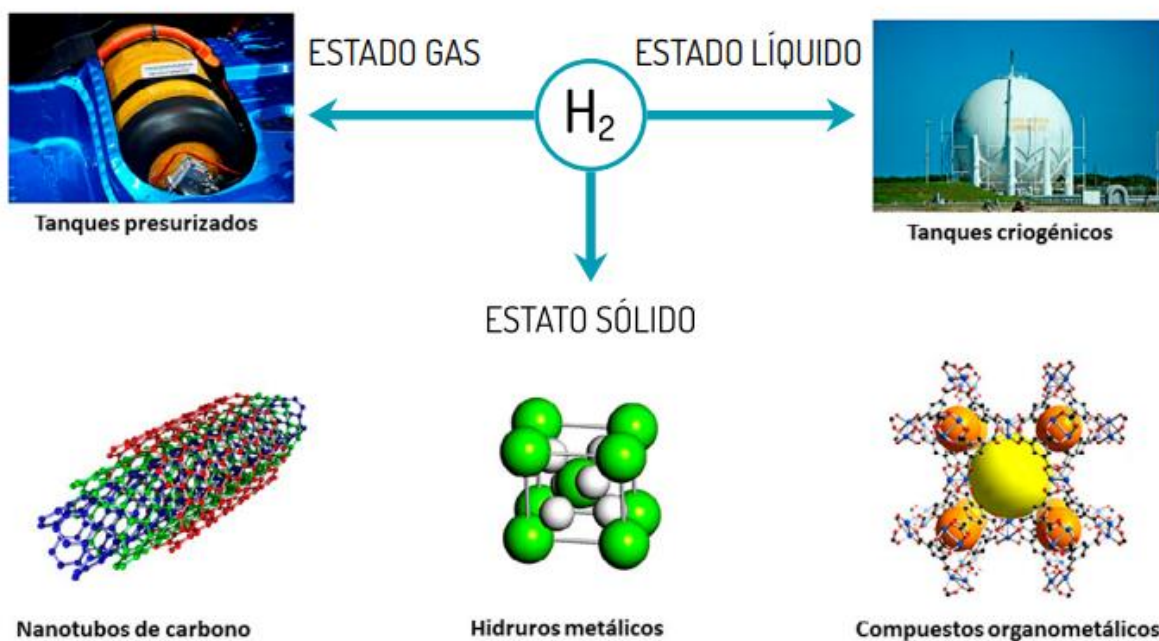
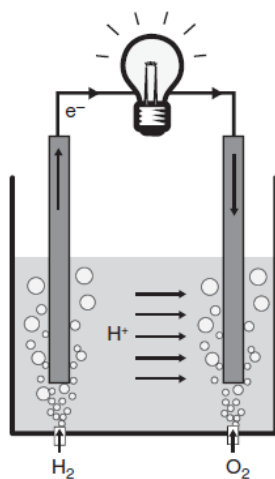


Ilustración 2.1.1 Métodos de almacenamiento del hidrógeno.
Fuente: (Tourño, 2021)

2.2 CELDAS DE COMBUSTIBLE

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que utiliza reacciones electroquímicas inversas para convertir continuamente la energía química de los reactivos en energía eléctrica, agua y algo de calor siempre y cuando se suministren combustible y oxidante de manera continua. Sir William Robert Grove y Christian Friedrich descubrieron el proceso de electrólisis inversa en 1839, lo que llevó a la invención de la pila de combustible. La primera pila creada por Grove consistía en un electrolito de ácido sulfúrico diluido sumergido en dos electrodos de platino revestidos de vidrio. El tubo de vidrio tenía dos electrodos: ánodo y cátodo alimentados con reactivos

de hidrógeno y oxígeno respectivamente. Para producir electricidad, los electrodos se conectaron a un circuito eléctrico externo. (Revankar & Majumdar, 2014; O’hayre, Cha, Colella, & Prinz, 2016)



*Ilustración 2.2.1 Forma básica de una celda de combustible
Fuente: (O’hayre, Cha, Colella, & Prinz, 2016)*

2.3 CLASIFICACIÓN DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE

Las celdas de combustible se pueden clasificar según el tipo de electrolito que emplean, este les confiere características tales como la temperatura de operación, subproductos, materiales implementados en su construcción, vida útil y área de aplicación.

2.3.1 Celdas de Combustible Alcalina (AFC)

Fue desarrollada en 1902 y fue hasta las décadas de 1960 y 1970 que las pilas alcalinas se convirtieron en el primer tipo de pila de combustible utilizada en una aplicación práctica, fue en el programa espacial, particularmente en el programa Apolo de la NASA que estas celdas (AFC) se utilizaron para alimentar los equipos que

componen la nave, así como para proporcionar de agua limpia. El electrolito en este tipo de celda es líquido y se crea a partir de una solución acuosa de hidróxido de potasio (un electrolito barato). Dependiendo de la temperatura de funcionamiento, la concentración de (KOH) en peso oscila entre el 30 y el 85 por ciento según la temperatura de del sistema (60 °C a 120 °C). Debido a que es un electrolito líquido, puede usarse como refrigerante y extraerse de la celda durante periodos de inactividad, aumentando así la vida útil. Por otro lado, debido a la corrosividad del KOH se deben emplear materiales poliméricos o de acero inoxidable para sus estructuras. El voltaje de funcionamiento máximo es de 0,875 V por celda, que es superior al promedio de 0,7 V del PEM. Los electrodos, incluido el cátodo, suelen estar hechos de materiales menos costosos que el platino, como el níquel. (Ramos & Cruz, 2015; Castrillo, Pabón, & Ricardo, 2018; Barreras & Lozano, 2015)

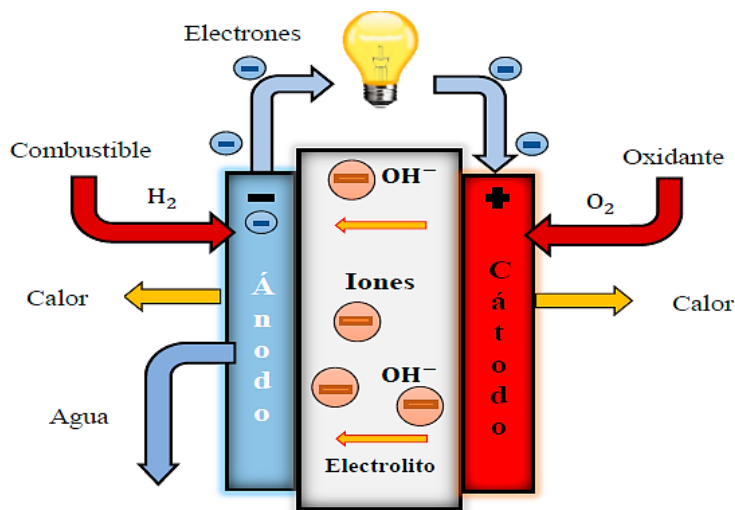


Ilustración 2.3.1 Diagrama de celda de combustible Alcalina
Fuente: (Castrillo, Pabón, & Ricardo, 2018)

2.3.2 Celdas de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico

Las celdas de combustible PEM fueron desarrolladas por General Electric en la década de los años 60's, en estas celdas, el electrolito es una membrana conductora de iones, hecha de películas poliméricas sólidas, a base de teflón acidificado, normalmente se utiliza la marca Nafion 117 desarrollada por la empresa Dupont, aunque existen más opciones comerciales. Las celdas de combustible tipo PEM funcionan a temperaturas entre 25 y 100 °C, lo que, según la aplicación, puede ser una ventaja o una desventaja ya que, por ejemplo, las bajas temperaturas de trabajo hacen de estas pilas sistemas idóneos para aplicaciones de transporte. Es justamente el electrolito polimérico, el que impone la restricción de temperatura ya que, a temperaturas superiores a 100 °C, la estructura del electrolito se deteriora, perdiendo su capacidad de transportar iones, y el rendimiento general de la pila de combustible disminuye gradualmente.

Para este tipo de celda, normalmente se utiliza como electrocatalizador platino puro o aleaciones de platino como el rutenio platino. El principal problema del platino es que puede producirse intoxicación por CO cuando este está presente en el combustible, por lo tanto, se deben utilizar principalmente H₂ y CH₃OH de alta pureza. (Barreras & Lozano, 2015; Castrillo, Pabón, & Ricardo, 2018; Ramos & Cruz, 2015)

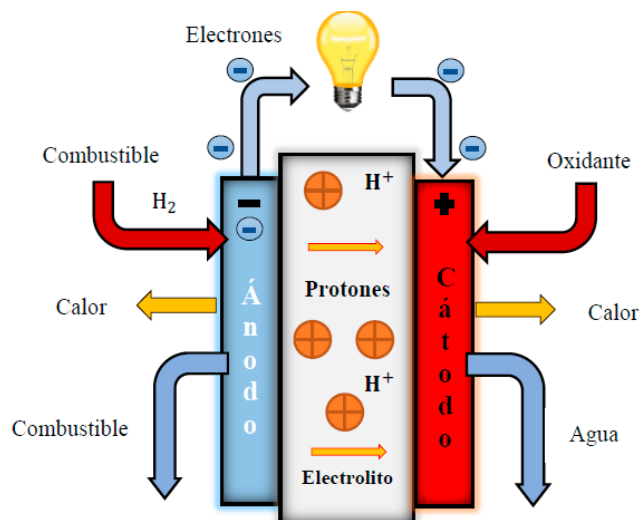


Ilustración 2.3.2 Diagrama de celda de combustible PEM
Fuente: (Castrillo, Pabón, & Ricardo, 2018)

2.3.3 Celdas de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)

En una celda PAFC la solución electrolítica líquida utilizada es ácido fosfórico (H_3PO_4) y los iones que se mueven a través de ella son iones de hidrógeno (H) o protones. En el ánodo, el gas hidrógeno se ioniza, liberando protones (H) y electrones (e^-). En el cátodo, el oxígeno reacciona con los protones (H) del electrolito y los electrones (e^-) que regresan del electrodo para crear agua. Con una temperatura de funcionamiento de aproximadamente $200\text{ }^\circ\text{C}$, las PAFC se denominan pilas de combustible de temperatura intermedia, su eficiencia típica es sólo de alrededor del 55%, lo que no es muy alto en comparación con otros diseños de pilas de combustible. Este tipo de celdas se utilizan principalmente para la generación de energía a mediana escala con una potencia operativa arriba de 200 kW. Las aplicaciones incluyen la creación de electricidad y calor simultáneamente en plantas de energía estacionarias. (Spiegel, 2007)

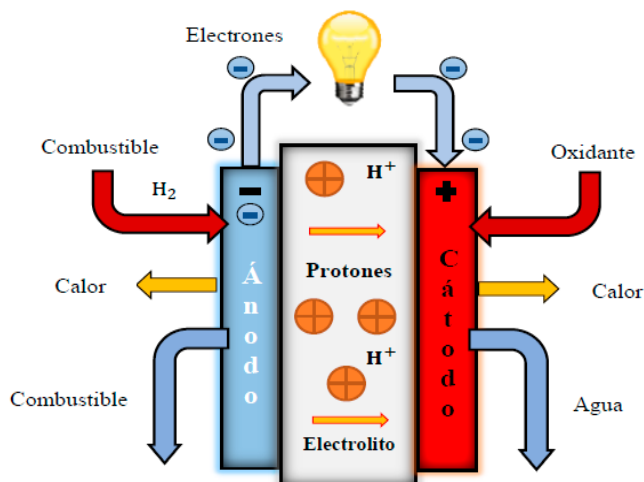


Ilustración 2.3.3 Diagrama de Celda de Combustible de Ácido Fosfórico (PAFC)
Fuente: (Castrillo, Pabón, & Ricardo, 2018)

2.3.4 Celdas de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC)

Con una alta eficiencia operativa del 65%, la celda MCFC es una celda de combustible de alta temperatura que opera en el rango de temperatura de 600 °C a 700 °C. El electrolito de un MCFC es carbonato alcalino fundido, como carbonato de litio o potasio (Li_2CO_3 , KCO_3), que se mantiene en una matriz cerámica de óxido de aluminio y litio. El hidrógeno se somete a oxidación-reducción combinándose con los iones de carbonato CO_3^{-2} entrantes, liberando electrones al circuito externo y produciendo agua y dióxido de carbono. En el cátodo, el oxígeno sufre una reacción de reducción al combinarse con el dióxido de carbono y los electrones procedentes del circuito externo. (Revankar & Majumdar, 2014)

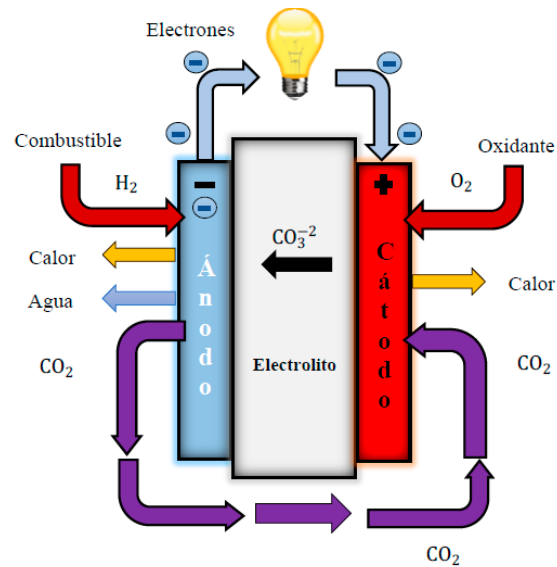


Ilustración 2.3.4 Diagrama de Celda de Combustible de Carbonato Fundido (MCFC)
Fuente: (Castrillo, Pabón, & Ricardo, 2018)

Como puede verse en la Ilustración 2.3.4, el dióxido de carbono se crea en el lado del ánodo y se consume en el lado del cátodo con lo cual es posible agregar dióxido de carbono a la corriente de gas de entrada de oxígeno o aire en el lado del cátodo recuperándolo de la corriente de gas de escape del ánodo y devolviéndolo al lado del cátodo, o simplemente puede secar el gas de escape del ánodo y mezclarlo con el corriente de gas de entrada al cátodo. Además de hidrógeno, los MCFC también pueden funcionar con otros combustibles como gas natural, biogás y gas de carbón limpio, reformando esos combustibles para producir hidrógeno. (Castrillo, Pabón, & Ricardo, 2018; Revankar & Majumdar, 2014)

2.3.5 Celdas de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)

La SOFC es una pila de combustible de alta temperatura (de 800 °C a 1000 °C) con una alta eficiencia operativa del 65 %. En este tipo de celdas se emplea un electrolito de cerámica sólida como el circonio estabilizado con itrio. Además, las SOFC pueden funcionar con otros hidrocarburos, como gas de carbón limpio y gas natural, produciendo hidrógeno mediante un proceso de reformado interno o externo. Las aplicaciones incluyen cogeneración y generación estacionaria. (O’hayre, Cha, Colella, & Prinz, 2016)

En el electrodo catódico, el oxígeno capta electrones y forma un ion cargado negativamente. El ion oxígeno es transportado por el electrolito de la membrana conductora de iones de óxido sólido hasta el ánodo, donde reacciona con el gas hidrógeno para producir agua y electrones que se mueven hacia el cátodo. El agua se crea a partir del gas hidrógeno y los electrones se envían al lado del cátodo a través del circuito eléctrico externo. (Revankar & Majumdar, 2014)

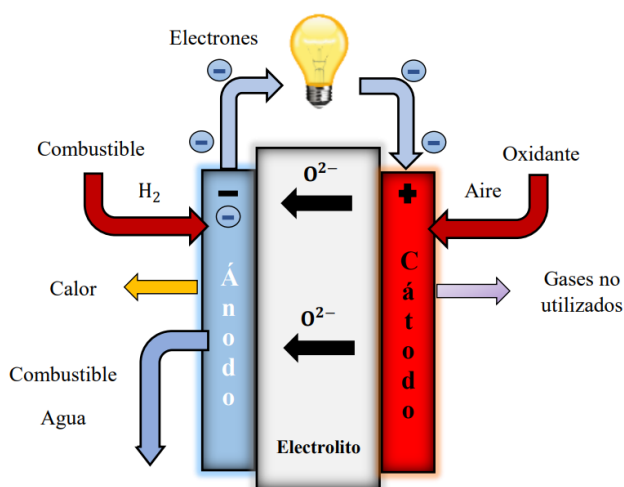


Ilustración 2.3.5 Diagrama de Celda de Combustible de Óxido Sólido (SOFC)
Fuente: (Castrillo, Pabón, & Ricardo, 2018)

2.3.6 Micro pilas de combustible

Una micro pila de combustible es una pila de combustible miniaturizada y compacta con tamaños que van desde los milímetros cuadrados hasta los 1.000 mm². Se utilizan como fuente de energía para teléfonos móviles, ordenadores portátiles, asistentes digitales personales y otros dispositivos electrónicos portátiles de baja potencia y otros dispositivos electrónicos portátiles de baja potencia. La densidad de potencia puede oscilar entre unas pocas decenas de microvoltios por centímetro cuadrado y varios cientos de milivoltios por centímetro cuadrado.

Las micro pilas de combustible suelen funcionar con metanol, pero también se han desarrollado versiones alimentadas por hidrógeno. Las PEMFC y las DMFC que funcionan a bajas temperaturas, son las mejores opciones de celdas de combustible aplicables a la electrónica portátil. Sin embargo, también se han desarrollado las pilas de combustible de metanol micro reformado y las SOFC en miniatura. (Revankar & Majumdar, 2014; Zhao, 2009)

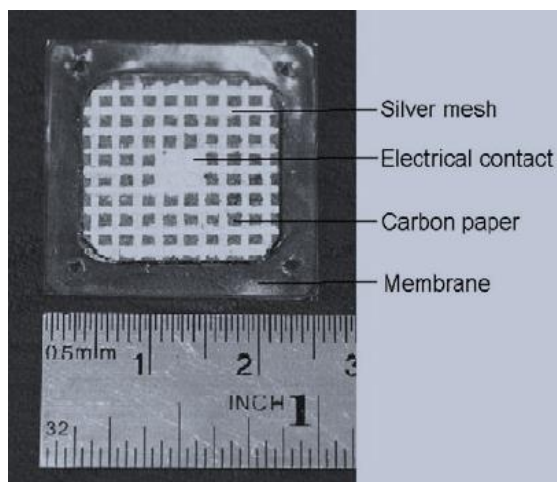


Ilustración 2.3.6 Micro fuel cells
Fuente: (Siew, Nam, Zetao, & Zhigang, 2005)

2.3.7 Celdas de combustible biológicas

Las pilas de combustible biológicas se diferencian de las pilas de combustible electroquímicas convencionales en varios aspectos, para las reacciones de oxidación y reducción se utilizan biocatalizadores. Un biocatalizador puede usarse para producir sustratos de combustible mediante procesos metabólicos o bio catalíticos, o puede participar en la transferencia de electrones que tiene lugar entre el sustrato de combustible y la superficie del electrodo. La pila de biocombustible conserva la capacidad de intercambio iónico mediante el uso de una membrana en lugar de la capa electrolítica típica de las pilas de combustible convencionales. Las pilas de biocombustible suelen funcionar a temperatura ambiente, presión atmosférica y pH neutro. (Revankar & Majumdar, 2014; Reyes, 2021)

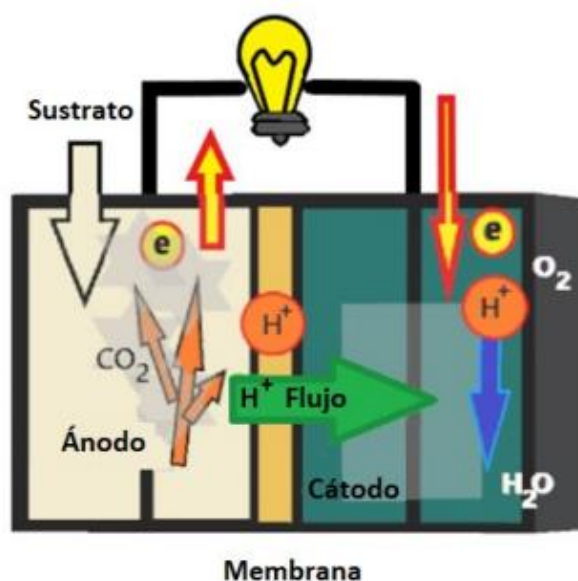


Ilustración 2.3.7 Esquema de celda de combustible biológica
Fuente: (Reyes, 2021)

2.4 OXIDANTE EN CELDAS DE COMBUSTIBLE

Un agente oxidante es una sustancia química que es capaz de oxidar otras sustancias y a su vez se reduce durante este proceso. Los agentes oxidantes pueden aceptar electrones, que son partículas elementales cargadas negativamente, mientras que los agentes reductores los liberan. En las celdas de combustible el oxidante involucrado en la reacción redox es el oxígeno, dado que rara vez se dispone de oxígeno puro disponible, este se obtiene del aire el cual se suministra como gas hacia el cátodo. (Tawalbeh, Alarab, Al-Othman, & Nauman, 2022)

Las celdas de combustible PEM son muy susceptibles al envenenamiento, principalmente por CO y SO₂, estos compuestos interfieren con los sitios activos del catalizador que normalmente están disponibles para la quimi-sorción y disociación del hidrógeno llevando a una desactivación del área activa, por tal motivo tanto el oxidante como el combustible deben tener un alto grado de pureza, de acuerdo con la tabla 3 la tolerancia de CO es de 50 ppm, para evitar la contaminación por CO en la pila, puede instalarse un depurador de gases entre el reformador y la pila de combustible. (O’hayre, Cha, Colella, & Prinz, 2016)

TABLA 3:

Tipo de celda de combustible.	Eficiencia eléctrica. (%)	Densidad de potencia. (mW/cm ²)	Rango de Potencia (kW)	Tolerancia de CO
PAFC	40	150-300	50-1000	Envenenamiento (<1%)

PEMFC	40-50	500-2500	0.001-1000	Envenenamiento (50 ppm)
AFC	50	150-400	1-100	Envenenamiento (50 ppm)
MCFC	45-55	100-300	100- 100,000	Combustible
SOFC	50-60	250-500	10-100,000	Combustible

Nota: Elaboración propia con información de (Revankar & Majumdar, 2014)

2.5 TASAS DE SUMINISTRO DE OXÍGENO

2.5.1 Consumo directo de oxígeno

Considerando el número de cargas electrónicas como n_e por cada mol de oxígeno en una reacción catódica, la carga total o corriente I viene dada como:

$$\text{Ecuación 1: } I = n_e * F * \dot{n}_{O_2}$$

Donde:

- n_e : Número de electrones transferidos por molécula en la reacción electroquímica
- F : Constante de Faraday (96,485.34 C/mol)
- \dot{n}_{O_2} : Consumo de gas en moles

Despejando de la ecuación 1, entonces el consumo molar de oxígeno es:

$$\text{Ecuación 2: } \dot{n}_{O_2} = \frac{I * N_C}{n_e * F} \text{ (mol/s)}$$

Donde:

- N_c : Número de celdas

Si se desea obtener en términos de flujo másico entonces la ecuación 2 se transforma en:

$$\text{Ecuación 3: } \dot{m}_{O_2} = \frac{I \cdot N_c \cdot M_{O_2}}{n_e \cdot F} \quad (\text{kg/s})$$

- Donde: M_{O_2} : Peso molar de la molécula de oxígeno (32×10^{-3} kg/mol)

2.5.2 Tasas de suministro de aire

Dado que es más costoso y a que rara vez se dispone de oxígeno puro las pilas de combustible utilizan normalmente aire como gas catódico. Considerando el aire como una mezcla de 21% de oxígeno y 79% de nitrógeno, podemos utilizar la fracción molar de oxígeno (Y_{O_2}), siendo entonces el número de moles de oxígeno por kilogramo de aire igual a la siguiente expresión:

$$\text{Ecuación 4: } n_{O_2} = \frac{M_{air}}{Y_{O_2}}$$

Donde:

- Y_{O_2} : Fracción molar del oxígeno (0.21)
- M_{air} : Peso molar del aire (28.97×10^{-3} kg/mol)

Sustituyendo Ec.4 en Ec.3 entonces, el consumo de aire para una reacción catódica viene dado como:

$$\text{Ecuación 5: } \dot{m}_{O_2} = \frac{I \cdot N_C \cdot M_{air}}{n_e \cdot F \cdot \gamma_{O_2}} \quad (\text{kg/s})$$

Con el fin de evitar pérdida de concentración y para mantener la reacción completa en toda la zona de reacción activa la cantidad de aire suministrada al lado del cátodo debe ser siempre superior a la estrictamente necesaria para el funcionamiento del sistema. Definiendo el exceso de suministro de aire en términos del factor estequiométrico (ξ_{air}) la tasa de suministro de aire en exceso es:

$$\text{Ecuación 6: } \dot{m}_{O_2} = \frac{\xi_{air} \cdot I \cdot N_C \cdot M_{air}}{n_e \cdot F \cdot \gamma_{O_2}} \quad (\text{kg/s})$$

2.6 COMPONENTES DE UNA CELDAS DE COMBUSTIBLE DE MEMBRANA POLIMÉRICA (PEM)

Las celdas de combustible de tipo PEM (membrana de intercambio de protones o simplemente pilas poliméricas) reciben su nombre justamente de su electrolito, el cual está constituido por una membrana polimérica que separa la parte anódica y catódica de una celda. Es un conductor de protones que, si bien permite el paso de iones H⁺, tiene la propiedad de ser impermeable a otras sustancias.

Las celdas de combustible tipo PEM están compuestas por dos electrodos, uno cargado positivamente (ánodo) y otro cargado negativamente (cátodo), dos canales de flujo, dos capas de difusión de gas, y dos capas catalizadoras, separados por una membrana

electrolítica que facilita la transferencia iónica, normalmente, estos tres elementos (membranas poliméricas, las dos capas catalíticas y las dos capas difusoras) forman una única unidad llamada “**sistema membrana-electrodo**” **MEA** según la literatura inglesa. El hidrógeno fluye por el canal en el lado del ánodo y es dirigido a través de la capa de difusión hasta la capa catalizadora, donde ocurre la reacción de oxidación del hidrógeno. Ambas capas de difusión de gas deben ser de un material altamente poroso para facilitar la difusión de los reactivos. (Barreras, 2015; Yue, 2019)

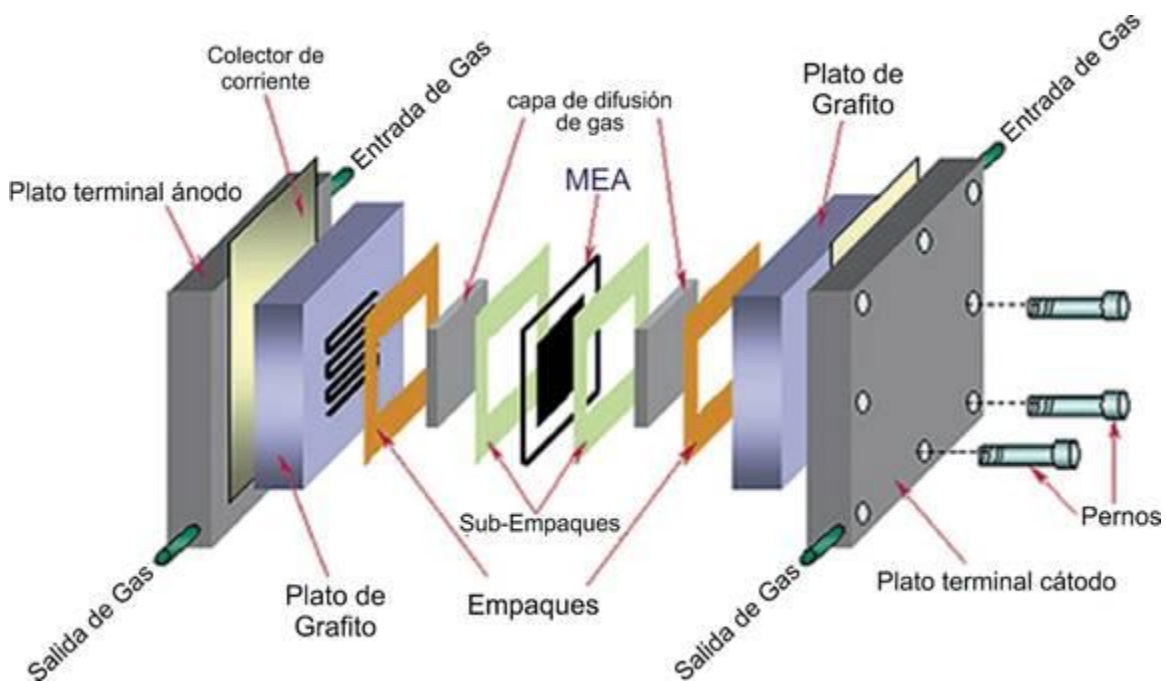
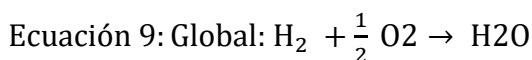
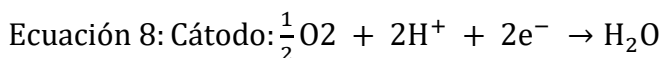
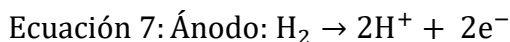


Ilustración 2.6.1 Componentes de una PEMFC
Fuente: (ALVARADO, 2013)

Dado que la membrana no es conductora de electrones, estos buscan una salida a través de las capas de difusión y las placas, lo que da como resultado una corriente eléctrica. Por el otro lado de la celda, el oxígeno entra en el canal de flujo del cátodo,

haciendo contacto en la capa difusora y combinándose con los protones en la capa catalizadora que atravesaron la membrana y los electrones, generando agua y calor.

Las siguientes reacciones electroquímicas se producen en el ánodo, en la membrana y en las capas catódicas:



2.7 PLACAS DE FLUJO DE CAMPO

Existen dos tipos de placas de flujo: monopolares, las cuales se usan en mono celdas y como placas finales en un arreglo de celdas, y bipolares las cuales funcionan como cátodo por un lado y como ánodo por el otro, este último es el más común pues normalmente se trabaja con arreglos de varias celdas de combustible.

Las principales funciones de las placas bipolares incluyen distribuir hidrógeno desde el ánodo y oxígeno desde el cátodo de manera uniformemente sobre el campo de flujo, transportar corriente eléctrica de una celda a la siguiente en el caso de pilas de combustible, evitar fugas de gas, transferir el calor producido y hacer circular agua para mantener las células hidratadas. (Sauermoser, Kizilova, Pollet, & Kjelstrup, 2020)



*Ilustración 2.7.1 Placa de flujo empleada en PEMFC.
Fuente: (Sauermoser, 2020)*

De acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos de América para celdas en aplicación móvil las placas bipolares deben cumplir las siguientes características: (The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, 2015)

- Ser eléctricamente conductoras (>100 S/cm)
- Ser impermeables a los gases ($< 2 \times 10^{-6}$ cm³ H₂ /cm² a 80 °C y 3 atm)
- Ser mecánicamente resistentes y ligeras en el caso de aplicaciones móviles (1 kg/kW)
- Térmicamente conductoras (> 20 W/mK)
- Resistentes a corrosión (<16 μA/cm²)

2.7.1 Materiales de placas de flujo de campo.

Materiales metálicos.

Los materiales más utilizados para las placas bipolares son los metales o aleaciones metálicas debido a su alta conductividad eléctrica y térmica, baja permeabilidad al gas, alta resistencia estructural, menor costo y facilidad de mecanizado para placas más delgadas con canales de gas integrados. Las principales desventajas de las placas bipolares metálicas son su mayor densidad y peso, mayor resistencia de contacto en la interfaz con la capa de difusión de gas/electrodo, y el problema crítico de la baja resistencia a la corrosión. Algunas de las placas bipolares metálicas más comunes están hechas de acero al carbono, acero inoxidable, aleación de níquel/cromo, titanio y aluminio utilizando técnicas de procesamiento de materiales como el fresado CNC, la fundición, el grabado y el estampado. (O’hayre, Cha, Colella, & Prinz, 2016)

Placas de grafito.

El grafito es otro material atractivo para la construcción de placas bipolares debido a su alta conductividad eléctrica, mayor resistencia a la corrosión, baja resistencia de contacto y menor densidad, lo que resulta en un peso reducido por unidad de potencia. Las principales desventajas son su dificultad y mayor costo de mecanizado, menor resistencia estructural y mayor porosidad. La menor resistencia estructural tiende a hacer que la placa sea más gruesa y pesada y dado que el grafito tiene una mayor permeabilidad al gas debido a su mayor porosidad, las placas de grafito deben ser

tratadas o impregnadas con resina para reducir la permeabilidad al gas. (Revankar & Majumdar, 2014)

Compuesto de polímero-carbono.

Una placa bipolar hecha de un compuesto de polímero-carbono es una opción viable en comparación con el grafito, destacando por su coste reducido, excelente resistencia a la corrosión y ligereza. Específicamente, los campos de flujo pueden ser moldeados directamente en estos compuestos, eliminando así la necesidad de mecanizado, requerido para el grafito y el metal. La fabricación de la mayoría de los compuestos de polímero-carbono implica el moldeo en caliente del carbono o del relleno de grafito en una matriz termo endurecible (como resina epoxi, resinas fenólicas, resina de furano, éster de vinilo) o termoplástica (como fluoruro de polivinilideno, polipropileno, polietileno). Los contenidos de carbono típicos varían entre el 50 y el 80% en peso.

La cantidad de carbono empleada en la fabricación de placas bipolares compuestas es crucial, ya que define tanto la conductividad eléctrica como las características mecánicas. Un mayor porcentaje de carbono incrementará la conductividad eléctrica de la placa bipolar compuesta, aunque complicará el procedimiento de moldeo (Yuana, 2010)

2.8 GEOMETRÍA DE LOS CANALES DE FLUJO (FFP)

En cuanto a la geometría de los canales de flujo, los diseños más comunes son el de canales paralelos son el tipo serpentín, canales paralelos, inter digitado y tipo pin o malla. Los diseños convencionales distan de ser perfectos pues como se observa en la Ilustración 2.8.1, (inciso A) debido a sus largo canales y esquinas constantes los patrones de tipo serpentín presentan alta resistividad al flujo; los patrones Inter digitados (inciso B) tienen la mayor caída de presión y resistividad con lo cual la MEA puede resultar dañada por fuerzas convectivas excesivas; y por otro lado los diseños paralelos (inciso C) disminuyen la caída de presión, sin embargo, tienen el rendimiento global más bajo entre los campos de flujo convencionales. (Sauermoser et al., 2020)

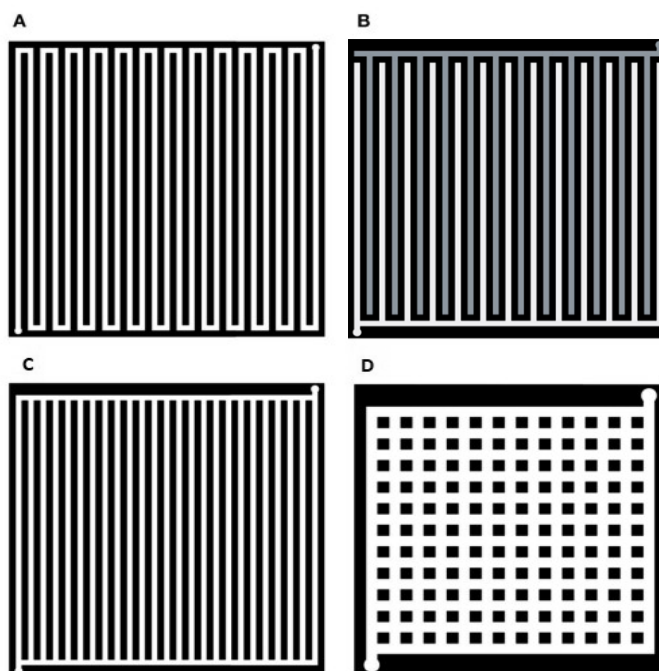


Ilustración 2.8.1 Diseños convencionales de FFP: A) Serpentín, B) Inter digitado, C) Paralelo, D) Pin.
Fuente: (Sauermoser, Kizilova, Pollet, & Kjelstrup, 2020)

Se han dedicado grandes esfuerzos dedicado a diseñar y explorar campos de flujo que resuelvan los problemas de inundación distribución de corriente, y problemas de caída de presión. Además de estos diseños convencionales, existen diseños mixtos, circulares, tubulares (3D), en cascada (o piramidales) fractales, y campos de flujo biomiméticos.

A continuación, se describen las principales ventajas de los diseños tradicionales empleados en este trabajo como referencias de análisis.

2.8.1 Patrón de flujo tipo serpentín

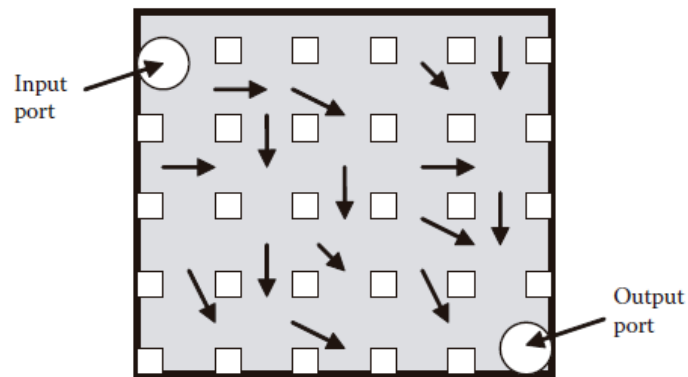
El diseño tipo serpentín (Ilustración 2.8.2), tiene un único canal continuo que cubre toda la superficie de la placa de flujo de campo, estos se han convertido en un estándar en la industria debido a su eficiencia superior. A menudo, se utilizan como punto de comparación para juzgar innovaciones en diseño, una ventaja de esta configuración serpenteante reside en la capacidad de eliminación de agua, ya que al tener un solo canal y una gran diferencia de presión entre la entrada y la salida, el agua líquida se ve obligada a salir de la celda, sin embargo, justamente su principal desventaja es que debido a esta drástica caída de presión, requiere mayor presurización externa para transportar el gas a lo largo del trayecto. (Sauermoser, Kizilova, Pollet, & Kjelstrup, 2020; Li, Bi, Tang, & Lu, 2022)



*Ilustración 2.8.2 Esquema de diseño tipo Serpentina.
Fuente: (O'hayre, Cha, Colella, & Prinz, 2016)*

2.8.2 Patrón de flujo tipo Pin o Malla

Los diseños de tipo malla (Inciso D, Ilustración 2.8.3), se componen de dos conjuntos de canales paralelos que se cruzan en ángulo recto. La principal ventaja del diseño de tipo malla frente al diseño serpentina y otros diseños convencionales es la baja caída de presión, debido a la resistividad hidrodinámica relativamente baja de los canales interconectados. Una limitación de este diseño es que el flujo suele seguir el camino de menor resistencia, provocando una distribución desigual del flujo y la aparición de zonas de estancamiento. Esto puede resultar en una distribución no uniforme de la concentración de gas en el área de contacto y una eliminación insuficiente del calor y el agua de todas las áreas de la superficie. Como se aprecias en la ilustración 2.8.3 estas desventajas pueden están relacionadas con la existencia de múltiples rutas desde la entrada hasta la salida. (Sauermoser, Kizilova, Pollet, & Kjelstrup, 2020; Li, Bi, Tang, & Lu, 2022)



*Ilustración 2.8.3 Esquema de diseño tipo Pin o Malla.
Fuente: (Revankar & Majumdar, 2014)*

2.9 CRITERIOS GEOMÉTRICOS DE DISEÑO

La relación entre el área de contacto del gas y el área de contacto de la placa con el electrodo se define por parámetros geométricos del canal como la altura, h , el ancho, w , y la profundidad, l . Variando estos parámetros geométricos como se muestra en la ilustración 2.9.1. el canal puede tener cualquier forma, como un cuadrado, rectángulo de diferentes relaciones de aspecto o un trapecio.

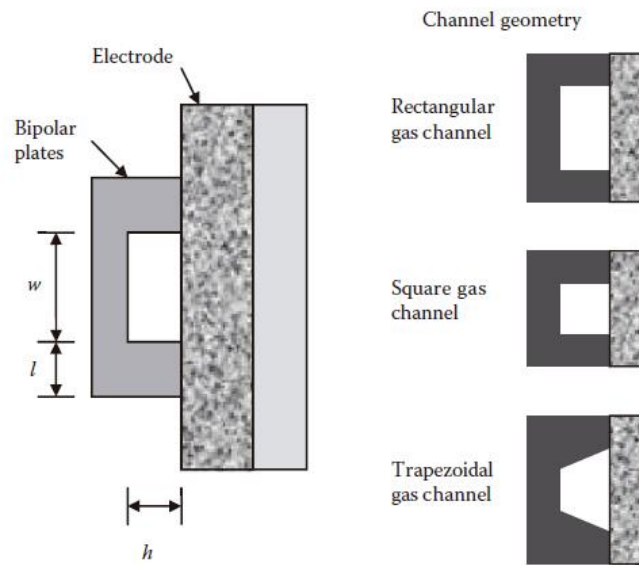


Ilustración 2.9.1 Vista de sección del canal y diferentes configuraciones geométricas posibles. Fuente: (Revankar & Majumdar, 2014)

Se han realizado análisis para determinar la configuración óptima de los canales de la placa de flujo, sin embargo, no existe consenso ni una relación óptima que funcione en todas las situaciones posibles y que no comprometa una característica en función de otra.

De acuerdo con el análisis realizado por Chen, Yang, Hu, & Wang., 2020 se encontro de entre seis casos posibles, pasando de un canal con forma de trapecio invertido, cuadrado, y un trapecio, mediante herramientas de optimizacion definió que el mejor resultado fue este ultimo, el cual se muestra en la ilustracion 2.9.2

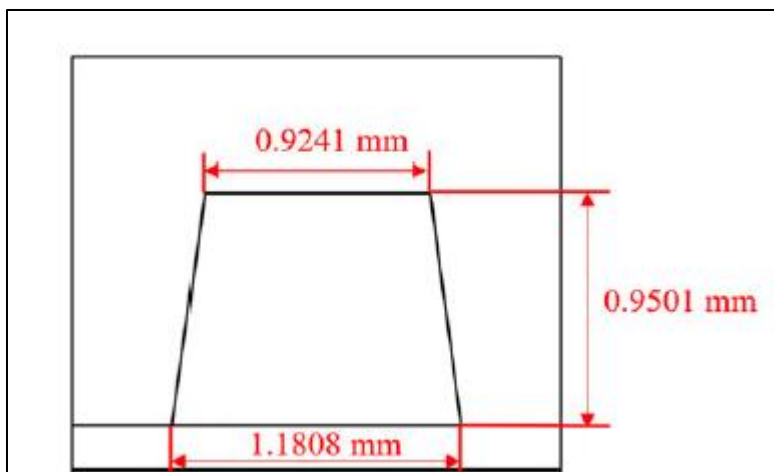


Ilustración 2.9.2 Geometría de canal obtenida mediante optimización por (Chen, Yang, Hu, & Wang., 2020)

En comparación con la geometría cuadrada convencional, se observó que, presenta una distribución más uniforme y una mejor eliminación de agua líquida. Como resultado, la densidad de potencia del canal óptimo aumenta en un 4.43% con relación a su contraparte. (Chen, Yang, Hu, & Wang., 2020)

En otro caso de análisis los autores Ahmadi & Sajad Rezazadeh, 2018 estudiaron el comportamiento de los reactivos en los cuatro escenarios mostrados en la ilustración 2.9.3. teniendo un canal cuadrado y tres trapecios inveros con variaciones en el área de contacto de 1 mm a 1.2 mm, 1.4 mm y 1.6 mm. Se observó que el caso 2 consumió una mayor cantidad de oxígeno en comparación con los otros casos, lo que revela su mejor rendimiento, eso se muestra en las curvas de polarización (ilustración 2.9.4) donde se comparan los cuatro modelos, en estas se observa una ligera mejora de todos los modelos respecto a la sección cuadrada, sin embargo es importante detallar que no se

menciona el coste de producir esta geometría, con lo cual se tenga un panorama mas completo del beneficio de implementarla. (Ahmadi & Sajad Rezazadeh, 2018)

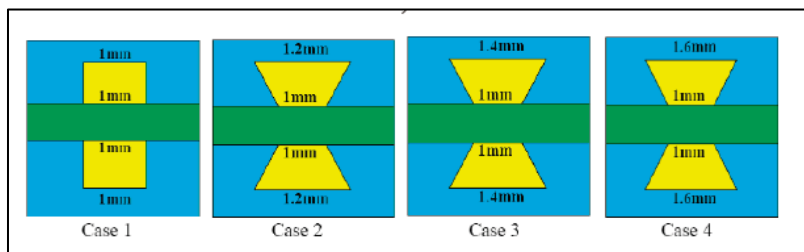


Ilustración 2.9.3 Casos de estudio en canales de flujo analizados por Ahmadi & Sajad Rezazadeh, 2018

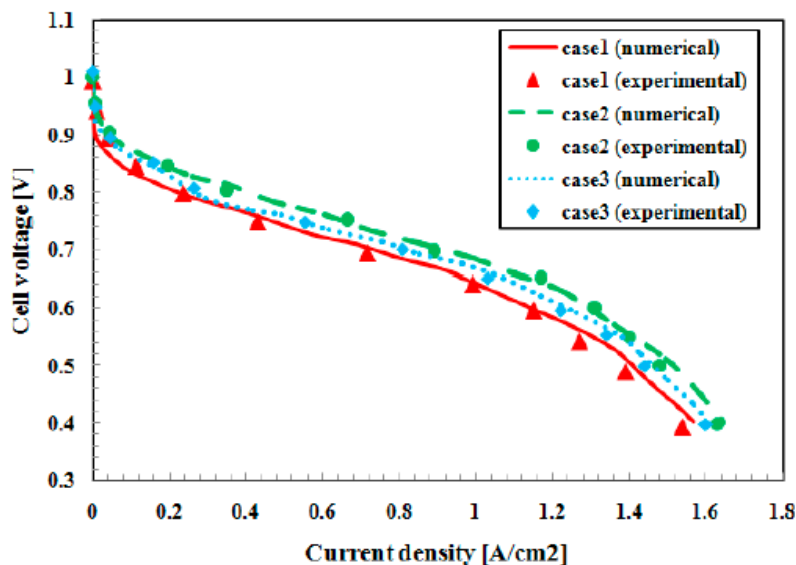


Ilustración 2.9.4 5 Curvas de polarización para los escenarios propuestos por Ahmadi & Sajad Rezazadeh, 2018

2.10 PERDIDAS EN CELDAS DE COMBUSTIBLE

Las pilas de combustible experimentan caídas de tensión que se pueden agrupar en tres tipos principales: la pérdida de activación, la pérdida óhmica y la pérdida de concentración. Estas pérdidas se ilustran en la Ilustración 2.10.1.

Las pérdidas de voltaje para una única celda de combustible vienen dadas por la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 10: } E_{CELL} = E_{OCV} - \Delta E_{ACT} - \Delta E_{OHM} - \Delta E_{CON}$$

Donde:

- E_{OCV} representa el voltaje de la pila de combustible en circuito abierto
- E_{ACT} es la caída de tensión asociada a la activación del ánodo y del cátodo
- E_{OHM} es la caída de tensión óhmica asociada a la conducción de protones y electrones
- E_{CON} es la caída de tensión resultante de la disminución de la concentración de oxígeno e hidrógeno. (Zhang, 2008)

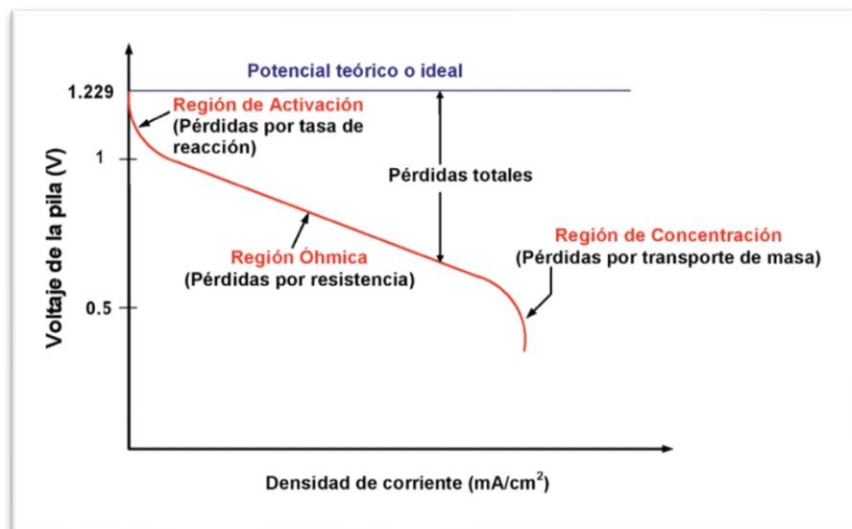


Ilustración 2.10.1 Curva de polarización ideal de una celda de combustible
Fuente: (Zhang, 2008)

2.10.1 Pérdidas por activación.

En la región de baja densidad de corriente, donde predomina la polarización de activación, el potencial de la célula disminuye rápidamente debido principalmente a la cinética lenta de la reacción de reducción de oxígeno (Zhang, 2008)

2.10.2 Pérdidas óhmicas.

La pérdida óhmica, también conocida como sobretensión óhmica, es una de las formas más fáciles de entender de pérdida de tensión. Esta pérdida se origina de la polarización óhmica, que es causada por la resistencia que presenta la membrana de polímero a la transferencia de iones, así como la resistencia del electrodo y la placa colectora a la transferencia de electrones.

A medida que aumenta la densidad de corriente, entramos en la región de polarización óhmica. Aquí, la resistencia óhmica causa una pérdida de voltaje significativa, que se atribuye en gran medida a la resistencia al flujo de iones en el electrolito y al flujo de electrones a través del electrodo. En esta región, el potencial de la célula disminuye casi linealmente con la densidad de corriente. En la mayoría de las pilas de combustible, la resistencia electrónica es casi insignificante, incluso cuando se utilizan grafito o compuestos de grafito y polímero como colectores de corriente. colectores de corriente, y la resistencia está causada principalmente por el electrolito iónico, aunque las resistencias de contacto también pueden ser importantes. (Revankar & Majumdar, 2014)

2.10.3 Pérdidas por concentración o transporte de masa.

Finalmente, en la región de alta densidad de corriente, la polarización por concentración se vuelve dominante. Los efectos del transporte de masa, como la limitación del transporte de gas reactivo a través de la estructura porosa de los GDL y las capas del electrocatalizador, se vuelven críticos y el rendimiento de la célula disminuye drásticamente. La polarización de la concentración provocará una pérdida de concentración o una sobretensión de concentración, que surge de la caída de la concentración de los reactantes a medida que se consumen en la reacción. Esta pérdida de concentración puede causar una rápida caída de tensión a alta densidad de corriente. (Zhang, 2008)

2.11 CONDICIONES ÓPTIMAS DE OPERACIÓN

Las celdas de combustible tienen algunos parámetros críticos de los cuales varia directamente la eficiencia de esta, entre ellos se encuentran la temperatura, presión, humedad relativa y la velocidad del suministro de aire en el caso del cátodo, a continuación, se presentan los parámetros óptimos de acuerdo con diversas fuentes bibliográficas, las cuales coinciden con trabajos experimentales y publicaciones consultadas. (Yan, Toghiani, & Causey, 2006; Jaralla & Cao, 2018; O’hayre, Cha, Colella, & Prinz, 2016)

2.11.1 Temperatura.

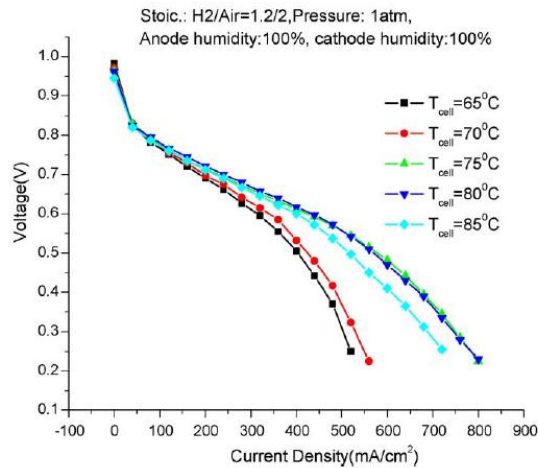


Ilustración 2.11.1 Curvas de polarización de una pila de combustible en diferentes temperaturas.
Fuente: (Yan, Toghiani, & Causey, 2006)

Como se observa en la Ilustración 2.11.1, manteniendo la presión a 1 atm, y humidificación del 100% de los gases, el aumento de la temperatura en el intervalo de 65 °C a 75 °C mejora notablemente la eficiencia de manera proporcional, esto se puede explicar por el aumento de la difusividad del gas y la conductividad de la membrana a temperaturas más altas, ya que el agua se condensa fácilmente a temperaturas más bajas provocando acumulación de líquido, que puede deteriorar la difusividad en la capa catalizadora y la capa de difusión de gas (GDL).

Por otra parte, en el intervalo de 75 °C a 80 °C no se experimentan cambios notables, y por el contrario a una temperatura de 85 °C se observa una disminución importante en el rendimiento, esto último ya que, al aumentar la temperatura, habrá una mayor tasa de evaporación de agua y eventualmente cuando la cantidad de agua evaporada exceda la cantidad de agua producida la membrana comenzará a secarse y la resistencia

aumentará, disminuyendo tanto la corriente como la producción de agua y por ende provocando aún más deshidratación . (Yan, Toghiani, & Causey, 2006; Zhang, 2008).

2.11.2 Humedad relativa.

El control adecuado de la humedad en la membrana para prevenir el exceso de agua es un factor crítico para el rendimiento óptimo de las celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEM). El agua líquida en la pila se produce en el cátodo debido a la reacción electroquímica, o a la humidificación de los gases reactantes.

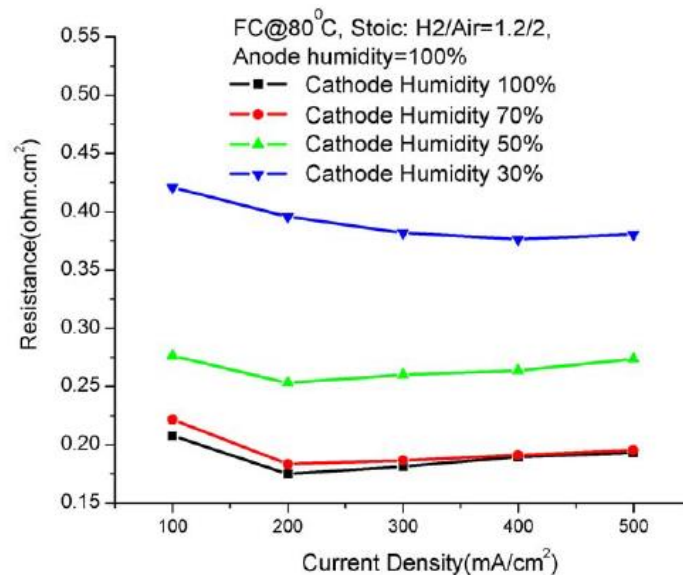


Ilustración 2.11.2 Variación de la resistencia iónica con diferentes valores de humedad relativa.
Fuente: (Yan, Toghiani, & Causey, 2006)

La ilustración 2.11.2 muestra la variación de la resistencia de la membrana, manteniendo una temperatura de 80 °C mientras que la humedad del hidrógeno se mantuvo al 100%

y la del aire se varió del 30% al 100%. Los resultados muestran que aumentar la humedad relativa disminuye el valor de resistencia. (Yan, Toghiani, & Causey, 2006)

2.11.3 Presión.

La presión es un factor operativo crucial que influye en la eficiencia de la celda de combustible. Una celda tipo PEM puede operar a presión atmosférica o con fuentes de gas a presiones de hasta 6 atmósferas (una presión mayor podría dañar la “MEA”), y a temperaturas que oscilan entre los 50 y los 90 grados Celsius.

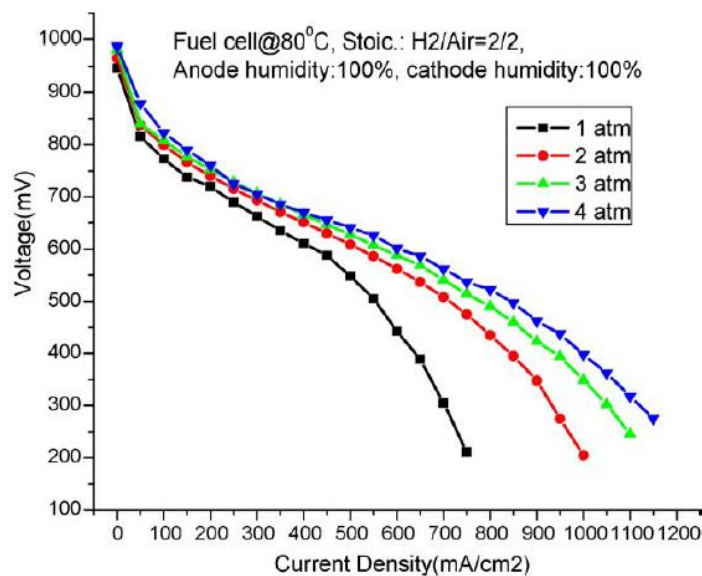


Ilustración 2.11.3 Curvas de polarización con diferentes presiones de operación.
Fuente: (Yan, Toghiani, & Causey, 2006)

En la Ilustración 2.11.3 se muestran diferentes presiones de funcionamiento de la pila de combustible. La presión de funcionamiento se incrementó de 1 a 4 atm, de forma general,

se observa que el rendimiento de la celda mejoró con cada incremento sin considerar el coste de implementar una mayor presión.

2.11.4 Velocidad de suministro del aire en el cátodo.

El aire proporciona oxígeno al cátodo de la celda de combustible PEM, permitiendo su participación en la reacción electroquímica para producir electricidad. Además, el aire tiene la función de expulsar el agua sobrante del sistema de la celda de combustible o, en un escenario adverso, puede causar la deshidratación de la celda. Por lo tanto, es crucial elegir correctamente el flujo de aire para prevenir la deshidratación de la membrana.

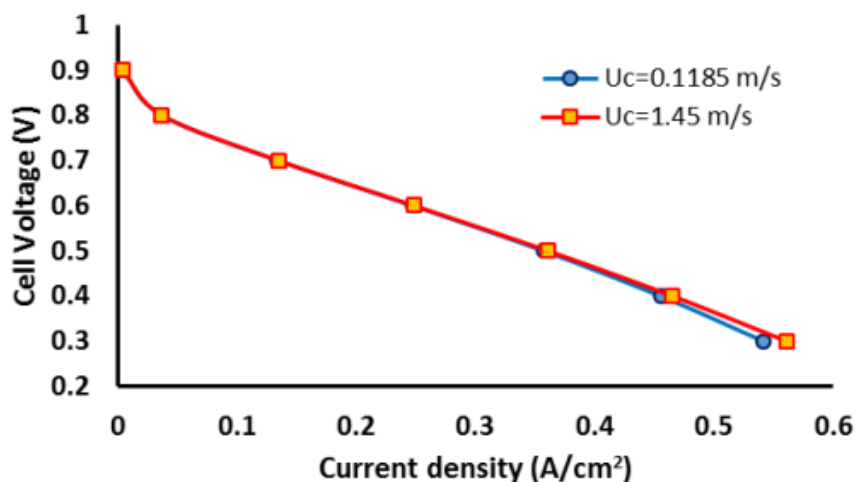


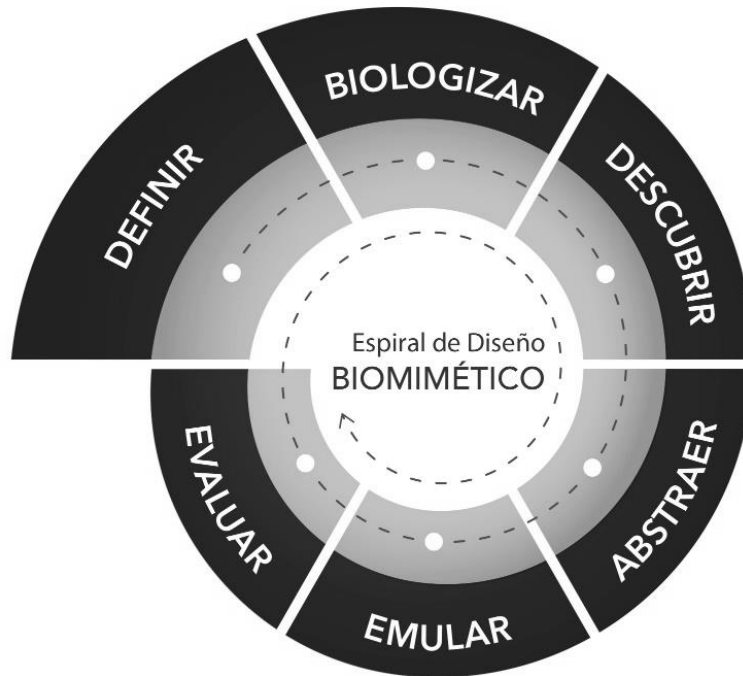
Ilustración 2.11.4 Curvas de polarización con diferentes velocidades de suministro de aire.
Fuente: (Jaralla & Cao, 2018)

La ilustración 2.11.4 muestra dos curvas de polarización con una velocidad de 0.1185 m/s y de 1.45 m/s respectivamente, de acuerdo con los resultados de Jaralla & Cao (2018) se aprecia que en bajas densidades de corriente no hay cambio alguno, mientras que en la región de alta corriente el aumento en la potencia es mínimo, con lo cual en este sentido no representa una ventaja, sin embargo, como se mencionó anteriormente, dependiendo de la velocidad del gas se tendrá una mejor o peor eliminación de agua y en un caso extremo deshidratación, es por esto que el parámetro óptimo se encuentra en torno a 1 m/s. (O'hayre, Cha, Colella, & Prinz, 2016)

2.12 DISEÑO BIOMIMÉTICO

La biomímesis (proviene de las palabras bio y mimesis, que significan "vida" e "imitar") es la ciencia que examina la naturaleza como fuente de inspiración de nuevas propuestas, es una técnica que imita a la naturaleza para crear soluciones innovadoras. Se debe analizar a la naturaleza para comprender cómo los organismos han resuelto problemas similares a los que nos enfrentamos, a partir de miles de años de adaptación y proponer ideas innovadoras.

Si bien existen distintas metodologías para abordar el diseño biomimético, el “biomimicry institute” fundado por Janine Benyus plantea su implementación por medio de la espiral de diseño, la cual se explica a continuación:



*Ilustración 2.12.1 Espiral de diseño biomimético.
Fuente: (Muñiz, 2017)*

Definir: Acotar cual es el objetivo y el alcance del proyecto, ¿Qué es lo que debe hacer?

Biologizar: Trasladar las funciones de diseño en funciones que desarrolla la naturaleza.
Preguntar, ¿cómo la naturaleza hace esta función?

Descubrir: Encontrar los mejores modelos naturales para responder a nuestras preguntas.

Abstraer: Elegir las estrategias más que mejor se ajusten a su diseño específico.

Emular: Desarrollar nuevas ideas y soluciones basadas en modelos naturales.

Evaluar: Contrastar los conceptos de diseño con los principios naturales que han demostrado ser exitosos en la vida y buscar otras maneras de perfeccionar el diseño. (Muñiz, 2017)

2.13 LEYES DE MURRAY

La ley de Murray (1926) debe su nombre a Cecil D. Murray, fisiólogo del Bryn Mawr College. Murray teorizaba que los sistemas vasculares, que han sido sometidos a la selección natural a lo largo de la evolución, deberían haber logrado una configuración óptima. Esta optimización permitiría que cada segmento del vaso lograra el flujo con el mínimo esfuerzo biológico. Murray identificó dos componentes energéticos que contribuyen al costo de mantener el flujo de sangre en cualquier sección de un vaso: la energía requerida para superar la resistencia viscosa en un fluido (Ecuación 11 Ley de Hagen-Poiseuille), y la energía metabólica necesaria para sostener el volumen de sangre y tejido vascular involucrados en el flujo (Ecuación 12). (Murray, 1926; Moreau & Mauroy, 2015)

$$\text{Ecuación 11: } P_t = \frac{8\mu l Q^2}{\pi r^4}$$

Donde: μ es la viscosidad dinámica.

$$\text{Ecuación 12: } P_m = \lambda \pi l r^2$$

Donde: λ es una constante metabólica

Por lo tanto, la potencia total requerida por el sistema es la suma de la ecuación 11 y 12

$$\text{Ecuación 13: } \sum P = \frac{8\mu l Q^2}{\pi r^4} + \lambda \pi l r^2$$

Como buscamos el radio cuya potencia es mínima, calculamos la derivada e igualamos al cero para encontrar el punto mínimo con respecto a r:

$$\text{Ecuación 14: } \frac{dP}{dr} = 0 = -\frac{32\mu l}{\pi r^5} Q^2 + 2\lambda \pi l r$$

Despejando para la tasa de flujo Q entonces:

$$\text{Ecuación 15: } Q = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{\lambda}{\mu}} r^3$$

Dado que en una bifurcación la masa se conserva, el caudal principal es la suma de los caudales secundarios, sustituyendo Ec. 15 en esta expresión entonces:

$$\text{Ecuación 16: } \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{\lambda}{\mu}} r_i^3$$

$$\text{Ecuación 17: } Q_1 = Q_2 + Q_3$$

Rescribiendo la ecuación 15 en 17 entonces:

$$\text{Ecuación 18: } = k r_0^3 = k r_1^3 + k r_2^3$$

$$\text{Donde } k = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{\lambda}{\mu}}$$

Eliminando los términos constantes entonces obtenemos la ecuación de Murray en función del radio de las redes bifurcadas:

$$\text{Ecuación 19: } = r_0^3 = r_1^3 + r_2^3$$

Dependiendo de las condiciones específicas la ley de Murray se adapta en mayor o menor medida, por tal motivo en su forma general adopta la misma forma, pero con un exponente característico diferente α . Esta ley se observa en los sistemas vascular y respiratorio de animales, en la xilema de las plantas y en el sistema respiratorio de los insectos, por ejemplo. (Zieliński & Nowosielski, 2020)

$$\text{Ecuación 20: } D_0^\alpha = D_1^\alpha + D_2^\alpha$$

2.14 LEY DE FINET

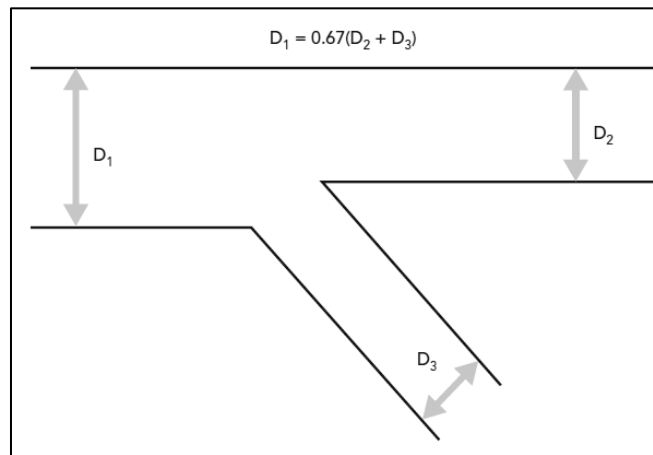
En cardiología es de suma importancia conocer cuáles son las dimensiones que gobiernan la ramificación de las arterias humanas, ya que, para tratar diversas afecciones relacionadas con obstrucciones, a veces es necesario colocar implantes conocidos como “stents” (microestructuras tubulares auto expandibles de malla de metal que evitan la obstrucción) en bifurcaciones coronarias, por lo tanto, para el éxito del procedimiento es importante saber que diámetros utilizar. (Kassab & Finet, 2015)

Si bien la primera propuesta de explicar este fenómeno fue propuesta por Cecile Murray en 1926, (ley de Murray; Ecuación 19) estudios experimentales muestran que esta es correcta para algunos sistemas ramificados presentes en la naturaleza como las nervaduras de las hojas, sin embargo, presenta una desviación significativa en sistemas vasculares animales, específicamente en arterias coronarias. Es por esto por lo que en cardiología suelen emplearse con mayor frecuencia la Ley de Finet, desarrollada por

Gerard Finet et al mediante análisis experimental, posteriormente se demostró que esta es un caso particular de la ley de Murray (Ecuación 20). (Zieliński & Nowosielski, 2020)

La ley de Finet afirma que el diámetro del vaso principal (D_1) se aproxima a la suma de los diámetros de los vasos secundarios (D_2, D_3) multiplicada por 0,678.

Ecuación 21: $D_1 = 0.678(D_2 + D_3)$



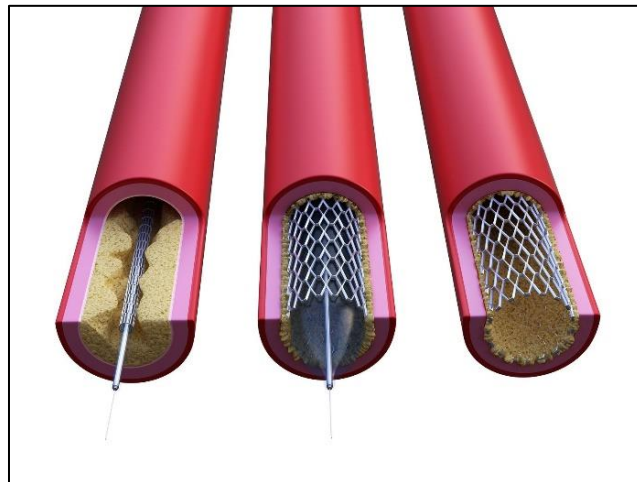
*Ilustración 2.14.1 Representación gráfica de la ley de Finet
Fuente: (Hoye, 2017)*

2.14.1 Aplicaciones médicas de la ley de Finet.

Las enfermedades cardiovasculares son la principal causa de muerte en los países desarrollados y la causa número uno en estados unidos. Las principales afecciones son la Aterosclerosis e insuficiencia cardíaca. La aterosclerosis es una afección en la cual se acumula placa (compuesta de colesterol y calcio principalmente) dentro de las arterias provocando que se endurezcan y se estrechen, afectando el gasto

cardíaco (la cantidad de sangre y oxígeno bombeado por el corazón por unidad de tiempo). (MedlinePlus en español, 2023)

Para tratar este padecimiento se pueden seguir tratamientos como cambios en el estilo de vida, medicamentos y si esto no da resultados se opta por realizar una angioplastia, un procedimiento para abrir las arterias mediante una endoprótesis vascular conocidas como “stents” (microestructuras tubulares auto expandibles de malla de metal que evitan la obstrucción).



*Ilustración 2.14.2 Angioplastia coronaria
Fuente: (MedlinePlus en español, 2023)*

Si los tratamientos actuales no surten efecto, puede que se requiera una cirugía de baipás coronario. Este procedimiento quirúrgico establece una nueva vía para el flujo sanguíneo al corazón. En este proceso, se toma una vena de la pierna o una arteria del pecho o la muñeca, y se conecta a la arteria coronaria en los puntos situados por encima y por debajo del bloqueo o estrechamiento. (MedlinePlus en español, 2023)

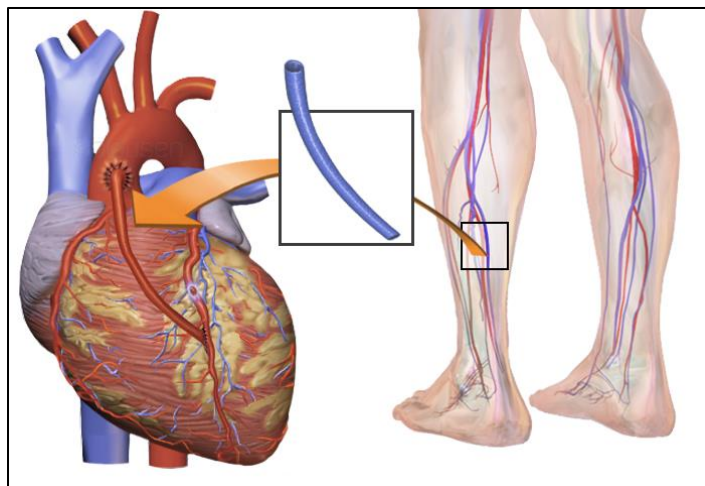


Ilustración 2.14.3 Bypass de arteria Fuente: (MedlinePlus en español, 2023)

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

El propósito de este trabajo es analizar de forma cuantitativa la influencia de la geometría implementada en los canales de flujo de campo del lado catódico de una celda de combustible PEM, concretamente se estudiarán tres variables: presión, temperatura y porcentaje de agua condensada. Con el fin de innovar se propondrán dos diseños inspirados en la naturaleza y se compararán contra dos de los diseños comunes más aceptados y empleados en la actualidad (serpentín y malla).

Para realizar los modelos se eligió Solidworks entre otros softwares (Tabla 4) ya que este cuenta con licencias de estudiante lo cual lo hace de fácil acceso, además de ser uno de los más implementados en la industria ya que brinda tanto herramientas de diseño asistido por computadora (CAD), manufactura (CAM) y simulación en un entorno

integrado, específicamente para este último apartado se utilizara la extensión “Flow simulation”, herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD) la cual brinda la opción de analizar la viabilidad del prototipo desde la etapa de diseño.

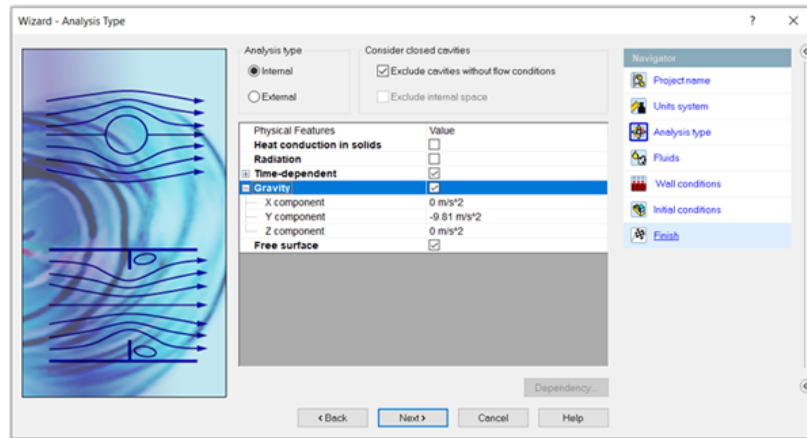


Ilustración 3.1 Interfaz de flowsimulation.
Fuente SolidWorks ver. 2019

TABLA 4: COMPARACIÓN DE SOFTWARES DE DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA

SOFTWARE	REQUERIMIENTOS MÍNIMOS	LICENCIA DE ESTUDIANTE	DE APLICACIONES
AutoCad	Procesador: de 3 GHz RAM: 16 GB	1 año, características limitadas	CAD, CAM, CAE. Enfocado al diseño 2D
SolidWorks	Procesador: de 3 GHz RAM: 8 GB	1 año	CAD, CAM, CAE. Enfocado al diseño 3D.

Comsol	Procesador: de 2.5 GHz RAM: 4 GB	15 días	CAE, simulación asistida por computadora.
FreeCad	Procesador: de 3 GHz RAM: 8 GB	Gratuito	CAD, CAM, CAE. características limitadas.

Nota: Elaboración propia.

3.1 CONDICIONES INICIALES Y CONSIDERACIONES

Para asegurar que los resultados en los diferentes modelos propuestos son equivalentes y consistentes entre sí, se tomarán las siguientes condiciones iniciales de operación óptimas plasmadas en la tabla 5 y tomando como referencia la sección 2.8 *Condiciones óptimas de operación* de este trabajo y otros autores citados previamente en el mismo.

Para el caso del flujo másico del oxidante, se usará aire y este valor se determinó mediante la ecuación 6 (pág. 31) y con las siguientes consideraciones:

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{\xi_{air} * I * N_C * M_{air}}{n_e * F * Y_{O_2}}$$

$I = 1 \text{ A/cm}^2$; considerando el área activa de 25 cm^2 entonces:

$$I = 25 \text{ A}$$

$$N_c = 1$$

$$M_{\text{Air}} = 28.97 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

$$\xi_{\text{air}} = 3$$

$$F = 96,485.34 \text{ C/mol}$$

$$Y_{\text{O}_2} = 21\% = 0.21$$

Por lo tanto, el flujo másico de aire es: $\dot{m}_{\text{O}_2} \approx 2.68 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$

TABLA 5 PARÁMETROS FÍSICOS INICIALES

PARÁMETRO	VALOR
Temperatura	80 °C
Humedad relativa	100%
Presión	2 atm
Flujo másico del oxidante (Aire)	2.65 x 10 ⁻⁵ kg/s (17.60 oxígeno) (66.22 nitrógeno) (16.18 agua debido a la humedad)
Velocidad de suministro de aire	1 m/s
Área Activa de la placa	250 mm ² (50 mm x 50 mm)
Profundidad de los canales	1 mm
Grosor de la placa de flujo	2 mm
Material de la placa:	Acero inoxidable (SS-316)

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 DISEÑO DEL PATRÓN DE FLUJO TIPO SERPENTÍN

Antes de comenzar a diseñar los canales de flujo inspirados en la naturaleza, es necesario tener un punto de referencia a modo de comparación, por este motivo se eligió el diseño de canales tipo serpentín, el cual es un diseño convencional y el más utilizado en aplicaciones reales, y en trabajos comparativos. El siguiente diseño se elaboró mediante SolidWorks:

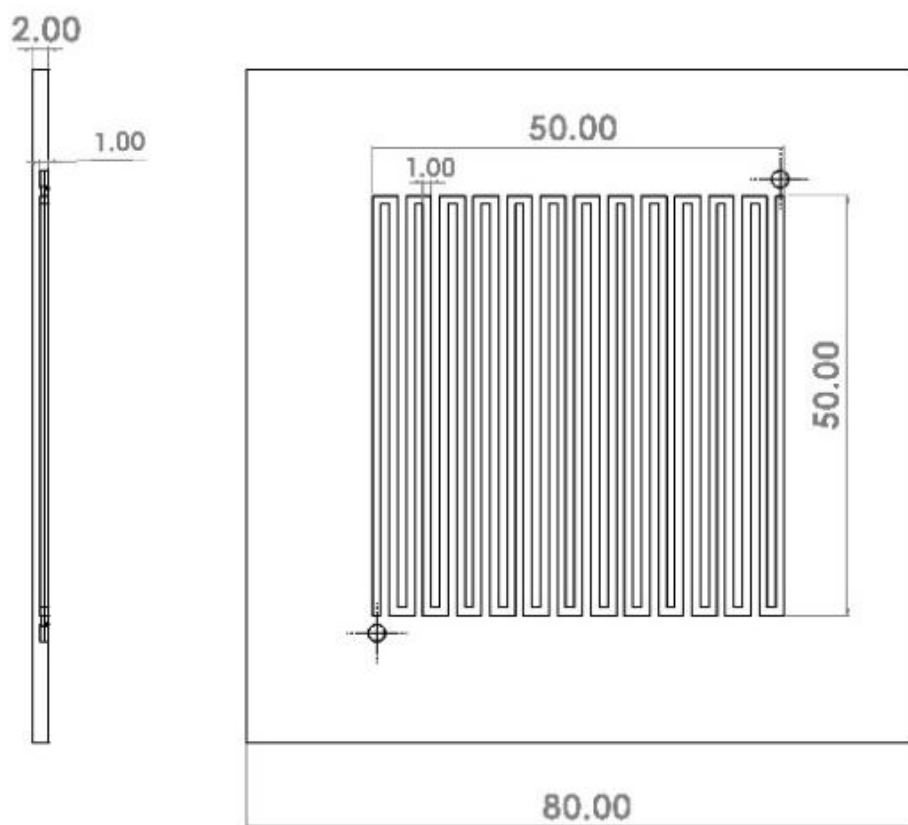
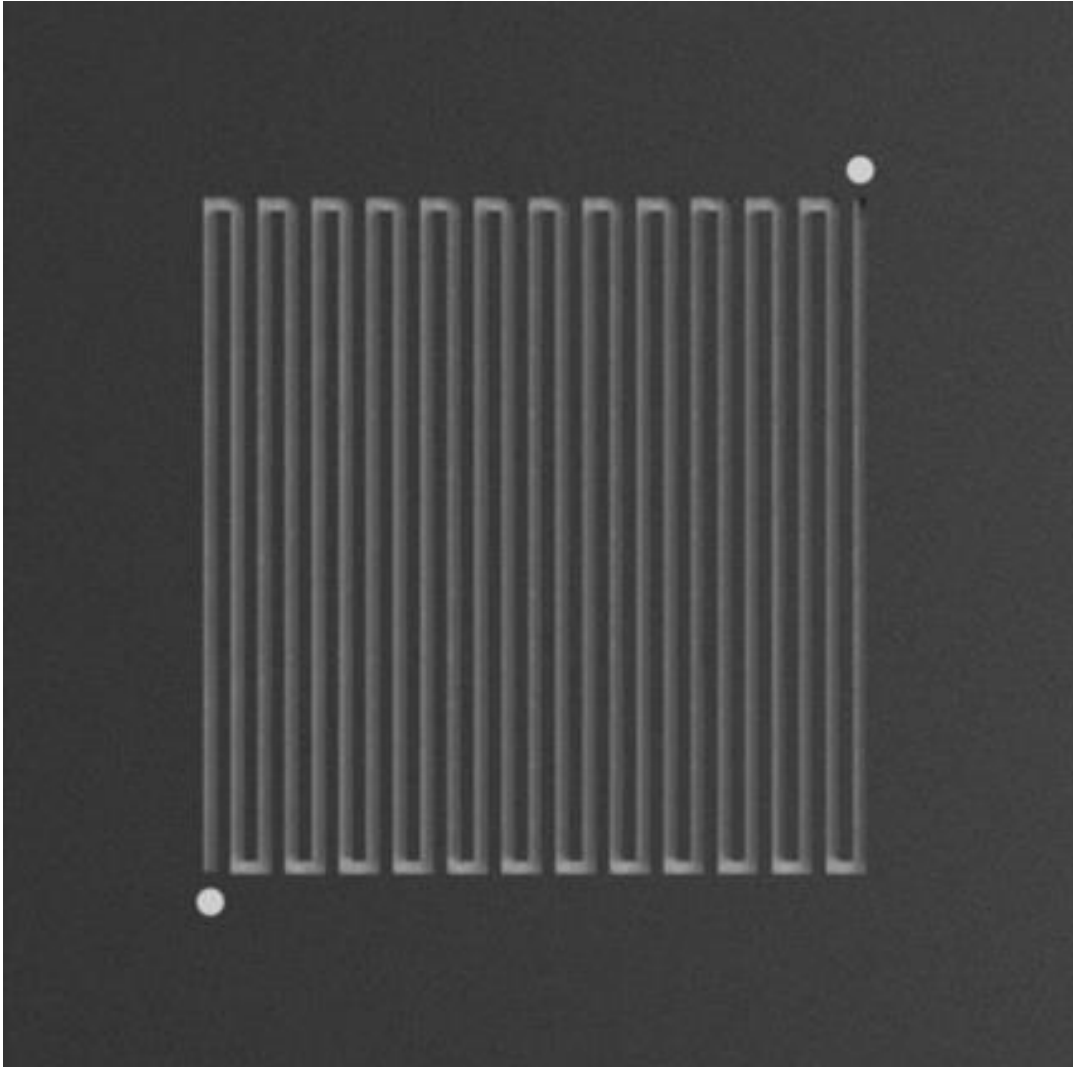


Ilustración 4.1.1 Planos del diseño tipo serpentín.
Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 4.1.2 muestra el renderizado del diseño final del patrón de flujo tipo serpentín, elaborado en SolidWorks:



*Ilustración 4.1.2 Diseño final de canales de flujo tipo serpentín
Fuente: Elaboración propia*

4.1.1 Simulación del diseño tipo serpiente.

Utilizando los parámetros establecidos en la tabla 5 “Parámetros físicos iniciales”, se realizó la simulación de temperatura, presión, fracción másica de agua condensada y distribución del oxidante en FlowSimulation (únicamente para el caso del modelo tipo serpiente la ilustración del análisis de agua condensada y distribución del oxidante se presentan en imágenes separadas, esto debido a que la resolución y el ancho del canal no permite apreciar ambos resultados de forma superpuesta). El análisis de resultados se reserva para el siguiente capítulo de este trabajo. (Capítulo 5 Análisis)

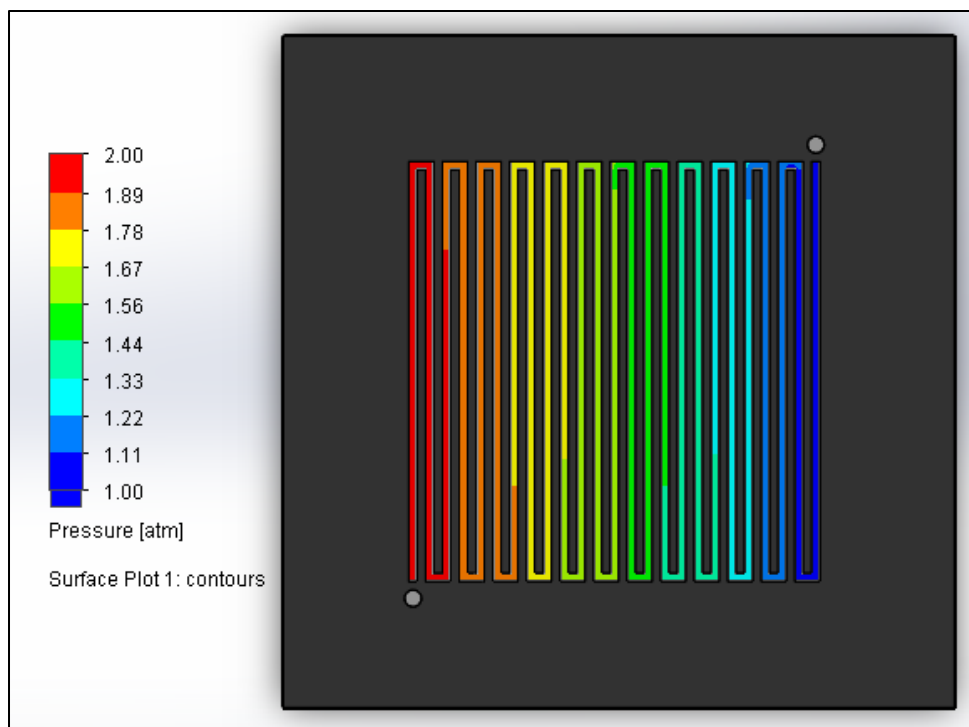


Ilustración 4.1.3 Análisis de presión (Diseño serpiente).
Fuente: Elaboración propia

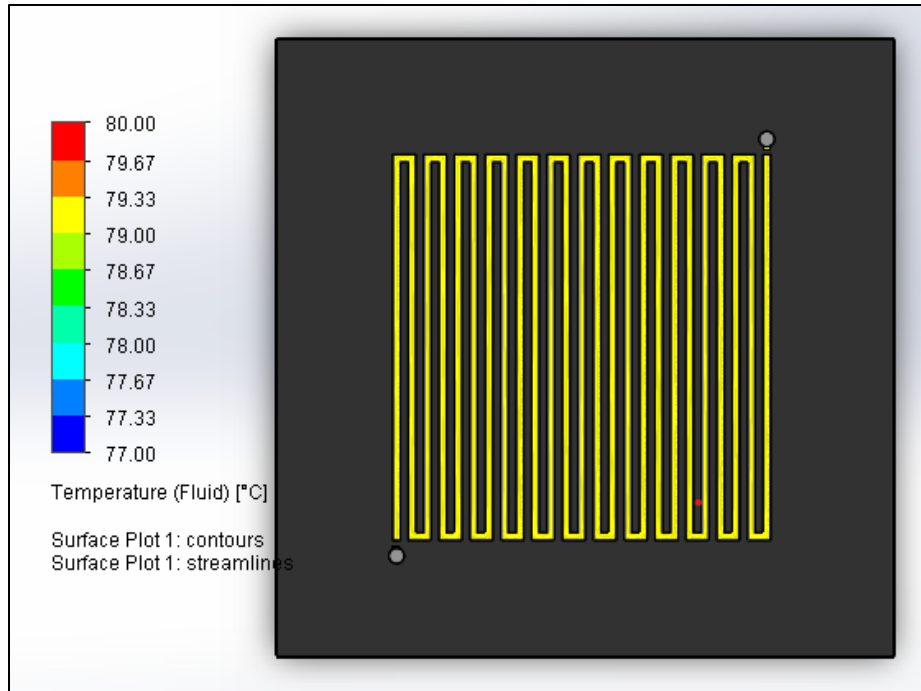


Ilustración 4.1.4 Análisis de Temperatura (Diseño serpentin)
Fuente: Elaboración propia

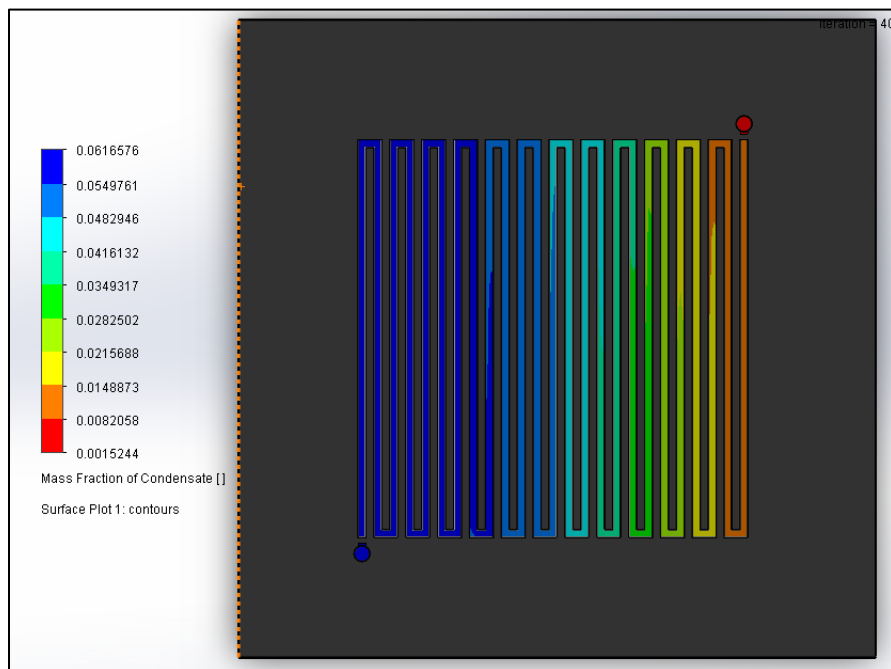
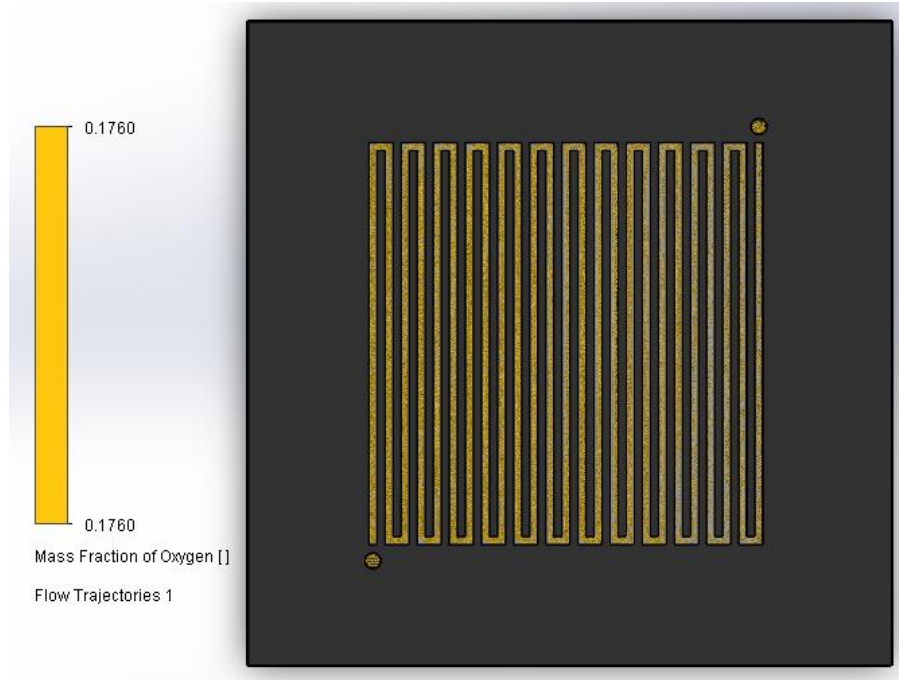


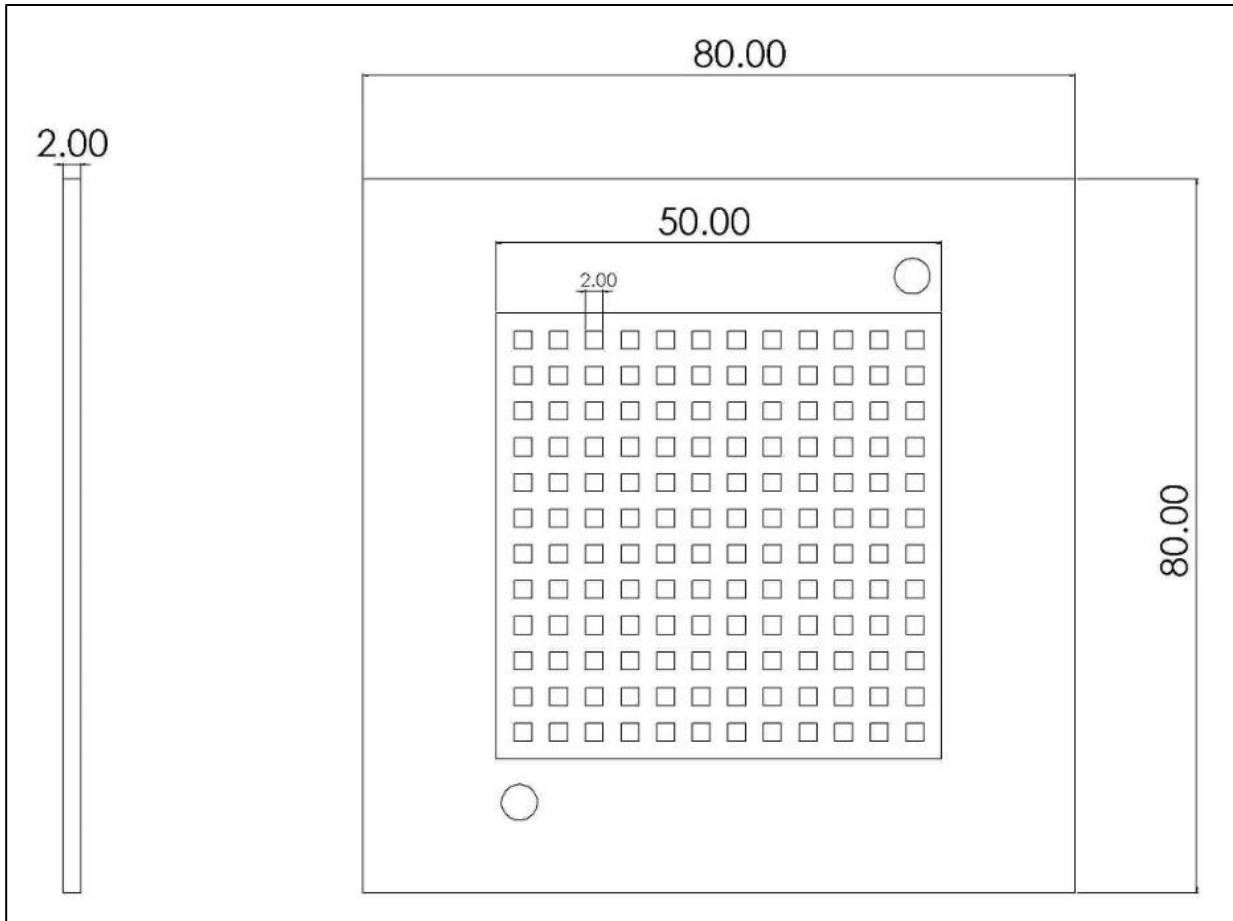
Ilustración 4.1.5 Fracción másica de agua condensada (Diseño serpentin).
Fuente: Elaboración propia



*Ilustración 4.1.6 Distribución del oxígeno (modelo serpentin).
Fuente: Elaboración propia*

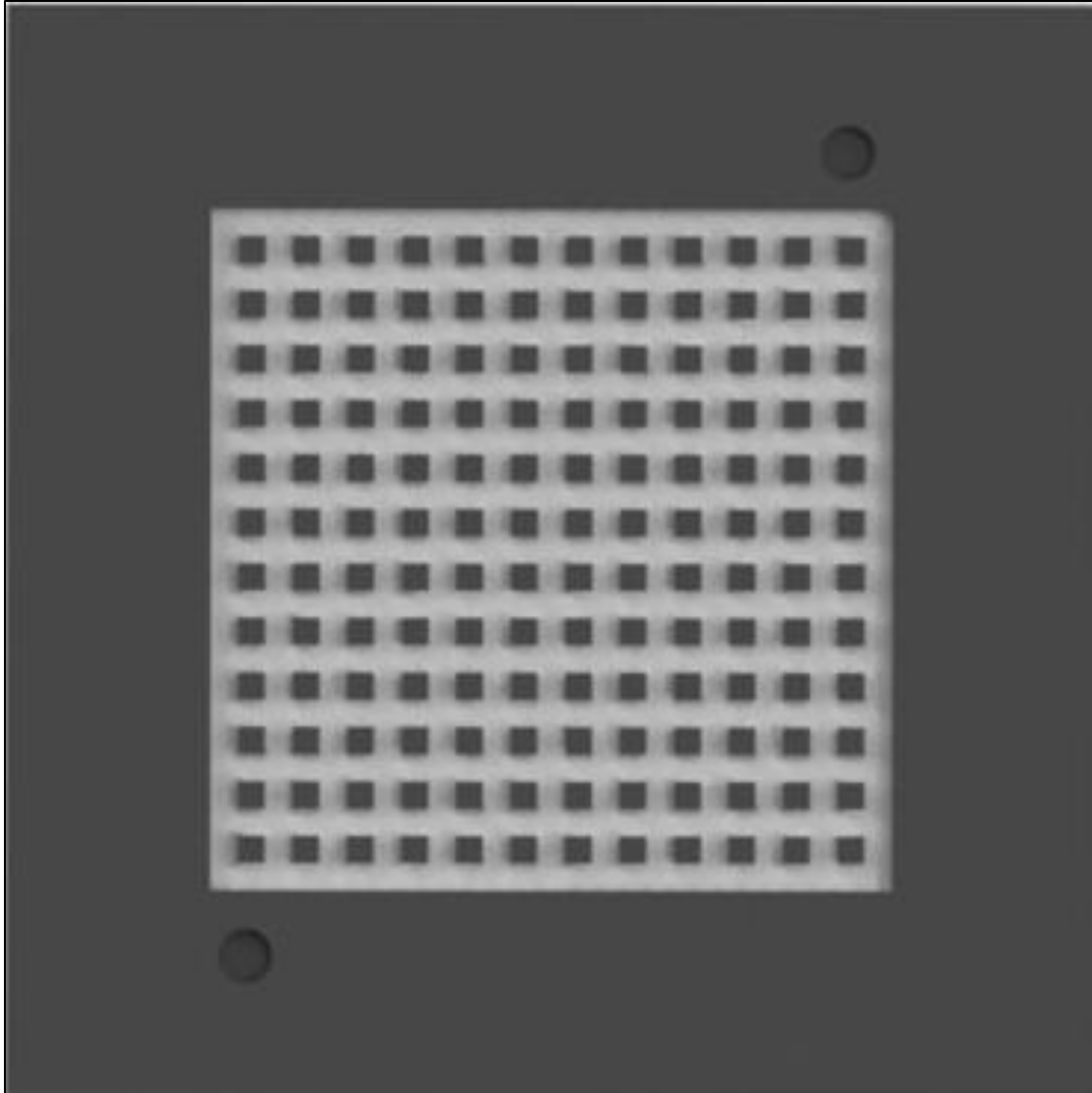
4.2 PATRÓN DE FLUJO TIPO PIN O MALLA

Sí, bien el diseño más común y el que se suele utilizar como referencia en trabajos comparativos es el modelo serpentin, se tomó la decisión de también realizar el modelado del diseño tipo pin o malla (se referirá a él como tipo malla a partir de ahora), ya que uno de los modelos propuestos y presentados adelante en este capítulo se asemeja más a este modelo, siendo por tanto una referencia más justa para su evaluación.



*Ilustración 4.2.1 Planos del diseño tipo malla.
Fuente: Elaboración propia*

La Ilustración 4.2.2 muestra el renderizado del diseño final del patrón de flujo tipo malla, elaborado en SolidWorks:



*Ilustración 4.2.2 Diseño final de canales de flujo tipo malla.
Fuente: Elaboración propia*

4.2.1 Simulación del diseño tipo malla

Utilizando los parámetros establecidos en la tabla 5 “Parámetros físicos iniciales”, se realizó la simulación de temperatura, presión, fracción másica de agua condensada y distribución del oxidante en FlowSimulation. El análisis de resultados se reserva para el siguiente capítulo de este trabajo. (Capítulo 5 Análisis)

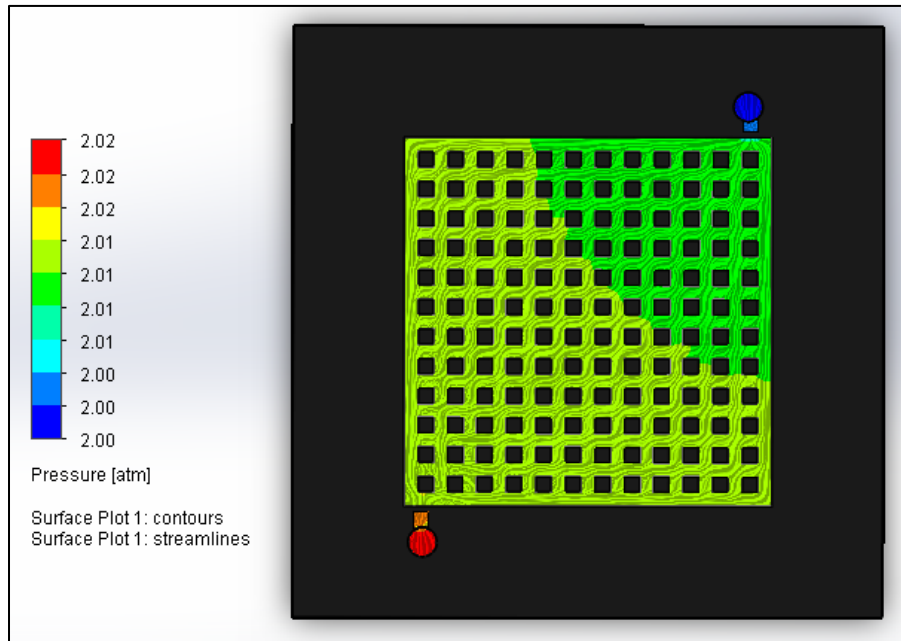


Ilustración 4.2.3 Análisis de presión (Diseño tipo Malla).
Fuente: Elaboración propia

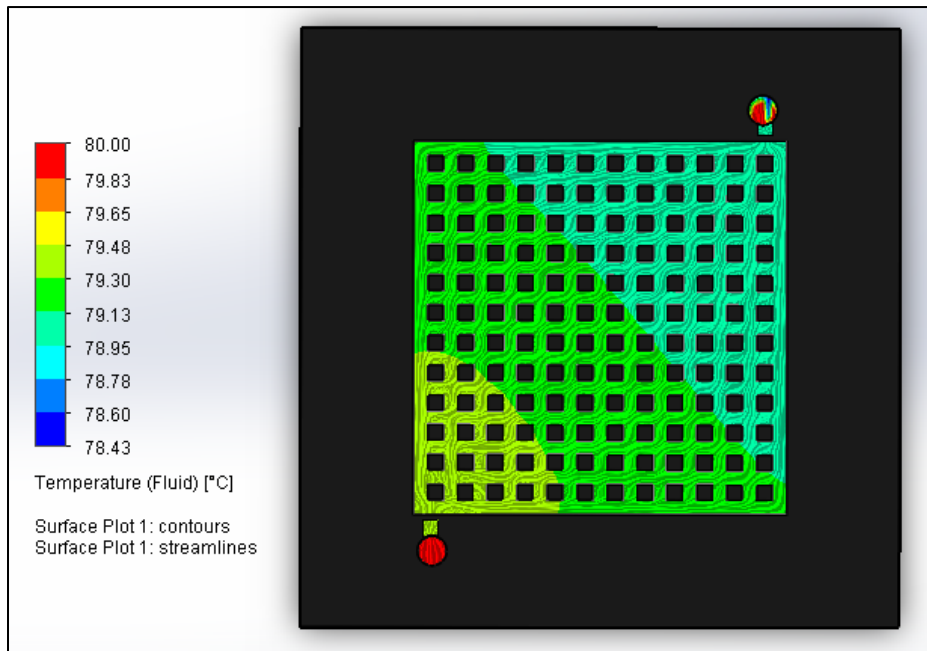
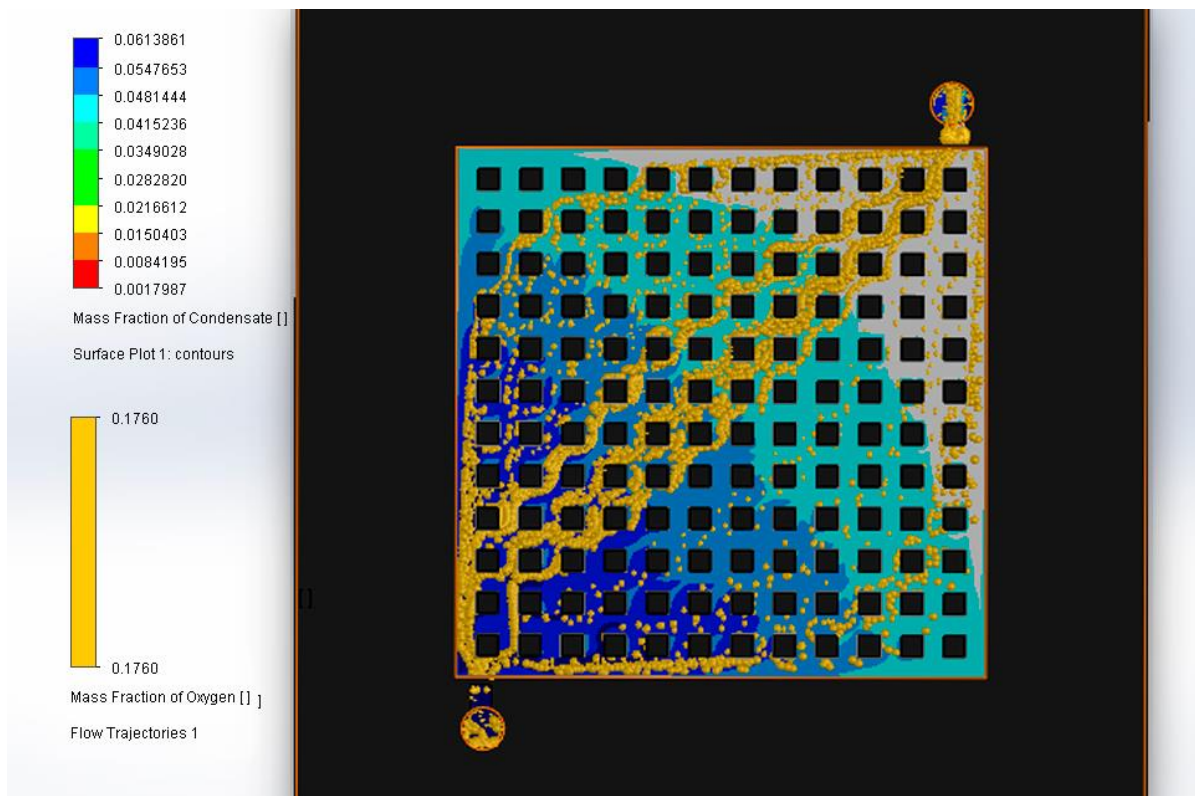


Ilustración 4.2.4 Análisis de temperatura (Diseño tipo Malla).
Fuente: Elaboración propia



*Ilustración 4.2.5 Fracción másica de agua condensada y distribución del oxígeno (Diseño tipo malla).
Fuente: Elaboración propia*

4.3 PROPUESTA DE DISEÑO BIOINSPIRADO

A diferencia del diseño biomimético (el cual se profundizará en la siguiente sección) el diseño bioinspirado propuesto en este trabajo busca tomar de la naturaleza solamente las formas o patrones geométricos presentes en organismos o sistemas naturales, sin importar necesariamente si estos tienen específicamente la función que se desea cumplir, es decir la optimización de fluidos, además no busca una recreación completamente fidedigna, pues como su nombre lo indica solo busca la inspiración como punto de partida de diseño.

En este sentido se eligió el patrón presente en las escamas de pescado pues como hipótesis específica se plantea que la forma curvada de una escama de pescado tiene una menor resistencia aerodinámica, en comparación con un diseño cuadrado como en el de los patrones tipo “malla”.

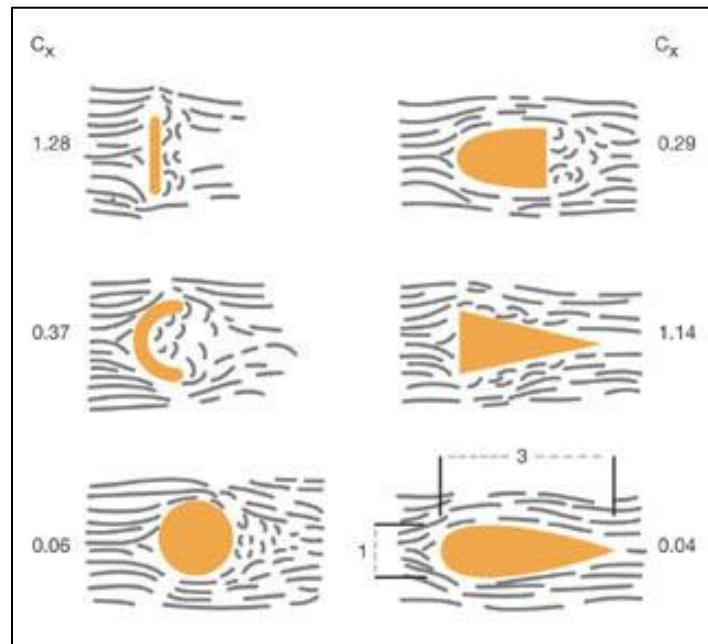


Ilustración 4.3.1 Coeficientes de resistencia de formas comunes.
Fuente: (energyresponsable.blogspot.com)



Ilustración 4.3.2 Escamas cicloides de un rutilo (*Rutilus rutilus*)
Fuente: (Wikipedia,2020)

4.3.1 Diseño final inspirado en escamas:

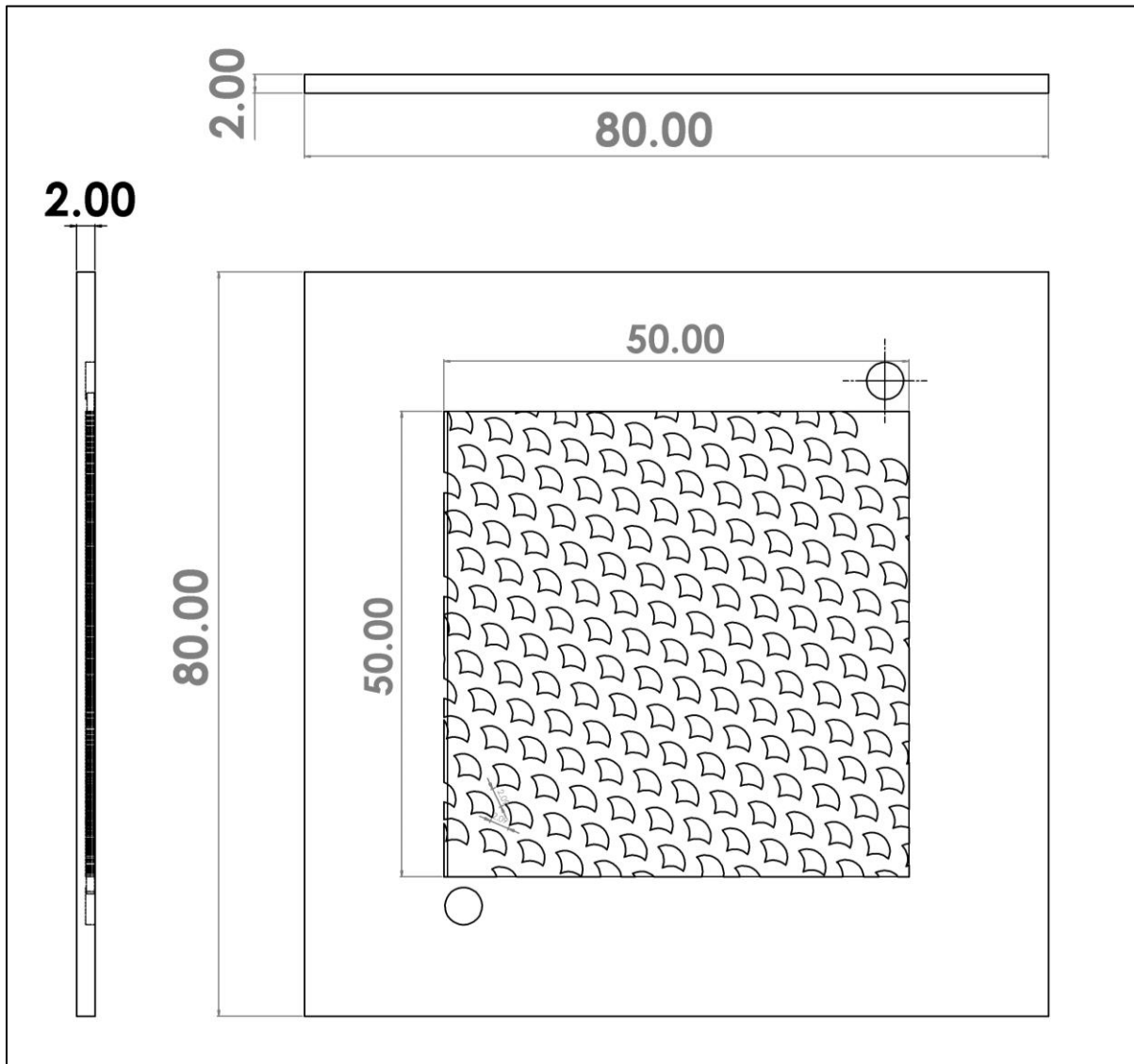
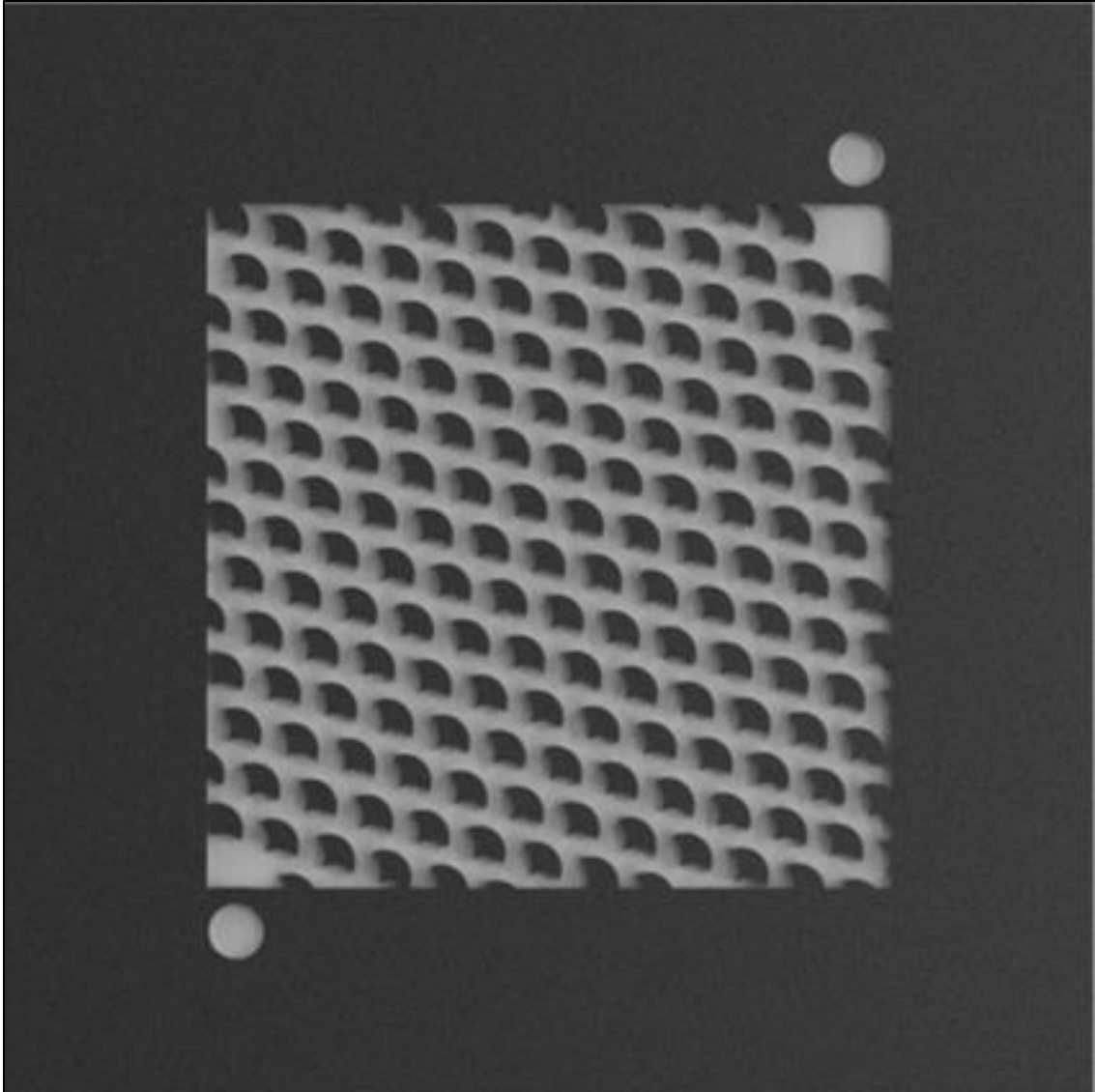


Ilustración 4.3.3 Planos del diseño inspirado en escamas.
Fuente: Elaboración propia

La Ilustración 4.3.4 muestra el renderizado del diseño final del patrón de flujo tipo escamas, elaborado en SolidWorks:



*Ilustración 4.3.4 Diseño final de canales de flujo inspirados en escamas.
Fuente: Elaboración propia*

4.3.2 Simulación del diseño bioinspirado (escamas):

Utilizando los parámetros establecidos en la tabla 5 “Parámetros físicos iniciales”, se realizó la simulación de temperatura, presión, fracción másica de agua condensada y distribución del oxidante en FlowSimulation. El análisis de resultados se reserva para el siguiente capítulo de este trabajo. (Capitulo 5 Análisis)

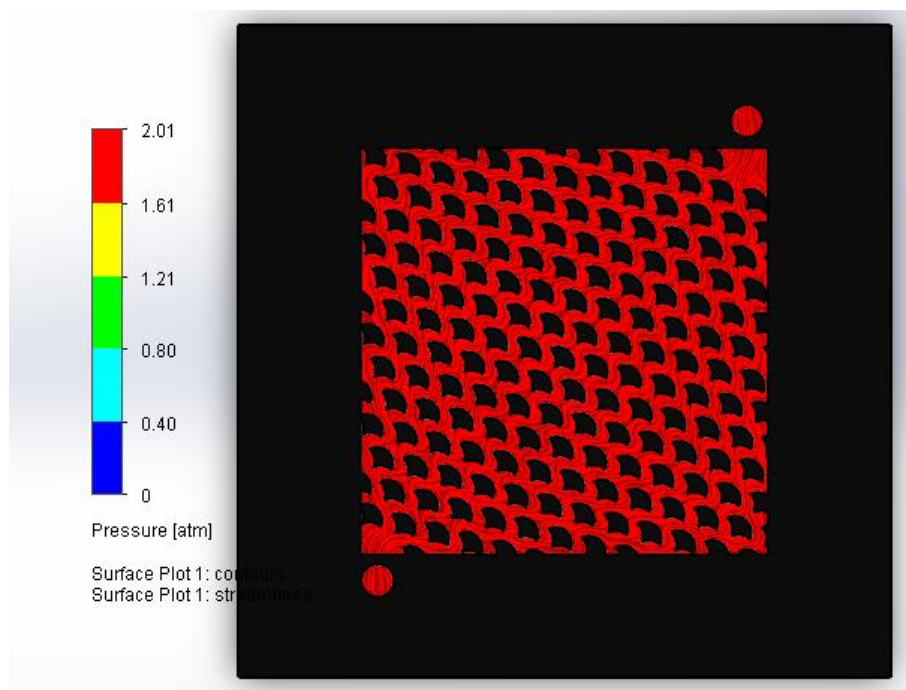


Ilustración 4.3.5 Análisis presión (Diseño bioinspirado).

Fuente: Elaboración propia

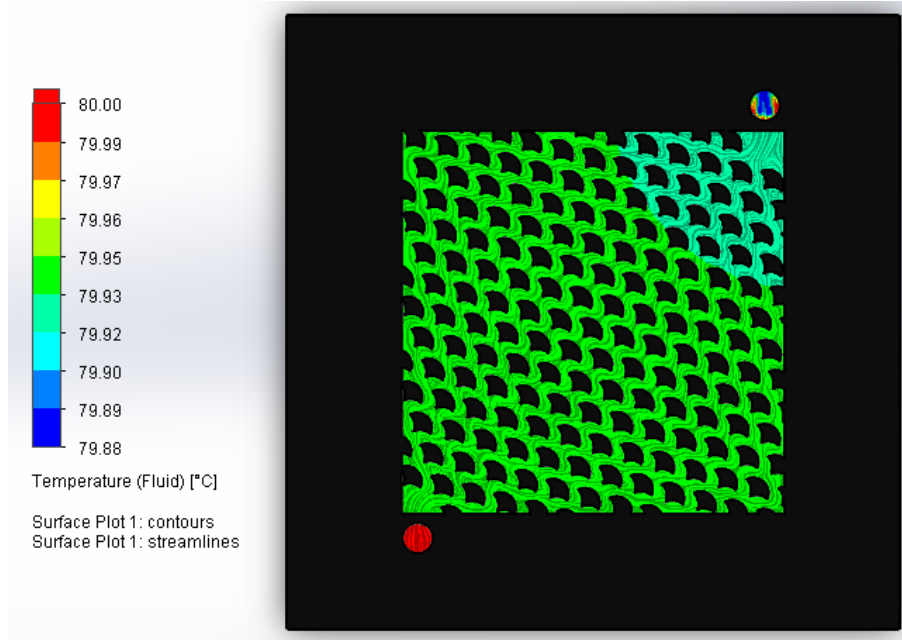


Ilustración 4.3.6 Análisis de Temperatura (Diseño bioinspirado).
Fuente: Elaboración propia

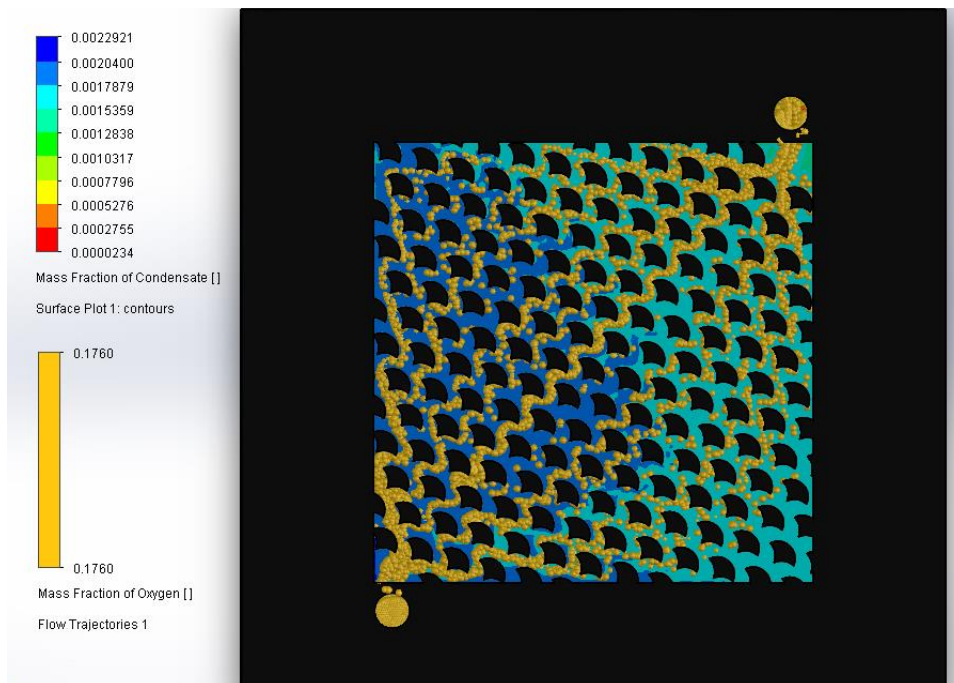


Ilustración 4.3.7 Fracción másica de agua condensada y distribución del oxígeno (Diseño bioinspirado)
Fuente: Elaboración propia

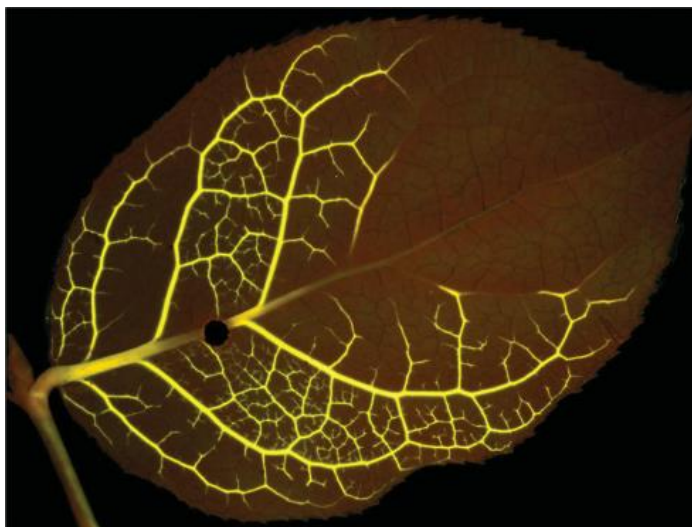
4.4 PROPUESTA DE DISEÑO BIOMIMÉTICO

Para crear el diseño biomimético se tomará como guía la metodología propuesta por el instituto “Biomimicry”, (The Biomimicry Institute, 2023) resumidas en la espiral de diseño biomimético. (Capítulo 2.9 Diseño biomimético)

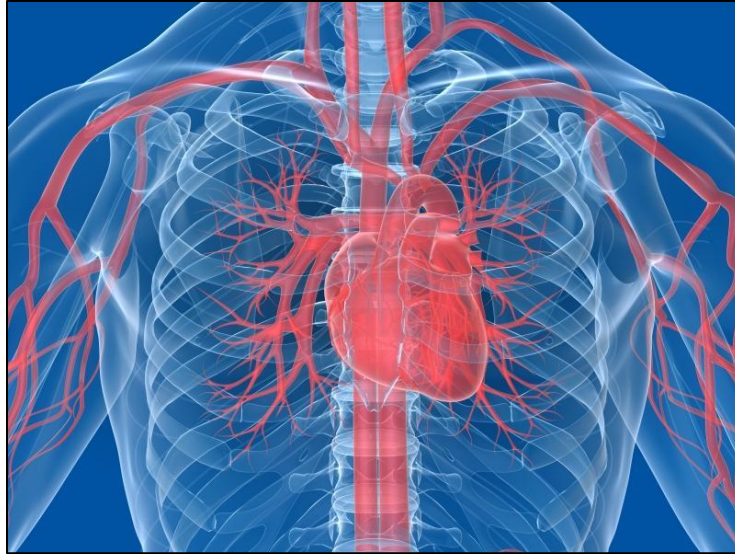
Definir: ¿Cómo podemos optimizar el flujo de oxígeno y agua en los canales de una placa catódica?

Biologizar: ¿Cómo la naturaleza optimiza la distribución de fluidos en áreas limitadas?

Descubrir: En la naturaleza cuando se trata de distribuir fluidos en un área determinada, las redes ramificadas son el patrón más frecuente, como por ejemplo en las nervaduras de las hojas, raíces, venas y arterias, alveolos de pulmones e incluso en los ríos. Todas estas redes presentan un patrón común de bucles interconectados y anidados (ramificaciones), los cuales permiten que el material siga caminos diferentes a medida que cambian las condiciones.



*Ilustración 4.4.1 Ejemplo de sistemas ramificados en la naturaleza (nervadura de hoja de limón)
Fuente: (Katifori, Szollosi, & Magnasco, 2010)*



*Ilustración 4.4.2 Ejemplo de sistemas ramificados en la naturaleza (Sistema linfático)
Fuente: (MedlinePlus en español, 2023)*

Abstraer: La propuesta de explicar este fenómeno fue desarrollada por primera vez por Cecile Murray en 1926, en estas se explica que estas redes trabajan bajo el principio de mínimo gasto energético (el cual el autor traduce como la mínima resistencia del fluido a través de las secciones cilíndricas), sin embargo, presenta una desviación significativa en sistemas vasculares animales, específicamente en arterias coronarias, para lo cual se debe aplicar en su lugar la ley de Finet.

Emular: Se aplicará la ley de Finet al diseño de canales de flujo de campo, mediante un patrón ramificado (tomado como conveniencia para el diseño, su aplicación en canales rectangulares y no secciones cilíndricas) con el objetivo de optimizar la distribución del oxidante y evitar la acumulación de agua.

4.4.1 Desarrollo del diseño biomimético

Para diseñar el patrón de flujo inspirado en los sistemas vasculares, se eligió específicamente el patrón que siguen las arterias coronarias, las cuales siguen el comportamiento de la ley de Finet, como diámetro madre o inicial $D_1 = 4.42$ mm y $D_2 = 2.89$ mm valores medidos clínicamente en pacientes reales. (Finet, y otros, 2007)

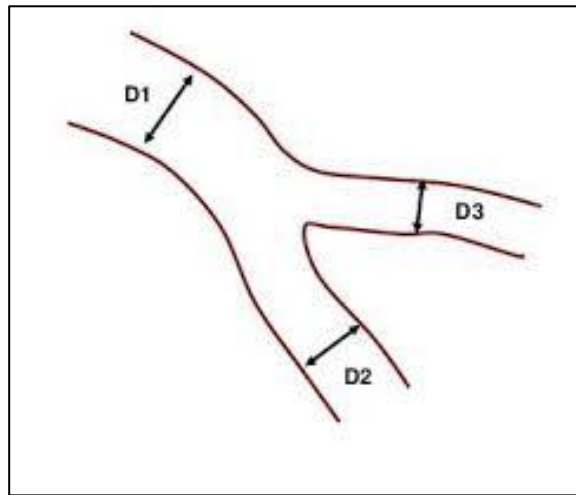


Ilustración 4.4.3 Esquema de bifurcación en una arteria.
Fuente: (Zieliński & Nowosielski, 2020)

Una vez establecidos dos valores iniciales, se puede calcular el de los niveles siguientes despejando para D_3 de la ecuación 21, quedando de la siguiente manera:

$$\text{Ecuación 22: } D_3 = \frac{D_1}{0.678} - D_2$$

Aplicando esta ecuación y repitiendo para los valores subsiguientes, se determinaron las siguientes dimensiones, considerando hasta 9 niveles:

TABLA 6 DIMENSIONES PARA CADA RAMIFICACIÓN SEGÚN LA LEY DE FINET

NIVEL DE RAMIFICACIÓN	DIMENSIONES (MILÍMETROS)
D1	4.42
D2	3.63
D3	2.89
D4	2.42
D5	1.93
D6	1.61
D7	1.28
D8	1.07
D9	0.85

Nota: Elaboración propia

En cuanto a los ángulos, de acuerdo con la hipótesis de la conservación del volumen sanguíneo y la energía mínima el ángulo óptimo está definido por las siguientes ecuaciones. (Zieliński & Nowosielski, 2020)

Ecuación 23:

$$\begin{cases} \cos(\alpha) = \frac{(1 + (D_s/D_l)^{7/3})^{12/7} - (1 + (D_s/D_l)^4)}{2(D_s/D_l)^2} \\ \cos(\beta) = \frac{(1 + (D_s/D_l)^{7/3})^{12/7} + (1 - (D_s/D_l)^4)}{2(1 + (D_s/D_l)^{7/3})^{6/7}} \\ \cos(\gamma) = \frac{(1 + (D_s/D_l)^{7/3})^{12/7} + ((D_s/D_l)^4 - 1)}{2(1 + (D_s/D_l)^{7/3})^{6/7} (D_s/D_l)^2} \end{cases}$$

Normalmente las bifurcaciones se clasifican en dos variantes, si el ángulo α es menor a 60° se clasifica como bifurcación en “Y” (Ilustración 4.4.4) y bifurcación tipo “T” (Ilustración 4.4.5) si es mayor a 60° .

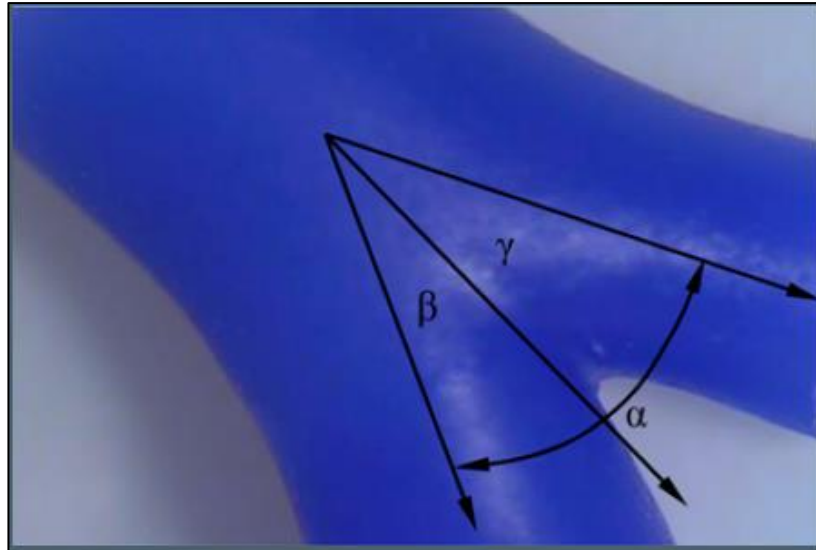


Ilustración 4.4.4 Bifurcación tipo Y
Fuente: (Huo, y otros, 2012)



Ilustración 4.4.5 Bifurcación tipo T
Fuente: (Huo, y otros, 2012)

En arterias coronarias de cerdos, las cuales son muy similares a las del cuerpo humano, se encontró que los ángulos normalmente son de 44° y 71° para las bifurcaciones tipo “Y” y “T” respectivamente. (Huo, y otros, 2012)

Una vez conocidos los ángulos y diámetros óptimos, se obtuvo el siguiente diseño (Ilustración 4.4.6) inspirado en las arterias coronarias:

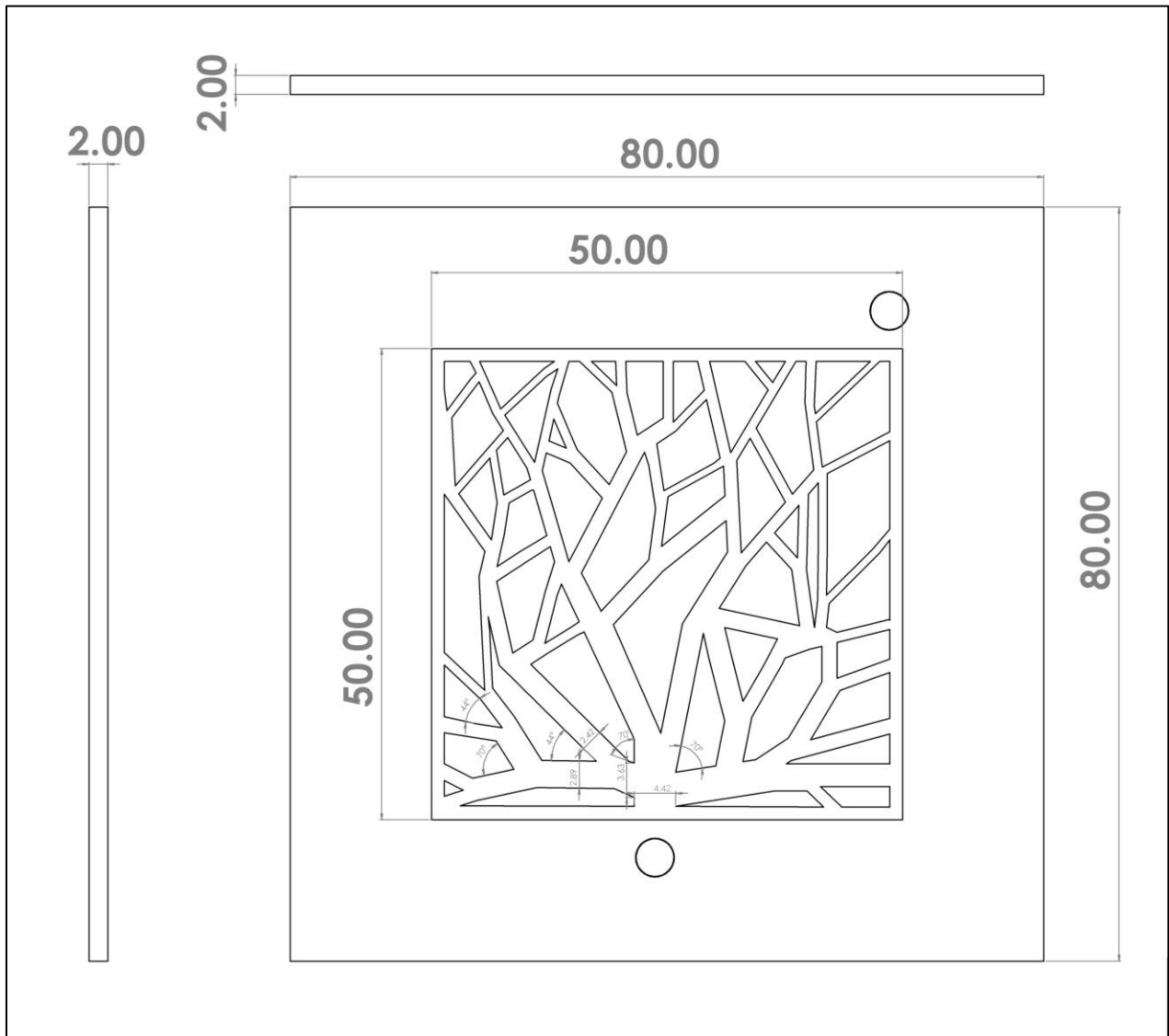


Ilustración 4.4.6 Planos del diseño biomimético
Fuente: Elaboración propia

Nota: Una consideración muy importante que se tomó, es que al aplicar las dimensiones encontradas mediante la ley de Murray - Finet solo implementó la sección transversal, pues en el diseño planteado los canales son rectangulares y no cilíndricos, significando un compromiso en la fidelidad de su eficacia, se tomó esta decisión considerando el grosor de la placa, la cual no podría contener los niveles de ramificación más grandes, además de que contar con canales cilíndricos, aumentaría significativamente el tiempo y por lo tanto el costo de maquinado.

En la Ilustración 4.4.7 se muestra detalle una sección del diseño propuesto, en donde se aplican tanto las dimensiones obtenidas para cada nivel de ramificación, así como los ángulos óptimos:

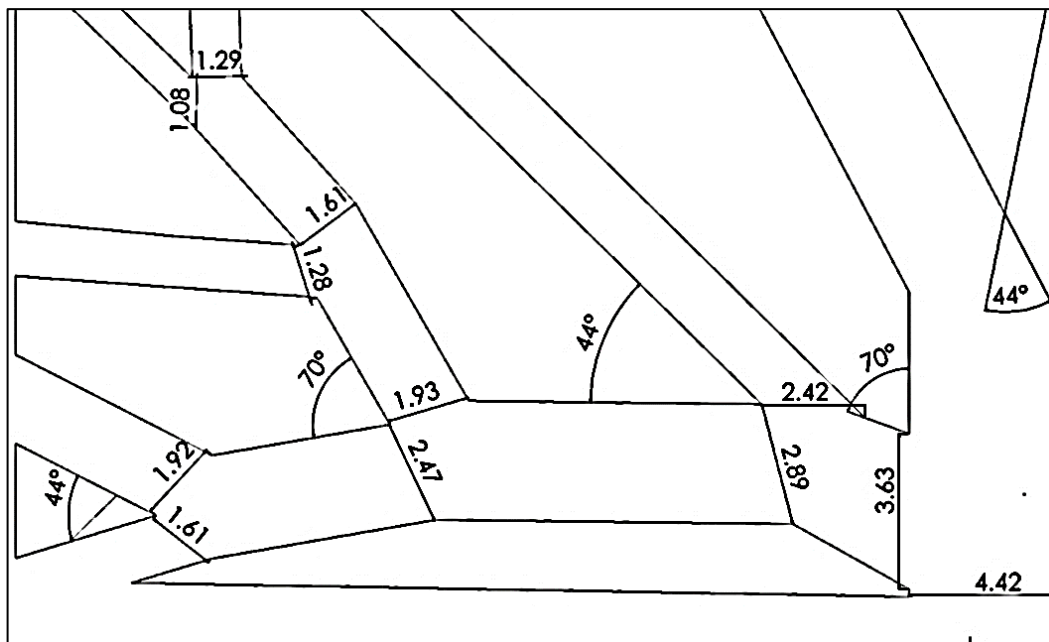


Ilustración 4.4.7 Dimensiones obtenidas aplicadas al diseño (sección).

Fuente: Elaboración propia

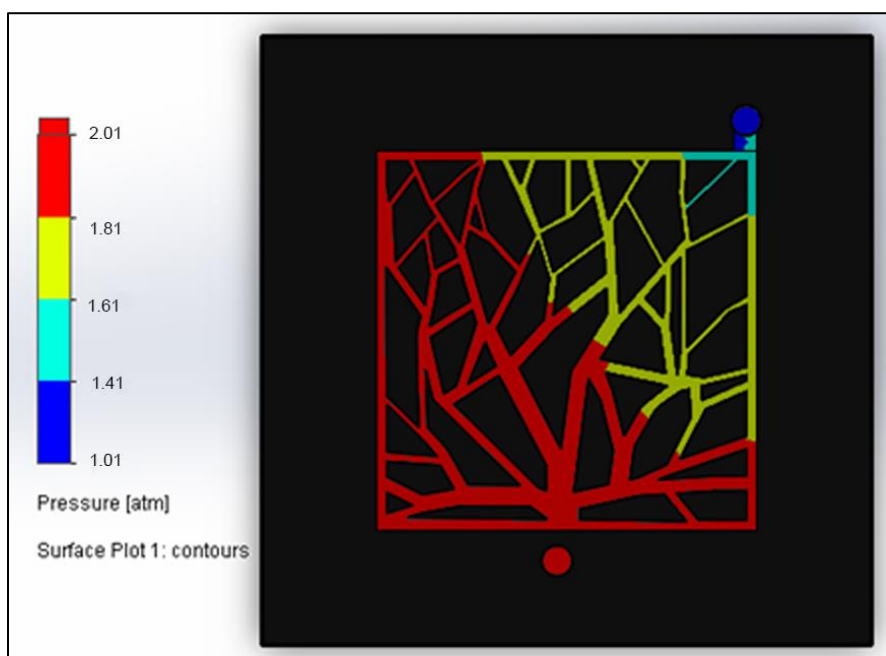
La Ilustración 4.4.8 muestra el renderizado del diseño final del patrón de flujo tipo arterias, elaborado en SolidWorks:



*Ilustración 4.4.8 Diseño final de canales de flujo biomiméticos (arterias)
Fuente: Elaboración propia*

4.4.2 Simulación del diseño biomimético:

Utilizando los parámetros establecidos en la tabla 5 “Parámetros físicos iniciales”, se realizó la simulación de temperatura, presión, fracción másica de agua condensada y distribución del oxidante en FlowSimulation. El análisis de resultados se reserva para el siguiente capítulo de este trabajo. (Capitulo 5 Análisis)



*Ilustración 4.4.9 Análisis presión (Diseño Biomimético).
Fuente: Elaboración propia*

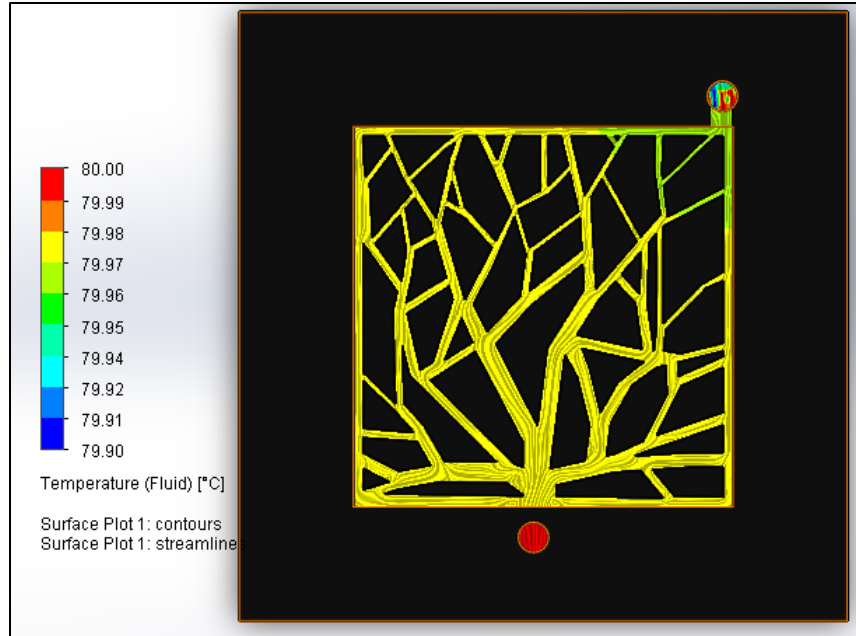


Ilustración 4.4.10 Análisis de porcentaje de agua condensada (Diseño biomimético).
Fuente: Elaboración propia

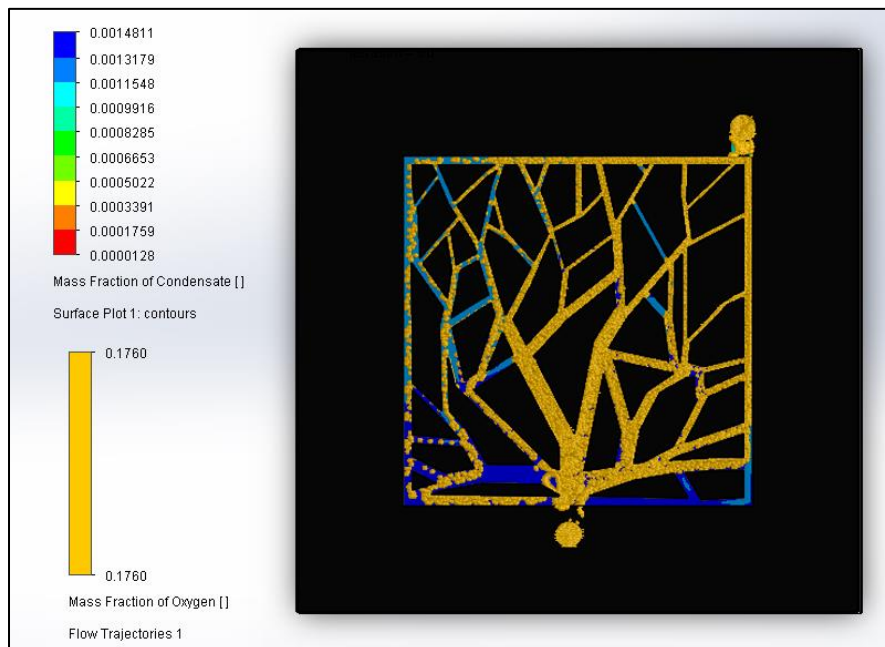


Ilustración 4.4.11 Análisis de Temperatura (Diseño biomimético).

4.5 SIMULACIÓN DE VISCOSIDAD DINÁMICA

Si bien dentro de los objetivos específicos y principales no está contemplada la simulación de viscosidad dinámica, se decidió realizarla, ya que según la ley de Murray un sistema de ramificación óptimo es aquel en el que, para un volumen total dado, se presenta la menor resistencia al fluido. En este sentido la viscosidad dinámica ofrece una variable cuantitativa a este parámetro.

La viscosidad se puede describir como la resistencia de un fluido al flujo, que puede interpretarse como la fricción entre las moléculas del fluido, este parámetro se mide en P*s (Pascal por segundo) y se ve afectado por la presión y la velocidad. En el caso de los líquidos, se atribuye a las fuerzas de cohesión de corto alcance y disminuye con la temperatura, mientras que, en los gases, se debe a las colisiones entre las moléculas y aumenta con la temperatura. Como referencia, para el aire a una temperatura de 20°C la viscosidad dinámica es de alrededor de 1.83×10^{-5} P*s y de 2.64×10^{-5} P*s a una temperatura de 200°C. (Carballo, 2017)

En los modelos simulados se obtuvieron los siguientes resultados:

- Serpentin (Figura 4.5.1): 1.92×10^{-5} P*s
- Tipo malla (Figura 4.5.2): 1.86×10^{-5} P*s
- Tipo escamas (Figura 4.5.3): 1.86×10^{-5} P*s
- Tipo arterias (Figura 4.5.4): 1.80×10^{-5} P*s

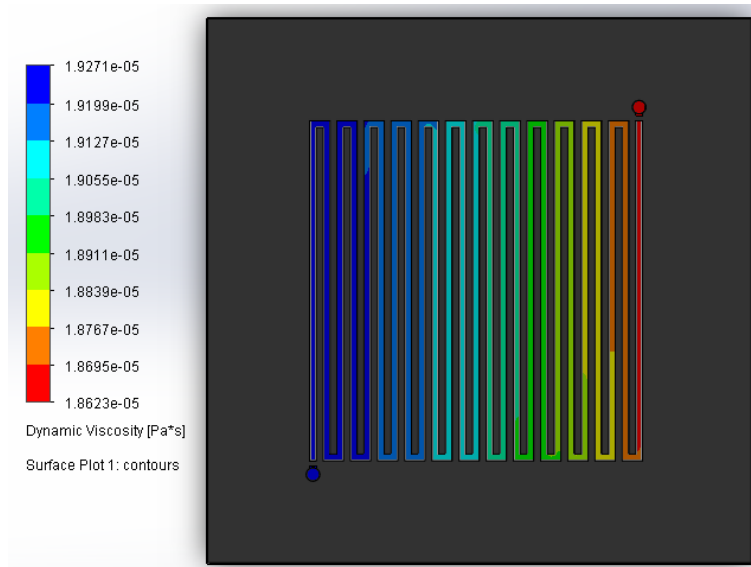


Ilustración 4.5.1 Viscosidad dinámica (modelo serpentin)
Fuente: Elaboración propia

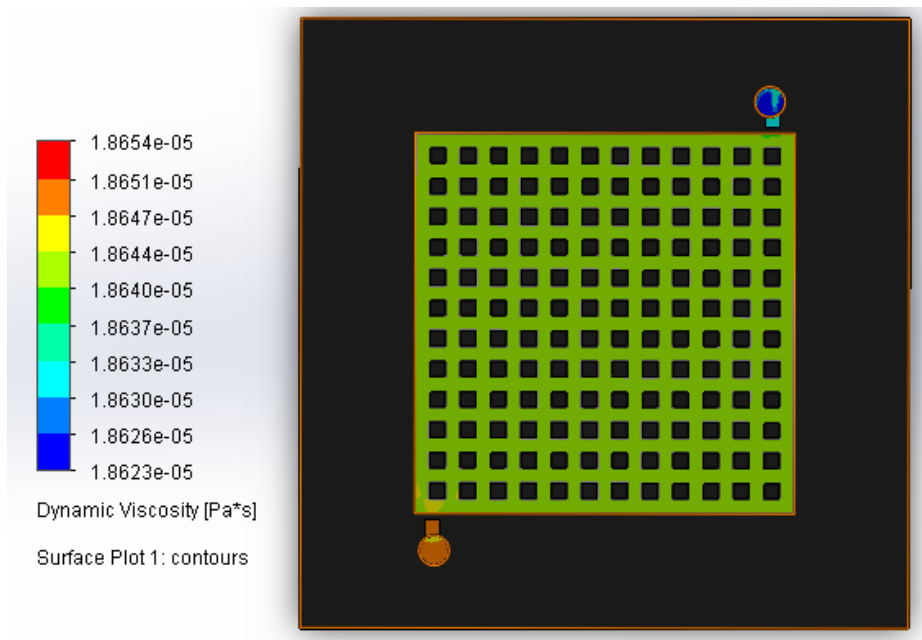
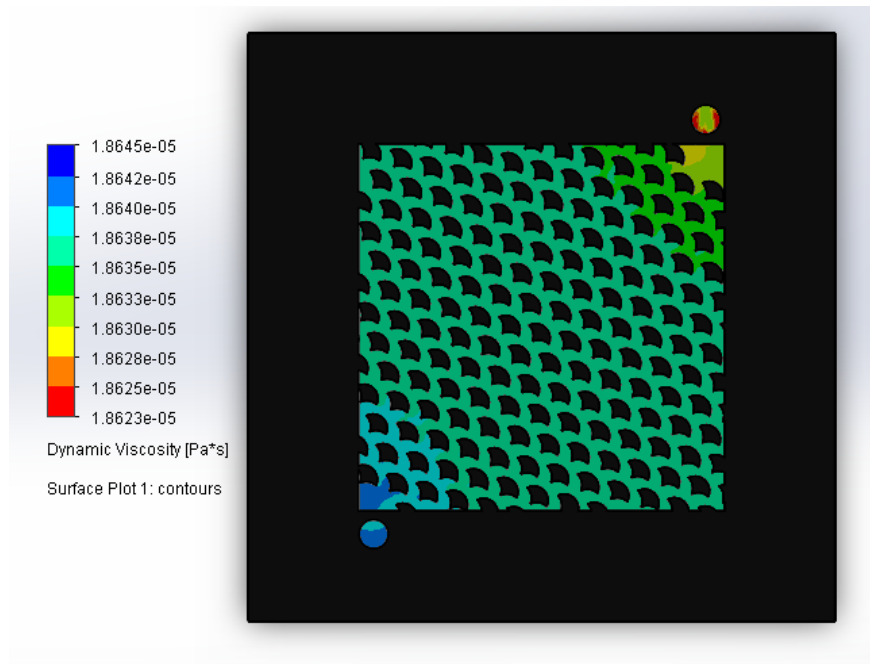
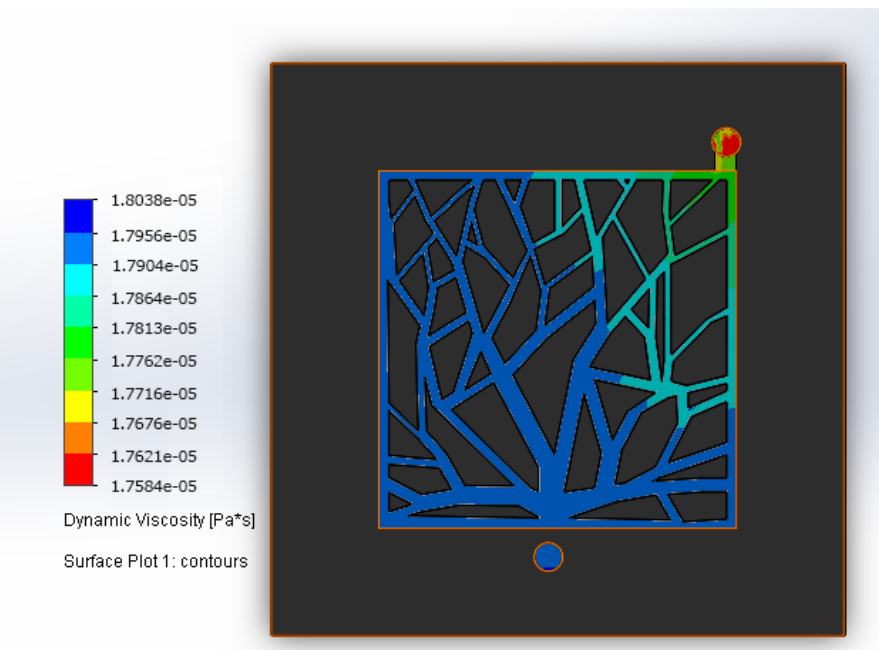


Ilustración 4.5.2 Viscosidad dinámica (modelo tipo malla)
Fuente: Elaboración propia



*Ilustración 4.5.3 Viscosidad dinámica (Diseño tipo bioinspirado).
Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 4.5.4 Viscosidad dinámica (diseño biomimético)
Fuente: Elaboración propia*

4.6 SIMULACIÓN DE MECANIZADO DE CONTROL NUMÉRICO POR COMPUTADORA (CNC).

Con el fin de determinar el costo de producción de los modelos convencionales y propuestos, se realizó la simulación de mecanizado, esto mediante el complemento “Solidworks CAM” la cual es una herramienta de manufactura asistida por computadora. El resultado será el tiempo total de maquinado, y en función de este se obtendrá un costo de producción aproximado. En todos los modelos se implementó la maquina “Milling Machine Metric” y acero inoxidable SS-316 como material.

4.6.1 Mecanizado del modelo tipo serpiente.

En el caso del modelo serpiente, utilizado como referencia, el tiempo de maquinado total fue de 26 minutos y 54 segundos, llevándose a cabo en dos operaciones descritas a continuación:

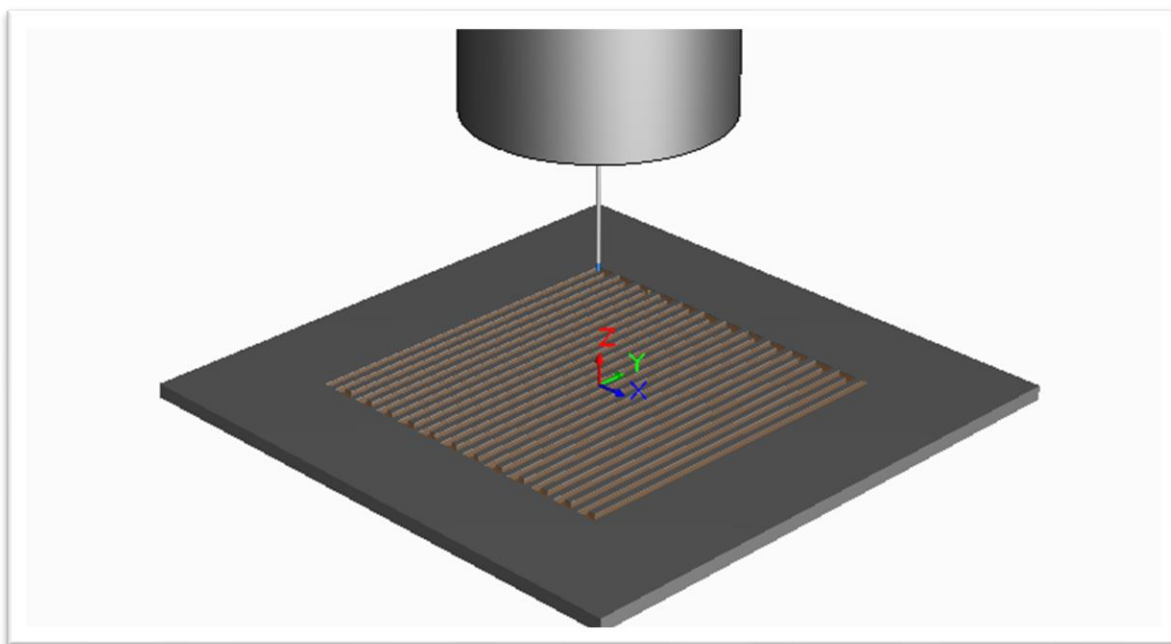


Ilustración 4.6.1 Simulación de mecanizado del modelo tipo serpiente

Operaciones:

- Desbaste: 1.7 min
- Contornado: 15.2 min
- Tiempo total de maquinado: 26.9 min

4.6.2 Mecanizado del modelo tipo arterias.

En el modelo biomimético (arterias), el tiempo de maquinado total fue de 31 minutos y 52 segundos, llevándose a cabo en tres operaciones:

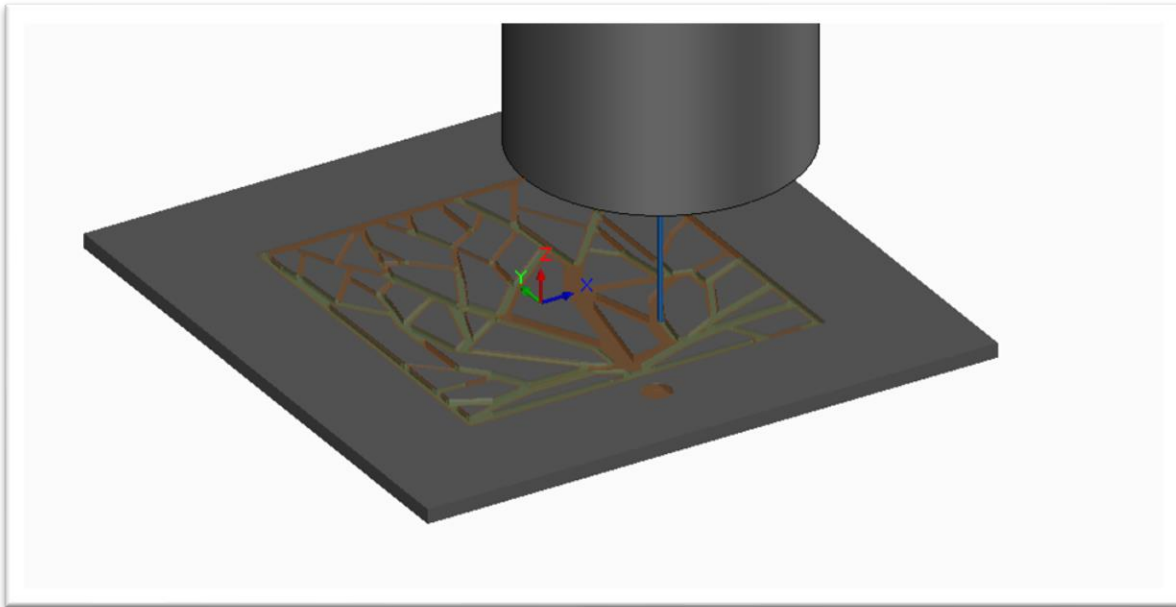


Ilustración 4.6.2 Simulación de mecanizado del modelo tipo arterias.

Operaciones:

- Desbaste 1: 22.7 min
- Desbaste 2: 3.17 min
- Contornado: 6.05 min
- Tiempo total de maquinado: 31.92 min

4.6.3 Mecanizado del modelo tipo malla.

El modelo tipo malla requirió de un tiempo de maquinado total fue de 38 minutos y 24 segundos, llevándose a cabo en tres operaciones:

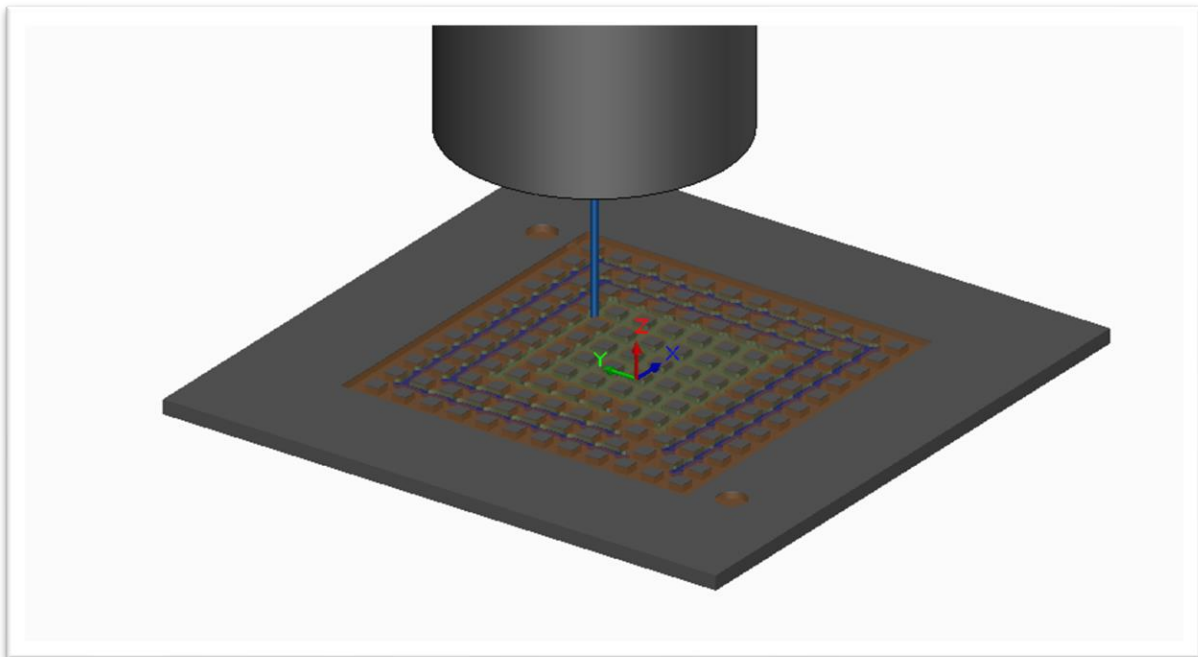


Ilustración 4.6.3 Simulación de mecanizado del modelo tipo malla.

Operaciones:

- Desbaste 1: 14.3 min
- Desbaste 2: 15.9 min
- Contornado: 8.2min
- Tiempo total de maquinado: 38.4 min

4.6.4 Mecanizado del modelo tipo malla.

En el modelo bioinspirado (escamas), el tiempo de maquinado total fue de 63 minutos y 9 segundos, llevándose a cabo en tres operaciones:

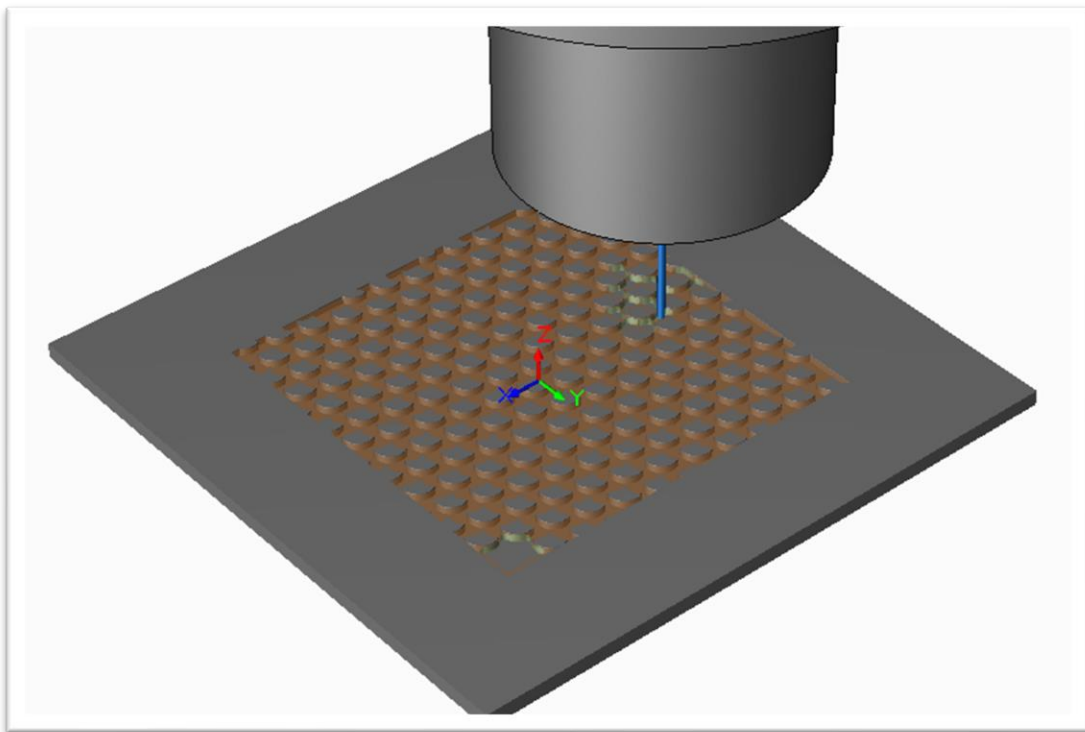


Ilustración 4.6.4 Simulación de mecanizado del modelo tipo escamas.

Operaciones:

- Desbaste 1: 26 min
- Desbaste 2: 7.2 min
- Contornado: 29.9 min
- Tiempo total de maquinado: 63.16 min

TABLA 7 COMPARACIÓN DE COSTO DE MAQUINADO

	TIEMPO	COSTO POR MINUTO	COSTO TOTAL
SERPENTÍN	26.9	\$9*	\$242.10
MALLA	38.4	\$9*	\$345.60
ESCAMAS	63.16	\$9*	\$568.44
ARTERIAS	31.92	\$9*	\$287.28

Nota: Elaboración propia con información de (<https://onthemove.mx>, 2024) *

CAPÍTULO 5 ANÁLISIS

5.1 ANÁLISIS DE PRESIÓN

La caída de presión es uno de los valores determinantes en la eficiencia de una celda de combustible, una diferencia de presión adecuada puede promover el correcto drenaje de agua líquida subproducto de la reacción producida en el cátodo, sin embargo, si la caída es muy drástica, será necesario suministrar mayor presión desde la entrada de la celda, lo cual podría llegar a representar cargas parasitas, es decir, un mayor consumo de energía externa y por lo tanto menor eficiencia global.

Como se observa en la Ilustración 5.1.1, los resultados de la simulación de presión para los modelos de tipo serpentín (a) y del tipo malla (b) son similares y consistentes con lo que se reporta en la bibliografía; en el tipo serpentín se presenta una caída drástica de presión, esto se explica debido a que se cuenta con un canal único por el cual se hace fluir el oxidante, además, debido a los múltiples cambios de dirección se cuenta con una alta resistencia al fluido. Por su parte en el modelo tipo malla, la caída de presión es mínima, ya que el gas tiene múltiples caminos por los cuales fluir; con lo cual se reduce significativamente la dependencia de un presurizador externo.

Por otra parte, en el modelo inspirado en las arterias (c) se observa una caída de presión bastante menos drástica en comparación con el modelo tipo serpentín, logrando una mejoría en la presión a lo largo de la placa de flujo. En cuanto al modelo inspirado en escamas de pescado (d), se obtuvo prácticamente el mismo resultado que con el modelo tipo malla utilizado como referencia.

Análisis de presión

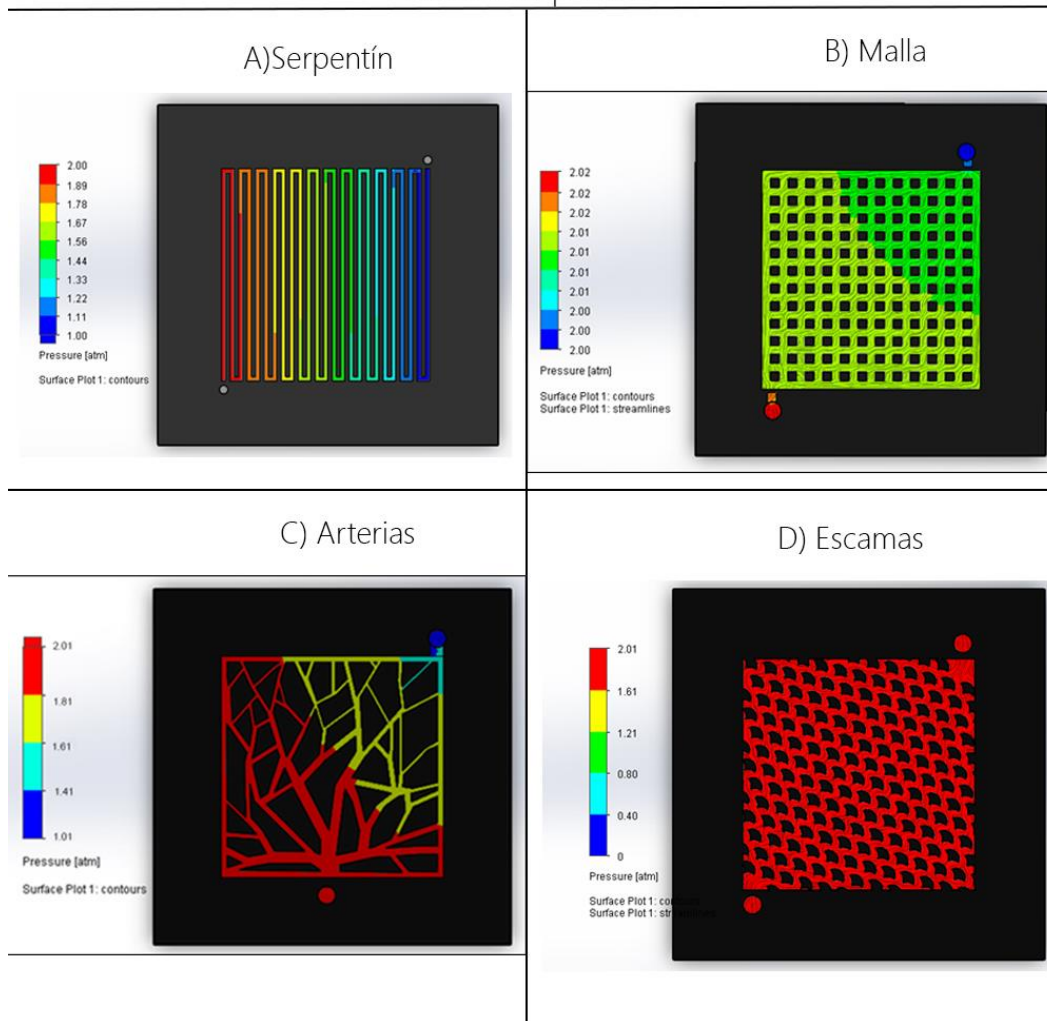


Ilustración 5.1.1 Resultados de la simulación de presión. A)Serpentin. B)Malla. C)Arterias. D)Escamas
Fuente: Elaboración propia.

5.2 ANÁLISIS DE TEMPERATURA

Mantener una temperatura adecuada es de suma importancia dentro de una celda de combustible, pues si bien la difusividad del gas mejora con el aumento de esta, por el contrario, la conductividad de la membrana iónica disminuye debido a que la tasa de eliminación de agua supera a la producida, la cual es necesaria para mantener la

membrana hidratada o de lo contrario se presentara una disminución gradual de la corriente. Los resultados del análisis de temperatura (Ilustración 5.2.1) son favorables y muy similares en los cuatro modelos ya que en todos se mantiene estable alrededor de 79°C, considerada como la temperatura optima de acuerdo con las fuentes consultadas y citadas en secciones anteriores. (2.11 Condiciones óptimas de operación)

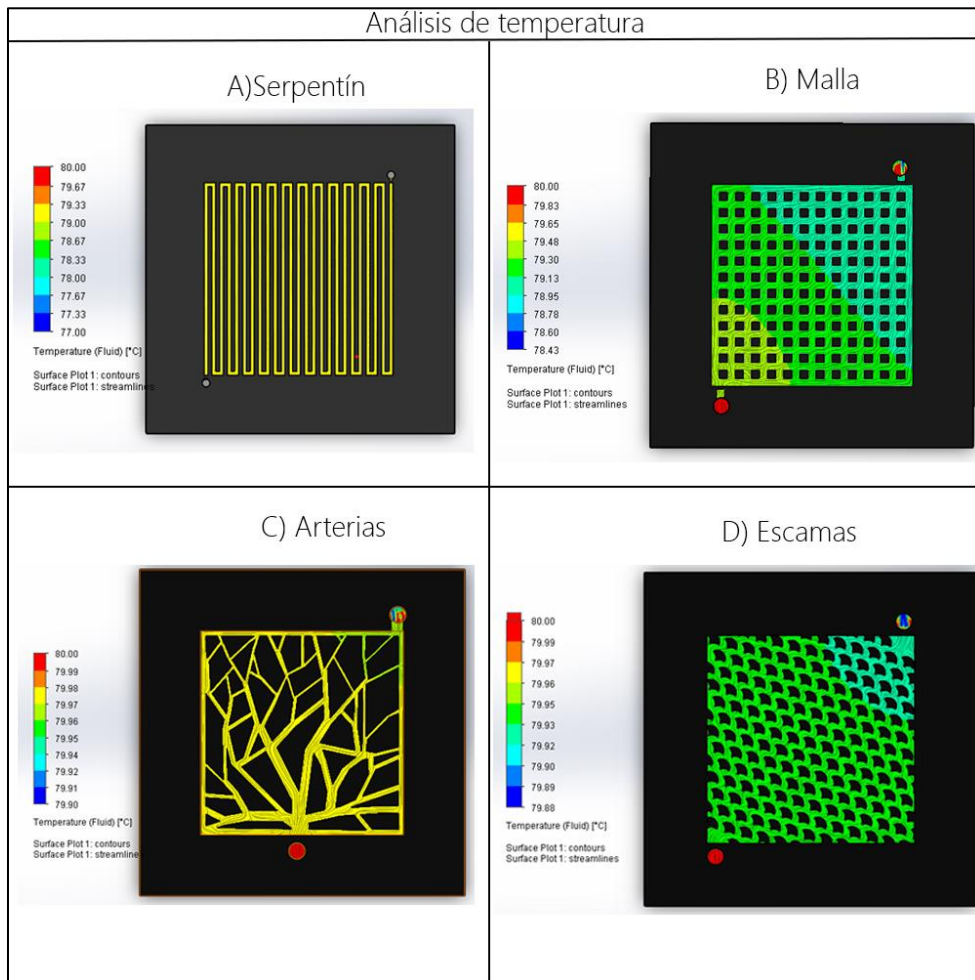


Ilustración 5.2.1 Resultados de la simulación de temperatura. A)Serpentin. B)Malla. C)Arterias. D)Escamas
Fuente: Elaboración propia.

5.3 ANÁLISIS DE FRACCIÓN MÁSCICA DE AGUA CONDENSADA

Una de las principales tareas de las placas de flujo es promover una correcta eliminación de agua acumulada, ya que de no hacerlo se presentarán con mayor probabilidad pérdidas por concentración, para medir esto se realizó una simulación de fracción másica de agua condensada, lo cual indica las zonas más probables en las que se acumula agua líquida.

Si bien la bibliografía indica que en el modelo serpentín se debería presentar poca acumulación de agua debido a su elevada caída de presión, en la Ilustración 5.3.1 se observa que en el primer tramo del serpentín hay una fracción másica de 0.06, esto debido a que para compensar su drástica caída de presión se debe compensar suministrando el gas con una mayor presión de entrada lo cual representa un mayor gasto energético de operación.

En cuanto al modelo tipo malla se tiene una fracción másica de 0.06 de agua cerca de la entrada, teniendo además una distribución del oxidante muy poco uniforme, teniendo una ruta del fluido prominente a través de la diagonal entre la entrada y la salida, la cual ofrece el camino de menor resistencia y provocando que existan algunas regiones con baja difusividad como lo declara la bibliografía. En contra parte, el modelo inspirado en escamas presenta una fracción másica de 0.0022 en la mayor parte de la placa con lo cual se logra tanto una mejor eliminación de agua, así como una distribución más uniforme, abarcando el oxidante una mayor área de la placa.

Finalmente, el modelo inspirado en arterias presenta la menor cantidad de agua siendo el máximo de 0.0014 de fracción másica, así como una muy buena distribución del aire.

FRACCIÓN MÁSCA DE AGUA CONDENSADA Y DISTRIBUCIÓN DEL OXÍGENO

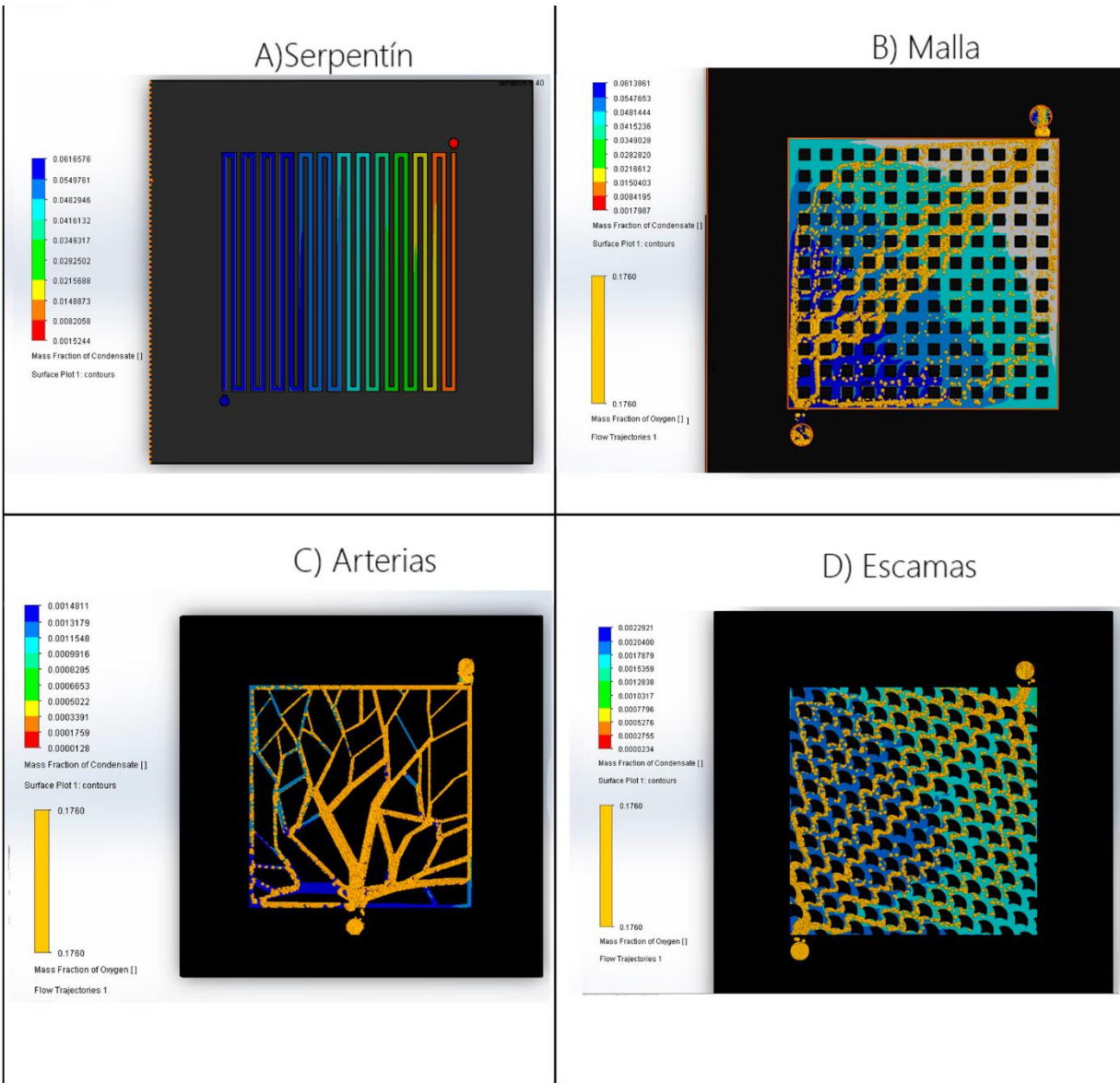


Ilustración 5.3.1 Resultados de la simulación de fracción másca de agua condensada y distribución del oxígeno.

A)Serpentin. B)Malla. C)Arterias. D)Escamas

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 8 COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

	SERPENTÍN	MALLA	ESCAMAS	ARTERIAS
PRESIÓN (ATM)	(2.00 – 1.11)	2.01	2.01	(2.01-1.61)
TEMPERATURA MÁXIMA (C°)	79.33	79.30	79.95	79.88
FRACCIÓN MÁSICA DE AGUA CONDENSADA	0.06	0.06	0.0022	0.0014
VISCOSIDAD DINÁMICA (Pa*s)	1.92×10^{-5}	1.86×10^{-5}	1.85×10^{-5}	1.80×10^{-5}
COSTO DE MAQUINADO (\$)	242.10	345.60	568.44	287.28

Nota: Elaboración propia

CONCLUSIONES

- Si bien la caída de presión en los canales de flujo pueden propiciar un mejor drenaje de agua, cuando una celda de combustible de membrana de intercambio protónico (PEM) está en funcionamiento, estas generalmente necesitan de un compresor de aire para proporcionar el oxígeno requerido por la reacción, y dado

que la caída de presión en el canal hará que el compresor de aire consuma más energía y a cambio reduzca la eficiencia global del sistema de celdas de combustible, un buen diseño no debería tener ni una alta caída de presión ni una baja densidad de corriente. Por lo tanto, el diseño de los canales es crucial para el rendimiento general de la celda de combustible.

- El resultado de las simulaciones muestra que el diseño tipo serpentín requiere de una mayor presión operativa para obtener una correcta eliminación de agua, con lo cual, al requerir un mayor gasto energético, disminuye su eficiencia global.
- En cuanto al diseño tipo malla, se hace visible que, si bien presenta una mínima caída de presión, esto promueve una alta acumulación de agua y mala distribución.
- En cuanto a la comparación entre el diseño tipo escamas y el diseño tipo malla, se evidenció una clara mejoría tanto en la distribución del reactivo, así como en la eliminación de agua, sin embargo, debido a su geometría curvada le añade mayor complejidad al diseño lo que eleva la dificultad de producirlo.
- El diseño inspirado en arterias presenta un equilibrio, pues el cambio de presión es menos drástico, lo cual reduce su necesidad de energía externa, así como en los resultados de eliminación de agua, teniendo el mejor desempeño, además su diseño no es demasiado complejo pues en principio son todas líneas rectas.
- En cuanto a la relación costo beneficio el mejor resultado es para el diseño tipo arterias seguido del modelo serpentín.

SUGERENCIAS

- Como recomendación general, se destaca la importancia y la ventaja de implementar herramientas de diseño asistido por computadora y dinámica de fluidos computacional para validar un modelo desde la etapa de concepción, así como también se recomienda ampliamente adoptar la biomímesis como filosofía de diseño, pues la naturaleza a través de millones de años de adaptación a optimizado procesos a los que nos enfrentamos en diferentes ámbitos.
- Para futuros trabajos, se recomienda analizar la eficiencia de la celda de combustible completa aplicando los diseños propuestos.
- Si se desea seguir con esta línea de investigación, se sugiere explorar la implementación de diferentes materiales para la construcción de la placa de flujo de campo y de catalizadores.

Bibliografía

- Ahmadi, N., & Sajad Rezazadeh, A. D. (2018). Study of the Effect of Gas Channels Geometry on the Performance of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*.
- ALVARADO, J. (2013). "Estudio comparativo de las diferentes tecnologías de celdas de combustible". *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*.
- Arvay, A., French, J., Wanga, J., Peng, X.-H., & Kannan, A. (2012). "Nature inspired flow field designs for proton exchange membrane fuel cell". *international journal of hydrogen energy*.

- Barber, R. W., Cieśliski, K., & Emerson, D. R. (2006). Using Murray's law to design artificial vascular microfluidic networks. *Institute of Automatic Control and Robotics*.
- Barreras, F., & Lozano, A. (2015). "Hidrógeno. Pilas de combustible de tipo PEM". *Universidad de Zaragoza*.
- Bejan, A. (2001). "Shape and Structure, From Engineering to Nature". *Entropy: International and Interdisciplinary Journal of Entropy and Information Studies*.
- Carballo, C. A. (2017). "MECÁNICA DE FLUIDOS: VISCOSIDAD Y TURBULENCIA". Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Castrillo, E. D., Pabón, J. J., & Ricardo, J. (2018). "ESTADO DEL ARTE DE LAS CELDAS DE COMBUSTIBLE". *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*.
- Chen, Z., Yang, X., Hu, X., & Wang, C. (2020). Optimization of channel structure for proton exchange membrane fuel cells based on a three dimensional two phase floe model. *Int J Energy Research*.
- Corson, F. (2010). Fluctuations and Redundancy in Optimal Transport Networks. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*.
- Finet, G., Gilard, M., Perrenot, B., Rioufol, G., Motreff, P., Gavit, L., & Prost, R. (2007). Fractal geometry of arterial coronary bifurcations: a quantitative coronary angiography and intravascular ultrasound analysis. *Euro Intervention*.
- Hoeflinger, J., & Hofmann, P. (2020). "Air mass flow and pressure optimisation of a PEM fuel cell range extender system". *international journal of hydrog enenergy*.

- Hoye, A. (2017). The Proximal Optimisation Technique for Intervention of Coronary Bifurcations. *Radcliffe Cardiology*.
- Huo, Y., Finet, G., Lefevre, T., Louvard, Y., Moussa, I., & Kassab., G. (2012). Which diameter and angle rule provides optimal flowpatterns in acoronarybifurcation? *Journal of Biomechanics*.
- Iakovou, I., Foin, N., Andreou, A., Viceconte, N., & Mario, C. D. (2011). New strategies in the treatment of coronary bifurcations. *Urban & Vogel*.
- Iranzoa, A., Arredondo, C., Kannan, A., & F.Rosa. (2020). "Biomimetic flow fields for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: a review of" . *Universidad de Sevilla*.
- Jaralla, R., & Cao, J. (2018). "Parametric study of operational PEM fuel cell using". *Int. J. Aerodynamics*.
- Jing, D., Song, S., Pan, Y., & Wang, X. (2018). Optimal fractal tree-like microchannel networks with slip for laminar-flow-modified Murray's law. *Beilstein Journal of Nanotechnology*.
- Jinhua, D., Shunfang, L., & Liu, S. (2020). "Numerical investigation of novel bio-inspired flow field design scheme for PEM fuel cell". *Journal of Renewable and Sustainable Energy*.
- Kassab, G., & Finet, G. (2015). Anatomy and function relation in the coronary tree: from bifurcations to myocardial flow and mass. *Euro Intervention*.
- Katifori, E., Szollosi, G., & Magnasco, M. (2010). Damage and Fluctuations Induce Loops in Optimal Transport Networks. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*.

Li, X., & Sabir, I. (2005). "Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs". *International Journal of Hydrogen Energy*.

Li, Y., Bi, J., Tang, M., & Lu, G. (2022). Snowflake Bionic Flow Channel Design to Optimize the Pressure Drop and Flow Uniform of Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Micromachines*.

Manso, A., Marzo, F., Barranco, J., Garikano, X., & Mujika, M. (2012). "Influence of geometric parameters of the flow fields on the performance of a PEM fuel cell. A review". *International Journal of Hydrogen Energy*.

Marappan, M., Palaniswamy, K., Velumani, T., Chul, K. B., Velayutham, R., Shivakumar, P., & Sundaram., S. (2021). "Performance Studies of Proton Exchange Membrane Fuel Cells with Different Flow Field Designs – Review". *THE CHEMICAL RECORD*.

MedlinePlus en español. (23 de 10 de 2023). *MedlinePlus en español [Internet]. Bethesda (MD): Biblioteca Nacional de Medicina (EE. UU.) [actualizado 27 ago. 2019].* Obtenido de medline: <https://medlineplus.gov/spanish/angioplasty.html>

Michael, R. (2021). "Design of a 300cm² PEMFC stack with force and CFD simulation". *Electronic Theses and Dissertations*.

Moreau, B., & Mauroy, B. (2015). Murray's law revisited: Quémada's fluid model and. *Hal Open Science*.

Muñiz, R. (2017). "Biomimética. Herramientas de Diseño Inspiradas en la Naturaleza". *Tekhné*.

Murray, C. (1926). "The physiological principle of minimum work applied to the angle of branching of arteries". *J Gen Physiol*.

O'hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., & Prinz, F. B. (2016). "*Fuel Cell Fundamentals*". Wiley.

Organización de las Naciones Unidas. (Septiembre de 2023). *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>

RakhtAla, S., & Eini, R. (2014). "Nonlinear Modeling of a PEM Fuel Cell System; a Practical Study with Experimental Validation". *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology*.

Ramos, J. L., & Cruz, M. M. (2015). "Una alternativa limpia para la generación de energía eléctrica". *Revista Ciencia*.

Revankar, S., & Majumdar, P. (2014). "*Fuel Cells: Principles, Design, and Analysis*". CRC Press.

Reyes, M. V. (2021). "*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE SOLAR MICROBIANA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA Y EL TRATAMIENTO DE AGUA*". TESIS DE MAESTRIA.

Rigatelli, G., Zuin, M., Ronco, F., Caprioglio, F., Cavazzini, D., & Giatti., S. (2018). Usefulness of the Finet law to guide stent size selection in ostial left main stenting:

- Comparison with standard angiographic estimation. *Cardiovascular Revascularization Medicine*.
- Roshandel, R., Arbabi, F., & Moghaddam, G. K. (2011). "Simulation of an innovative flow-field design based on a bio inspired pattern for PEM fuel cells". *Renewable Energy*.
- Sauermoser, M., Kizilova, N., Pollet, B., & Kjelstrup, S. (2020). "Flow Field Patterns for Proton Exchange Membrane Fuel Cells". *Front Energy Res*.
- Shimpalee, S., Spuckler, D., & Zee, J. V. (2007). Prediction of transient response for a 25-cm² PEM fuel cell. *Journal of Power Sources*.
- Siew, H., Nam, N., Zetao, X., & Zhigang, W. (2005). "Development of a polymeric micro fuel cell containing laser-micromachined flow channels". *Micromech. Microeng.*
- Song, J., Huang, Y., Liu, Y., Ma, Z., Chen, L., Li, T., & Zhang., X. (2022). "Numerical Investigation and Optimization of Cooling Flow Field Design for Proton Exchange Membrane Fuel Cell". *Energies*.
- Spiegel, C. (2007). *"Designing and building fuel cells"*. New York: McGraw-Hill.
- Tang, A., Crisci, L., Bonville, L., & Jankovic, J. (2021). "An overview of bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells". *Journal of Renewable Sustainable Energy*.
- Tawalbeh, M., Alarab, S., Al-Othman, A., & Nauman, J. R. (2022). "The Operating Parameters, Structural Composition, and Fuel Sustainability Aspects of PEM Fuel Cells: A Mini Review". *Fuels*.
- The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). (2015). *"DOE Technical Targets for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Components"*.

- Touriño, I. L. (2021). HIDRÓGENO COMO NUEVO VECTOR ENERGÉTICO: PRESENTE Y FUTURO. *UEM STEAM Essentials*.
- Warren, S. (2021). "Multiobjective Optimization of Pin-Type Flow Channels Using a Reinterpretation of Murray's Law". *Electronics*.
- Xu, J., & Chen, X. (2019). Mixing performance of a fractal-like tree network micromixer based on Murray's law. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.
- Yan, Q., Toghiani, H., & Causey, H. (2006). Steady state and dynamic performance of PEMFCs under various operating conditions and load changes. *Journal of Power Sources*.
- Yang, Y. (2019). "Performance and Durability -Temperature Proton Exchange Membrane Fuel Cells Operated on Propane Reformate". Tesis. Rochester Institute of Technology.
- Yuana, X. Z. (2010). "Bipolar Plates for PEM Fuel Cells - From Materials to Processing". *Journal of New Materials for Electrochemical Systems*.
- Zhang, J. (2008). "PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers". London : Springe.
- Zhao, T. (2009). "Micro Fuel Cells Principles and Applications ". Elsevier.
- Zieliński, J., & Nowosielski, J. (2020). Finet's Law as a Special Case of the Generalised Murray's Law. *SN Computer Science*.