



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA**

**ELEMENTOS PARA EL DISEÑO,  
CARACTERIZACION Y SIMULACION DE UNA  
CELDA DE COMBUSTIBLE DE  
TEMPERATURA ALTA**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

Maestría en Ingeniería Mecánica – Diseño mecánico

P R E S E N T A :

**Carrasco Meléndez Israel**



TUTOR:  
Dr. Espinoza Bautista Adrián

AÑO: 2012



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO :**

Presidente: (Dr. Cervantes de Gortari Jaime)

Secretario: (Dr. Borja Ramírez Vicente)

Vocal: (Dr. Espinoza Bautista Adrián)

1.º Suplente: (Dr. Barba Pingarron Arturo)

2.º Suplente: (Dr. Solorio Ordaz Francisco Javier)

Lugar o lugares donde se realizó la

tesis: Facultad de Ingeniería

TUTOR DE TESIS:

Dr. Espinoza Bautista Adrián

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Adrián Espinoza', written over a circular stamp or seal.

FIRMA

## **Agradecimientos**

- A CONACYT por el apoyo económico que me brindó para realizar este proyecto de tesis a lo largo de mi estancia en la maestría.
- Para mi familia que siempre me brindó apoyo incondicional y su confianza en mi.
- Para mi director de tesis por brindarme su amistad y apoyo.
- Para mi tutor que siempre estuvo al pendiente de las dudas que surgían.
- Para mis sinodales que permitieron mejorar este trabajo mediante sus comentarios.
- Para mis compañeros de la maestría por que la mayoría de ellos me mostraron como hacer las cosas de una manera diferente.
- Para la UNAM porque una vez más me permitió crecer como un individuo y entender que en la vida la superación es continúa.

## Resumen

Las celdas de combustible es una tecnología altamente prometedora debido a sus características de eficiencia y en cuanto a la generación de energía eléctrica. A comparación de las maquinas a base de combustibles fósiles estas producen una menor cantidad de contaminantes y su eficiencia es mucho mayor. La aplicación abarca desde aparatos portátiles como equipos de gran tamaño por lo cual se hace más atractivo para utilizarse y trabajar en conjunto con equipos cotidianos. Conforme esta tecnología madura comienza a precisar de una investigación mas profunda y detallada, por lo tanto ya no es suficiente la información que una especialidad pueda proveer. Tan solo el querer reducir la temperatura de funcionamiento de estos aparatos necesita una combinación de experiencia en química, diseño, materiales, etc.

El principal problema que se ha observado en cuanto al desarrollo de las celdas de combustibles son las propuestas que se enfocan en áreas específicas, la necesidad de proponer un sistema completo se complica y por tanto se necesita cambiar la forma de trabajo para obtener mejoras considerables para este tema. Para aumentar la eficiencia de esta tecnología se requiere la implementación de ideas que abarquen varios campos de conocimiento. Los grupos multidisciplinarios representan una gran alternativa para encontrar opciones de solución muy completas sin embargo este trabajo de investigación no se enfocó en el trabajo de varias áreas de manera simultanea. Lo que se pretendió fue utilizar información encontrada en algún tipo de publicación científica que sirvió como base para poder proponer diferentes opciones de diseño utilizando una metodología de diseño y herramientas tales como TRIZ y biomimética. Las opciones encontradas se enfocaron en los objetivos de reducir la temperatura y mantener una alta eficiencia, para el caso de celdas de combustible oxido solido de temperatura alta. Como medio de comprobación se utilizo el software COMSOL Multiphysics™ tanto para las propuestas como el modelo convencional de celda plana

Con el análisis realizado se demostró que la disipación de calor mejoraba al aplicar formas que presentaban una mayor área superficial. La mejor opción en este caso fue utilizar la celda con la placa electrolítica dentada aunque como trabajo futuro se pretende hacer pruebas de manera física para verificar los resultados obtenidos y aplicarla en algún aparato cotidiano.

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO 1.....</b>	<b>10</b>
CELDAS DE COMBUSTIBLE DE ÓXIDO SÓLIDO.....	10
<i>Clasificación por temperatura.....</i>	<i>11</i>
Temperatura baja (LT-SOFC 500-650°C).....	11
Temperatura intermedia (IT-SOFC 650-800°C).....	12
Temperatura alta (HT-SOFC 800-1000°C).....	12
<i>Componentes de la celda .....</i>	<i>13</i>
Electrolito.....	13
Electrodos.....	14
Cátodo.....	14
Ánodo.....	15
Interconector.....	17
Sellado.....	18
<i>Clasificación por configuración .....</i>	<i>19</i>
Configuración tubular.....	19
Pilas .....	21
Microtubular .....	21
Configuración plana .....	22
Fabricación de la celda .....	26
Rendimiento.....	27
Configuración monolítica .....	27
Diseño de celdas segmentada en serie .....	28
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>30</b>
OBJETIVOS Y ALCANCE .....	30
<i>Objetivo principal.....</i>	<i>30</i>
<i>Objetivos secundarios .....</i>	<i>30</i>
<i>Alcance.....</i>	<i>30</i>
SELECCIÓN DE LA METODOLOGÍA .....	31
<i>Selección .....</i>	<i>31</i>
<i>Pasos de la metodología .....</i>	<i>31</i>
Selección de necesidades.....	31
Búsqueda de información.....	31
Definición de especificaciones.....	32
Diseño conceptual.....	32
Técnicas de creatividad .....	32
1.-Lluvia de ideas .....	32
2.-Método de convergencia controlada o DATUM.....	32
3.-Análisis funcional.....	33
4.- Análisis de valor.....	34
5.- TRIZ <sup>[10]</sup> .....	34
6.-Biomimética.....	37
Selección de alternativas.....	45
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>49</b>
APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA .....	49

<i>Aplicación</i> .....	49
Selección de necesidades. ....	49
Definición de especificaciones. ....	49
Búsqueda de información. ....	50
Artículos. ....	50
Patentes.....	50
Análisis matricial.....	50
<i>Diseño conceptual</i> .....	52
Análisis funcional.....	52
Definición de necesidades. ....	52
Formulación de funciones. ....	52
Estructuración de funciones.....	52
Árbol de funciones .....	54
TRIZ.....	55
Líneas de evolución .....	57
Conclusión de la parte de TRIZ.....	61
Biomimética .....	61
Declaración del problema.....	61
Investigación.....	62
Fase de ideas .....	62
Síntesis. ....	67
Conclusión de la parte de biomimética.....	68
Selección de alternativas.....	68
Método DATUM .....	69
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>79</b>
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	79
Conclusión del capítulo .....	87
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>89</b>
CONCLUSIONES.....	89
<b>ANEXO A: REACCIONES</b> .....	<b>91</b>
MODELADO DE UNA CELDA DE COMBUSTIBLE TIPO SOFC.....	92
<b>ANEXO B: PLANOS DE FABRICACIÓN</b> .....	<b>99</b>
<b>ANEXO C: ARTICULOS</b> .....	<b>111</b>
<b>ANEXO D: PATENTES</b> .....	<b>117</b>

## **Introducción**

La utilización de los diferentes tipos de energía ha representado un gran avance para el uso de tecnologías que mejoran en sus características o funciones, por ejemplo, la implementación de autos híbridos. La necesidad de mejorar o encontrar nuevas formas de producir la energía necesaria se vuelve cada día un reto importante para los diferentes investigadores. En un principio las fuentes de energía eran estáticas o si eran dinámicas resultaban ser pesadas, por tal motivo se optó a crear fuentes más pequeñas pero para lograr dicho propósito se encontró que se requeriría tener tecnología más avanzada y/o costosa. Si bien no se pudo crear inmediatamente estos aparatos se optó por la creación de dispositivos almacenadores de energía que permitían aplicarse a diferentes escalas.

Conforme se desarrolla tecnología y esta avanza se ha podido crear sistemas generadores de energía que tienen la característica de ser móviles, un claro ejemplo son las celdas de combustible. Una ventaja de las celdas ha sido que el suministro de combustible para su funcionamiento puede ser continuo por lo cual aumenta el tiempo útil como fuente de energía. Con grandes cualidades se encuentran aun desventajas que necesitan ser resueltas, por ejemplo, como cualquier artefacto generador de energía presenta que su eficiencia se representa por la generación de energía y por efectos no deseados. Esta segunda parte principalmente se presenta en forma de calor y que en su totalidad no es posible su reutilización.

Actualmente las investigaciones que son realizadas a las celdas de combustible aun son deficientes en el sentido que para su mejora es necesario aportar tanto ideas del área química como física. La dificultad radica en la falta de un grupo multidisciplinario que proponga ideas que abarquen tanto materiales, formas, etc hasta mejorar las reacciones producidas dentro de la celda.

En esta investigación la principal idea podría ser crear un grupo multidisciplinario pero llevaría un tiempo más allá del disponible para obtener resultados, sin embargo lo que se pretende es partir de una investigación química y con esto proponer ideas para mejorar la configuración de cada celda. No se obtendrá un diseño a detalle pero sí uno de configuración y mediante el uso de algún software se simularan las ideas obtenidas con el fin de verificar si hubo alguna diferencia notoria en cuanto a las nuevas características obtenidas en comparación a un diseño convencional.

Para alcanzar la propuesta de esta investigación el presente trabajo constará de 5 capítulos los cuales tienen la siguiente información:

Dentro del primer capítulo se presentará la información general de las celdas de combustible de óxido sólido tomando en cuenta que estos dispositivos están conformados por varias partes que cumplen con funciones específicas. Por otra parte se incluirá también las configuraciones más utilizadas en la industria o en los materiales de investigación que se encuentren disponibles.

Como segundo capítulo se planteará los objetivos a lograr y la metodología que se utilizará en todo el desarrollo de la investigación, así mismo se hará mención de las herramientas de diseño que complementarán al proceso.

En el tercer capítulo se utilizarán los elementos de diseño seleccionados (metodología, herramientas, artículos, patentes, etc) con el fin de encontrar una o varias propuestas de la celda de combustible. Las ideas finales se determinarán utilizando un filtro el cual proporcionará las ideas finales las cuales se compararán con el concepto más básico de celda plana.

El cuarto capítulo será enfocado a analizar el desempeño de cada celda propuesta mediante el uso del software COMSOLTM y con esto verificar cual es la transferencia de calor de cada una de ellas, al final se realizará un comparativo que permitirá concluir cual opción cuenta con el mejor desempeño y sea posiblemente utilizado como trabajo a futuro. Lo que se pretende es que se pueda continuar con esta investigación ya utilizando materiales reales y con esto verificar realmente la funcionalidad de la celda.

Como capítulo final se realizará un listado de las conclusiones obtenidas y se verificará si se cumplió con los objetivos planteados al inicio del trabajo de investigación.

## Capítulo 1.

### Celdas de combustible de óxido sólido.

En la actualidad existe una variedad de celdas de combustible y sus aplicaciones están presentes en aparatos portátiles hasta de mayor dimensión, por ejemplo, centrales termoeléctricas. A este segundo ejemplo le corresponden al tipo de celdas de combustible de óxido sólido o también conocidas por sus siglas en inglés como SOFC (Solid-oxid fuel cell) y resultan ser una tecnología altamente prometedora, por lo mismo se ha realizado una amplia investigación para obtener mejores resultados mediante la optimización y ampliación de su campo de trabajo. Las SOFC conservan un esquema general de una celda de combustible básica donde se dispone de ánodo, un cátodo, un canal de aire, un canal de combustible y un electrolito,

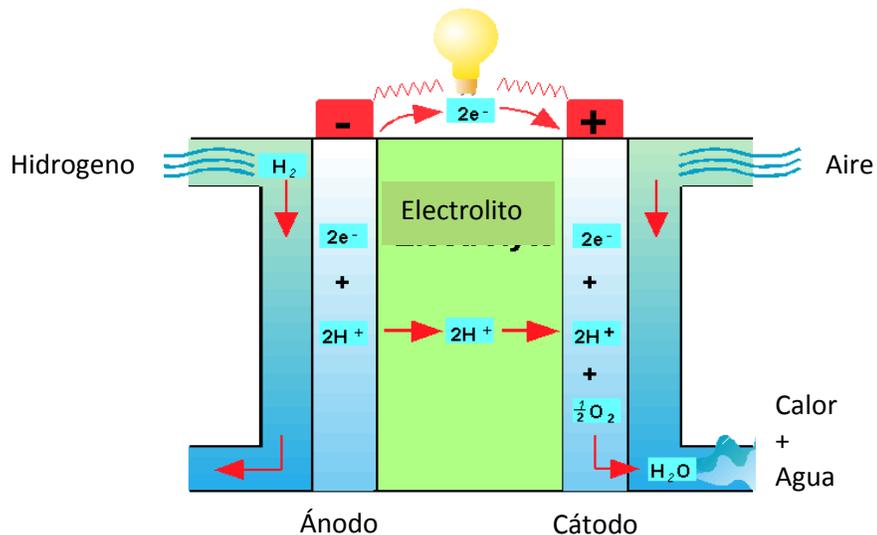


Figura 1. Diagrama general de una celda de combustible. Revista Mundo Científico, No 233, Abril 2002.

Una diferencia notoria ante otros tipos de celdas radica en la utilización de un electrolito hecho de un material cerámico denso y poroso, el cual posee una gran conducción a altas temperaturas. Generalmente su composición es a base zirconia, no es un material único ya que también existen otros materiales compuestos con similares características<sup>[1]</sup>.

Dentro de este tipo de celdas existen dos clasificaciones importantes: por temperatura y por configuración. La primera de ellas se refiere a celdas que trabajaban a  $1000^\circ C$  lo cual implica varias desventajas, por ejemplo, los materiales, costos y aplicaciones. Otro punto importante que se busca mediante la investigación para la primera clasificaciones es la reducción de la temperatura lo que daría como resultado un mayor tiempo de vida de la celda, reducir los esfuerzos térmicos y principalmente los costos en general. En cambio, la clasificación por configuración va encaminada en el desarrollo de varias propuestas con el fin de ampliar el rango de trabajo en cuanto a temperatura de  $1000^\circ C$  hasta los  $500^\circ C$ , figura 2.

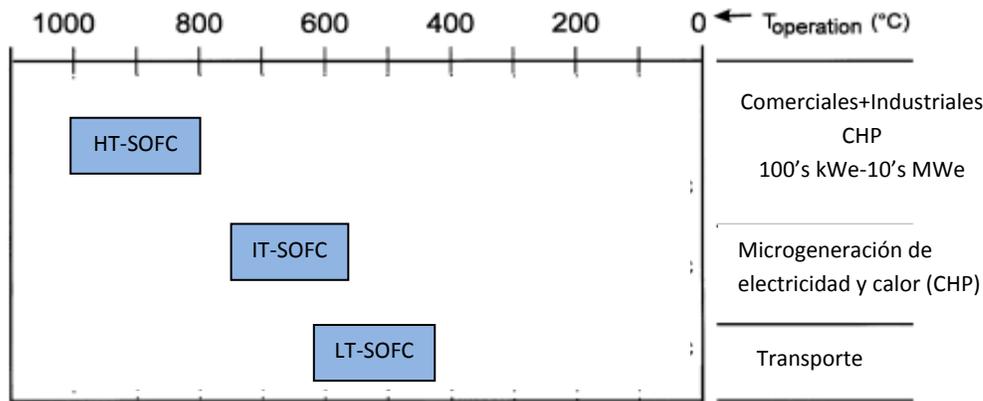


Figura 2. Posible Mercado de aplicación de SOFC vs régimen de temperatura de operación. J.P.P. Huijsmans et. al. *Intermediate temperature SOFC – a promise for the 21st century.*

### Clasificación por temperatura.

#### **Temperatura baja (LT-SOFC 500-650°C).**

Un factor importante dentro de la fabricación de las celdas es el tiempo de vida ya que este parámetro depende de factores como son: la generación de choques térmico, degradación de materiales causados por la alta temperatura de trabajo. Algunas soluciones que se han implantado para reducir estos problemas tales como precalentar los gases de entrada para evitar el cambio súbito de temperatura, proponer nuevos materiales resistentes a medios corrosivos y de sistemas de enfriamiento para reducir la alta temperatura de trabajo.

La ventaja que presenta esta tecnología se presenta en su uso en sistemas dinámicos y en la reducción de costos por fabricación, por ejemplo, el uso de acero inoxidable ferrítico para sustituir partes de la pila. Dos parámetros importantes que se buscan en la fabricación del electrolito es la reducción de su espesor además de conservar la mayor conductividad posible a una menor temperatura, continuamente se investiga con el fin de desarrollar nuevos compuestos electrolíticos que cumpla con los mismos objetivos.

De acuerdo a la clasificación antes mencionadas aquí se muestran algunos de los materiales utilizados<sup>[2]</sup>:

- a) En la fabricación de pilas se han utilizado electrolitos compuestos basados en cerio dopado para diferentes dimensiones, a escala nanométricas, el resultado obtenido al utilizar este material es la eliminación de la conducción electrónica dañina para la celda además se incrementa la conductividad tanto para altas como bajas temperaturas. El resultado que se ha registrado es un voltaje de 0.5 V con una densidad de corriente de más de 2 A/cm<sup>2</sup> a 600° C, 1.25 A/cm<sup>2</sup> a 540° C, 0.75 A/cm<sup>2</sup> a 500° C y 0.5 A/cm<sup>2</sup> a 480° C.

- b) Cerio dopado con itrio con un espesor de 4-8  $\mu\text{m}$  de espesor a 600°C, con una resistividad de 0.25  $\text{ohm}\cdot\text{cm}^2$  y una densidad de corriente de 400  $\text{mA}/\text{cm}^2$  se obtuvo un voltaje en la celda de 0.4V.
- c) Electrolito de cerio dopado con Gadolinio (CeGO) con un espesor de 30  $\mu\text{m}$  y a una temperatura de 500°C, se obtuvo con un voltaje de 0.6V una densidad de corriente de 100 mA, un voltaje de 0.4 V y una densidad de corriente 300  $\text{mA}/\text{cm}^2$ .
- d) Una ultradelgada capa de electrolito de 0.7  $\mu\text{m}$  fue utilizada en una membrana de Paladio (40  $\mu\text{m}$ ) que es hidrogenadamente permeable, logrando así un voltaje de 0.6 V con una densidad de corriente de 1.5  $\text{A}/\text{cm}^2$  a 400°C y 2.5  $\text{A}/\text{cm}^2$  a 600°C.

#### ***Temperatura intermedia (IT-SOFC 650-800°C).***

Este subtipo de celda se encuentra entre un nivel intermedio del rango de temperatura y no se ven tan beneficiadas como las de alta y baja temperatura, en cuanto a aplicación de materiales y en la capacidad de obtención de voltaje. Su uso principalmente está dirigido a micro-aplicaciones CHP (Combine Heat & Power) con uso comercial y su principal desventaja es el bajo rendimiento en comparación a las celdas de alta temperatura.

Para este caso se han propuestos nuevos materiales para diferentes componentes dentro de la celda, por ejemplo:

-Para el electrolito se ha buscado nuevos materiales que tengan una alta conductividad iónica y una buena estabilidad química, un claro ejemplo es el ceria dopado con gadolinio (CGO) o samario (CSO) aunque su principal problema es el desarrollo de una conducción electrónica indeseable.

Como segundo ejemplo se presenta al galato de lantano ( $\text{LaGaO}_3$ ) dopado con iones bivalentes metálicos, tales como el estroncio y/o el magnesio, con lo que se logra obtener un material que a una baja presión de oxígeno no desarrolla una conducción electrónica notable aunque su principal desventaja es su complicada preparación.

-La cualidad de la manganita de lantano dopada con iones bivalentes metálicos (LSM) al utilizarse como cátodo es poseer una buena conductividad aunque este disminuye si la temperatura decrece. Para las celdas de temperatura intermedia se utiliza una combinación de LSM con materiales basados en estroncio dopado con ferrita cobáltica de bario los cuales exhiben buenas propiedades aunque la desventaja del material radica en el coeficiente de expansión térmica que depende de la temperatura.

-En el ánodo los materiales que son utilizados a bajas temperaturas pierden conductividad por lo que se usan ánodos hechos a base de níquel/samario dopado con cermet de cerio el cual mejora esta propiedad a temperatura intermedia. El principal problema que se observa es la conducción electrónica debida a la baja presión parcial del oxígeno<sup>[3]</sup>.

#### ***Temperatura alta (HT-SOFC 800-1000°C).***

Este fue el primer diseño de las celdas de tipo SOFC, dentro de sus características es soportar altas temperaturas que les permite alcanzar una mayor eficiencia/corriente eléctrica, una alta conductividad óxido-ion del electrolito óxido sólido y una alta eficiencia de conversión de energía. Las principales ventajas es su alta eficiencia que van del 50% al 85%, dependiendo si se encuentra trabajando en conjunto con un sistema de cogeneración o un sistema combinado, generación de más de 100 kW, cogeneración industrial con/sin combinación de turbina de gas y reutilización de los gases calientes en la salida. A comparación de los otros dos tipos este cuenta con una mayor cantidad de materiales y tecnología aplicada a su funcionamiento. Entre las principales desventajas que presenta son: corrosión de los materiales debida a las altas temperaturas de trabajo, falta de un buen sellado en la celda individual, alto costo en los componentes utilizados y un tardío encendido y/o apagado <sup>[4]</sup>.

Se ha visto de manera superficial este tipo de celda en cuanto a la temperatura pero además es necesario conocer los diferentes componentes que la conforman.

### **Componentes de la celda**

#### ***Electrolito.***

Los electrolitos son conductores del ion-oxígeno en el que el flujo de corriente se produce por el movimiento de los iones a través de la red cristalina. Dentro de las características que debe de tener:

- Un material tanto estable en un medio oxidante y reductor.
- Una alta capacidad iónica con una baja conductividad electrónica al momento de trabajo de la celda.
- Material impermeable para permitir la separación del oxidante y del combustible, si es posible manufacturarlo como una placa delgada para evitar cualquier tipo de fuga de gas.

Los criterios necesarios para la selección de materiales del electrolito se ven reflejados en características principales tales como: el rápido transporte iónico, baja conductividad electrónica y estabilidad termodinámica sobre un amplio rango de temperaturas y presión parcial del oxígeno. Otros atributos adicionales que deben tomarse en cuenta son la compatibilidad química, térmica y mecánica con el ánodo, cátodo y otros componentes además que su composición sea lo menos volátil posible, una baja interacción con los demás componentes bajo condiciones de operación/fabricación <sup>[5]</sup>.

Los compuestos que conforman al electrolito se componen en su mayoría de zirconia, por ejemplo, la zirconia estabilizado con itrio (YSZ) que posee una estructura cristalina similar a la fluorita y a alta temperatura presenta conducción del ión  $O^{2-}$  por esta razón es de las más utilizadas en las SOFC.

El electrolito YSZ es usado en las celdas de tipo HT-SOFC pero para que trabajen a una menor temperatura se ha optado por la sustitución de algunos materiales, por ejemplo, el cerio dopado que opera en un rango menor de temperatura (600-800°C). Hay compuestos que poseen una buena conductividad iónica a diferentes temperaturas y para distintas aplicaciones, tabla 1.

Tabla 1. Diferentes tipos de materiales utilizados para electrolitos en celdas de combustible, así mismo se presentan los formulas químicas de los ejemplos mostrados. "Materials for IT-SOFC stacks: 35 years R&D: the inevitability of gradualness?", Steele\*, B. C. H. (2000).

Material del electrolito	Tipo de celda	Formula química
zirconia	YSZ	$(ZrO_2)_{1-x}(Y_2O_3)_x$ ( $x \sim 0.08-0.1$ )
	SSZ	$(ZrO_2)_x(Sc_2O_3)_{1-x}$ ( $x \sim 0.8$ )
	CaSZ	$Zr_{0.85}Ca_{0.15}O_{1.85}$
Cerio	GDC	$Ce_xGd_{1-x}O_y$ ( $x \sim 0.8, y \sim 1.8$ )
	SDC	$Ce_xSm_{1-x}O_y$ ( $x \sim 0.8, y \sim 1.9$ )
	YDC	$Ce_xY_{1-x}O_y$ ( $x \sim 0.8, y \sim 1.96$ )
	CDC	$Ce_xCa_{(1-x)}O_y$ ( $x \sim 0.9, y \sim 1.8$ )
Lantano	LSGM	$La_xSr_{1-x}Ga_yMg_{1-y}O_3$ ( $x \sim 0.9, y \sim 0.8$ )
	LSGMC	$La_xSr_{1-x}Ga_yMg_{1-y-z}Co_zO_3$ ( $x \sim 0.8, y \sim 0.8, z \sim 0.085$ )
	LSGMF	$La_xSr_{1-x}Ga_yMg_{1-y-z}Fe_zO_3$ ( $x \sim 0.8, y \sim 0.5, z \sim 0.4$ )
	LSGMCF	$La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.32}Mg_{0.08}Co_{0.2}Fe_{0.4}O_3$
	Base de LaAlO3	$La_{1-x}Ca_xAlO_3$ ( $x = 0.0027-0.008$ ), $La_{1-x}Ba_xAlO_3$ ( $x = 0.1$ )
Otros	BCY	$BaCe_xY_{1-x}O_3$ ( $x \sim 0.25$ )
	YSTh	$(ThO_2)_{1-x}(Y_2O_3)_x$ ( $x \sim 0.08-0.1$ )
	YSHA	$HfO_2)_{1-x}(Y_2O_3)_x$ ( $x \sim 0.08-0.1$ )
	Oxido de Bismuto de base	$(Bi_2O_3)_x(Nb_2O_5)_{1-x}$ ( $x \sim 0.25$ )
	Pirocloro de base	$YZr_2O_7, Gd_2Ti_2O_7$
	Brownmillerita base de Bario	$BaZrO_3, Ba_2In_2O_5, Ba_3In_xAO_y$ ( $A = Ti, Zr, Ce, Hf$ ), $Ba_3Sc_2ZrO_8$
	Brownmillerita base de Estroncio	$Sr_2ScAl_xA_yO_z$ ( $A = Mg, Zn$ ), $Sr_2ScAlO_5, Sr_3In_2HfO_8$

### **Electrodos.**

Se debe considerar que el ánodo y el cátodo son elementos importantes en el diseño de la celda de combustible para el caso de la temperatura mayor a 800° C el ánodo debe ser estable en condiciones reductoras (H<sub>2</sub> a T>800 °C) en cambio los cátodos deben serlo en condiciones oxidantes (O<sub>2</sub> a T>800 °C).

#### **Cátodo.**

El cátodo es el electrodo positivo donde se reduce el oxígeno puro en iones O<sup>2-</sup> dentro de la celda. Este componente opera a bajas temperaturas y el electrodo funciona como una resistencia limitante a causa de su sobrepotencial que es mucho mayor al de los sobrepotenciales anódicos. Otras propiedades que debe cumplir con varias propiedades como son: alta conductividad eléctrica, alta actividad catalítica para la reducción del oxígeno y ser compatible con los demás componentes de la celda.

El comportamiento de los materiales del electrodo positivo depende principalmente de la temperatura, la forma de granos, microestructura y proceso de deposición utilizado. La elección apropiada depende del cerámico del electrolito y la temperatura de operación que afecta este proceso. En un inicio el principal material utilizado era el platino pero debido a los altos costos no resultaba ser tan práctico por lo que se decidió optar por el uso de Perovskita ( $ABO_3$ ) y la manganita de lantano dopado con iones bivalentes metálicos (LSM), cumplen con las propiedades requeridas.

Para celdas tipo IT-SOFC se utiliza un cátodo compuesto que consiste en manganato de lantano dopados con Estroncio ya que ha mostrado un buen desempeño. Algunos otros materiales son mostrados a continuación, tabla 2, pero no se profundizará en ninguno debido ya que no es el objetivo de esta investigación<sup>[6]</sup>.

#### Ánodo.

El papel del ánodo es proporcionar los sitios donde ocurren las reacciones electroquímicas de oxidación catalítica del gas, combustible, con los iones  $O^{2-}$  que vienen del cátodo y es capaz de proporcionar trayectorias para que los electrones sean transportados de los sitios de reacción en la interface ánodo/electrolito para los interconectores de este tipo de celdas.

Hay características que deben considerarse para que el ánodo sea estable durante su funcionamiento y entre ellas se encuentran una conductividad eléctrica, alta conductividad electrocatalítica, estable en una atmosfera reductora, ser lo suficientemente delgado para evitar pérdidas debido a la transferencia de masa, una porosidad entre el 20 y 40%, coeficiente de expansión térmica compatible con los demás componentes y capaz de promover reacciones de reformado interno dependiendo del combustible utilizado. Estas consideraciones junto con el medio operante del ánodo son la clave para la selección del material a utilizar ya que ambas deben combinar la actividad catalítica para la oxidación de combustible con la conductividad eléctrica, estas propiedades catalíticas del ánodo que son necesarias para la cinética de la oxidación del combustible con los iones óxido que vienen a través del electrolito sólido.

Entre los materiales que más se usaban para su fabricación se tiene el platino, oro y metales de transición tales como el níquel y el hierro. Las desventajas de estos elementos se reflejan en el corto tiempo de vida útil con lo cual el funcionamiento de la celda para el platino y el níquel a altas temperaturas se provoca una reducción en el acceso del combustible, aunque se puede resolver mezclándolo con partículas de electrolito de YSZ manteniendo una matriz de níquel (ánodo compuesto)<sup>[3]</sup>. Otros ejemplos de materiales son mostrados en la tabla 3.

Tabla 2. Diferentes tipos de materiales utilizados para el cátodo en las celdas de combustible, así mismo se presentan los formulas químicas de los ejemplos mostrados. "Materials for IT-SOFC stacks: 35 years R&D: the inevitability of gradualness?", Steele\*, B. C. H. (2000).

Material de los cátodos	Tipo de celda	
Lantano	LSM	$\text{La}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{MnO}_3$ ( $x \sim 0.8$ )
	LSF	$\text{La}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{FeO}_3$ ( $x \sim 0.8$ )
	LSC	$\text{La}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{CoO}_3$ ( $x \sim 0.6-0.8$ )
	LSCF	$\text{La}_{(1-x)}\text{Sr}_x\text{Fe}_y\text{Co}_{(1-y)}\text{O}_3$ ( $x \sim 0.4, y \sim 0.2$ )
	LSMC	$\text{La}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{Mn}_y\text{Co}_{(1-y)}\text{O}_3$ ( $x \sim 0.8$ )
	LSMCr	$(\text{La}_x\text{Sr}_{1-x})_{0.91}\text{Mn}_y\text{Cr}_{(1-y)}\text{O}_3$ ( $x \sim 0.7, y \sim 0.95$ )
	LCM	$\text{La}_x\text{Ca}_{(1-x)}\text{MnO}_3$ ( $x \sim 0.5$ )
	LSCu	$\text{La}_{(1-x)}\text{Sr}_x\text{CuO}_{2.5}$ ( $x \sim 0.2$ )
	LSCN	$\text{La}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{Co}_y\text{Ni}_{(1-y)}\text{O}_3$ ( $x \sim 0.6, y \sim 0.98$ )
	LSFN	$\text{La}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{Fe}_y\text{Ni}_{(1-y)}\text{O}_3$ ( $x = 0.8, y = 0.8$ )
	LNC	$\text{LaNi}_{(1-x)}\text{Co}_x\text{O}_3$ ( $x \sim 0.4$ )
	LNF	$\text{LaNi}_{(1-x)}\text{Fe}_x\text{O}_3$ ( $x \sim 0.4$ )
	LSAF	$\text{La}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{Al}_y\text{Fe}_{(1-y)}\text{O}_3$ ( $x \sim 0.8, y \sim 0.2$ )
	LSCNCu	$\text{La}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{Co}_y\text{Ni}_{(1-y-z)}\text{Cu}_z\text{O}_3$ ( $x \sim 0.8, y \sim 0.8, z \sim 0.05$ )
	LSFNcCu	$\text{La}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{Fe}_y\text{Ni}_{(1-y-z)}\text{Cu}_z\text{O}_3$ ( $x \sim 0.8, y \sim 0.8, z \sim 0.05$ )
LNO	$\text{LaNiO}_3$	
Gadolinio	GSC	$\text{Gd}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{CoO}_3$ ( $x \sim 0.8$ )
	GSM	$\text{Gd}_{(1-x)}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ( $x \sim 0.3-0.6$ )
Praseodimio	PCM	$\text{Pr}_x\text{Ca}_{(1-x)}\text{MnO}_3$ ( $x \sim 0.7$ )
	PSM	$\text{Pr}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{MnO}_3$ ( $x \sim 0.65$ )
	PBC	$\text{Pr}_x\text{Ba}_{(1-x)}\text{CoO}_3$ ( $x \sim 0.5$ )
Estroncio	SSC	$\text{Sm}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{CoO}_3$ ( $x \sim 0.5$ )
	NSC	$\text{Nd}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{CoO}_3$ ( $x \sim 0.8$ )
	BSCCu	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$
Ytrio	YSCF	$\text{Y}_{(1-x)}\text{Sr}_x\text{Co}_y\text{Fe}_{(1-y)}\text{O}_3$ ( $y = 0.7, x \sim 0.3-0.8$ )
	YCCF	$\text{Y}_{(1-x)}\text{Ca}_x\text{Co}_y\text{Fe}_{(1-y)}\text{O}_3$ ( $x = 0.2, y \sim 0.1-0.7$ )
	YBCu	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

Tabla 3. Diferentes tipos de materiales utilizados para el ánodo en las celdas de combustible. "Materials for IT-SOFC stacks: 35 years R&D: the inevitability of gradualness?", Steele\*, B. C. H. (2000).

Material de los ánodos	Tipos de celdas	formulas
Níquel	Ni-O/YSZ	
	Ni-O/SSZ	
	Ni-O/GDC	
	Ni-O/SDC	
	Ni-O/YDC	
Cobre	CuO <sub>2</sub> /CeO <sub>2</sub> /YSZ	
	CuO <sub>2</sub> /YSZ	
	CuO <sub>2</sub> /CeO <sub>2</sub> /SDC	
Lantano	La <sub>1-x</sub> SrCrO <sub>3</sub>	
	La <sub>1-x</sub> Sr <sub>x</sub> Cr <sub>1-y</sub> MyO <sub>3</sub>	
	LST	
	LAC	
	CeO <sub>2</sub> /GDC	
	TiO <sub>2</sub> /YSZ	
	Base de Cobalto	
	Base de Platino	
	Ru/YSZ	

Para crear una mayor corriente eléctrica en las celdas se conectan en serie mediante un puente o un conector, en este caso a este aditamento se le conoce como interconector.

### **Interconector.**

El interconector funciona como proveedor de una trayectoria y conexión eléctrica entre los electrodos así como un conductor eléctrico que permite una conexión en serie de celdas de combustible en una pila, también es utilizado como separador de aire u oxígeno (lado del cátodo) del combustible (lado del ánodo). Actúa como un elemento estructural primario para mantener soporte mecánico general y estabilidad en el sistema. Los interconectores deben ser térmica, química y mecánicamente estables durante la exposición simultánea de un ambiente oxidante y reductor además de soportar altas temperaturas durante largas horas de trabajo y tener una excelente resistencia a la oxidación y a la corrosión .

Los interconectores están sujetos a severas condiciones durante el periodo de operación y por lo tanto están sujetos a requisitos rigurosos, además de los mencionados, el permanecer estable al estar en contacto con gases químicamente diferentes, alta conductividad eléctrica, alta densidad, elevada conductividad térmica facilitando las reacciones de reformado en el ánodo e impermeabilidad gaseosa.

Dentro de los posibles materiales para los interconectores aparecen los óxidos de tierras raras, cromato de itrio ( $\text{YCrO}_3$ ) y el cromato de lantano ( $\text{LaCrO}_3$ ) y la cromita de lantano, otros ejemplos se muestran en la siguiente tabla 4<sup>[5]</sup>.

Tabla 4. Diferentes tipos de materiales utilizados para el interconector. "Materials for IT-SOFC stacks: 35 years R&D: the inevitability of gradualness?", Steele\*, B. C. H. (2000).

MATERIAL INTERCONECTADORES	TIPO	FORMULA
Metales	Cromo	
	Acero fierro inoxidable	
	Acero inoxidable	
	súper Hierro	
	Súper Níquel	
recubrimientos	LSM	$\text{La}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{MnO}_3$ ( $x \sim 0.8$ )
	LCM	$\text{La}_x\text{Ca}_{(1-x)}\text{MnO}_3$ ( $x \sim 0.5$ )
	LSC	$\text{La}_x\text{Sr}_{(1-x)}\text{CoO}_3$ ( $x \sim 0.6-0.8$ )
	LSFeCo	
	LSCr	
	LaCoO3	
Cerámica	Cromito de Lantano	

Reducir la temperatura de los 1000° C representa un arduo trabajo de investigación, los puntos importantes son:

- Reducir del costo general del sistema.
- Obtener la mayor eficiencia posible.
- Obtener una mayor optimización entre la relación rendimiento y el tiempo de vida de la pila.
- Mejorar el tiempo de encendido y apagado.
- Usar materiales alternos para diferentes partes en la celda.
- Usar un nuevo material para el electrolito, el cátodo o el ánodo.
- Reducir el espesor del electrolito,
- Introducir una nueva estructura para el electrolito.

### **Sellado.**

El sellado es responsable de cerrar las aberturas en las celdas unitarias evitando que haya una mezcla de oxidante con el combustible además de conectar los interconectores a la estructura principal. Dentro de los requisitos que deben cumplir son: un buen aislamiento eléctrico, coeficiente de expansión térmica compatible con otros componentes y una estabilidad química/física a altas temperaturas. Evita que los

interconectores sufran cualquier tipo de movimiento durante toda su vida útil de la celda, más de 50000 h.

Los materiales que más comúnmente son utilizados para sellar son los vidrios y los compuestos vítrocerámicos ya que han demostrado soportar arriba de 1000h de operación sin mostrar una degradación significativa. La ventaja de los vítreos es debido a que la cantidad de vidrio puede ser controlada con el objetivo de mejorar el material aunque la desventaja es su fragilidad y reactividad con los demás componentes. Dos criterios importantes que se toman en cuenta al seleccionar el vidrio son la temperatura de selección vítrea y los coeficientes de expansión térmica. Un sellado adecuado proporciona una rigidez para sustentar la integridad mecánica.

No se puede afirmar que se haya concluido con la investigación sobre esta tecnología ya que aún existen áreas de oportunidad en las que se necesita proponer ideas para mejorar el funcionamiento, costo y rendimiento. En esta parte se ha dado un panorama general de las celdas tipo SOFC en base a la temperatura y los componentes, ahora se analizarán las diferentes configuraciones que existen.

Debido a la estructura rígida del cerámico en la celda se pueden formar en estructuras arbitrarias que muestran diversas características. Dentro de las principales geometrías que se pueden encontrar son la celda plana y la tubular, de ellas existe una mayor información y se encuentran presentes en varias aplicaciones industriales. Por otra parte hay tipos que son variaciones de las primeras formas, por ejemplo, la microtubular y monolítica las cuales son importante de conocer para utilizar la información en capítulos posteriores <sup>[7]</sup>.

El análisis matemático es importante en el desarrollo de las celdas de combustible pero implicaría utilizar una investigación más detallada en otras áreas como química y de materiales. Bastara con la realización de un estudio superficial para el diseño pero la parte matemática está en la parte del anexo 1 con más detalle y se hace con el fin de evitar distraer la atención del lector.

### **Clasificación por configuración**

Es necesario entender que en esta parte no abarca solo a la celda unitaria también es indispensable tomar en cuenta que hay una interacción entre las celdas unitarias dentro de la pila. Por ultimo habrá que tomar en cuenta su funcionamiento bajo las diferentes temperaturas en las que se hayan propuesto y realizado.

#### ***Configuración tubular***

La configuración tubular es el diseño más utilizado en la industria junto con la celda plana aún se continúa investigando con el fin de optimizar lo existente. Existen dos tipos de celdas tubulares, la primera con un diámetro mayor a 15 mm y aquellas que tienen un diámetro menor a 5 mm (celdas microtubulares), figura 3.

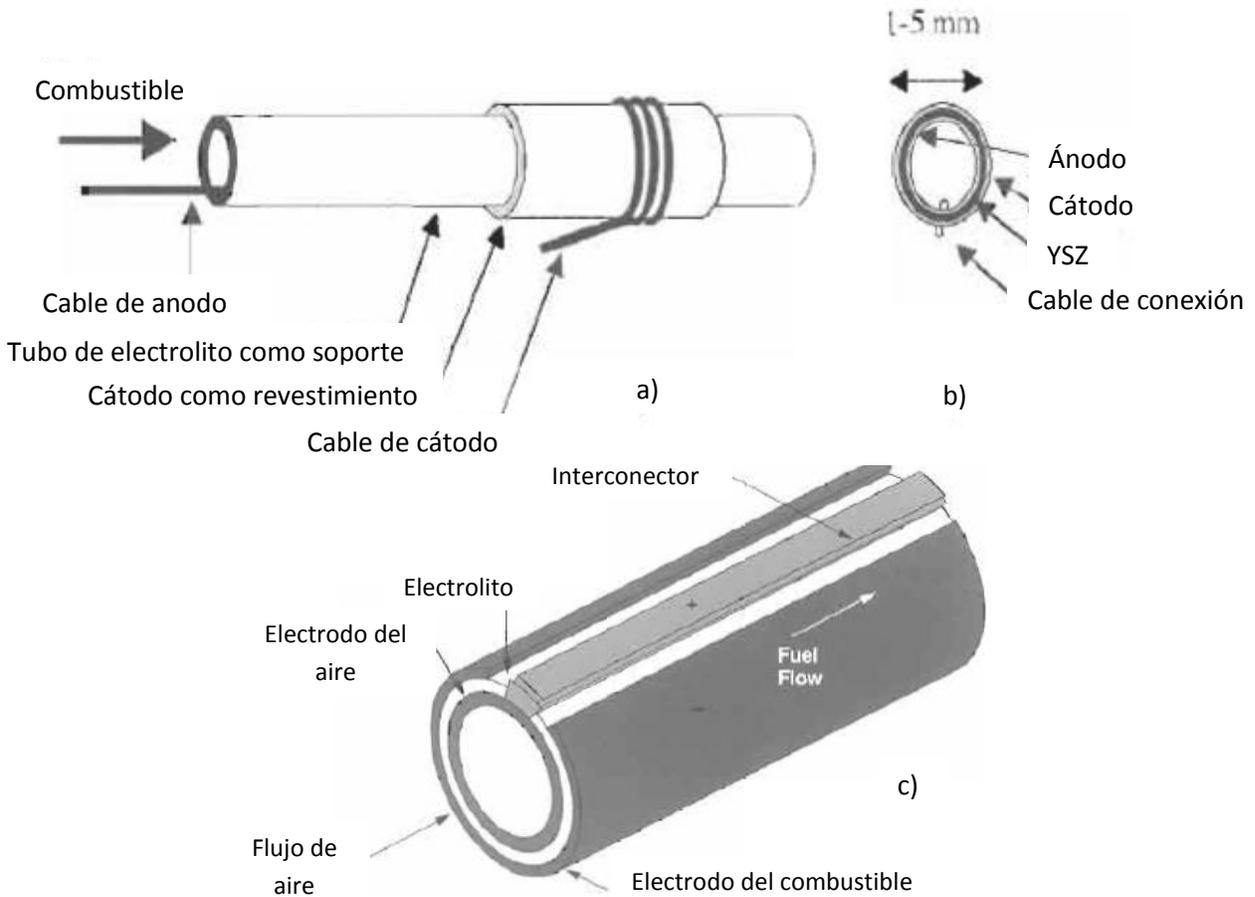


Figura 3. a) Diseño de una celda tubular, diseño de una microcelda tubular o microtubular b) celda en tubo como soporte y c) sección transversal en la región del electrodo. *High temperature: Solid oxid fuel cell* de Singhal & Kendall y [www.siemens.com](http://www.siemens.com) 2011

Los componentes de esta configuración se depositan en forma de capas delgadas en un tubo cilíndrico, anteriormente se fabricaba con zirconia la cual actuaba como un elemento estructural además de permitir el paso de aire hacia el cátodo durante su operación. La fabricación de esta estructura se realizaba por extrusión seguido de un sinterizado a una elevada temperatura aunque la zirconia es porosa presenta una impedancia del flujo del aire al electrodo positivo. Como mejora se redujo el espesor de 2 mm hasta 1.2 mm pero al final se decidió optar por el uso de tubo de manganita de lantano ( $\text{LaMnO}_3$ ) y sirve de manera similar al cátodo.

La forma consiste en un tubo que se encuentra sellado en un extremo, el aire u oxígeno es administrado mediante un tubo de inyección de aluminio colocado en el interior de la celda. El oxidante es descargado cerca del extremo y fluye a través del espacio anular formado por la celda y el tubo inyector coaxial. El combustible fluye desde el extremo cerrado oxidándose electroquímicamente hasta la parte abierta de la celda generando electricidad. En el extremo abierto el poco oxígeno que queda se quema con el combustible restante. Por lo general del 50-90% del combustible es utilizado y aquel que queda

sobrante se recircula al flujo inicial. Los gases de escape salen a una temperatura que va de 600-900° C dependiendo de las condiciones de operación.

Su tiempo de vida promedio es de 30000 h antes de la degradación, presenta una mayor resistencia al choque térmico, la densidad de potencia de este tipo es relativamente baja y el costo de manufactura es alto. Un problema grave que presenta este tipo son las grietas producidas por el funcionamiento a altas temperaturas. Las celdas SOFC tubulares son comercialmente viables debido a su resistencia mecánica y a la pérdida de rendimiento eléctrico debido a los ciclos térmicos que se llevan a cabo durante largos lapsos de trabajo<sup>[8]</sup>.

### ***Pilas***

La construcción de las pilas se realiza con celdas individuales conectadas tanto en serie como en paralelo, figura 4. Como conector entre las celdas se utiliza un fieltro de níquel que consiste en largas fibras metálicas de níquel sinterizadas las cuales proveen suavidad porque son mecánicamente compatibles además de proveer una baja resistencia eléctrica. El combustible pasa a lo largo de la parte exterior de todas las celdas mientras que el oxígeno lo hace por la parte interna.

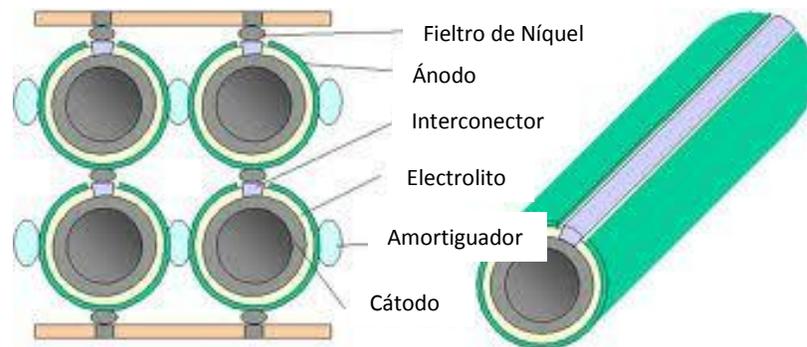


Figura 4. Pila formada por celdas tubulares conectadas en serie y en paralelo. Imagen tomada de aki.che.tohoku.ac.jp

### ***Microtubular***

Esta es una variación de las celdas tubulares que fue inicialmente usada en los años noventa cuando se produjo la posibilidad de extrudir tubos de pared delgada de YSZ. Gracias a las pruebas que se realizaron en tubos de diámetro de 1-5 mm y espesores de 100-200  $\mu\text{m}$  se demostró una buena conductividad iónica y hermeticidad de los tubos. El uso de las celdas microtubulares permite el diseño de las pilas con celdas de alta densidad de potencia volumétrica debido al área incrementada del electrodo además de tener una alta resistencia al choque térmico. Una celda de 2mm de diámetro puede ofrecer diez veces más potencia por volumen en la pila que una celda de 20 mm de diámetro. Tienen una alta resistencia mecánica durante el rápido inicio de operación. Una de las cuestiones más importante es el costo de manufactura pero se compensa con la resistencia a agrietarse cuando hay un aumento súbito en la temperatura de trabajo<sup>[8]</sup>.

En este caso no se necesita un material para el interconector ya que el ánodo funciona como colector de corriente eléctrica. El tamaño que tiene permite su acoplamiento a dispositivos electrónicos.

### Configuración plana

La SOFC plana han sido consideradas como una de las tecnologías más prometedoras para generación de energía en aplicaciones comerciales e industriales en un rango de 0.2-10 MW. Los materiales que son utilizados primordialmente son: para el electrolito zirconia estabilizada con itrio (YSZ), para el cátodo manganita de lantano estroncio (LSM) y para el ánodo se utiliza cermet de níquel/zirconia (Ni/YSZ), figura 5.

Las celdas planas se pueden clasificar en dos categorías:

Auto-soporte: generalmente se trata de una capa más gruesa que actúa como elemento estructural de la celda, por ejemplo, el ánodo, cátodo o electrolito, figura 6. En el electrolito para tamaños de espesores mayores a 100  $\mu\text{m}$  se requiere una temperatura de funcionamiento alrededor de los 900-1000° C. Para reducir la pérdida óhmica en su contraparte se utilizan espesores entre 5-20  $\mu\text{m}$  con lo cual se puede reducir la temperatura de operación.

Soporte externo: la celda individual es configurada mediante capas delgadas en el interconector o en un sustrato poroso <sup>[8]</sup>.

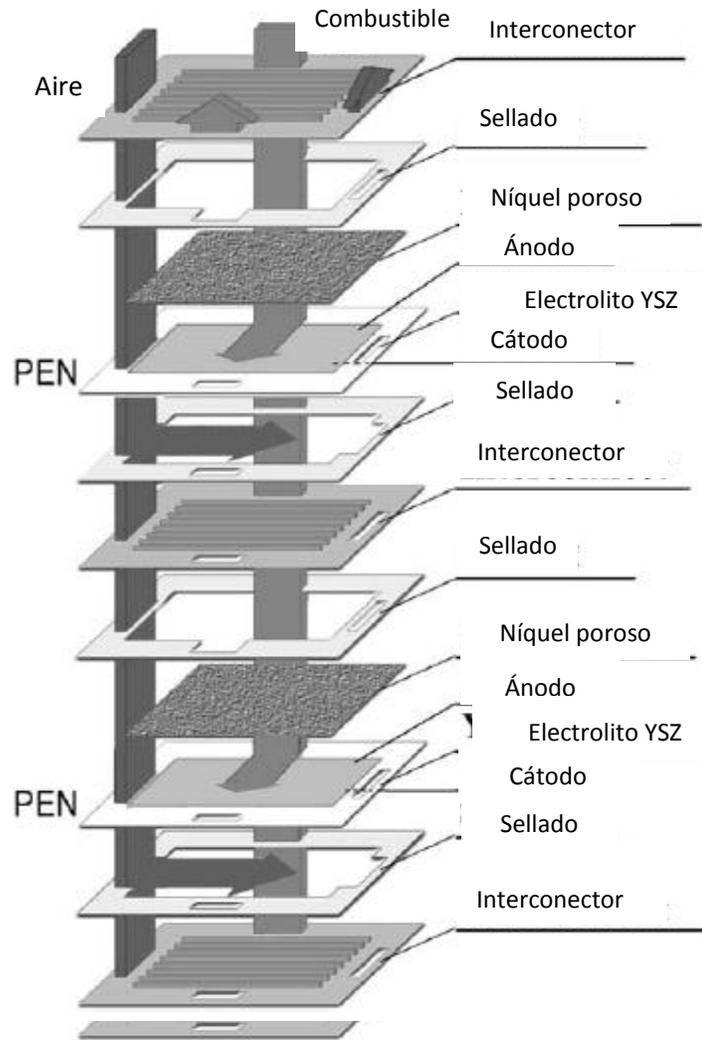


Figura 5. Esquema básico de una pila con celdas planas. Wen et.al., Material research for planar SOFC stack.

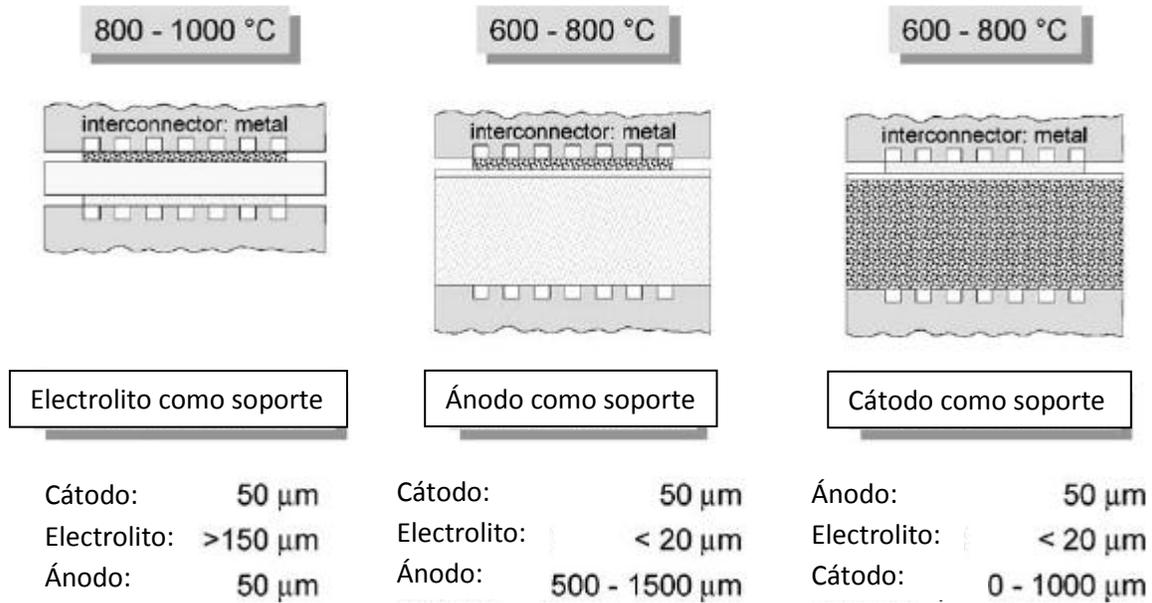


Figura 6. Configuraciones utilizadas en las celdas planas, se muestra la temperatura más común de aplicación así como el espesor para cada componente en cada caso. Andre Weber y Ellen Ivers-Tiffee, *Materials and concepts for solid oxide fuel cells (SOFCs) in stationary and mobile applications*.

En la siguiente tabla <sup>[9]</sup> se muestran las características de los componentes que han sido como soporte.

Tabla 5. Características de las configuraciones encontradas en una celda plana.

Configuración de la celda	Ventaja	Desventajas
<b>Auto-soporte</b>		
Electrolito como soporte	Soporte estructural relativamente fuerte de un electrolito denso.  Menos susceptible a fallas debido a la re-oxidación del ánodo.	Alta resistencia debido a la baja conductividad del electrolito.  Alta temperatura de operación requerida para minimizar las pérdidas en el electrolito óhmico.
Ánodo como soporte	Alta conductividad del ánodo  Baja temperatura de operación mediante el uso de electrolitos delgados.	Potencial en la re-oxidación del ánodo.  Limitación del transporte de masa debido al espesor del ánodo.
Cátodo como soporte	No hay problemas de oxidación.  Baja temperatura de operación mediante el uso de electrolitos delgados.	Menor conductividad.  Limitación en el transporte de masa debido al cátodo.

<b>Soporte externo</b>		
Interconexión de soporte	Componentes delgados de la celda para operar a bajas temperaturas.  Estructuras más fuertes del interconector metálico.	Oxidación en el interconector.  Limitación en el diseño del campo de flujo debido a los requerimientos de soporte de la celda.
Substrato poroso	Componentes delgados de la celda para operar a bajas temperaturas.  Potencial de uso de materiales diferentes de la celda que darán soporte para mejorar las propiedades.	Incremento a la complejidad debido a la adición de nuevos materiales.  Corto potencial eléctrico con el substrato metálico poroso debido a la superficie irregular.

El diseño de placas planas que son conectadas en serie se manufactura de forma sencilla permitiendo una mayor variación en las formas de las placas. El principal objetivo en el diseño de las celdas es obtener el rendimiento eléctrico y electroquímico junto a la integridad mecánica-estructural sin olvidar satisfacer los requerimientos de la aplicación a utilizar. Algunos de los requisitos necesarios para su fabricación dependen de ciertos requerimientos de diseño y el campo de trabajo donde se implantará.

Tabla 6. Diferentes propiedades a considerar para el diseño de celdas planas.

Propiedad	Requerimiento de la propiedad	Objetivo para diseñar
Rendimiento eléctrico	Mínima pérdida óhmica	Trayectoria corta para la corriente  Un buen contacto eléctrico y una suficiente área de contacto  Diseño del colector de corriente para obtener una ruta corta y uniforme
Rendimiento electromecánico	Voltaje total del circuito abierto  Baja pérdida de polarización	Insignificantes fugas del gas combustible (sellado mínimos o nulos)  Uniforme distribución del combustible a través de la celda

		y en toda la pila.
Gestión térmica	Refrigeración y distribución uniforme de la temperatura.  El mayor gradiente de temperatura que afecta toda la pila.	Simple y eficiente medio para el enfriamiento  Apropiada configuración para el flujo de gas  Diseño para soportar el esfuerzo térmico
Integridad mecánica/estructural	Resistencia mecánica para el ensamblaje y manipulación	Mínimo esfuerzo mecánico

Uno de los principales problemas que tiene esta configuración es la generación de esfuerzos térmicos causados por el choque térmico y/o los ciclos de calor. Las SOFC planas requieren un sellado a altas temperaturas en los bordes o de manera interna justo en las trayectorias del combustible, los materiales más usuales son el cemento, vidrio y vítrocerámicos que funcionan bastante bien. Otro factor que se toma en cuenta es que debido a la unión entre cada componente genera restricciones mecánicas y un desequilibrio en cuanto a la compatibilidad en el coeficiente de expansión térmica con la posibilidad de causar un gran esfuerzo.

Otro requerimiento que se toma en cuenta en esta configuración del flujo de combustible ya que afecta a la eficiencia de la celda, su temperatura, la distribución del gas y del aire que se tendrá dentro. Los flujos más utilizados dentro de una SOFC planar son el flujo cruzado, contraflujo o flujo paralelo aunque existen otros patrones que comienzan a utilizarse con mayor frecuencia tales como el flujo Z, serpentin, radial y patrones en espiral.

Los canales son utilizadas para aumentar la uniformidad en la distribución del combustible, promover el transporte de masa y mejorar la disipación del calor. Un efecto que se busca al utilizar el canal de flujo es tener una caída de presión a través de la celda para promover un flujo uniforme entre celdas. Es necesario optimizar y mejorar a la pila con estas características pero en gran medida depende de cómo sea aplicado por el diseñador. Los canales de flujo son parte del interconector y otras se incluyen en los electrodos, aunque su función sea más como una conexión eléctrica entre estos componentes.

Los colectores de gas también tienen un papel importante en el diseño de la celda plana, su función principal es abastecer el combustible a cada celda y eliminar gases que no han reaccionado. Los colectores se clasifican como internos o integrales, el primero se construye por separado de cualquier componente de la celda en cambio los integrales que se forman como parte de la celda o del interconector.

### Fabricación de la celda

El proceso seleccionado para la fabricación de cada celda plana o pila depende de la configuración presente aunque la parte primordial que se debe tomar en cuenta en cualquier proceso de selección es la fabricación del electrolito denso. Esta selección del cerámico se puede ver como: un enfoque en partículas o un enfoque en la deposición, tabla 7<sup>[9]</sup>.

Tabla 7. Selección del electrolito mediante el enfoque además del proceso de fabricación asociado.

Selección del electrolito	Método de fabricación
Enfoque en partículas (capas de electrolitos de varios espesores)	<p>Moldeado laminar: es un método común para la fabricación de láminas delgadas y planas además de utilizarse para fabricar otros componentes de la celda plana. El proceso es simple donde el cerámico se mezcla con un polvo de cerámica en suspensión líquido el cual se dosifica y se seca en un soporte temporal.</p> <p>Calandrado laminar: es el proceso de obtención de una lámina a partir de material termoplástico suave que pasa a través de varios rodillos. Tanto la cinta de cerámico, el cerámico en polvo y el aglutinante orgánico se mezclan para obtener una masa plástica después pasa a un calentamiento a temperaturas elevadas y al final pasa a un segundo laminado.</p>
Enfoque en la deposición (espesores de 5-20 um de electrolito YSZ)	<p>Pulverización catódica: una descarga eléctrica en la mezcla de argón/oxígeno se usa para depositarse sobre la placa de YSZ en el sustrato.</p> <p>Recubrimiento por inmersión: los sustratos porosos están inmersos en la suspensión YSZ del tamaño de partículas coloidales. La película depositada se seca y son quemadas.</p> <p>Recubrimiento por giro: películas de YSZ son producidos sobre un sustrato denso o poroso por recubrimiento por giro de un precursor sol-gel (proceso para fabricar materiales amorfos y policristalinos de forma relativamente sencilla mediante varios procesos químicos) seguida por un tratamiento térmico a temperaturas relativamente bajas.</p> <p>Pirolisis por spray: una solución que consiste en un polvo precursor y/o partículas de la composición final es rociado sobre un sustrato caliente seguido de una etapa de sinterizado para densificar la capa depositada.</p> <p>Deposición electroforética: partículas de YSZ son depositadas de una suspensión a un electrodo de carga opuesta sobre la aplicación del campo eléctrico en corriente directa (CD). La capa depositada se calienta a elevadas temperaturas.</p>

	<p>Técnica de colado: capas de YSZ son depositados sobre un sustrato por una suspensión vacuo metálica, después de la deposición es seguido por un secado y la capa se sinteriza a altas temperaturas.</p> <p>Pulverización por plasma: los polvos se inyecta en un chorro de plasma mediante el cual se aceleran, derriten y se deposita sobre el sustrato.</p>
--	--

Existen otros procesos para la fabricación del electrolito en celdas planas además de las mostradas en la tabla, tales como: deposición de vapor asistida electrostáticamente, deposición electrolítica en fase de vapor, evaporación al vacío, pulverización por láser, impresión transferida, método de sedimentación y metal de plasma de deposición de vapor químico orgánico.

Los interconectores en celdas planas pueden ser cerámicos cuando se trata de una temperatura de 900-1000° C y metálico cuando es menor a 800° C. El cerámico más utilizado es la cromita de lantano dopado (LaCrO<sub>3</sub>) a menudo fabricado por métodos convencionales de procesamiento de cerámico. En cambio cuando se trata de un interconector metálico generalmente se usan aleaciones de cromo y aceros inoxidable que son seleccionados debido a su coeficiente de expansión térmica que son similares a los demás componentes<sup>[6]</sup>.

Una parte importante de la celda es el sellado donde su principal función es evitar fugas de gas o mezcla de los gases. Hay dos métodos importantes el primero por cargas compresivas y el segundo utilizando un sellado a alta temperatura. Los requisitos que se solicitan en este proceso es muy estricto ya que se busca minimizar el cierre y el sellado así como evitar generar reacciones no deseadas en la celda.

#### Rendimiento.

Las celdas planas son de diferentes tamaños y operan bajo varias condiciones ya que una sola celda puede proveer una alta densidad de potencia por área, por ejemplo, resultados arriba de los 1.8 W/cm<sup>2</sup> a 800° C y 0.8 W/cm<sup>2</sup> a 650° C y se han obtenido utilizando un ánodo como soporte. Por el contrario cuando se habla de una pila es necesario considerar que trabajan por miles de horas y con otras pilas para obtener grandes cantidades de electricidad<sup>[9]</sup>.

El reto más importante en el diseño de una celda plana se basa en varios conceptos que deben tomarse en cuenta aunque es capaz de ofrecer una alta densidad de potencia la exigencia se presenta en como sellar a la celda en una alta temperatura.

#### ***Configuración monolítica***

Este es un diseño variante de las celdas planas que fue creada alrededor de los años 90 por el laboratorio nacional Argonne en los Estados Unidos. Utilizó materiales empleados que no difieren de los utilizados en otras celdas, por ejemplo, para el electrolito se optó por zirconia estabilizada con itrio (YSZ), del cátodo fue manganitas de lantano y estroncio (LSM,  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ , con  $0.1 \leq x \leq 0.5$ ) y para el ánodo cermet de níquel (Ni/YSZ) o placas bipolares de cromato de lantano. El diseño es más compacto a comparación de otros y cuando se monta su estructura parece a un panal de abejas, figura 7<sup>[9]</sup>.

Las características de esta estructura proporcionan una gran área superficial de reacción y por otra parte da libre acceso a los gases reactivos en todos los segmentos del área superficial de trabajo. Gracias a las paredes delgadas se reducen las pérdidas de voltaje óhmico y ofrece un buen soporte estructural, también hay una disminución en la formación de esfuerzos internos debido a los cambios de temperatura.

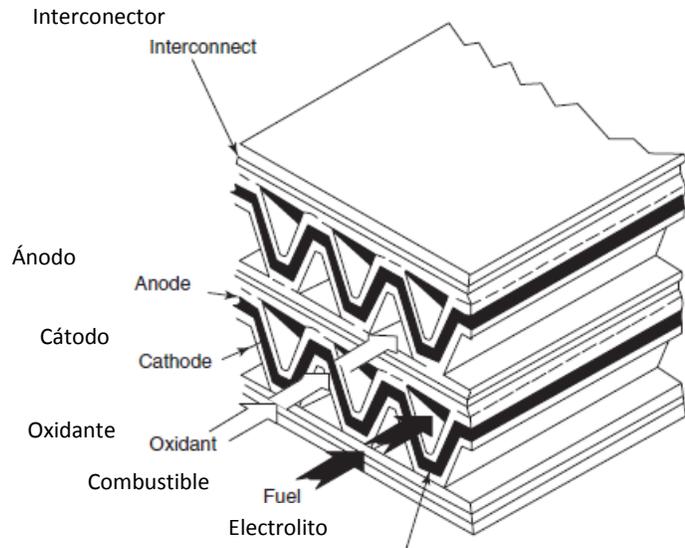


Figura 7. Diseño de celda monolítica. Imagen tomada de Fuel cells de Bagotsky Vladimir.

### ***Diseño de celdas segmentada en serie***

El diseño de esta celda proviene de una variación de la celda de tubular y de la celda plana en el cual se combinan las características de ambos con lo cual se ha podido alcanzar potencia de hasta 10 kW en la pila. Las celdas se organizan en una estructura de bandas delgadas soportado por un tubo poroso (generalmente se usa aluminato), figura 8<sup>[9]</sup>. La interconexión provee un sellado y un contacto eléctrico entre el ánodo de una celda y el cátodo de otra. El flujo de combustible va de una celda a otra por la parte interior a comparación del flujo de aire que va hacia afuera.

La principal ventajas de este tipo de celdas es el de no requerir sellado a altas temperatura sin embargo las desventajas que más se pueden observar es su alto costo, es una solución poco fiable y su uso va dirigido a aplicaciones estacionarias de generación de energía y no para el transporte o aplicaciones militares.

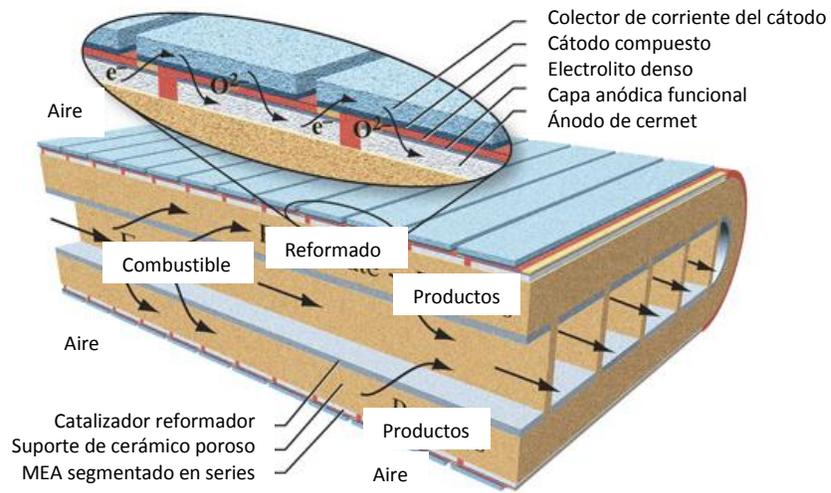


Figura 8. Diseño de celda segmentada en serie, una combinación entre las celdas planas y tubulares. coloradofuelcellcenter.org, 2011

En este capítulo propiamente se iniciara con el trabajo de investigación pero poder realizar esta actividad habrá que proponer los objetivos y el alcance pretendido.

### Objetivos y alcance

#### Objetivo principal

- Proponer un diseño eficiente de una celda de combustible de óxido-sólido.

#### Objetivos secundarios

- Aumentar la disipación de calor en las celdas de combustible planas
- Proponer una geometría que aumente la cantidad de combustible y oxidante
- Realizar un comparativo entre una celda convencional y las opciones propuestas para observar las mejoras encontradas

#### Alcance

Generalmente en un trabajo de diseño lo que se pretende es llegar a una propuesta hecha en papel o un elemento físico. En este caso, el alcance deseado es obtener un diseño que va mas allá del diseño conceptual pero sin llegar al diseño de detalle, se define mas como un diseño de configuración debido a que se obtendrán planos de fabricación y una lista especificando los materiales de cada parte para su fabricación así como un estudio mediante su simulación mediante un software. Este último punto es con el fin de comprobar el objetivo secundario de la verificación de la disipación de calor.

Es necesario tener presente que cuando se realiza un trabajo es necesario presentar un plan de trabajo el cual en este caso consiste en los siguientes pasos.

- Antecedentes
- Objetivo principal y secundarios
- Selección de una metodología de trabajo (esto va desde detallar los pasos del método hasta obtener una o varias propuestas las cuales se valoraran mediante diferentes pruebas, ya sean físicas o virtuales)
- Resultados
- Conclusiones
- Información adicional
- Referencias y/o bibliografía adicional

Dentro del área de diseño existe una gran cantidad de metodologías existentes y que permiten encontrar diferentes opciones de solución, es necesario recordar que nada garantiza obtener buenos o malos resultados. Al final la decisión de como se realizan las cosas y hasta donde se trabajará será decisión del diseñador.

## **Selección de la metodología**

En esta parte se expondrán las ideas principales relacionadas con el área de oportunidad (aumentar la eficiencia de la celda SOFC) y las metodologías, además de presentar algunos criterios que se tuvieron en el desarrollo del concepto.

Al inicio de esta investigación se recabó la información de las celdas de combustible de óxido-sólido de forma muy general pero en esta parte se seleccionó la configuración de celda plana. El principal objetivo que se marcó desde un inicio consistía en obtener el diseño eficiente de una celda de combustible de óxido-sólido, la obtención de la meta propuesta dependerá de factores tales como la inventiva del diseñador, el estado del arte y las diferentes herramientas que se utilicen en conjunto con la metodología propuesta.

### **Selección**

Para obtener los resultados que permitan cumplir con las metas propuestas durante la fase de diseño es necesario, hasta cierto punto, seguir una metodología que se relacione con el diseño del producto, aunque el éxito del mismo también dependerá de la experiencia que posea el diseñador.

En el método que se utilizará es el propuesto por Jorge Alcaide<sup>[10]</sup>, solo se abarcará la parte de diseño conceptual de un sistema compuesto por una SOFC en sistema combinado o un sistema de cogeneración, las fases que la integran son las siguientes:

### **Pasos de la metodología**

#### ***Selección de necesidades.***

Se establecen las necesidades propuestas por el cliente y/o el diseñador, la primera información será obtenida de diversas fuentes o mediante el uso de herramientas como entrevistas, estudios de mercado, publicaciones, etc. La mejor recomendación para obtener los datos necesarios es elaborar cuestionarios creados a partir de elementos generales de especificaciones del producto.

#### ***Búsqueda de información.***

Esta actividad se puede llevar a cabo mediante:

- a) El análisis paramétrico: se basa en la relación que hay entre el producto en estudio y aquellos en que los competidores exponen en el mercado, los datos obtenidos se presentan en una tabla donde sus características se cruzan y se representan las relaciones gráficamente. Al final se buscan puntos comunes que puedan ayudar en el diseño.

- b) El análisis matricial: Es un método que tiene como objetivo la construcción de una matriz con las características de los productos de la competencia (eje vertical) y los modelos de la competencia (eje horizontal). Se llena la matriz con modelos que incluyen cada característica.

Con este estudio se trata de buscar las características más esperadas por los usuarios o cuales son las más comunes; además se pueden observar los huecos que existen del producto dentro de un mercado para utilizarse como áreas de oportunidad.

### ***Definición de especificaciones.***

Se recopilan los requerimientos obtenidos de la selección de necesidades y se le asigna un valor numérico mediante el diseño conceptual

### ***Diseño conceptual***

Se proponen varios conceptos y en esta parte se representan las propuestas de ideas para utilizarse de herramienta, por ejemplo, propia, herramientas de diseño, etc, por lo que es indispensable tomar en cuenta los siguientes puntos:

### ***Técnicas de creatividad***

Existen diversos métodos para estimular la creatividad y generación de ideas, la mayoría son útiles pero conducen a una gran cantidad de soluciones por lo que se tiene que definir lo mejor posible el problema y acotarlo.

Estas técnicas proponen soluciones utilizando analogías en las que inconscientemente los humanos asociamos ciertas cosas o acciones con otra pero hacerlo de manera consciente podría ser de gran ayuda. La biomimética es un ejemplo de esto y su función es generar productos con características encontradas en la naturaleza, se logra obtener ideas innovadoras mediante una herramienta muy poderosa a la hora de generar nuevos conceptos, al final se debe acotar las propuestas lo más posible.

#### **1.-Lluvia de ideas**

Es una de las opciones más ocupada para la generación de conceptos realizadas por un grupo de personas, generalmente se desarrolla en tiempos establecidos para evitar repetir propuestas. Se sugiere que el grupo sea multidisciplinario para darle una mayor riqueza a todo lo que se pueda proponer.

#### **2.-Método de convergencia controlada o DATUM**

Más que un método de generación de ideas es catalogado como un proceso de selección de alternativas y/o toma de decisiones, de refinamiento y mejora de las ideas existentes logrando obtener una solución final que no tenga nada en común con lo propuesto inicialmente.

La gran ventaja que tiene es que permite alternar entre el pensamiento analítico y el pensamiento de síntesis puede verse como un generador de soluciones y de selección del mismo. Evita que se propongan ideas no razonadas, se trata de tener varios puntos de vista y eliminan aquellas características negativas valiéndose de un elemento de referencia que puede ser un producto ya existente o propuesto. Un método es iterativo que permite expandir y contraer la matriz hasta converger u obtener un concepto final.

Los pasos de esta herramienta se definen por:

- Generar ideas y plasmarlas en bocetos de la forma más detallada posible y que sea al mismo nivel para las demás opciones.
- Generar una matriz de comparación y evaluación de conceptos implementando bocetos creados para una mejor evaluación. Se debe tener en cuenta los requerimientos y especificaciones que se plantearon inicialmente.
- Elegir un producto como referencia y en caso de que exista uno similar a éste se sugiere elegir al producto líder o alguna propuesta.
- Utilizar +1, -1 ó 0 como una forma de evaluación del elemento referencia con el que está siendo comparado, tomando que +1 si es mejor, -1 es débil y 0 si son similares a la característica del producto de referencia.
- De las opciones más fuertes se analizan los puntos débiles y se tratan de mejorar combinando ideas de otros conceptos que resuelva dicha debilidad
- Con las soluciones obtenidas se podrá continuar sólo si satisface con lo deseado o iterar de nuevo con lo obtenido y así nuevas propuestas o el concepto definitivo.

Este proceso no necesariamente se aplica al concepto de forma general también se puede particularizar y como se mencionó mientras más detallado sea se podrá obtener mejores resultados.

### 3.-Análisis funcional

Método propuesto por Lawrence D. Miles para reducir costos en el cual se pretende cambiar cierta parte que realiza una función por otra que haga la misma actividad pero a un menor costo. Actualmente se emplea en el diseño conceptual de nuevos productos o como complemento de otros métodos de mayor alcance así mismo se utiliza en el rediseño de algún producto.

El principio es ver una caja negra donde se considera un elemento el cual se transforma de un estado inicial a un estado final mediante un proceso desconocido, figura 9.



Figura 9. Representación gráfica del análisis funcional

Se proponen los siguientes pasos para su uso:

- a) Definición de necesidades: conocer todas y cada una de las necesidades que soliciten los clientes.
- b) Formulación de funciones: Determinar la misión del producto y como se llevara a cabo. Formular la tarea con estructura de la forma verbo + sustantivo. Para el verbo hay que considerarlo como transitivo y el sustantivo se dirige a la acción formulada
- c) Estructuración de funciones: se deben clasificar según su importancia ya sea como principales, secundarias e innecesarias y/o perjudiciales.
- d) Clasificación según el tipo de prestación: se realiza por funciones técnicas, de uso o manejo, de seguridad, de imagen y de estética.
- e) Árbol de funciones o diagrama de funciones: se puede ver de manera global, el trabajo en conjunto de las funciones que provocan la función total del producto. Mediante este diagrama se observan las fortalezas y debilidades el producto para aplicar una herramienta como TRIZ.

#### 4.- Análisis de valor

Se basa en un plan de trabajo sistemático que consiste en cinco fases para la resolución de problemas clásicos.

- Preparación y recolección de información: principalmente consiste en recolectar información sobre costos de productos existentes, método muy útil para rediseños y perfeccionamiento de productos existentes.
- Análisis: se analizan las funciones del producto mediante el análisis funcional, cada función es identificada según su importancia y a un costo con lo cual se obtiene una lista donde se contrastan ambos factores.
- Generación de soluciones: uso de técnicas creativas para la generación de soluciones mediante el uso del análisis de funciones y costos.
- Evaluación de alternativas: en esta fase se comparan las ideas de acuerdo a criterios como el grado de mejora, viabilidad técnica, simplicidad, costo de implantación de tal modo que se pueda elegir la opción más eficiente en base a los criterios establecidos.
- Implantación de las mejoras y control del proceso: se lleva toda la documentación del proyecto dando como principal importancia a las mejoras aportadas y su implantación

#### 5.- TRIZ<sup>[10]</sup>

Esta herramienta de diseño permite encontrar soluciones a problemas técnicos dentro de los conceptos que se puedan proponer utilizando alguno de sus 40 principios, su matriz de contradicción, el algoritmo ARIZ, etc.

Principalmente lo que se hace es tomar una función o un problema dentro del producto y aplicar la herramienta para encontrar una solución o una idea innovadora. Se resume el proceso de TRIZ de forma breve en el siguiente apartado:

- Identificación del problema: consiste en determinar las características del sistema en estudio como su entorno de operación, parámetros que definen al producto, la función positiva primaria, efectos negativos resultado ideal.
- Formulación del problema: su objetivo está en reformular el problema en términos de contradicciones físicas tratando de identificar los puntos negativos que podrían surgir al mejorar una de las características técnicas.
- Búsqueda de soluciones ya aportadas al problema: Se localizan los principios de ingeniería que causan conflicto y mediante el uso de los 39 parámetros técnicos se aplican para detectar el principio necesario a modificar y eliminar el efecto secundario negativo generado al mejorar este conflicto técnico. Los parámetros técnicos son:
  1. Peso de un objeto en movimiento
  2. Peso de un objeto en reposo
  3. Longitud de un objeto en movimiento
  4. Longitud de un objeto en reposo
  5. Área de un objeto en movimiento
  6. Área de un objeto en reposo
  7. Volumen de un objeto en movimiento
  8. Volumen de un objeto en reposo
  9. Velocidad
  10. Fuerza
  11. Tensión, presión
  12. Forma
  13. Estabilidad de la composición del objeto
  14. Resistencia
  15. Durabilidad de un objeto en movimiento
  16. Durabilidad de un objeto en reposo
  17. Temperatura
  18. Brillo
  19. Energía consumida por un objeto en movimiento
  20. Energía consumida por un objeto en reposo
  21. Potencia
  22. Consumo de energía
  23. Consumo de sustancia
  24. Pérdida de información
  25. Consumo de tiempo

26. Cantidad de sustancia/materia
27. Fiabilidad
28. Precisión de medida
29. Precisión de fabricación
30. Factores perjudiciales sobre un objeto
31. Efectos perjudiciales laterales
32. Posibilidad de fabricación
33. Conveniencia de uso
34. Facilidad de reparación
35. Adaptabilidad
36. Complejidad del elemento
37. Complejidad de control
38. Grado de automatización
39. Productividad

- Búsqueda de soluciones análogas y adaptación al problema: se utilizan alguno de los 40 principios propuesto por Altshuller para resolver el problema encontrado con anterioridad, una forma de hacer esto es construyendo una matriz de contradicción. Dicha matriz tiene como entrada los 39 parámetros técnicos en las filas y como entradas en las columnas los mismos parámetros como elemento a mejorar, la intersección de fila y columna muestra la sugerencia de solución mediante un principio. Los principios que son utilizados para resolver un problema técnico son:

1. Segmentación: dividir, seccionar o aumentar el grado de división de un objeto
2. Extracción: eliminar o separar una parte o propiedad de un objeto
3. Calidad local: transición de una estructura homogénea de un objeto a una heterogénea
4. Asimetría: sustituir una forma simétrica por una asimétrica
5. Combinar: combinar en el espacio objetos homogéneos u objetos destinados a realizar operaciones contiguas
6. Universalidad: hacer que los objetos realicen varias funciones, eliminando otros
7. Anidar: colocar los objetos uno dentro de otros
8. Contrapeso: compensar el peso de un objeto con la adición de otro que tenga una fuerza de elevación
9. Adelantar la acción opuesta: realizar una acción previamente
10. Adelantar acción: realizar la acción o parte de ella por anticipado
11. Amortiguar por anticipado: compensar la posible baja fiabilidad de un objeto mediante medidas tomadas por anticipado
12. Equipotencialidad cambiar las condiciones de trabajo de manera que un objeto no tenga que ser elevada o descendido
13. Inversión: en lugar de una acción dictada por las especificaciones del problema, producir la acción contraria

14. Esfericidad: sustituir partes lineales o superficiales planas por curvas o formas cúbicas esféricas
15. Dinamismo: hacer que el objeto se ajuste automáticamente para un funcionamiento óptimo en cada nivel de operación
16. Acción parcialmente efectuada: cuando es difícil obtener el 100 % de un efecto deseado, alcanzar un cierto porcentaje simplifica el problema
17. Mover a otra dimensión: desplazar un movimiento lineal a uno en un plano
18. Vibración mecánica: hacer oscilar un objeto o aumentarla en caso de que exista
19. Acción periódica: sustituir una acción constante por una acción periódica
20. Continuidad de una acción útil: realizar una acción útil continuamente de modo que todas las partes del objeto trabajen a plena capacidad
21. Pasar rápidamente: realizar las acciones negativas de manera muy rápida
22. Convertir lo negativo en positivo: utilizar los efectos negativos para conseguir uno positivo
23. Realimentar: introducir realimentación
24. Mediadores: usar un objeto intermedio para desempeñar una acción
25. Autoservicio: hacer que el objeto se sirva a sí mismo o realice tareas de mantenimiento
26. Copiar: usar copias simples y económicas en lugar de objetos complejos, más caros, frágiles o difíciles de manejar
27. Duración: sustituir objetos caros duraderos por varios baratos intercambiables
28. Cambio del sistema mecánico: sustituir un sistema mecánico por uno óptico, acústico, etc.
29. Neumático o hidráulico: reemplazar partes sólidas de un objeto por un gas o un líquido
30. Membranas flexibles o películas delgadas: reemplazar configuraciones tradicionales por otras con membranas
31. Usar material poroso: hacer un objeto poroso o añadir elementos porosos
32. Cambiar el color: cambiar el color de un objeto
33. Homogeneidad: hacer del mismo material o de otro con comportamiento similar los objetos que interactúan con uno primario
34. Rechazar o regenerar partes: una vez que cumple su función, eliminar o modificar el objeto
35. Transformación del estado físico o químico de un objeto: cambiar el estado de agregación de un objeto, distribución de densidad, grado de flexibilidad, temperatura, etc.
36. Cambio de fase: incluir el efector durante un cambio de fase
37. Expansión térmica: usar un material que se expande o contrae con el calor
38. Usar oxidantes fuertes: sustituir aire normal con aire enriquecido
39. Ambiente inerte: cambiar el ambiente normal por uno inerte
40. Materiales compuestos: reemplazar un material homogéneo por uno compuesto

Actualmente existen varios software de TRIZ que brindan ayuda al diseñador a realizar todo este proceso con lo cual se reduce el tiempo de uso de esta herramienta.

#### 6.-Biomimética.

La generación de ideas ha contribuido en el desarrollo de la humanidad ya que cumplen con encontrar soluciones a problemas comunes, por ejemplo, buscar la forma más rápida de transportarnos de un

lugar a otro. Sin duda esta meta se ha presentado a lo largo de la historia con resultados tales como la invención de las carretas, autos, barcos, aviones, etc. Mediante el uso de metodologías con la inspiración de varias personas se ha podido obtener los diferentes tipos de tecnologías que han mejorado la forma de vida de los humanos sin embargo algunas son copias de conceptos obtenidos de observar a su alrededor.

En la naturaleza los procesos que se realizan son perfectos y hechos a la medida de los recursos disponibles; los investigadores se han dado cuenta de ello y están tratando de realizar lo mismo con las diferentes tecnologías existentes. Los aviones se mejoraron copiando el diseño de las alas de las aves y la forma aerodinámica de los tiburones que permitió alcanzar grandes velocidades.

Algunos resultados han sido logrados mediante el uso de la biomimética el cual es una metodología que pretende es tomar ideas y conceptos de la naturaleza e implementarla en cualquier campo de la ingeniería. Como principal interés es aprender lecciones que da la naturaleza con el fin de aumentar la creación de soluciones de tecnología verde a problemas contemporáneos.

Un punto importante en la biomimética es el de reducir el impacto negativo que ha causado la humanidad y busca conservar los recursos aun disponibles en la naturaleza. Como cualquier metodología de ingeniería se requiere seguir una serie de pasos, utilizar los materiales adecuados, propiedades que cumplan con lo solicitado así como otras características que se han seguido en la naturaleza. Por su parte la autora Janine Benyus<sup>[11]</sup> describe cómo aplicar las lecciones de la naturaleza mediante los siguientes pasos:

- Naturaleza como modelo: Los modelos naturales se clasifica en tres niveles: forma, proceso y sistema.
- Naturaleza como medida: la biomimética utiliza un estándar ecológico para juzgar lo que es más correcto con respecto a la innovación, ya que se considera que después de 3.8 billones de años de evolución la naturaleza se ha perfeccionado. La naturaleza usa una serie de principios, estrategias y leyes que comúnmente son utilizados como plantilla en los diseños naturales.
- Naturaleza como mentor: esta metodología es una nueva forma de ver las cosas desde un punto de vista tan cotidiano que no solo se trata extraer de la naturaleza y no solo que podemos aprender de ella. Solo permite trabajar con lo que contamos actualmente y busca incrementar la eficiencia y optimizar los diseños, formas y procesos que pueden reducir los costos de operación.

Existe una gran variedad de análisis que se enfocan en el uso de la biomimética donde cada una da resultados diferentes pero en este trabajo se utilizara el diseño metabólico para poder obtener una propuesta para algún problema en específico. Esta metodología fue propuesta por Devin W. Baldrige<sup>[12]</sup>, en el cual se puede observar que son procesos (desde comer, convertir los alimentos en energía hasta desecharlos del cuerpo) que suceden en los seres vivos para mantener su vida habitual.

El método metabólico comprende cuatro categorías que son evaluadas de la naturaleza y que el diseñador debe tomar en cuenta antes de utilizar la metodología.

### **Acabados/superficies**

Las superficies en la naturaleza se han encargado de crear diferentes texturas que se adecuan perfectamente a las condiciones a las que se encuentran expuestos. Asociándolo con el proceso de diseño se puede observar como la interacción que tiene el cliente con un producto y al final esto representará un factor clave para su éxito. Los diferentes tipos de superficie que se pueden encontrar se enlistan para que se puedan identificar.

- Superficies químicamente reactivas: este tipo de pieles son generadas por la variación de la química del cuerpo ya sea por el cambio de temperatura o el cambio de ánimo, por ejemplo, la piel del camaleón.
- Superficies que incrementan su área: este mecanismo es una respuesta química u hormonal y en la mayoría de los casos son una forma de protección, el caso más común es el del pez globo.
- Superficies expandibles que en otras ocasiones se vuelve rígida: la mayoría de los organismos poseen pieles que son flexibles pero en ocasiones de peligro pueden ser lo suficientemente rígidas para su seguridad.
- Superficies para la defensa: utiliza una defensa y protección ante otros agentes peligrosos ya que su piel es un arma, por ejemplo, los cactus y algunas larvas.
- Superficies de camuflaje: algunos organismos han tomado este mecanismo como una forma de protección y en otras ocasiones les sirve de acecho ante otras especies ya que les permite envolverse con su ambiente.
- Escamas: este tipo de piel se presenta en peces y reptiles, su protección es en contra de la abrasión y resistencia al desgaste ocasionado por el suelo.
- Plumas: las plumas que cubren a un ave y no solo sirven para volar sino también como una forma de aislamiento ante los cambios bruscos del clima.
- Pelo: los pelos en los animales regulan la temperatura corporal y evitan que el frío acabe con la especie además de ser una herramienta sensorial.

En cuanto a los acabados hay una gran variedad y se describen a continuación:

- Oxidación / patina: es un mecanismo de defensa inherente en algunos minerales para evitar el deterioro.
- Color: es usualmente usado en conjunción con otros mecanismos para llamar la atención, ocultarse, extraer el calor o repelerlo.

- Mudar. Es una función que tienen la mayoría de los animales y es utilizada frecuentemente como un método de renovación del pelo, cuernos, plumas y hasta piel logrando con esto refrescar la apariencia y renovar la función.
- Secreciones: algunas plantas o animales secretan capas de mucosa que actúa como un elemento hidratante.
- Acabados con cera: algunas plantas utilizan esta sustancia como un recubrimiento de cera para prevenir la deshidratación además de utilizarse como un sellador de agua, una de las ventajas que tiene es su fácil remplazo aplicando otra capa.
- Capa de aceite: algunos organismos producen un recubrimiento de aceite que es utilizado como un lubricante natural para proteger su piel del ambiente.
- Barnizado: el barniz es una sustancia hecha con resinas de árboles mezclada con aceites y su principal uso es aumentar la brillantez a la madera, metal, etc.
- Goma laca: es un recubrimiento similar al barniz con propiedades como aislante eléctrico, en medicinas como agente protector temporal para que el ingrediente activo llegue hasta el estómago, en joyerías, prótesis dentales, etc<sup>[12]</sup>.

### **Formas/estructuras**

En la mayoría de los organismos que existen en la naturaleza se tienen diferentes formas y estructuras que se adecuan ya sea de su ambiente, su forma de vida y otros aspectos de supervivencia. Algunos ejemplos son una verdadera obra de arte que son soluciones a diferentes problemas o limitaciones que fueron encontradas a través del tiempo a pesar de las condiciones del medio ambiente que habita el ser vivo.

Hay dos grupos que se han definido a la hora de analizar el tipo de esqueleto que tienen los organismos biológicos, exoesqueleto y endoesqueleto que es referido a si posee un esqueleto ya sea externo o interno. Se observa que la anterior clasificación va ligada con el tipo de organismo al que pertenece ya sea un vertebrado o invertebrado, algunos ejemplos se citan a continuación.

### **Vertebrados**

Son seres vivos que poseen un esqueleto interno que utiliza cartílagos y huesos para su funcionamiento, tienen una columna vertebral que les permite flexibilidad aunque su función sea de servir de soporte y articulaciones para el movimiento de sus diferentes partes del cuerpo.

Las articulaciones planas son las más comunes pero además de esta hay otras como: articulación de bisagra, articulación de montura, articulación de bola y orificio así también la articulación de pivote.

Por otra parte las conexiones son una parte importante al igual que las articulaciones, algunas de ellas son:

- Por penetración: esta es la más simple conexión que puede haber ya que consta de insertar un cuerpo en otro.
- De sujeción: un cuerpo es sometido a fuerzas de compresión hechas por otro con el fin de mantenerse conectados.
- Incluido: se puede observar como una forma lineal que es envuelta por otro elemento, por ejemplo, la boca de la serpiente se debe adecuar a la cabeza de un ciempiés para dar un soporte.
- Por montaje: este ejemplo se observa claramente cuando se coloca un imán sobre otro.
- Entrelazado: una unión en la cual se cruzan entre si dos cuerpos.
- Acoplamiento: esta unión es más compleja debido a que no hay necesidad de un enlace directo pero si ambos elementos trabajan para formar una unidad.
- Integración: lo que se busca es formar un gran cuerpo a partir de partes sencillas<sup>[12]</sup>.

Otro punto importante que se toma en cuenta son los diferentes tipos de huesos, por ejemplo, las mandíbulas que tienen los seres vivos, ya que cada una tiene diferentes características tanto de agarre, mordedura, triturar, etc. Estos modelos pueden dar más de una solución posible para un problema definido además de proveer información suficiente para buscar un sistema ya existente con la capacidad de cubrir las necesidades presentes.

Las diferentes estructuras de los animales no solo proveen una forma de existir también de sobrevivir, hay que considerar que la mayoría de ellos han sido provistos de diferentes habilidades que el humano ha tratado de imitar a lo largo del tiempo. Recordemos que lo logrado mediante la investigación busca mejorar cada día aplicando nueva tecnología, a la naturaleza le tomo muchos años y evolucionar antes de llegar a perfeccionarse. Algunas estructuras son mostradas en la siguiente tabla.

Tabla 8. Las clases más importantes de seres vivos que son encontrados en la naturaleza, sus principales características y ejemplos de ellos.

Clase	Adaptación	Ventajas	Ejemplos
Mamíferos	Diferentes hábitats	Posibilidad de adaptación a los diferentes hábitats que existen.	El humano
Aves	Vuelo	Sus huesos son más delgados que de otros animales. Su cuerpo es más aerodinámico y tiene plumas que le permiten mantenerse en el	Casi todas las aves excepto algunas, por ejemplo, los

		aire.	pingüinos.
Varios	Geometrías adaptables	Dependiendo del medio que habiten su cuerpo presenta diferentes formas que les permite moverse, siempre se busca el equilibrio con este cambio.	Todos
Reptil	Adaptación al medio	Existen diferentes tipos de reptiles que pueden coexistir en más de un diferente tipo de medio ambiente.	Cocodrilos, serpientes, etc.
Tortugas	Estructuras híbridas	Las tortugas muestran una combinación entre un exoesqueleto y endoesqueleto, una es utilizada como protección mientras que el otro permite la movilidad y agilidad.	
Peces	Geometrías que permiten gran movilidad	Son seres vivos que han sido provistos de un esqueleto que les da una forma corporal que les permite moverse con gran facilidad en el agua.	Todos los peces
Anfibio	Transformación	Estos seres proveen una gran información ya que la mayoría sufre de cambios realmente notorios, esto le permite adaptarse a diferentes medios y les provee de nuevas características aunque pierden otras.	Ranas.

### **Invertebrados**

A comparación de los vertebrados la mayoría de los invertebrados tienen exoesqueletos tales como insectos, crustáceos, conchas de caracol, erizos de mar entre otros. De las grandes características más notables que tienen los invertebrados es la capacidad de regenerar las partes de su cuerpo que pierden por algún accidente. De este tipo de animales una gran parte pertenecen a los artrópodos, animales con extremidades articuladas, que incluyen insectos como escarabajos, arañas, escorpiones y crustáceos.

El principal uso del exoesqueleto es para protección y defensa ante depredadores también les permite mudar para permitir el crecimiento del artrópodo y les protege sus partes más vulnerables. Los diseños que presentan algunos exoesqueletos han sido utilizados para la creación de maquinaria pesada para la construcción.

Otro tipo importante que pertenece a los exoesqueletos y que existen en la naturaleza son las membranas y algunos organismos como los gusanos poseen el cual consiste en capas de piel donde cada una tiene una función específica ya sea para permitirle moverse, sentir y funciona como una piel.

Por ultimo están las plantas que son organismos con arquitectura de venas que le permiten transportar sus nutrientes desde las raíces hasta las hojas, cuentan con un tallo que les da cierta rigidez además de realizar la fotosíntesis para vivir. Las plantas han servido de fuente de inspiración de muchas ideas utilizadas tal es el caso del velcro.

## **Materiales**

En la naturaleza existe una gran variedad de materiales que funcionan bajo diferentes condiciones para cumplir con la función asignada, a continuación se verán algunos tipos de materiales que hay.

- Materiales usados tradicionalmente para la construcción: este tipo de materiales se ejemplifica con la madera que es utilizado para la fabricación de muebles debido a las propiedades físicas del material que le permite ser utilizado como elemento decorativo. Otro ejemplo que se puede observar claramente es el corcho el cual es utilizado debido por su resistencia al agua y a las bacterias. Es importante mencionar a los cueros, la lana, la seda, huesos, piedras, etc.
- Materiales sintéticamente manufacturados: de este tipo hay una gran variedad de tipos como el Kevlar, hecho de fibras de carbón, o algunos bioplásticos a base de aceites vegetales.
- Producción de materiales influida en los procesos: estos materiales son pensados en los procesos a los cuales serán sometidos para obtener el producto final, lo que se busca es obtener mejores resultados a un menor costo y tiempo.
- Materiales que imitan al hueso: las pérdidas de miembros en los humanos ha generado que la investigación sobre materiales sintéticos para prótesis se vuelve un tema importante de investigación, hay que tomar en cuenta que el imitar las características del hueso resulta muy complicada debido a que su estructura es muy compleja.
- Las pieles: la piel del cuerpo de un vertebrado resulta de mucha importancia ya que le permite regular su temperatura y le ayuda contra los climas extremos. Cada una tiene un diferente tipo de superficie además de que se puede regenerar en caso de sufrir algún daño.
- El vidrio: este material es utilizado en una infinidad de objetos que utilizamos a diario. Las características de este material pueden variar dependiendo del proceso de fabricación y del material con el que se combine, por ejemplo, no es el mismo vidrio que se usa en una ventana de alguna casa o en auto blindado ya que ambos iniciaron de diferentes procesos para obtener propiedades específicas.

## **Procesos/producción**

Cuando un ingeniero habla de procesos se refiere a los pasos necesarios para producir un producto en cambio en la naturaleza ocurre de manera diferente. La idea principal que se observa en los procesos naturales es la continuidad de la vida, para esto se valdrá de partes esenciales como crecer, cambiar, reproducirse, regenerarse o hasta evolucionar para lograr este objetivo.

La principal pregunta que se debe tener en cuenta es ¿Cómo lo hace la naturaleza?, y buscar entre todos los procesos naturales que proponen respuestas a ella. En caso de no encontrar una solución óptima provista de manera natural se puede optar por utilizar procesos artificiales.

### **Metodología<sup>[12]</sup>**

El diseño metabólico es representado por el diagrama y se basa en una metodología básica de diseño en la cual se adaptan conceptos utilizados en procesos naturales, figura 10.

Declaración del problema (problema statement): se fija un problema a resolver.

Investigación (Research): esta fase implica un análisis del producto, reconocimiento de los productos de la competencia.

Fase de ideas (Ideation): consiste en explorar la información encontrada que fue proporcionada por la investigación y lo que se busca es especificarse en una de las categorías antes mencionadas, por ejemplo, forma/estructura. Adicionalmente a lo anterior el diseñador comienza a coleccionar evidencias de la naturaleza que le permita cubrir la categoría seleccionada.

Síntesis (Synthesis): envuelve una re-evaluación de la declaración del problema y se define un diseño a desarrollar utilizando las ideas obtenidas.

Presentación (Presentation): muestra el diseño final ante personas calificadas para su evaluación de tal forma que se realiza físicamente de manera posterior o en caso contrario como retroalimentación en un nuevo proceso de diseño.

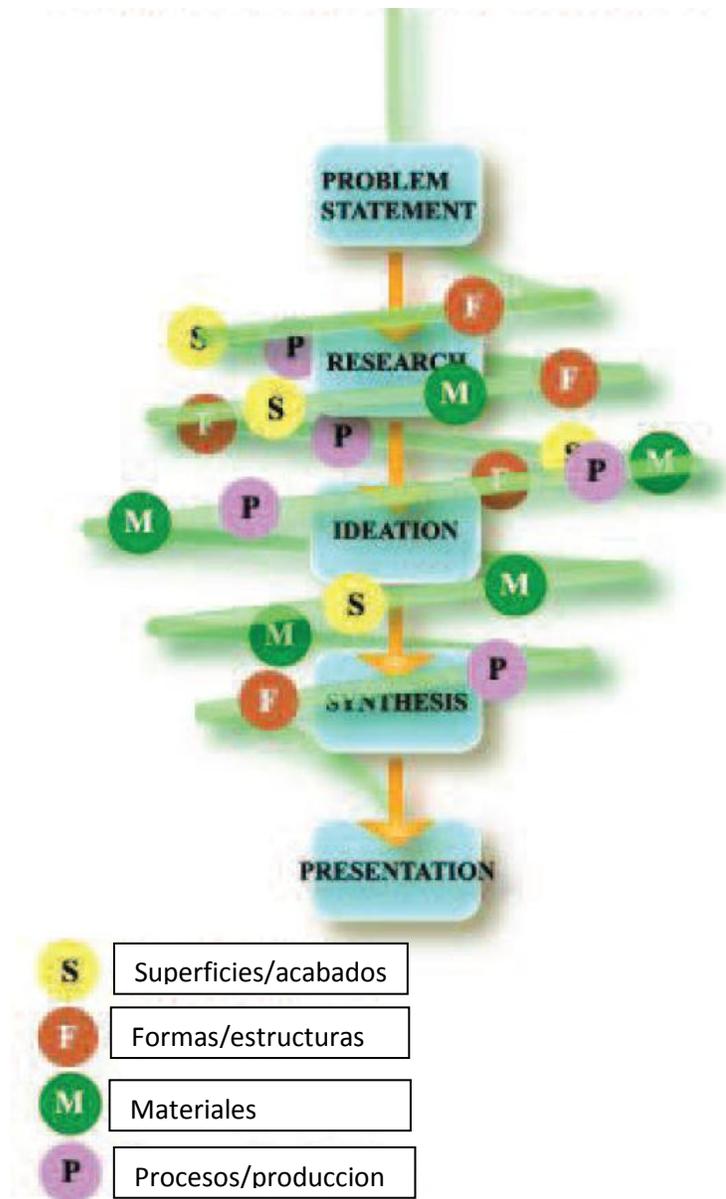


Figura 10. Diagrama representativo del diseño metabólico. Baldrige Devin, "The metabolic design methodology"

### ***Selección de alternativas***

Como paso final en el diseño conceptual se procede a seleccionar el concepto final que cumpla de preferencia con todos los requerimientos y especificaciones que se plantearon con anterioridad. Una forma de cumplir con esto es utilizando DATUM (tomando todas las propuestas hechas ya sea por las técnicas de creatividad, análisis funcional, análisis de valor, etc). Éste no es el único método existente pero al final la elección sigue siendo del diseñador y de él dependerá cual seguir.

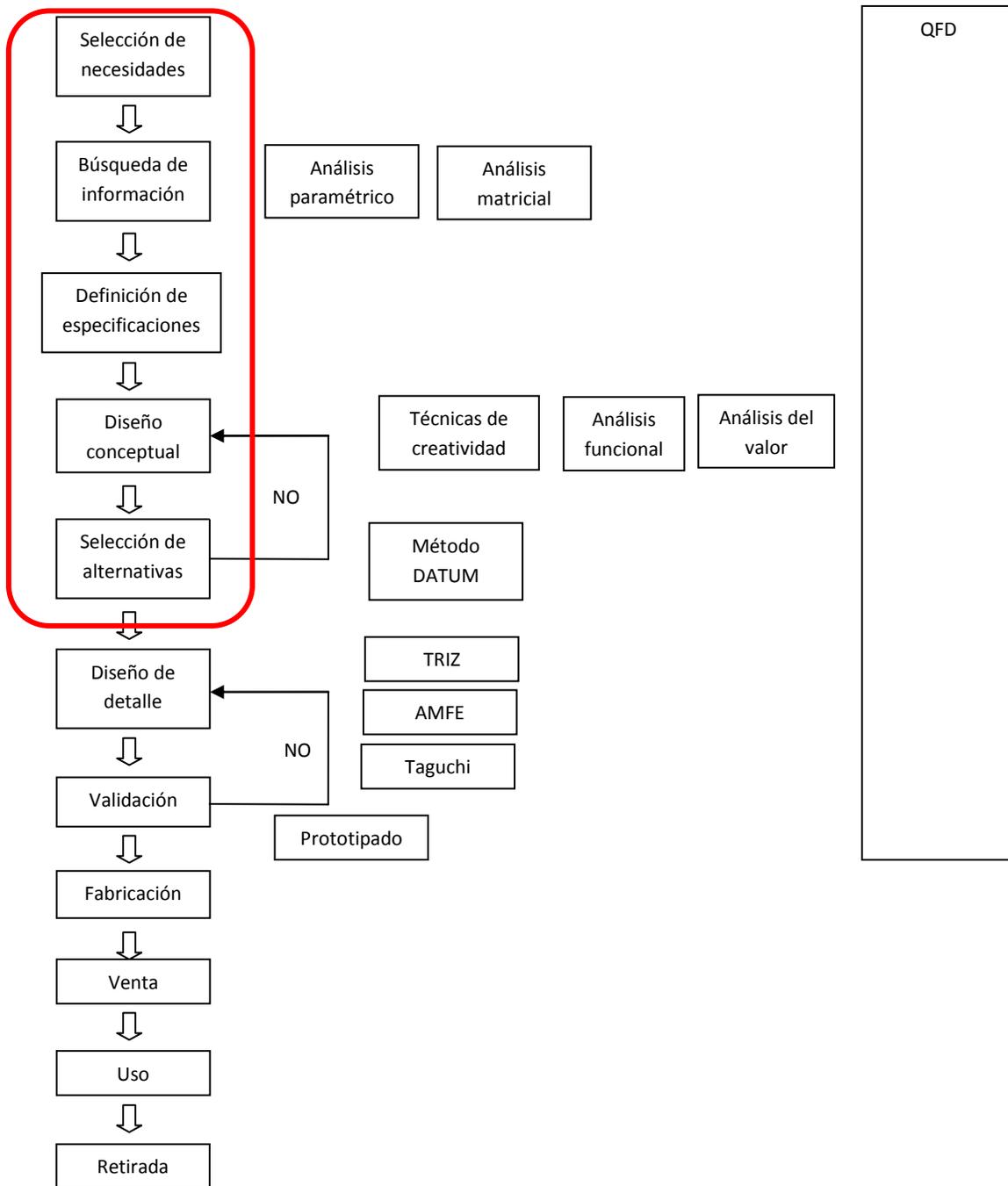


Figura 11. Diagrama de la metodología del diseño de producto de propuesta por Jorge Alcaide

Se debe evitar colocar información sobre la casa de la calidad (QFD) debido a que la información comercial es muy poca y no sea tan vasta ni tan común.

La parte de diseño conceptual que fue tomado del libro *Diseño de productos: métodos y técnicas* se verá modificada utilizando criterios y la experiencia propia para proponer una metodología, figura 11<sup>[10]</sup>. Las variaciones serán presentadas de la siguiente forma:

- Se elimina el análisis paramétrico y análisis matricial permanece.
- Cambiar el orden entre búsqueda de información y definición de especificaciones ya que esta forma es más comúnmente utilizada en diversas metodologías.
- En búsqueda de información se agrega la información obtenida de artículos y patentes.
- En técnicas de creatividad se especifica utilizar biomimética junto con TRIZ como parte de generación de ideas para definir un mayor número de propuestas y encontrar soluciones específicas.
- La parte de análisis de valor no se elimina por completo en cambio la parte de costo que maneja se agregara en el análisis general de la opción final.
- Después de la parte selección de alternativas se propone agregar el punto pruebas, esto se realiza de manera matemática o mediante algún software o alguna herramienta de análisis. Por otra parte se hará una tabla de costo ya se de las opciones finales u opción final para tener un estimado real.
- Como punto final al adicional de pruebas se propone realizar un informe sobre los resultados obtenidos y las conclusiones a las que se llegaron. Con todo los cambios se obtendría el siguiente diagrama, figura 12, el cual será utilizado en el siguiente capítulo.

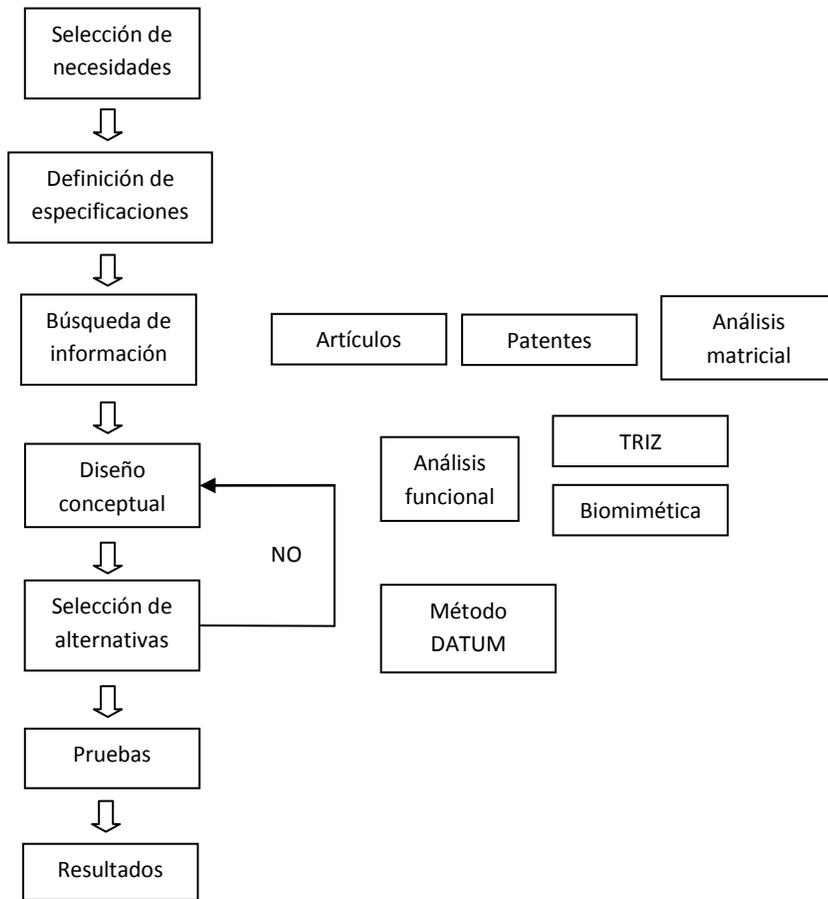


Figura 12. Diagrama de la metodología adaptada del diseño de producto de Jorge Alcaide

## Capítulo 3

### Aplicación de la metodología

En la parte anterior de la investigación se presentó como desarrollar el tema seleccionado mediante una metodología pero antes de iniciar con este proceso es necesario seleccionar la configuración de celda tipo óxido-sólido y conocer que información se reutilizaría en este capítulo. Se observaron varios ejemplos y de entre ellas las que pueden dar más información son la celda plana y la tubular, ambas son buenas opciones pero en este caso la decisión final depende totalmente del diseñador debido a que no hay ninguna restricción necesaria o alguna aplicación en específico. De la información de las configuraciones no se encontró una diferencia notoria entre ellas por lo que se seleccionará la configuración plana sin ninguna razón importante.

Utilizando la metodología propuesta anteriormente, figura, se iniciará con el primer paso que se sugiere.

#### **Aplicación**

##### ***Selección de necesidades.***

A continuación se enlistaran las más importantes.

- La principal necesidad a lograr que se planteó desde un inicio, aumentar la eficiencia de una celda de combustible de óxido-sólido.
- Reducir la temperatura de la celda de manera individual así mismo al trabajar con otras celdas en una pila.
- Obtener una alta salida de corriente eléctrica.
- Buen sellado en la pila.

##### ***Definición de especificaciones.***

Se asignan valores numéricos a los requerimientos.

- Se requiere una eficiencia de más del 80%.
- Reducción de temperatura menor a 1000° C de una celda de tipo HT-SOFC.
- Obtener una corriente eléctrica alrededor o mayor de 10 MW en una pila.
- Debido a que no hay un estándar para definir como es un buen sellado se sugiere definir un porcentaje de fuga como especificación, se establece que sea menor al 2%.

### ***Búsqueda de información.***

En esta parte como se ha mencionado en el capítulo 2 se recolectará la información derivada de artículos, patentes y lo que se encuentra de manera comercial; posteriormente se realizará un comparativo con el fin de obtener las mejores características de toda la información. Los datos obtenidos permitirán al diseñador enfocarse en puntos débiles de esta tecnología.

#### **Artículos.**

La mayoría de la información que fue encontrada en diferentes artículos se centraba en el modelado de la celda plana, otra parte en materiales utilizados en el diseño. Mediante las tablas mostradas en el anexo de artículos se muestra la información mostrando las ventajas y/o desventajas que presentan así mismo los diseños de celdas planas que manejaba cada autor.

Un ejemplo de esta información que se obtuvo fue que en una investigación se presentaban materiales para cada componente utilizado en las celdas, citando alguno de ellos, el óxido de lantano para el cátodo y el uso de cermet para el ánodo. Mediante esta propuesta se realizaron pruebas y se obtuvieron voltajes de alrededor de 1.3 volts para el caso de un sola celda, este valor representa un incremento en los valores obtenidos con otros materiales mas usualmente utilizados.

Otra parte importante además de los artículos son las patentes que contienen una mayor información debido a que en la mayoría de los casos las celdas son analizadas de manera física.

#### **Patentes.**

Se presentan las diferentes patentes que se encontraron sobre estructura, materiales, ensamblaje, diseños, etc, toda esta información se presenta en el anexo de patentes

Dentro de lo más notorio que se menciona en este apartado se presenta en una patente que elimina el sellado de la celda, aunque hay que tener en cuenta que es necesario analizar que tanta ventaja ofrece esta característica. Por otra parte también se muestran ejemplos de trayectorias para el combustible como para el oxidante, esto puede permitir obtener una referencia y posteriormente proponer nuevas trayectorias para los fluidos.

No se pretende distraer al lector con la información de los artículos ni de las patentes, por lo que se presenta lo más importante de cada uno en los anexos. En caso de que surja alguna, por ejemplo, en el uso de los datos obtenidos al aplicarlo para la realización de las propuestas hechas queda disponible el resumen de cada trabajo citado.

### ***Análisis matricial.***

En este capítulo se mencionó que se utilizaría la información comercial de celdas planas pero lo que se observó fue que los proveedores o desarrolladores de esta tecnología no mostraban la suficiente información para que fuese utilizada en esta investigación. Sólo con la información de patentes y artículos la tabla queda de la siguiente forma.

Tabla 9. Análisis matricial tanto de las patentes como de los artículos.

No.	Celda de combustible  Función	Diseño óptimo de un interconector de bi-capas para SOFC	Sellos de vidrio	Uniformidad de flujo	Investigación de materiales para celdas	Efectos de fuentes de calor en el	US2002/0106548 A1	US 2005/0074659 A1	US2005/0201919 A1	US 2010/0016142 A1	US 2004/01853321 A1	WO 2004/008556 A2	US 2010/0216053 A1	US 7858259 B2	US 6593020 B1	EP 2 031 680 A1	Repres. del porcentaje	%
1	Material anodo				√			√							√	√	4	4.21
2	Material catodo				√			√	√						√		4	4.21
3	Material interconector				√			√							√	√	4	4.21
4	Tipo de soporte en PEN			√	√			√							√	√	5	5.26
5	Sellado		√		√		√	√		√		√	√	√			8	8.42
6	Diseño del interconector	√		√	√		√	√		√	√	√			√		9	9.47
7	Ensamble	√	√	√	√		√	√			√	√	√	√	√		11	11.5
8	Interconector de doble capa	√		√				√		√							4	4.21
9	Trayectoria flujo combustible	√		√	√		√	√		√	√	√	√		√		10	10.52
10	Distribución de flujos	√		√	√	√	√	√		√			√		√		9	9.47
11	Diseño pila	√					√	√						√			4	4.21
12	Cambio de velocidad de los fluidos	√		√		√					√		√				5	5.26
13	Diseño de colectores de corriente						√	√				√		√	√		5	5.26
14	Subtipo de celda plana						√	√		√							3	3.15
15	Trayectoria flujo aire	√			√	√	√	√		√		√	√	√	√		10	10.52

La parte de diseño es la médula del trabajo ya que en esta sección se proporcionan las ideas como propuestas de solución al objetivo de esta investigación, los datos de la tabla anterior serán importante ya que indicaran si existe información sobre algún aspecto en específico o en caso contrario proponer algo totalmente nuevo.

### **Diseño conceptual.**

Dentro de la metodología esta sección se refleja en expresar todo aquello que el diseñador crea que puede funcionar, esto no representa que cualquier concepto sea una solución pero si un inicio de ella.

### **Análisis funcional.**

Para desarrollar la parte de análisis funcional se considerará el diagrama presentado en el capítulo 2 donde se representaba la función de un producto X en el cual se suministraba una o varias entradas para obtener una salida.

Definición de necesidades.

Se vuelven a mencionar las necesidades planteadas al inicio de esta investigación.

- Aumentar la eficiencia de una celda de combustible de óxido-sólido.
- Reducir la temperatura de la celda de manera individual así mismo al trabajar con otras celdas.
- Obtener una alta salida de corriente eléctrica.
- Buen sellado en la pila.

Formulación de funciones.

Ahora se deben determinar la misión del producto con una breve descripción, la tarea a realizar y una ampliación del panorama tecnológico de la función principal, figura 13.

<p><b>Celda de combustible.</b></p> <p>1.- <b>Misión del producto o componente</b> La tarea principal a realizar es crear una diferencia de voltaje</p> <p>2.- <b>Describir dicha misión.</b> En el caso de las celdas de combustible mediante una reacción electroquímica se genera electricidad.</p> <p>3.- <b>Formular la tarea.</b> La función es <i>generar electricidad</i>.</p> <p>4.- <b>Ampliación de la función.</b> En este caso no es posible cambiar la forma en que se genera la electricidad ya que se estaría cambiando por completo la el principio de esta tecnología.</p>
--

Figura 13. Formulación de funciones de una celda de combustible

Estructuración de funciones

Enlistar las funciones presentes en el proceso en general, figura 14.

## ***Celda de combustible***

### **Función principal:**

Generar corriente eléctrica

### **Funciones secundarias:**

Permitir flujos constantes de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>

Mantener flujo uniforme

Reducir al O<sub>2</sub>

Oxidar al H<sub>2</sub>

Intercambiar electrones

Producir agua

Permitir paso de iones O<sup>-</sup> a través del electrolito

### **Funciones terciarias:**

Eliminar residuos de combustible y oxidante

Proporcionar rigidez a la estructura

Conectar celdas por medio del interconector

Evitar filtraciones y/o fugas debido al sellador

### **Funciones innecesarias:**

Generar calor y aumentar la temperatura de la celda

Distribuir ineficientemente los flujos dentro de la celda

Corroer componentes de la celda

Permitir filtraciones a temperaturas cercanas a los 1000° C

Disminuir eficiencia debido al trabajo a altas temperaturas

Generar flujos turbulentos

Figura 14. Estructuración de funciones de la celda de combustible

Clasificación según el tipo de prestación.

La clasificación de las funciones desde la función técnica, de uso o manejo, de seguridad y de manejo se presentan en la siguiente ficha, figura 15.

**Funciones técnicas:** generar electricidad  
 Eliminar residuos de combustible y oxidante  
 Reducir al O<sub>2</sub>  
 Oxidar al H<sub>2</sub>  
 Permitir paso de iones O<sup>-</sup> a través del electrolito

**Funciones de uso o manejo:** Mantener flujo uniforme  
 Conectar celdas por medio del interconector  
 Permitir flujos constantes de H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>  
 Generar calor y aumentar la temperatura de la celda

**Funciones de seguridad:** evitar fugas y/o filtraciones debido al sellador  
 Permitir filtraciones a temperaturas cercanas a los 1000° C

**Funciones de estética, imagen o efecto psicológico:** Intercambiar electrones  
 Proporcionar rigidez a la estructura por medio del interconector  
 Producir agua

Figura 15. Funciones realizadas dentro de la celda de combustible.

Árbol de funciones

Utilizando las funciones obtenidas se forma el siguiente árbol de funciones donde se parte de la función

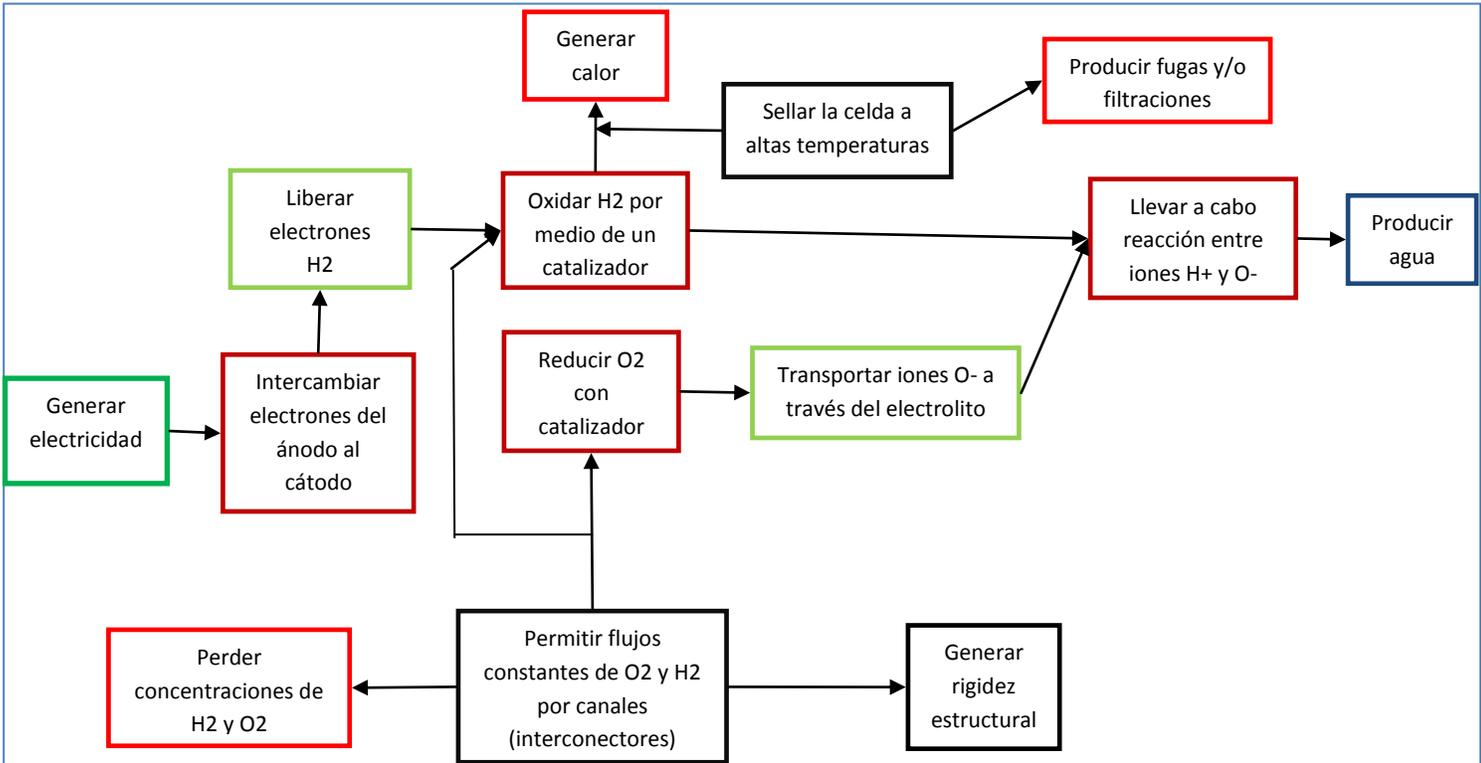


Figura 16. Diagrama del árbol de funciones de la celda de combustible.

principal, figura 16. Mediante el diagrama los efectos indeseados se observan de color rojos y son

aquellos en el que el diseñador debe enfocarse para mejorarlos. Las funciones que se encuentran de color rojo oscuro y verde claro son funciones electroquímicas, esta segunda implica un transporte de electrones o iones. Los de color negro son funciones que se desarrollan con componentes físicos, el azul es un residuo que no resulta dañino y de verde fuerte la función principal.

De las funciones indeseables o dañinas será necesario conocer que otras variables implican cada uno para aplicar TRIZ o biomimética.

La generación de calor implica:

- Mejorar el flujo de combustible y aire para disipar el calor.

Fugas y filtraciones:

- Mejorar el sellado de la celda.
- Modificar el diseño de la celda.
- Mejorar el ensamblaje de la celda.

Concentración de O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>.

- Rediseño de los canales de flujo.
- Cambiar el diseño de la celda.
- Cambiar el tipo de flujo.

Con estos datos se puede observar que la mayoría de los cambios deben realizarse en la estructura sin embargo de forma paralela se buscará una opción de distribución de flujos para mejorar las reacciones entre los gases.

Para utilizar TRIZ como forma de solución se manejarán los parámetros de temperatura, distribuciones de flujos, concentración constante del aire y combustible a lo largo de la trayectoria, ensamblaje y forma de los canales. Debido a que la biomimética es solo una metodología complementaria en este caso solo se enfocará en el intercambio y flujo de los gases además de la regulación de la temperatura.

### **TRIZ**

Para aplicar TRIZ se propuso utilizar algún software para mejorar el número de opciones de mejora que este método pueda arrojar. CREAX™ es un programa enfocado en su totalidad a usar TRIZ y algunas de sus herramientas importantes como el uso de la matriz de contradicción técnica, utilizar los 40 principios, líneas de evolución hasta el uso de campos S. Debido a que solo se hará un enfoque en utilizar las tres primeras opciones es necesario plantear las funciones de tal forma que puedan utilizarse en el software.

De la primera función, para mejorar la disipación del calor en la celda es necesario mantener un flujo constante del aire como método de enfriamiento. Con esto se obtiene que:

- Lo que se desea mejorar es la temperatura pero se empeora el consumo de sustancia.

La segunda función son efectos provocados por el uso de la celda, debido a que la temperatura de trabajo es alta se dan cambios inesperados o no contemplados y que si no resultan favorables se deben tomar en cuenta para su mejora. Para las fugas o filtraciones tenemos que:

- Se desea mejorar efectos perjudiciales laterales pero se empeora la complejidad del elemento.
- Otro factor que se contempla es que si se desea mejorar la adaptabilidad y se empeora la posibilidad de fabricación.

Al tomar la última función se sabe que cuando pasa tanto el combustible como el aire por los canales de la celda decrecen en concentración y velocidad debido a la fricción con las paredes con lo que se dificulta la disipación en la celda. De esta información tenemos que:

- Lo que se desea mejorar es la cantidad de sustancia/materia y empeora la forma.

Con estos nuevos datos y al ingresarse en el programa se obtienen los principios que podrían dar una idea sobre lo que se debe contemplar al momento de dar propuestas, tabla 10.

Tabla 10. Matriz de contradicción técnica.

Empeora	Consumo de sustancia	Complejidad del elemento	Posibilidad de fabricación	Forma
A mejorar				
Temperatura	21, 36, 29, 31			
Efectos perjudiciales laterales		19, 1, 31		
Adaptabilidad			1, 13, 31	
Cantidad de sustancia/materia				35, 14

Con los datos obtenidos del software CREAX™ se sugiere que para mejorar las características requeridas se deben aplicar los siguientes principios:

- Mejorar la temperatura: pasar rápidamente, cambio de fase, neumático o hidráulico y utilizar un material poroso.
- Mejorar los efectos perjudiciales laterales (fugas y filtraciones): acción periódica, segmentación y utilizar un material poroso.
- Mejorar la adaptabilidad: segmentación, inversión y utilizar un material poroso.
- Mejorar la cantidad de sustancia/materia: transformación del estado físico o químico de un objeto y esfericidad.

Con estos datos lo que se desea realizar es utilizar la información de líneas de evolución para obtener otras sugerencias aplicables a los posibles conceptos.

### Líneas de evolución

Analizando los ejemplos presentados en CREAX™ de líneas de evolución y los principios obtenidos se pretende encontrar posibles soluciones que se puedan utilizar en los conceptos para mejorarlos o cambiarlos.

Para mejorar la distribución del combustible y del aire:

- Sabemos que ambos flujos se dan a través de los canales formados por paredes planas y una forma de mejorar la velocidad en estos espacios es utilizar algún pistón. La contrariedad de utilizar algún artefacto en espacios se refleja en su costo de aplicación debido al tamaño milimétrico por lo que no es conveniente.
- Si se hiciera un cambio de fase implicaría cambiar el combustible o el oxidante de su fase gaseosa a una fase líquida o sólida. La desventaja del oxígeno líquido radica en el alto costo en su obtención y almacenaje además de tener un mayor peso, para el hidrogeno se presenta el problema similar al del oxígeno ya que los costos son el tema principal. En ambos casos se descarta el estado sólido debido a que no hay estudios que nos permita conocer su comportamiento dentro de la celda, esto se podría realizar pero implicaría tiempo y un análisis desde el punto de vista químico a profundidad.
- En el caso de pasarlo rápidamente, los fluidos, sin usar un aditamento mecánico se podría optar por cambiar o mejorar los canales para disminuir el arrastre que se da en el combustible y el aire. Es necesario analizar casos donde se mejoren las características de un fluido por un sistema conocido, por ejemplo, en las pelotas de golf generan un menor arrastre cuando son golpeadas y viajan a gran velocidad por el aire debido a la rugosidad o porosidad que posee físicamente. Si observamos este principio se muestra en las líneas de evolución donde se cambia de una superficie plana a una donde haya una rugosidad superficial, al aplicar este principio de material poroso debe analizarse en partes de la celda se puede utilizar.

Creax™ presenta las ventajas de usar una superficie rugosa:

1. Se reduce el arrastre
2. Se mejora la tracción
3. Mejora el control
4. Mejora la controlabilidad aerodinámica
5. Auto-limpieza (efecto Lotus)
6. Mejora la transferencia de calor
7. Incrementa el área superficial

Para evitar las fugas/filtraciones

- Primero se recomienda utilizar una acción periódica, actualmente hay un flujo constante de ambos gases debido a que se necesita una reacción ininterrumpida para evitar el calentamiento de la celda sin embargo no se usa solo una celda en una pila más bien varias. Aplicar este principio implica usar un aparato que regule los flujos pero si lo vemos a un nivel de más de 50 celdas y en diferentes direcciones de aplicación del flujo se podría observar que ya no resulta tan viable aplicarlo en una tecnología que ya es costosa.
- Para los dos siguientes principios se cumple con lo anteriormente propuesto en la mejora del flujo al utilizar un material poroso en una superficie segmentada, con lo cual se obtiene una mejor controlabilidad del fluido y un menor arrastre para evitar comportamientos aleatorios y que favorezcan las fugas.

Para mejorar el ensamble o adaptabilidad:

En la utilización del principio de **segmentación** se puede proponer que en lugar de tener dos superficies planas de contacto se podría variar la geometría en ambas partes donde se unen para optimizar la unión de dos partes, para evitar problemas hay que observar que sea el mismo coeficiente de expansión térmico.

En el siguiente principio se propone utilizar la **inversión** donde lo que se busca hacer es todo lo contrario a lo que se busca, por ejemplo, en vez de girar un desarmador sobre un tornillo se hace todo lo contrario. En el caso de la celda podría ser que en vez de ensamblar parte por parte hacer una estructura exterior que contenga a todas las partes dentro.

Por último se encuentra el principio de **material poroso** en el cual se puede observar que el uso de una superficie rugosa mejore la unión de superficies al aplicar el sellador. En otro caso se podría combinar este principio con el de segmentación para crear piezas similares a los legos los cuales se unen por presión.

Para mejorar la concentración del oxígeno y el combustible:

- El primer principio habla sobre cambiar el estado físico y químico de las sustancias pero en este caso ambos flujos están en estado gaseoso que representa mejores características. El hidrogeno

gaseoso tiene una mayor difusión en metales en cambio el oxígeno es más estable a la presión y temperatura ambiental.

- Por otra parte el segundo principio propone cambiar una superficie plana hasta volverla una curva 3D. En el caso de los canales lo mejor que se podría realizar es cambiar las paredes planas por una construcción axisimétrica para aumentar la capacidad de gas que entra. Las mejoras que se presentan en el software son:

1. Mejora la distribución de flujo
2. Mejora la distribución de cargas
3. Mejora las propiedades de esfuerzos
4. Mejora el momento de inercia
5. Mejora la unión de dos partes
6. Incrementa el área de superficie

La generación de conceptos se realizará en base a los consejos dados por CREAX y en base al modelo utilizado actualmente.

Las ideas que fueron propuestas se muestran a continuación:

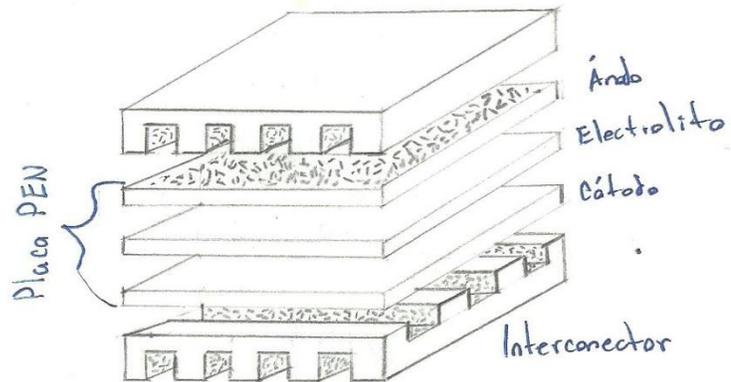
#### Primera idea

Esta propuesta se basa en el uso de superficies rugosas en los canales y en la placa PEN para ambas caras, figura 17.

#### Segunda idea

En esta propuesta se pretende segmentar el canal de aire en dos partes con suministro propio del gas para mejorar la cantidad del oxígeno, por otra parte su busca manejar un ensamble entre placas para mejorar el sellado, figura 18.

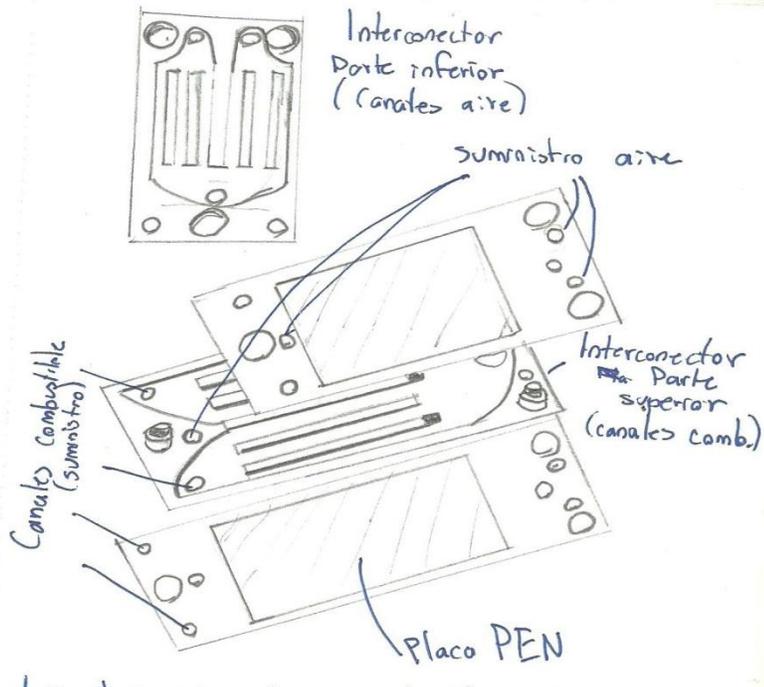
Utilizar rugosidad en los canales y en superficies del ánodo y cátodo.



#### Posibles cambios

- Solo aplicar rugosidad en el ánodo y cátodo.
- Cambiar el flujo cruzado por otra configuración.

Figura 17. Primera propuesta hecha utilizando la TRIZ, su principal característica es el uso de la rugosidad superficial.



Las placas PEN embonan en los interconectores y estos a su vez se conectan con el siguiente y el anterior interconector.

Figura 18. Segunda propuesta hecha utilizando la TRIZ, principal característica es el uso de multicanales.

#### Cuarta idea

Se propone el uso de una celda que no necesita un sellador y a cambio utiliza tornillos-resortes-tuercas para sujetar a la estructura. Cuando se hace uso de una estructura como la pila donde hay varias celdas la sujeción de solo un elemento se realiza con la mitad de tornillos y con la parte restante se fijan a la celda más próxima, figura 20.

Los canales medio circulares permiten una entrada distribuida de los gases.

Estos canales son más fáciles de maquinar.

El interconector se repite a lo largo de la celda.

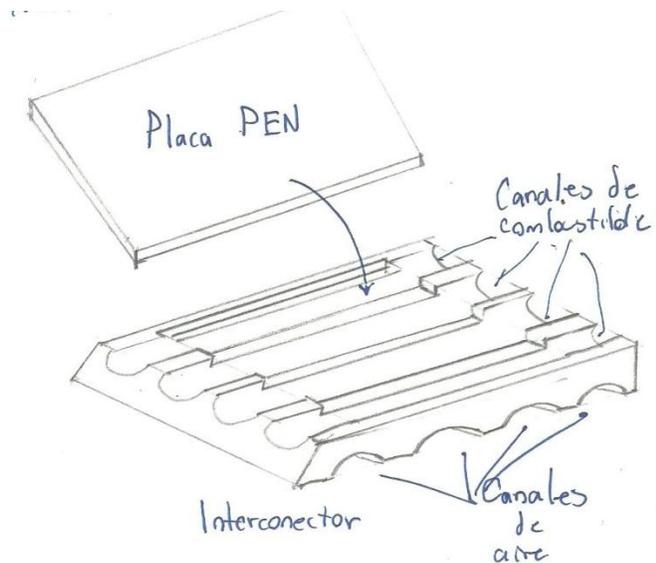


Figura 19. Tercera propuesta hecha utilizando la TRIZ, uso de canales semicirculares.

#### Tercera idea

El uso de canales medio circulares para sustituir los canales cuadrados, obteniendo un aumento en la cantidad de oxígeno, figura 19.

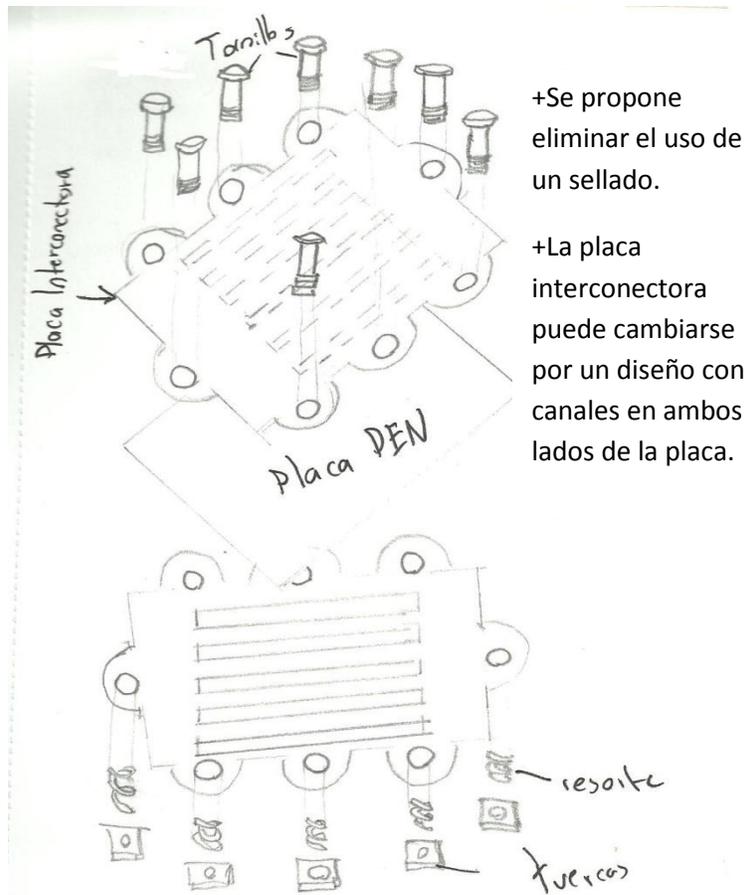


Figura 20. Cuarta propuesta hecha utilizando la TRIZ, la principal característica es la eliminación de una forma de sellado y en su lugar se emplean tornillos, tuercas y resortes.

### Conclusión de la parte de TRIZ

Aplicando TRIZ se encontró que una solución innovadora en la generación de nuevos conceptos al utilizar superficies rugosas para la mejora del flujo de combustible y el oxidante además de aumentar la transferencia de calor.

### **Biomimética**

Para utilizar esta metodología será necesario definir solo una característica deficiente de las celdas planas con el fin de encontrar opciones de solución

### Declaración del problema.

La característica que se busca optimizar es la de mejorar el flujo del  $H_2$  y  $O_2$  en la celda con el fin de tener una mejor concentración de ambos además de regular la temperatura debida a la oxidación del  $H_2$ .

## Investigación.

Una vez que sea declarado el problema lo siguiente es investigar sobre las diferentes trayectorias de los gases así como la forma en que se da la reacción entre el agente reductor y el oxidante, tarea realizada. Esta acción fue realizada con anterioridad y dentro de los resultados encontrados fue que:

- Existen tres tipos de configuraciones de flujos: contraflujo, flujo en paralelo y flujo cruzado.
- Se utilizó un flujo en zigzag mediante el método Taguchi con el fin de aumentar la velocidad de los gases y su influencia, en este caso la temperatura se redujo.
- En otros diseños se varió en el número de canales utilizados y con esto se obtuvo una mejor distribución uniforme.
- Los canales son formados por paredes planas.

Por otra parte, el obtener una mejor distribución de los fluidos también se ve reflejado en el rendimiento de reacción. Lo que se desea es encontrar un buen intercambio de iones  $O^{2-}$  a través del electrolito por los poros que posee este material.

## Fase de ideas

Estudio de formas para realizar procesos: branquias.

Las branquias de los peces permiten un intercambio altamente eficiente del oxígeno obtenido del agua.

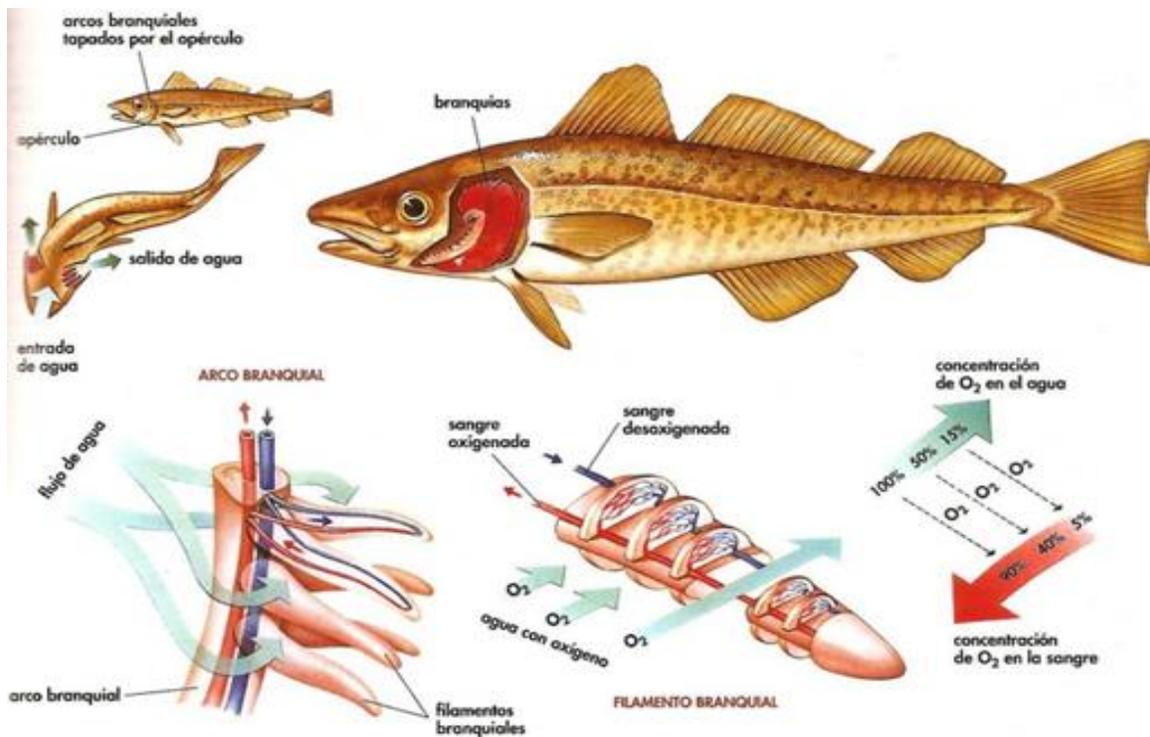


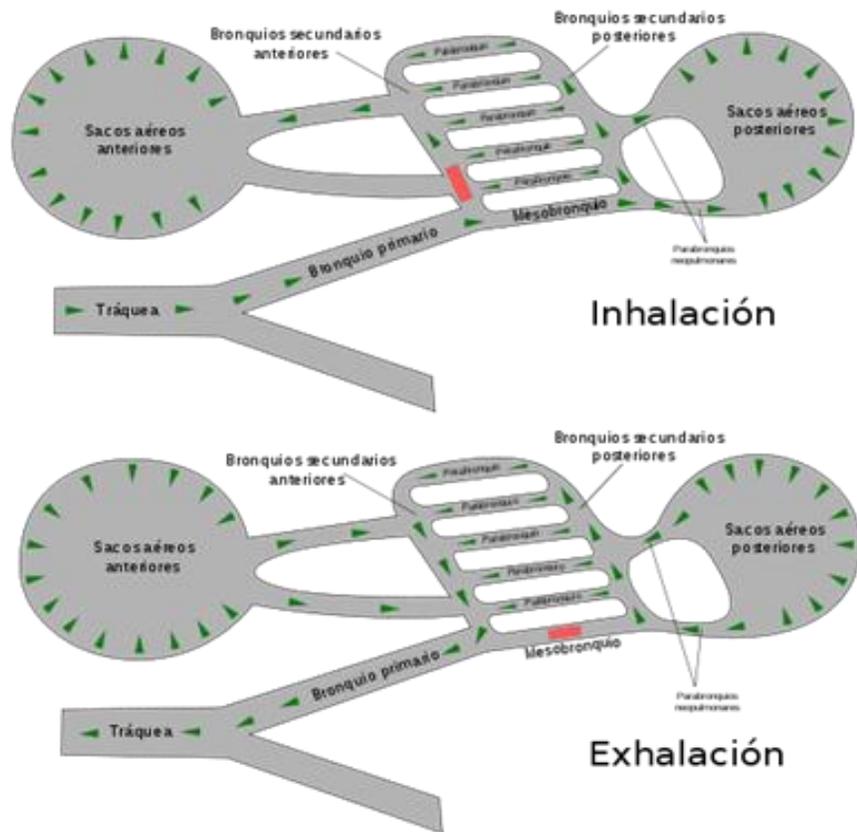
Figura 21. Branquias en los peces y como el oxígeno es transportado del agua a la sangre. Enciclopedia cubana, [www.ecured.cu](http://www.ecured.cu) 2011

El proceso comienza cuando el pez abre la boca para permitir la entrada del agua la cual proporcionara oxígeno al pasar por el conjunto de branquias, otra función es transportar el CO2 producido por su cuerpo. Las branquias son hileras de filamentos con aletas a lo largo de ellas y por la cual pasa una corriente de sangre, tanto el agua como el plasma son flujos que se mueven en sentido contrario. El intercambio va del orden del 5% al 90% por lo cual se considera un excelente proceso, figura 21.

Estudio de forma: aves

El sistema respiratorio de las aves transporta de manera eficiente vía unidireccional el oxígeno además de contar con sacos para su almacenamiento.

El proceso en las aves se realiza cuando se inhala el aire, este entra y pasa a través de la tráquea a los bronquios primarios para pasar después a los parabronquios y al final a los sacos aéreos, figura 22. Cuando llega el momento de la exhalación la corriente cambia el sentido logrando retirar una gran cantidad de anhídrido carbónico del cuerpo. El flujo se realiza en una sola dirección donde el 75% del aire pasa directamente a los sacos aéreos y en cambio el restante pasa a los pulmones. Tanto en la salida como en la entrada del aire se garantiza que haya oxígeno fresco para el cuerpo del ave.



Estudio de proceso: caimanes

En los caimanes el flujo de sangre regula la temperatura de su cuerpo.

En los reptiles, figura 23, la regulación térmica se logra de manera sencilla ya que cuando se encuentra en un ambiente caluroso lo que único que el animal tiene que hacer es

Figura 22. Aparato respiratorio de las aves. [www.portalsaofrancisco.com.br](http://www.portalsaofrancisco.com.br) 2011

colocarse en un lugar con sombra pero cuando hace frio hace todo lo contrario. Esta no es la única forma de mantener su temperatura corporal porque puede controlar su metabolismo dependiendo de la temperatura del ambiental.



Figura 23. Fotografía de caimanes. [crocodile-park.blogspot.com](http://crocodile-park.blogspot.com) 2011

#### Estudio de formas: pico del tucán

El pico del tucán toco (*Ramphastos toco*) funciona como regulador de temperatura mediante el ajuste del flujo de sangre.

El tucán es una de las aves con uno de los picos más grandes, figura 24, el tamaño es casi de un tercio con la longitud total del cuerpo. El pico funciona como un radiador y depende en total medida del flujo de sangre que se da en los vasos sanguíneos en la extremidad.

#### Estudio de formas en procesos: alveolos humanos

Los alveolos en los pulmones mejoran el intercambio de gases al incrementar el área de superficie, figura 25. Los pulmones son la interfaz entre

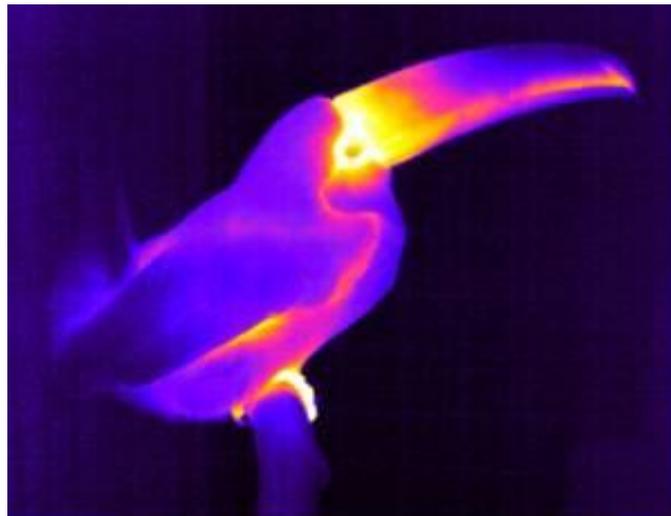


Figura 24. Imagen térmica de un tucán en donde se muestra que el pico que regula su temperatura.

[sinsacro.blogspot.com](http://sinsacro.blogspot.com) 2011

nuestro cuerpo humano y el ambiente también en esta parte se realiza un proceso vital las personas, respirar. La capacidad de los pulmones es apenas de 6 litros a comparación de la superficie que va entre los 50 y 100 m<sup>2</sup> que se alcanza con los treientos millones de alveolos. La forma es cilíndrica con punta medio esférica, donde en la punta pasa la sangre que entra con una baja cantidad de oxígeno y una alta cantidad de CO<sub>2</sub> para que al salir la relación sea contraria.

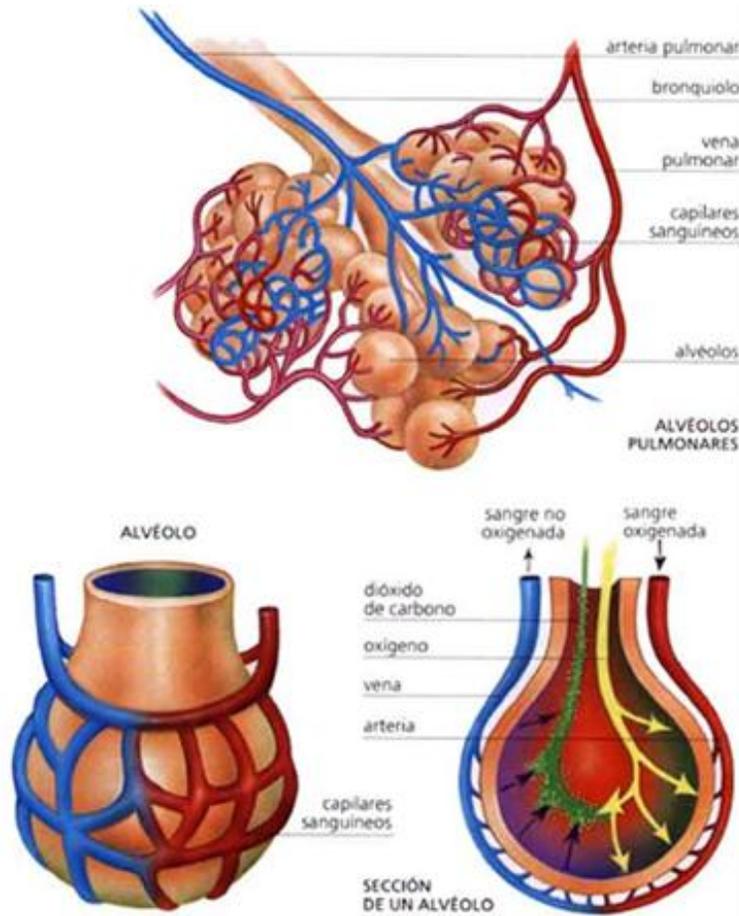


Figura 25. Alveolos humanos mostrando las diferentes partes que la componen. [www.vi.cl](http://www.vi.cl) 2011

#### Estudio de formas: hojas palmera de abanico

La hoja abanico optimiza el enfriamiento y la resistencia al viento. Gracias a la forma que tiene esta hoja, figura 26, permite una buena absorción del calor debido a su gran superficie pero debido a su forma entrecortada le permite el paso del aire para mantener su temperatura. No se puede exceder temperaturas de más de 40° C debido a que se puede cambiar su estructura química y la función de las biomoléculas, no tolera el calor.



Figura 26. Hojas de palmera de abanico. [www.asknature.org](http://www.asknature.org) 2011

#### Estudio de formas: nidos de hormigas

Los hoyos en los nidos de las hormigas de madera funcionan como regulador de temperatura.

Las hormigas han entendido que para mantener el calor o permitir la entrada de aire fresco en sus nidos, implica que tantos hoyos tengan abiertos en sus nidos, figura 27.

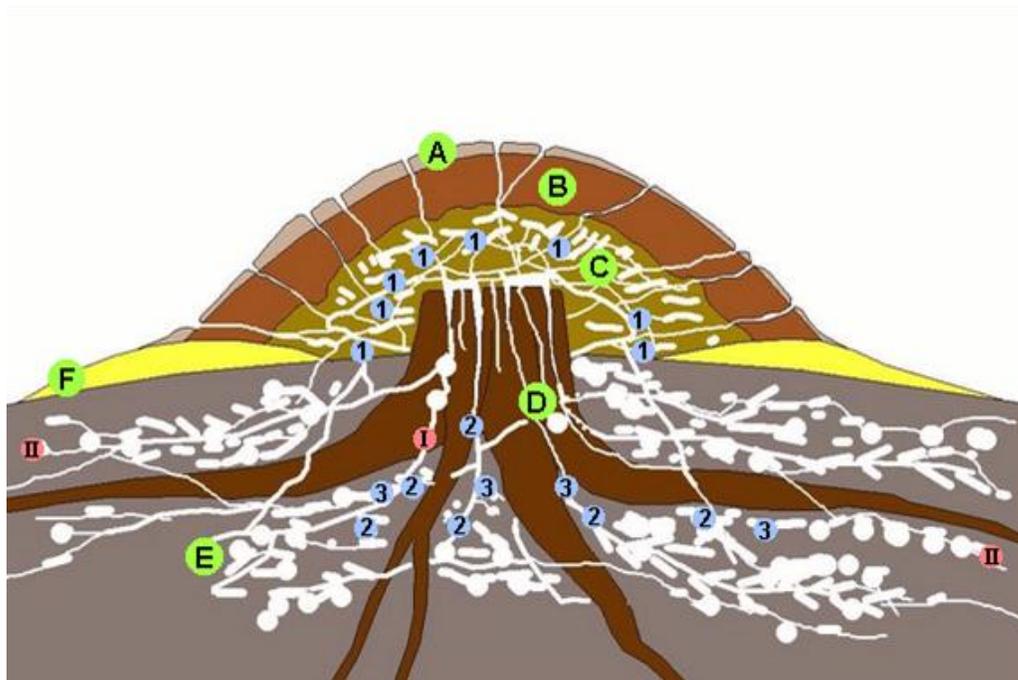


Figura 27. Nido de hormigas mostrando los diferentes canales que se crean en su interior. [www.ant-maps.com](http://www.ant-maps.com) 2011

Ahora con la información obtenida se harán propuestas combinando el modelo más común de las celdas planas.

### **Síntesis.**

Con la información obtenida sobre elementos en la naturaleza que cubren los requerimientos necesarios tenemos que las propuestas obtenidas fueron:

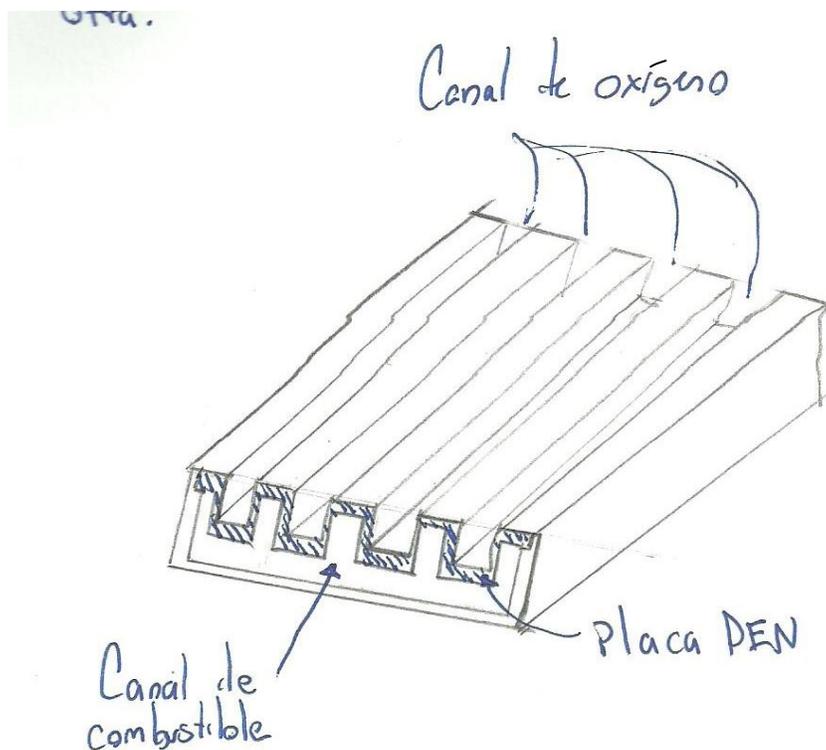
#### Primera idea

Utilizando la información de las branquias de los peces y los alveolos humanos se logró conocer que es necesario tener una mayor área de contacto de la placa PEN. Por tanto se cambió la forma de la placa por una forma dentada aumentando el área y acercándose al diseño de las branquias en los peces, figura 28.

La propuesta es utilizar una placa dentada para aumentar el área de la superficie de contacto tanto del oxígeno como del combustible.

En este caso no se toma en cuenta cual será el grado de dificultad para obtener dicha forma.

Es necesario contemplar cómo hacer un buen sellado al utilizar esta configuración.



#### Segunda idea

Esta propuesta consiste en aumentar la cantidad de aire mediante el uso de dos canales de oxígeno en lugar de uno además de utilizar dos placas

Figura 28. Primera propuesta hecha utilizando biomimética, se propone el uso de una placa PEN dentada.

PEN en lugar de una, figura 29.

Tercera idea

En esta última propuesta se pretende utilizar un diseño donde la placa de oxígeno se divide en un canal principal y uno adicional que sirve de alimentación, en la parte de salida del oxígeno donde la cantidad de gas se ve reducida, figura 30.

Se omitirá la parte de presentación ya que en lugar de mostrar una idea final en esta parte lo que se realizara es combinar las ideas mostradas en la parte de biomimética como en la parte de TRIZ.

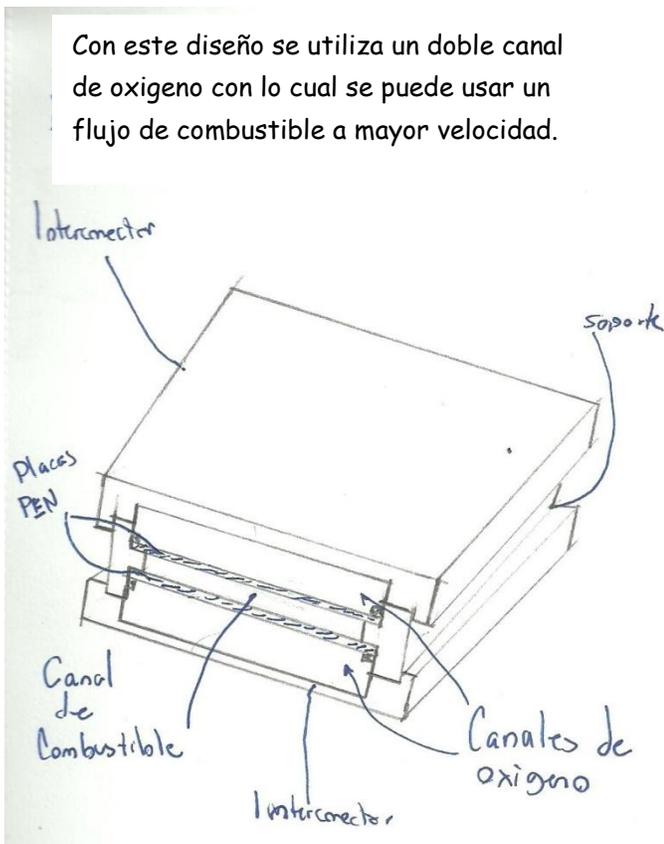


Figura 29. Segunda propuesta hecha utilizando biomimética, uso de dos placas PEN y dos canales de oxígeno.

Conclusión de la parte de biomimética

Aplicando biomimética se obtuvieron soluciones aplicables para los nuevos conceptos que se basan en el uso de canales en formas de aleta para aumentar el área de transferencia de calor y iones (H, O). Por otra parte se identificó que al utilizar más de una entrada de aire mejora la concentración de los gases utilizados dentro de la celda.

**Selección de alternativas.**

Se aplica un canal adicional al de oxígeno para suministrar el gas en la parte final del canal principal.

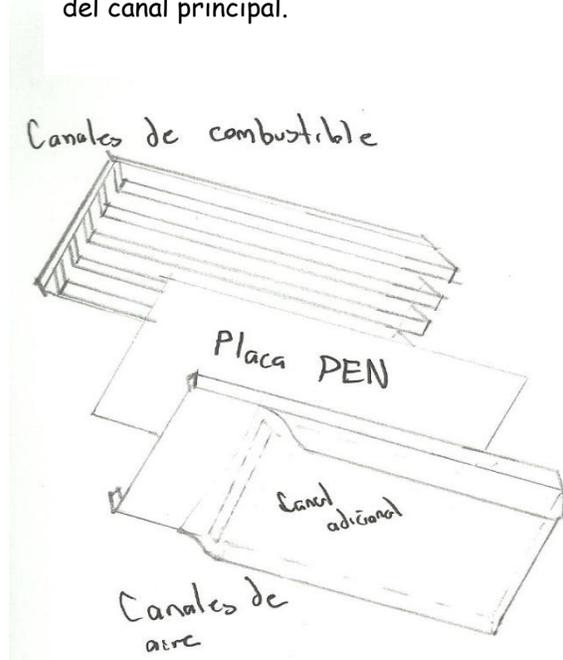


Figura 30. Tercera propuesta hecha utilizando biomimética, adición de un canal de aire.

## Método DATUM

Utilizando el método DATUM se pretende obtener dos conceptos en los cuales se harán pruebas mediante un software de simulación para observar cómo se da la transferencia de calor en las celdas propuestas. Utilizando la información y bocetos propuestos se obtiene la siguiente tabla.

Tabla 11. Utilización del método DATUM para la elección de los conceptos finales.

Criterios de selección	Conceptos							
	Referencia Celda	A Rugosidad	B Doble entrada	C Canales circulares	D Placa PEN dentada	E Doble placa PEN	F Sin sellador	G Canal adicional
Facilidad de flujo	0	+1	0	+1	0	+1	0	0
Facilidad de transferencia de calor	0	<b>+1</b>	0	0	+1	0	0	+1
Facilidad de sellado	0	0	+1	0	0	0	+1	0
Facilidad de apilamiento	0	<b>0</b>	+1	0	0	+1	0	0
Facilidad de acoplado	0	0	+1	0	0	+1	0	0
Mejora la cantidad de O2 y H2	0	<b>0</b>	+1	+1	0	0	0	+1
Facilidad de maquinado	0	0	0	+1	-1	0	0	-1
Mejora las reacciones REDOX	0	+1	0	0	+1	0	0	+1
Suma +		3	4	3	2	3	1	3
Suma 0		5	4	5	5	5	7	4
Suma -		0	0	0	1	0	0	1
Evaluación neta		3	4	3	1	3	1	2
Lugar		2	1	2	4	2	4	3
¿Continuar?		Combinar 1	Combinar 1 Combinar 2	Combinar 1 Combinar 2	Combinar 2	No	Combinar 1 Combinar 2	No

Mediante la tabla se obtuvieron las opciones de una primera combinación A, B, C y F junto con una segunda que provendrá de los conceptos B, C, D y F. EL fin de obtener estas propuestas finales es compararlas con el elemento de referencia mediante una prueba de flujo y de transferencia de calor que será hecho en el software COMSOL. A continuación se presentan los conceptos finales obtenidos, en este caso si se especifican dimensiones de cada uno para poder realizar el análisis con el programa seleccionado.

Se aclara que los bocetos que se mostrarán a continuación son demostrativos y algunas dimensiones parecerán no concordar con el dibujo presentado. Las dimensiones en todas las figuras están en milímetros.

Propuesta A

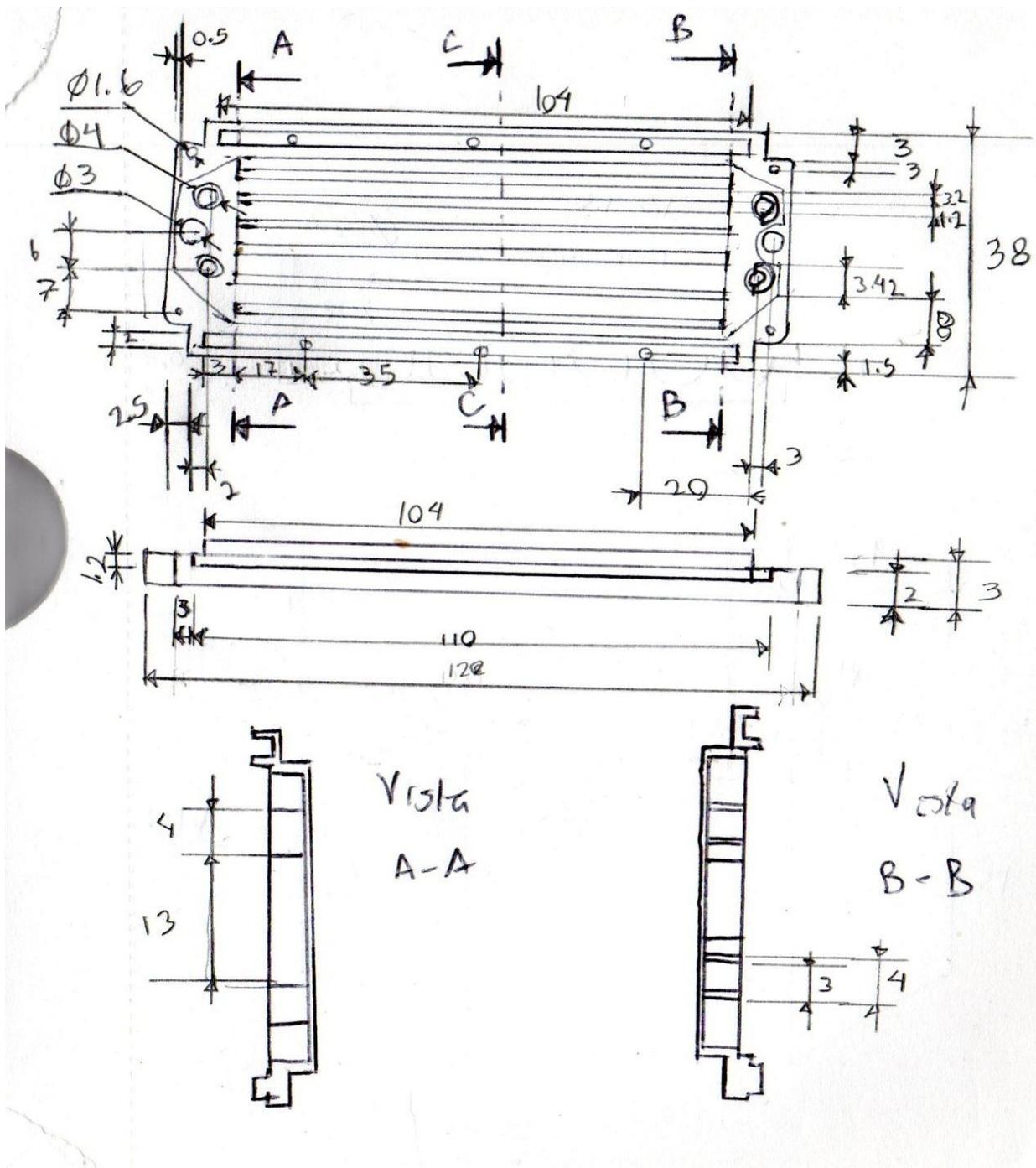


Figura 31. Propuesta de la placa interconectora del primer diseño, se muestra una vista superior y de lado así como cortes transversales.

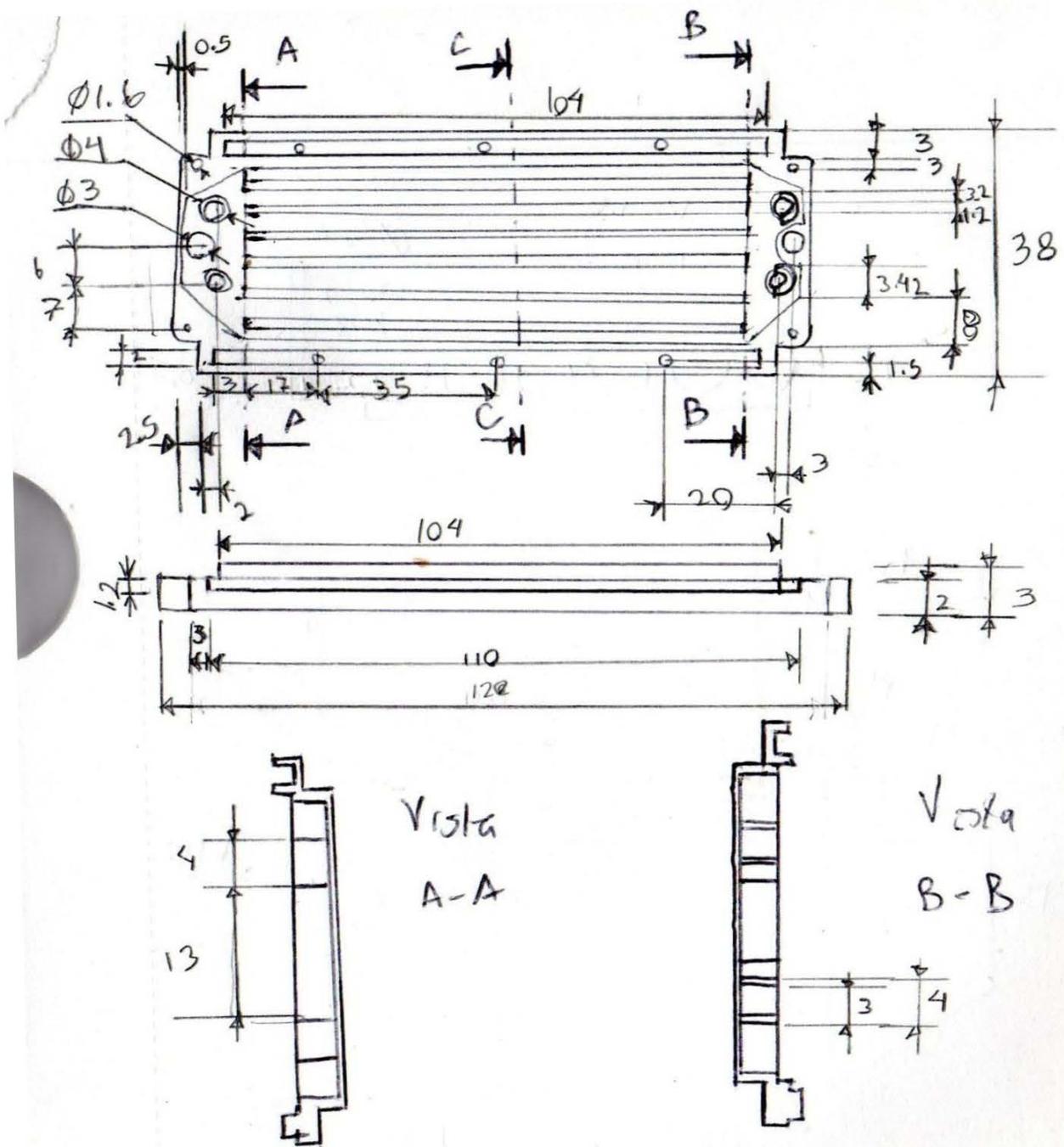


Figura 32. Propuesta de la placa interconectora del primer diseño, se muestra una vista superior y de lado así como cortes transversales

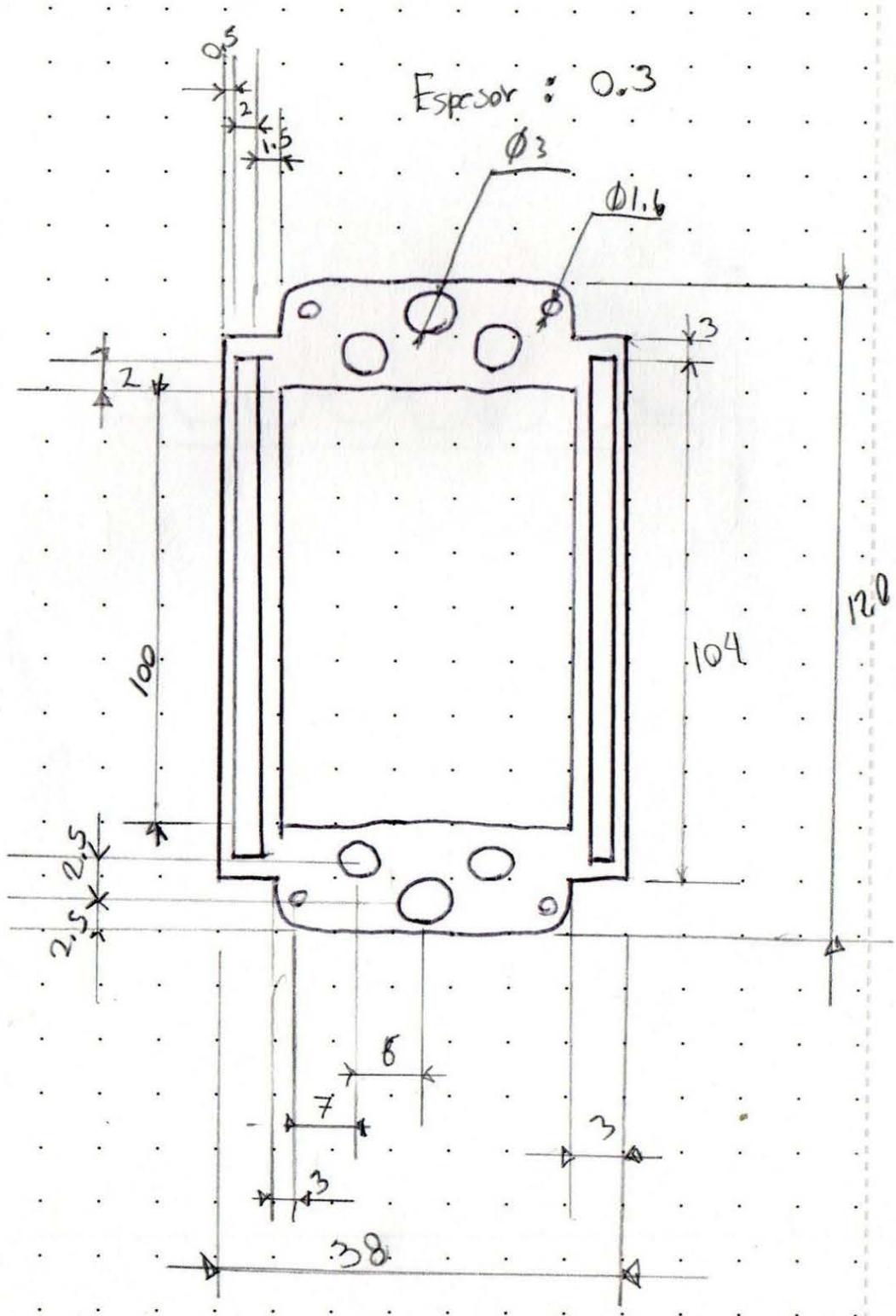


Figura 33. Placa utilizada como sellado para la primera propuesta.

Propuesta B

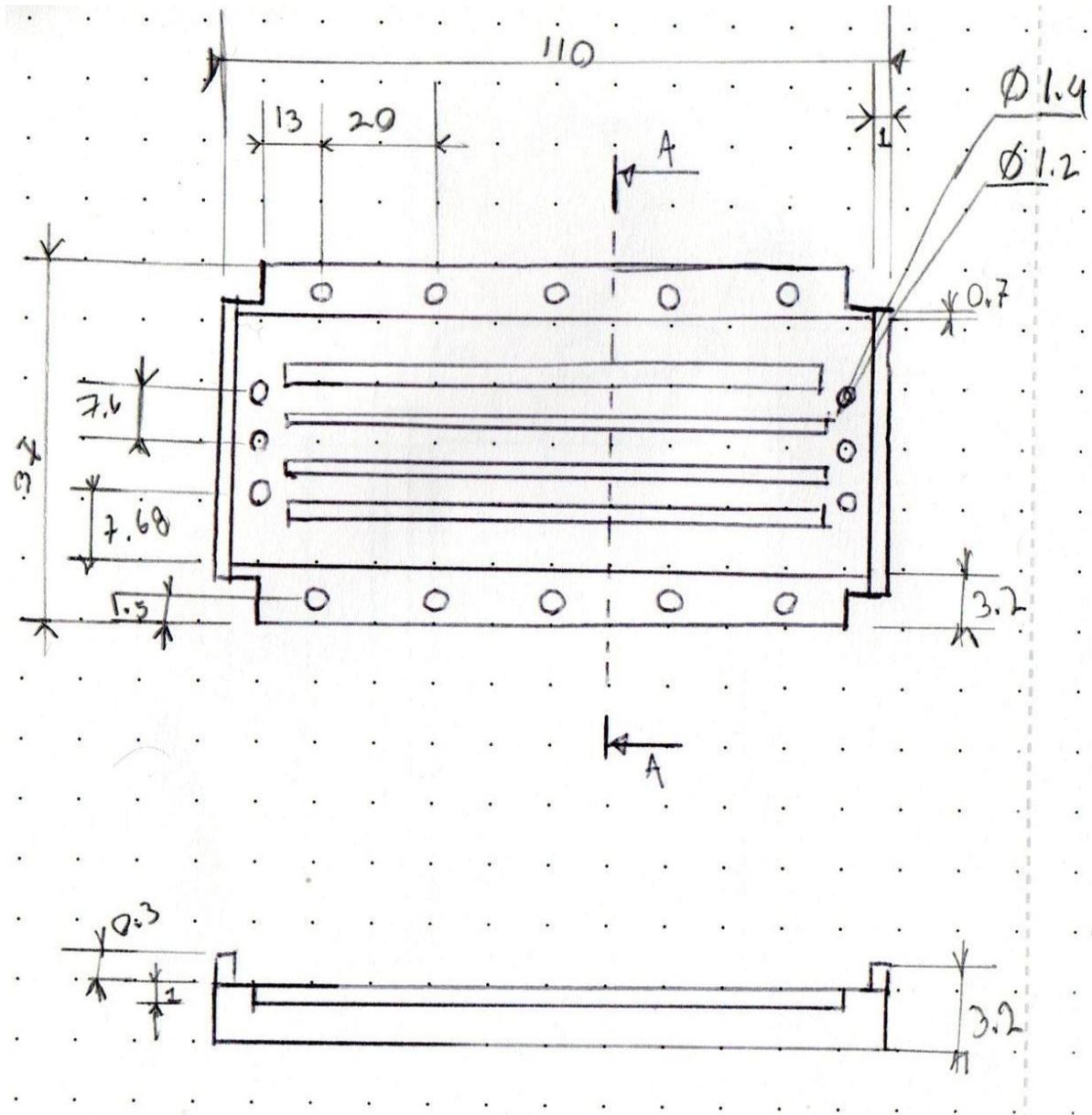


Figura 34. Placa interconectora superior de la segunda propuesta de diseño.

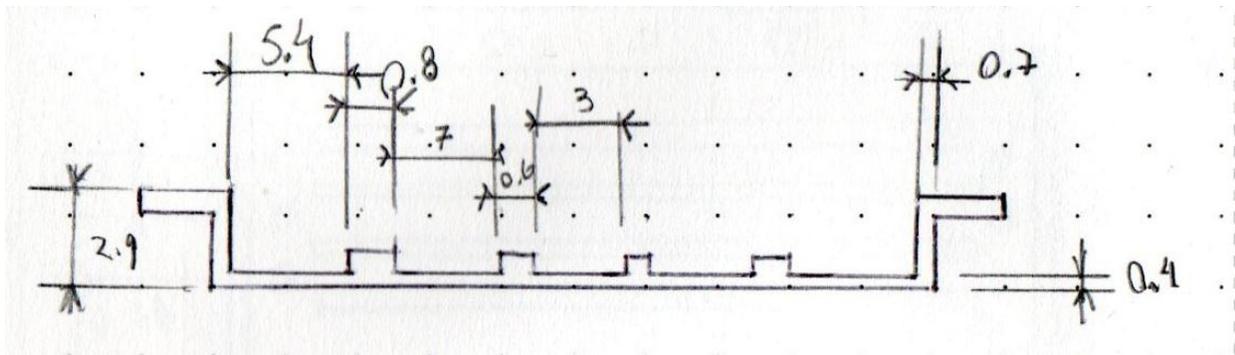


Figura 35. Corte transversal de la placa interconectora superior.

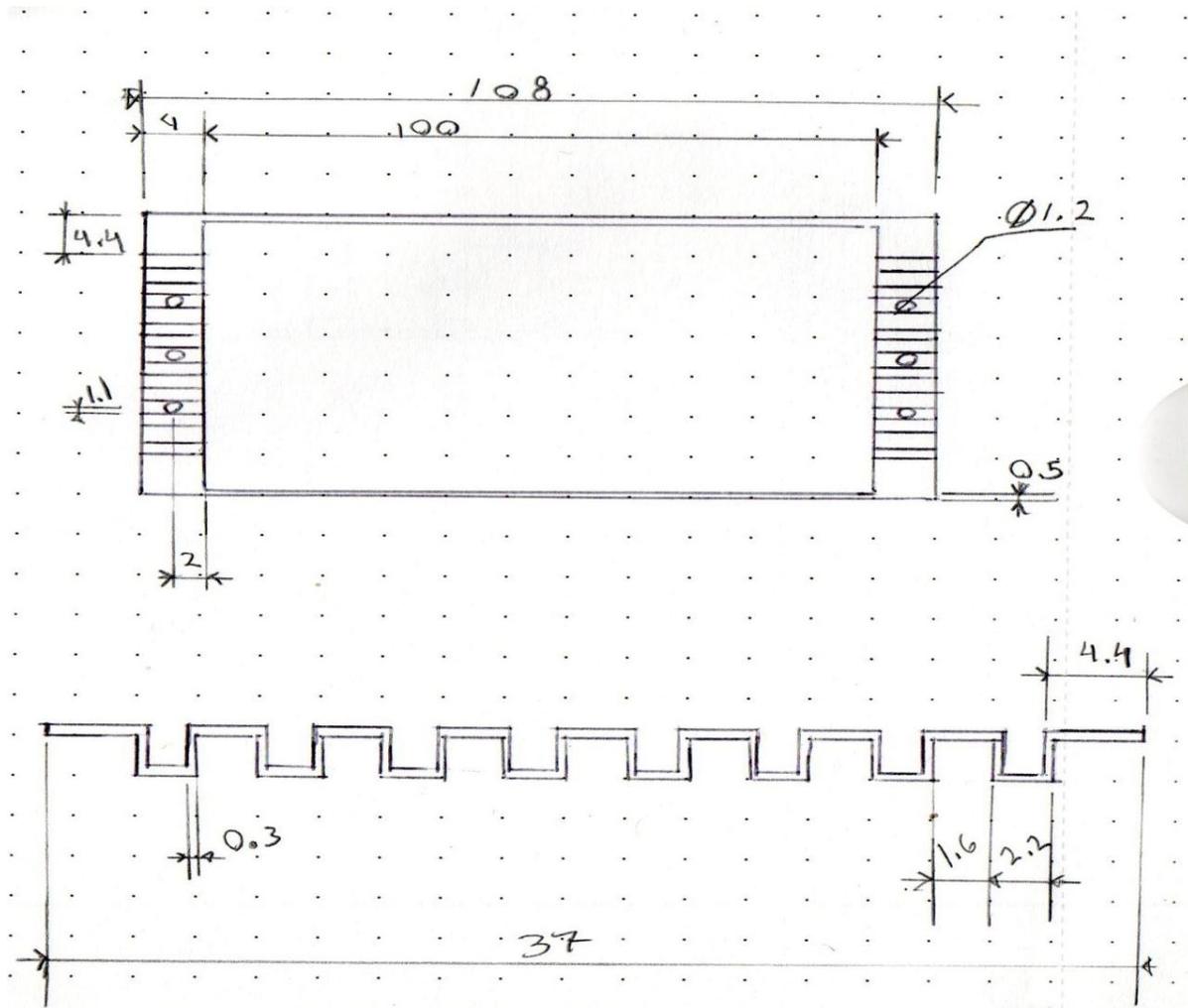


Figura 36. Placa selladora utilizada en la segunda propuesta de diseño.

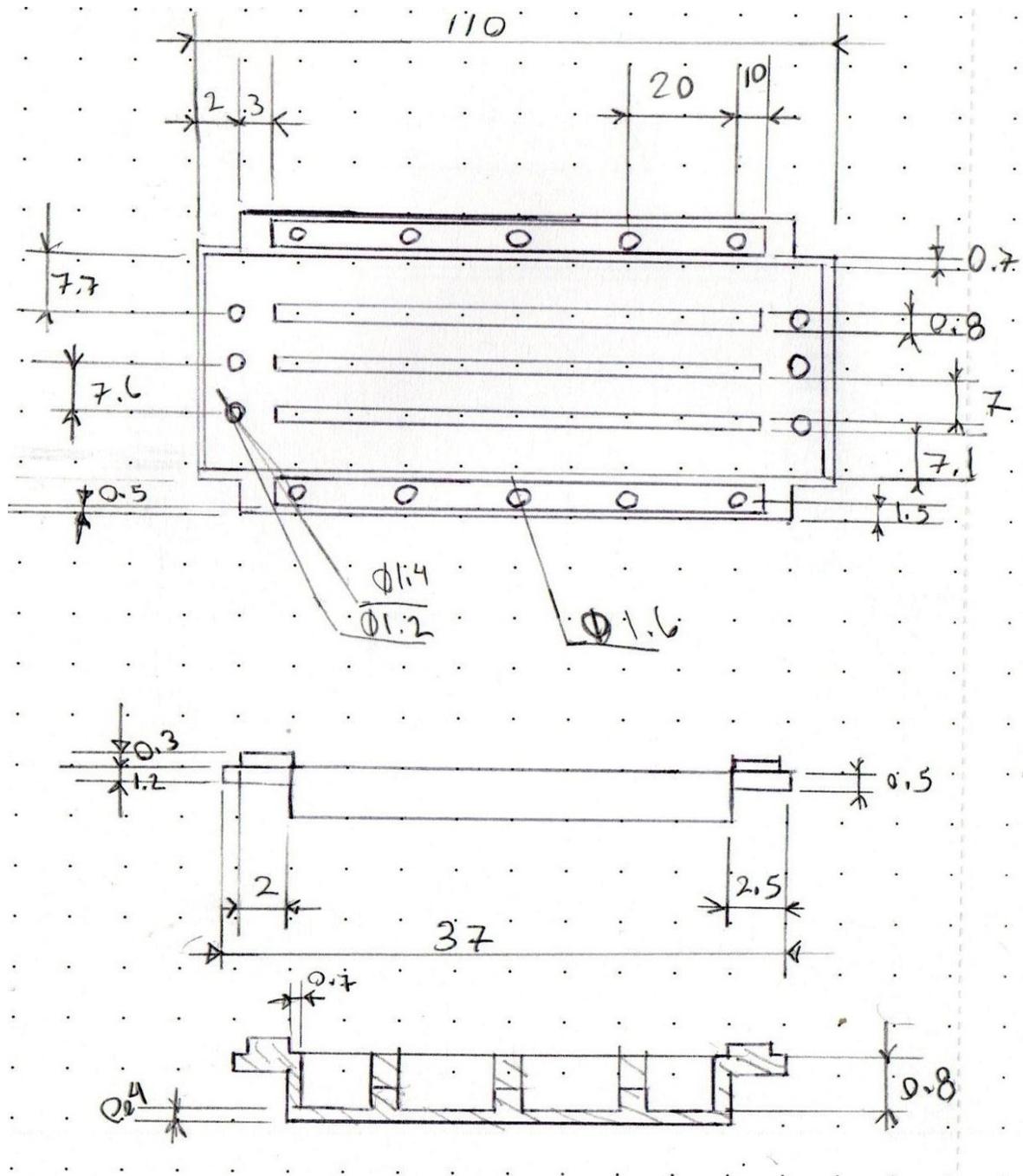


Figura 37. Placa interconectora superior.

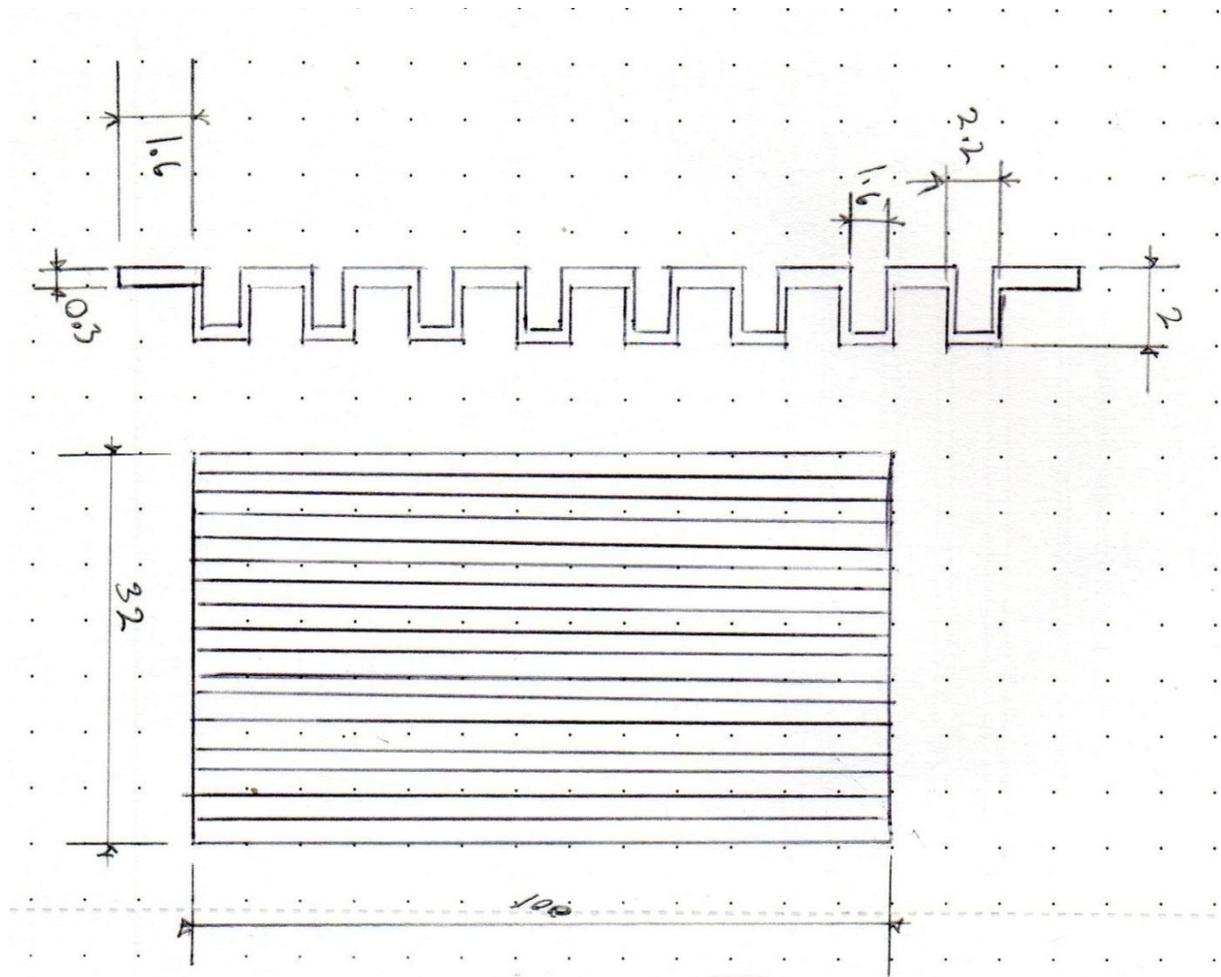


Figura 38. Propuesta de placa PEN para el segundo diseño.

#### Conclusiones de la selección de alternativas

Dentro de esta sección al utilizar la biomimética y TRIZ se lograron obtener dos conceptos finales en los cuales se utilizaron las mejores características de cada herramienta usada.

#### Conclusiones del capítulo

Mediante la aplicación de las diferentes técnicas aplicadas (TRIZ y biomimética) se encontraron las siguientes ideas:

- Superficies rugosas
- Cambio de forma en los canales de cuadrada a circular
- Cambio de forma de la placa PEN
- Aumento en la cantidad de entrada de aire y combustible en la celda

Con toda esta información se puede afirmar que aplicando lo anterior es posible mejorar aspectos como la transferencia de calor, entrada de combustible y aire lo cual se verá reflejado en la eficiencia de la celda así como en las reacciones electroquímicas que se den a cabo.

·

·

## Capítulo 4.

### Análisis de resultados.

En esta sección se muestra el análisis hecho a la celda plana más usual y a las propuestas hechas anteriormente. No se pretende realizar una simulación a detalle ya que ello representaría realizar pruebas físicas a materiales propios de las celdas además de que se necesitaría tener un conocimiento más detallado en el área química, ambos factores se verían reflejados en tiempo y costos. Por el alcance de este trabajo no se realizará un comparativo entre los resultados obtenidos del software ni los datos que puedan ser proporcionados por la celda física. Las pruebas en una celda real se plantean como un trabajo a futuro debido a que los materiales necesarios para realizar solo son proporcionados a grupos empresariales.

Adicional al objetivo de este capítulo se mostraran los planos de fabricación y ensamble de las propuestas. Dentro de esta sección para la primera propuesta uno de sus planos no se mostrara debido a que tanto el tesista como el tutor se reservan el derecho de confidencialidad por lo que si se requiere este archivo estará a su disposición con cualquiera de estas dos personas mencionadas.

El análisis se realizara mediante el software COMSOL y las variables necesarias para su realización se presentan en la siguiente tabla, al obtener los resultados se hará un comparativo y ver cual opción puede presentar una mayor eficiencia al realizarse de manera física.

En base a los modelos propuestos, figuras 39-41, los diseños que serán utilizados para el análisis en el software quedan mostrados en la figura. Es necesario mencionar que debido a que solo se examinará la transferencia de calor así como su disipación se utilizará la parte central de la celda, en este caso se omitirán los aditamentos tales como los tornillos, tuercas, etc.

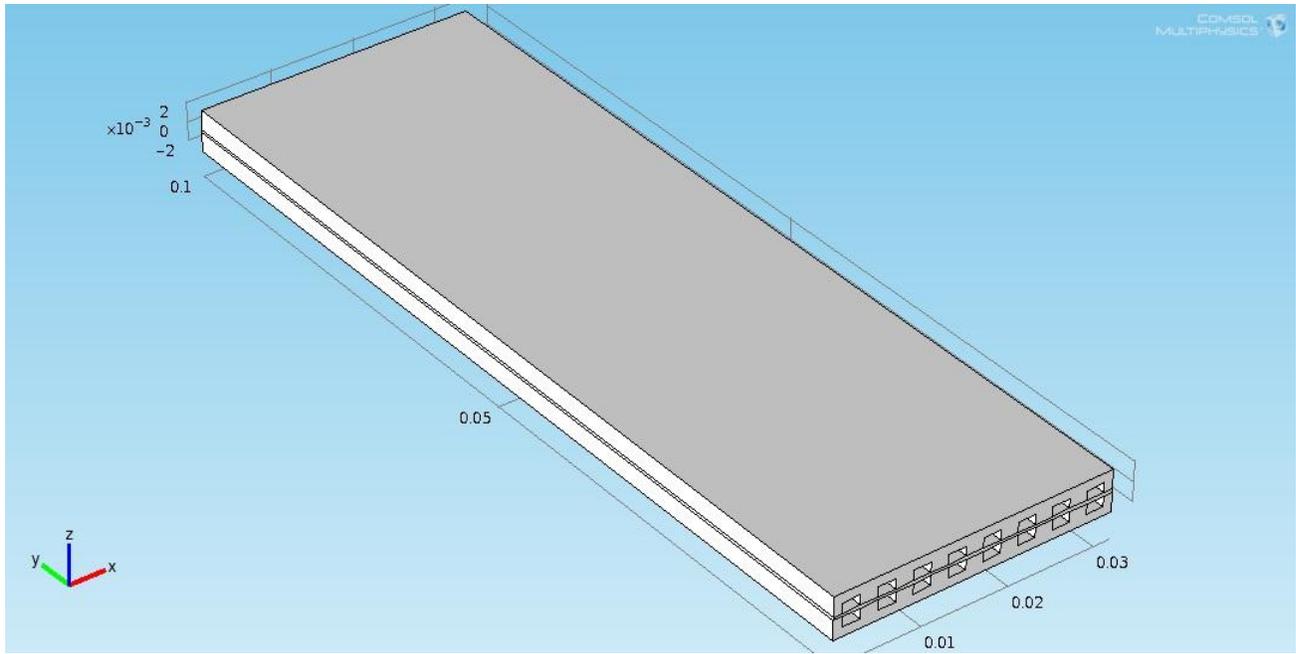


Figura 39. Celda de combustible plana, diseño habitual.

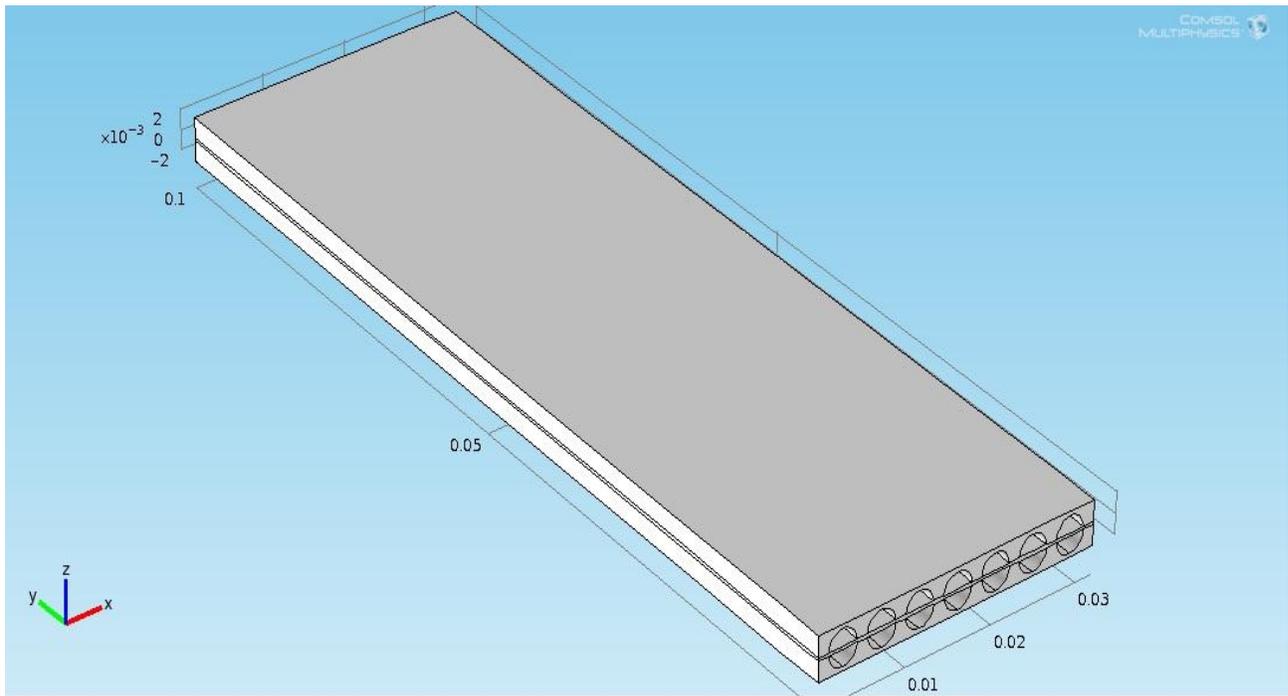


Figura 40. Primer propuesta de celda de combustible con canales semicirculares.

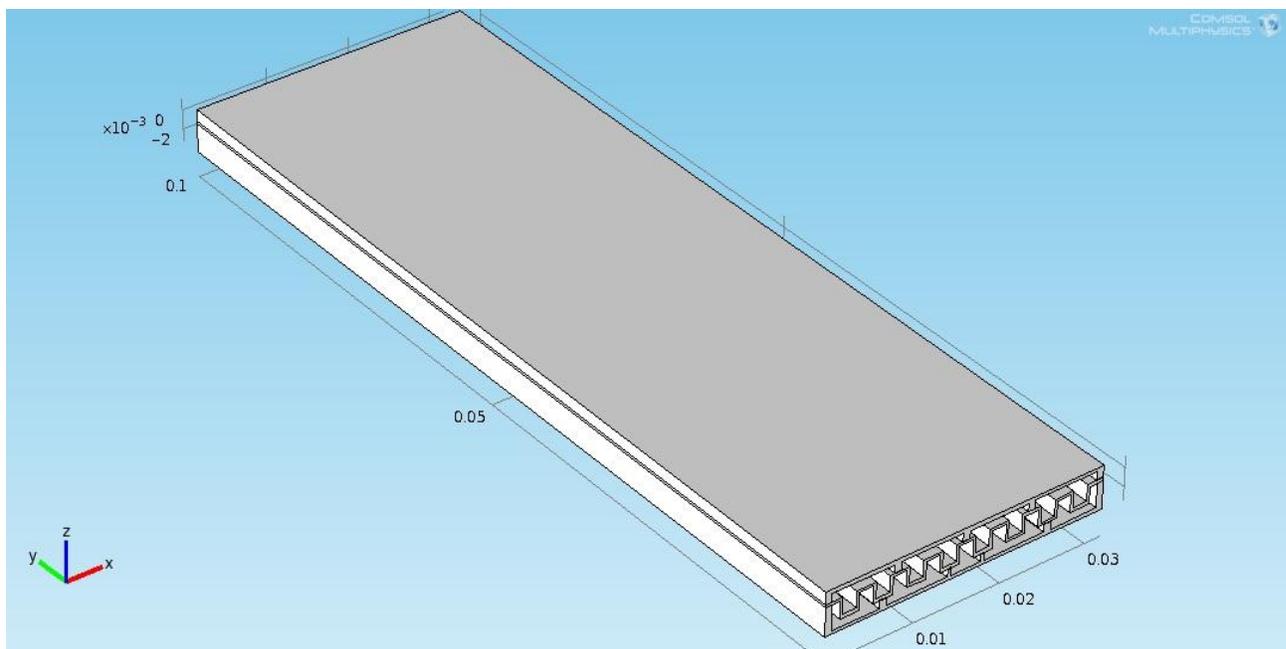


Figura 41. Segunda propuesta de celda de combustible utilizando una placa PEN dentada.

Los materiales utilizados y las condiciones de trabajo son las siguientes, se menciona que la placa PEN (positivo-electrolito-negativo) en este caso será representada por un material. Con esta consideración se busca evitar problemas de mallado debido al espesor milimétrico del cátodo además de que los materiales tienen propiedades básicas muy similares, tabla 12.

Tabla 12. Propiedades de los materiales utilizados para la simulación.

Parte de la celda	Material	Propiedades necesarias
Placa PEN	52NiO-YSZ	Conductividad térmica: 2 [W/(m*K)] Densidad: 6100 [kg/m <sup>3</sup> ] Capacidad calorífica a presión cte: 590 [J/(Kg*K)] Tempref: 1273.15 [K]
Placas interconectoras	La <sub>0.9</sub> Sr <sub>0.1</sub> CrO <sub>3</sub>	Conductividad térmica: 2 [W/(m*K)] Densidad: 4300 [kg/m <sup>3</sup> ] Capacidad calorífica a presión cte: 550 [J/(Kg*K)] Tempref: 1273.15 [K]

Mediante la Tempref (temperatura de referencia de trabajo) y que conociendo está el software puede determinar otras propiedades necesarias para el análisis.

Los resultados para cada uno de los casos se muestran en la siguiente tabla al igual que se realiza una comparación entre ellos para observar los efectos de utilizar diferentes canales y geometrías, figuras 42-50 y tabla 13.

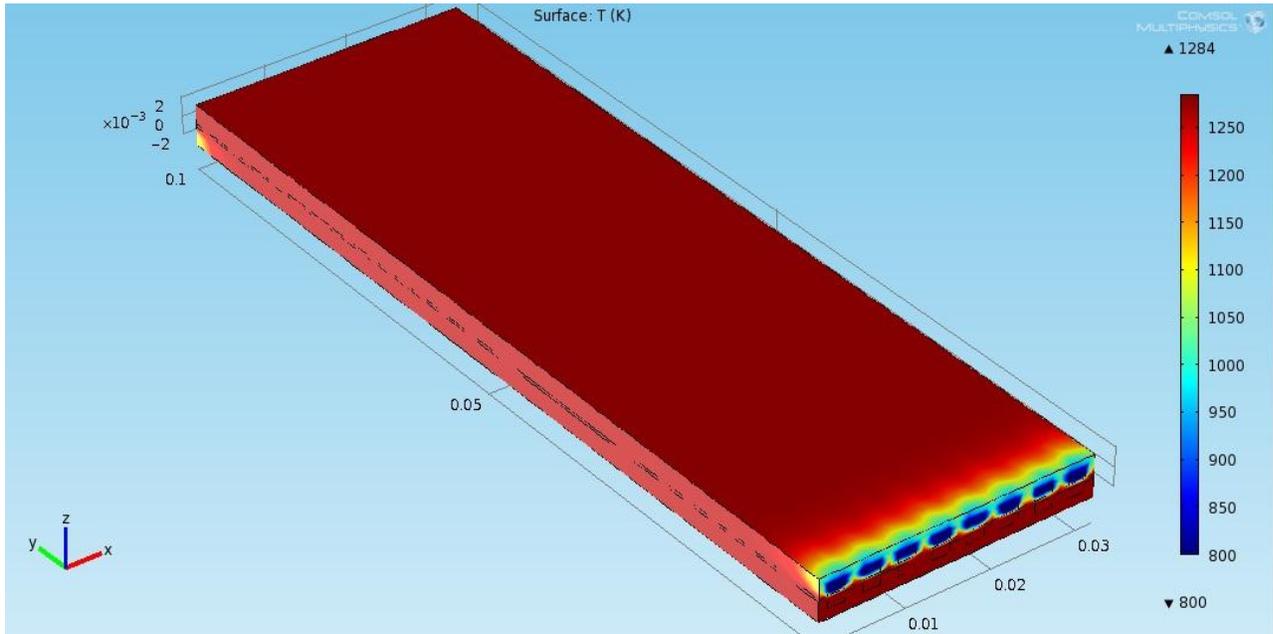
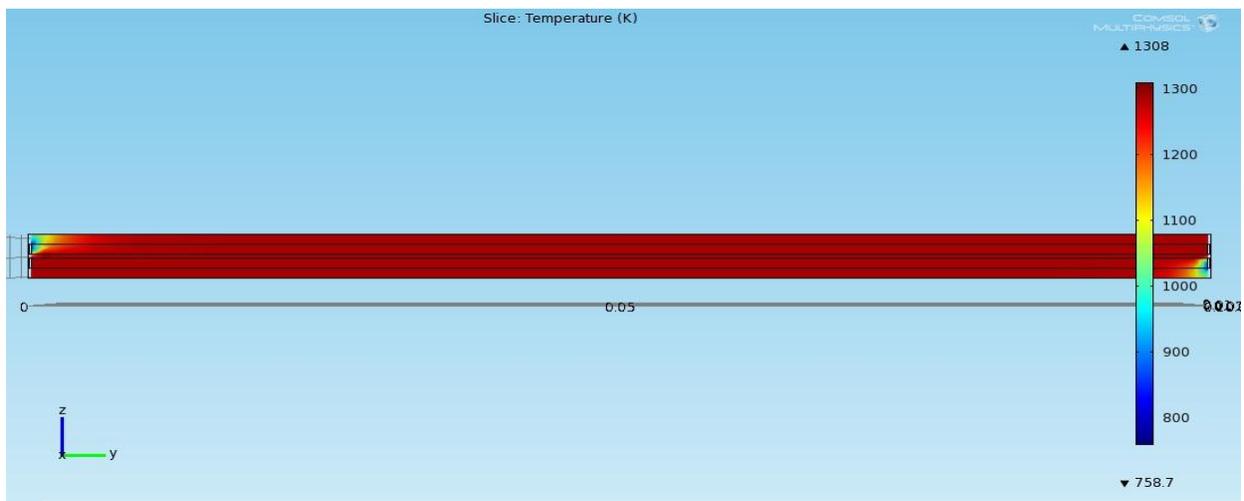


Figura 42. Simulación de la disipación de calor mediante COMSOL en una celda plana convencional.



Figuras 43. Corte de la celda en el plano YZ.

Al analizar el perfil de velocidades se encuentra que para el combustible no hay una disipación de calor notable a comparación del oxidante. Para el aire se observa que posee una mayor velocidad la disipación de calor en la entrada es más notorio aunque conforme pasa a través de los canales se concluye que la mayor velocidad, representada por las flechas mas grandes y que van derecha a izquierda, se da por el centro de los orificios.

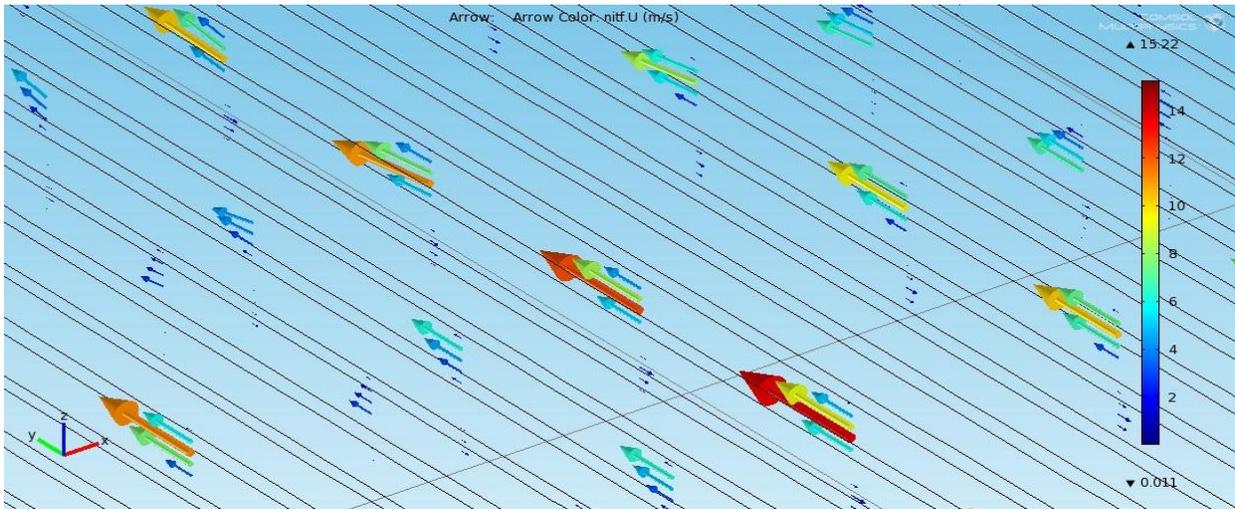


Figura 44. Perfil de velocidades del combustible y del aire en los canales de la celda

En este estudio se aplicó la primera propuesta hecha en el cual la principal característica son los canales medio circulares. Un punto importante es el hecho de aumentar la disipación del calor del oxidante en la entrada.

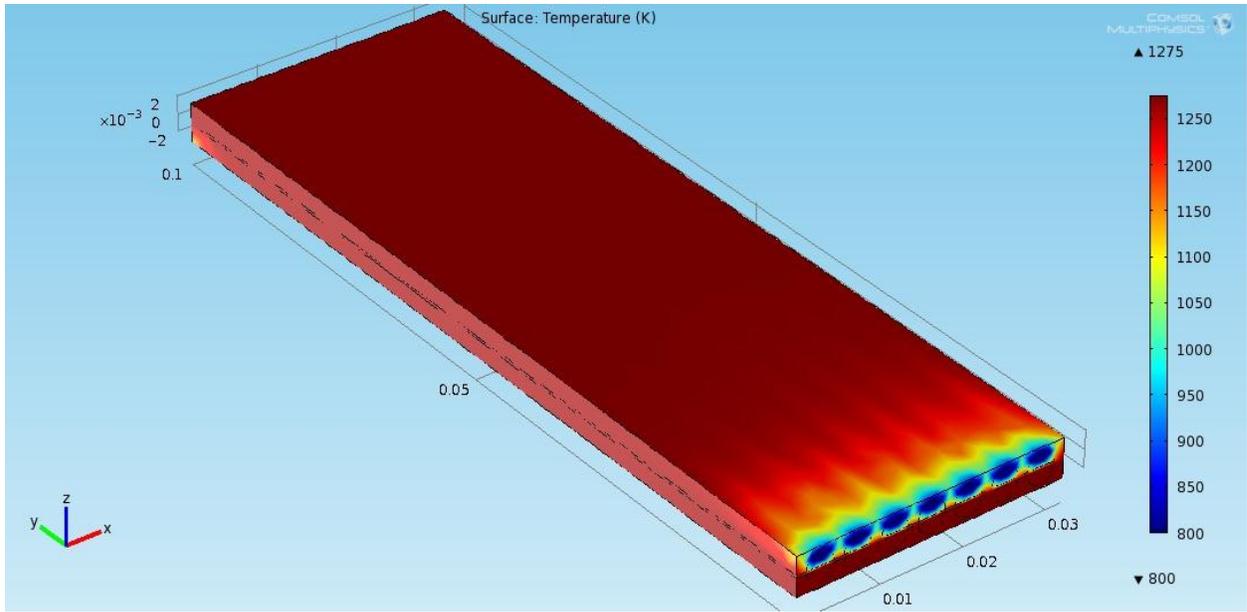
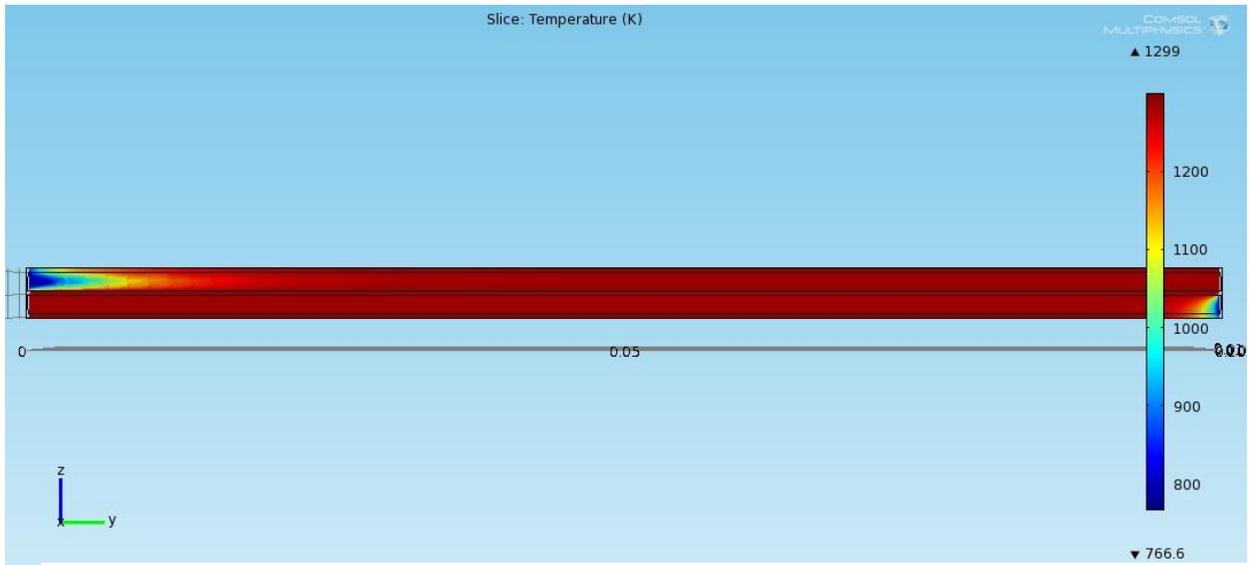


Figura 45. Simulación de la disipación de calor mediante COMSOL en una celda plana con canales semicirculares



Figuras 46. Corte de la celda en el plano YZ.

El perfil de velocidad que presento tanto el combustible como el oxidante fue que ambos tuvieron el valor mas alto en el centro del canal. Es necesario recordar que ambos fluidos presentan una disminucion en su perfil cuando se encuentra cercano a las paredes provocado por la fricción.

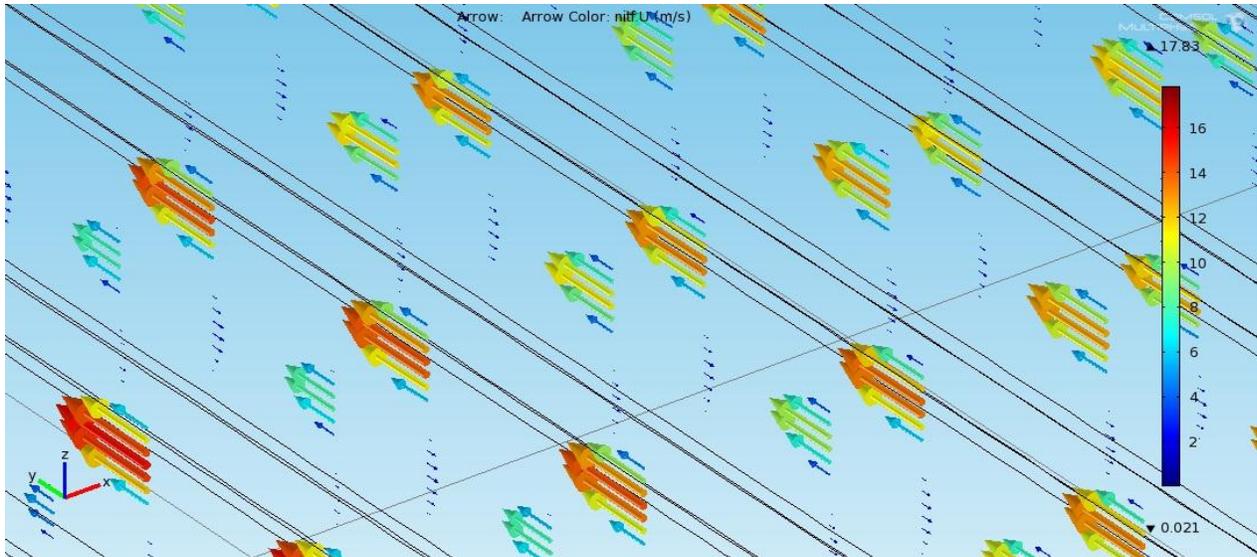


Figura 47. Perfil de velocidades del combustible y del aire en los canales de la celda

Para este caso se utilizó la segunda propuesta en la que se aplicaba una placa dentada y unos canales que permitían una mayor cantidad de combustible y oxidante. La disipación de calor fue mucho mayor para el oxígeno en la entrada en este caso que en los anteriores.

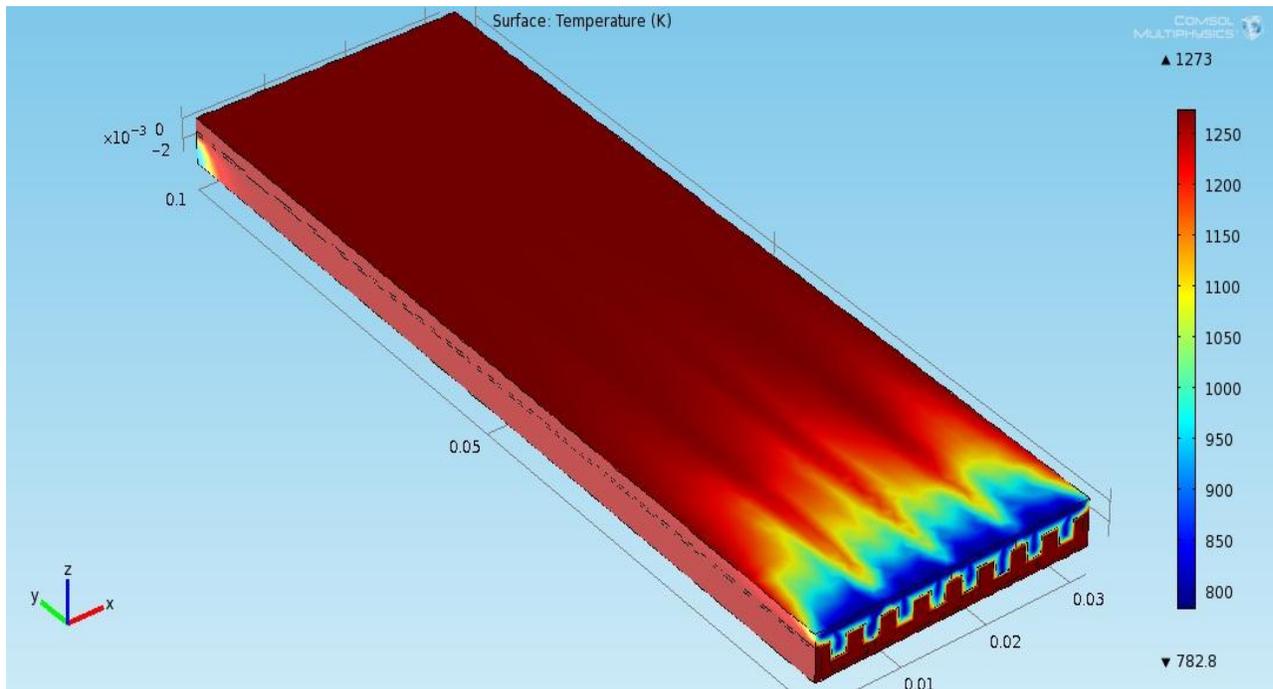
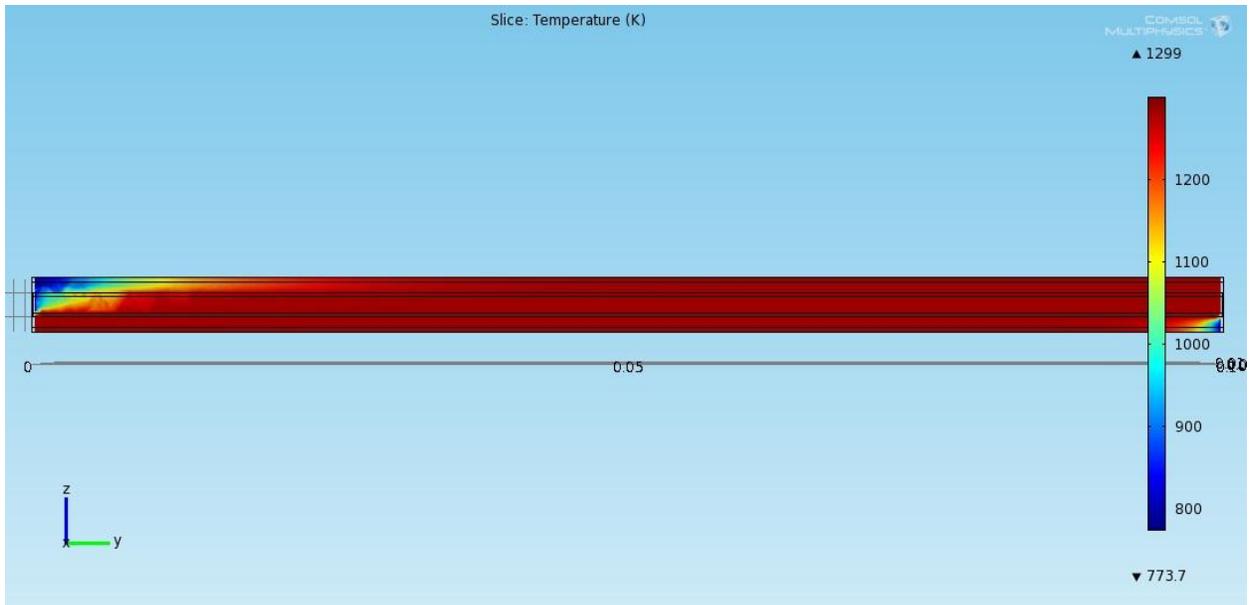


Figura 48. Simulación de la disipación de calor mediante COMSOL en una celda plana con placa PEN dentada.



Figuras 49. Corte de la celda en el plano YZ.

El perfil obtenido mostró que hubo un flujo mas uniforme además de que la geometría permitía un aumento en la velocidad de ambos fluidos. Un punto importante a mencionar es que el uso de canales con diferentes dimensiones favoreció las propiedades de los flujos.

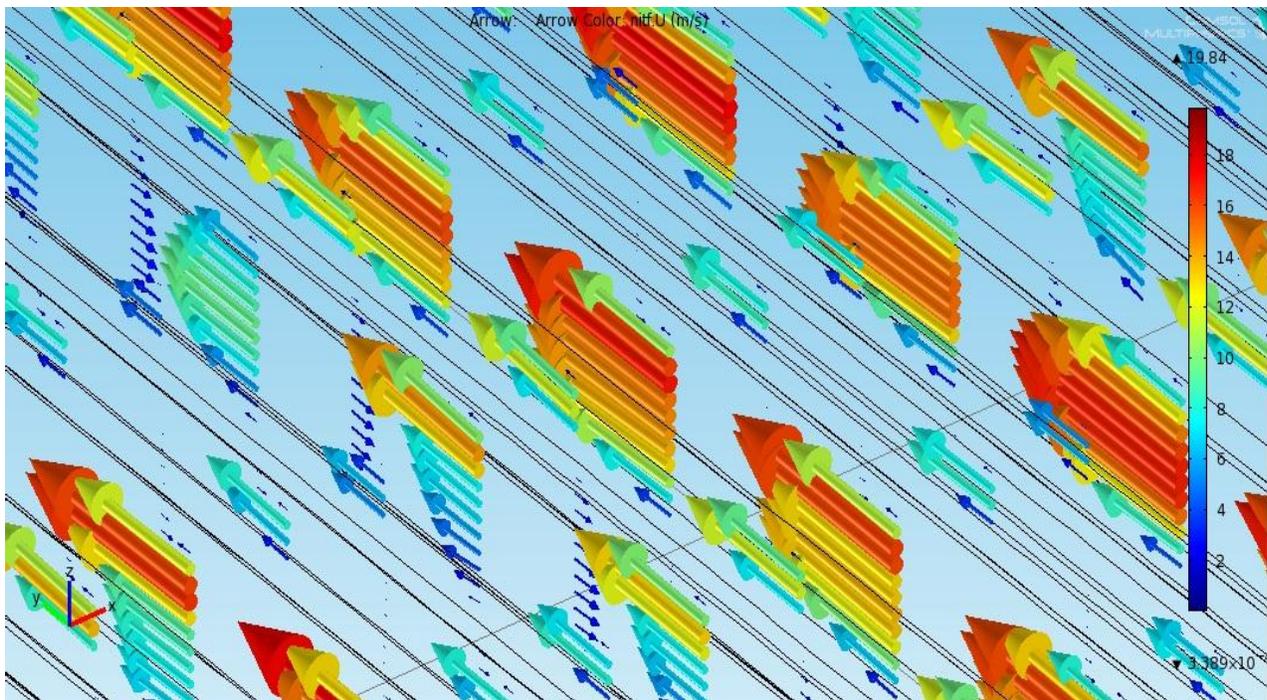


Figura 50. Perfil de velocidades del combustible y del aire en los canales de la celda

Tabla 13. Resultados obtenidos de la simulación de las propuestas de las celdas de combustible.

Tipo de celda	Características obtenidas del análisis	Comentario
Celda plana	<p>La disipación del calor se da solo en la entrada de la celda para ambos flujos.</p> <p>Se observa que el perfil de velocidades se mantiene a una velocidad promedio, solo en el centro aumenta hasta casi los 12 m/s.</p>	Tomando en cuenta los resultados podemos suponer que las reacciones tienen un bajo índice de reacción.
Celda con canales semicirculares	<p>La disipación de calor aumento hasta un <math>\frac{1}{4}</math> a lo largo de la celda.</p> <p>Dentro del perfil de velocidad se observa que el aumento de esta característica se da alrededor del centro de los canales mejorando el flujo.</p>	A comparación del primer modelo mejoro las características por lo que se espera que aumente el índice de reacción.
Celda con placa PEN dentada	<p>Este caso muestra que los efectos de la disipación del calor se dan hasta la mitad de la celda.</p> <p>En el perfil de velocidad se observa que debido a la variación de espesor en los canales influye en la velocidad que mantienen ambos flujos.</p>	Este fue el diseño que mejoro el flujo del aire y del combustible por lo que se espera que el índice de reacción aumente notablemente en comparación del modelo de referencia.

Los materiales que fueron seleccionados pertenecen a materiales cerámicos que cuentan con una rugosidad superficial propia, para este trabajo lo que se buscaba era aumentar esta propiedad pero debido a ciertas limitaciones en el uso del COMSOL no fue posible implementarlo. Lo que se considera es que los resultados obtenidos pueden ser mejorados y esto se podrá comprobar de manera física por lo que se posterga y se incluye para trabajo a futuro.

#### Conclusión del capítulo

Se realizó una simulación con el objeto de adquirir conocimientos básicos acerca de las celdas de combustible plana en su forma más básica. Los resultados varían de los reales y de los mostrados en artículos debido a la falta de datos que se obtienen mediante pruebas físicas a los materiales.

Mediante el análisis de disipación que fue realizado a los tres tipos de celdas bajo las mismas condiciones se observó que cambiar el tipo de canal utilizado y la geometría de la placa PEN mejoro el tipo de flujo y en suposición el índice de reacción.

Gracias a la utilización de COMSOL fue posible evaluar cada uno de los modelos presentados con lo cual se evaluó de una manera rápida.

Un punto que se tomó en cuenta y que no se determinó fue el sellado de la celda aunque se mencionó en un principio para este caso solo se asumirá que mediante el uso de piezas que encajan de manera justa se logra tener un mínimo de fugas o filtraciones.

## Capítulo 5.

### Conclusiones.

Como capítulo final se presentan las conclusiones obtenidas de este trabajo en el cual se buscó identificar y resaltar los puntos físicos que pueden ser considerados para mejorar mediante metodologías y herramientas de diseño.

En la búsqueda de la información se encontraron diferentes fuentes que mostraban trabajos enfocados ya sea en el área química (en su mayoría) o en la parte física. Por esta razón se optó por tomar resultados obtenidos en esta primera área y a partir de ahí trabajar en la propuesta de diseños que fueran capaces de mejorar la disipación de calor, la entrada de combustible y oxidante.

Sin duda los resultados obtenidos permitirán que de forma posterior se realicen modelos físicos en los cuales se han considerado las formas de los canales tanto para el combustible como para el oxidante, el aumento de la disipación de calor en una celda que beneficiará a la pila (conjunto de celdas).

Hablando más a detalle los puntos más importantes en esta investigación se presentan a continuación

No fue posible determinar un valor numérico de las celdas propuestas debido a que es necesario conocer el funcionamiento de los materiales en las reacciones electroquímicas y esto se logra haciendo pruebas en laboratorio. La gran desventaja que se presentó en la búsqueda de información con proveedores fue que los datos que tenían eran celosamente guardados y solo se compartía con empresas con las que tenían tratos directos. Este problema además de presentarse comercialmente también se notó en los artículos donde surgía el inconveniente de no mostrar en su totalidad las propiedades aplicadas para los diferentes análisis.

Para mejorar la eficiencia de la celda de combustible es necesario hacer cambios de manera física (nuevos materiales, rediseño en las geometrías conocidas así como el uso de un mayor uso de simulaciones virtuales antes de hacerlo de manera real) y química, no solo una de ellas. En este caso al emplear un software multidisciplinario como lo es COMSOL se mejoran las pruebas hechas debido a que no hay necesidad de hacerlos físicamente en un principio.

Mediante la aplicación de la TRIZ y biomimética se encontraron puntos importantes aplicables para la mejora en el rediseño de la celda de combustible. De la primera se observó que la búsqueda de soluciones se centró en el problema buscando la opción más conveniente a comparación de la biomimética que mostró varias soluciones a diferentes escalas y tipos de ambientes.

La falta de un trabajo multidisciplinario representó un área de oportunidad necesaria para aumentar la eficiencia de las celdas de combustible, por eso se propone como punto primordial para trabajos a futuros. La falta de información e integrantes enfocados en áreas de química y materiales se tradujo en tiempo mal empleado que pudo ser aprovechado para realizar otras actividades.

En caso de que este proyecto sea desarrollado a detalle se avistan grandes oportunidades para llegar a encontrar un diseño eficiente, sin embargo, hablando de la experiencia adquirida podemos decir que siempre es mucho mejor aplicar soluciones a problemas similares combinándolo con ideas propias para así encontrar un producto innovador.

## **Anexo A: Reacciones**

## Modelado de una celda de combustible tipo SOFC.

Antes de realizar un modelado de una celda de combustible es necesario analizar varios parámetros que serán de gran utilidad al momento de utilizar las ecuaciones matemáticas, figura 1a.

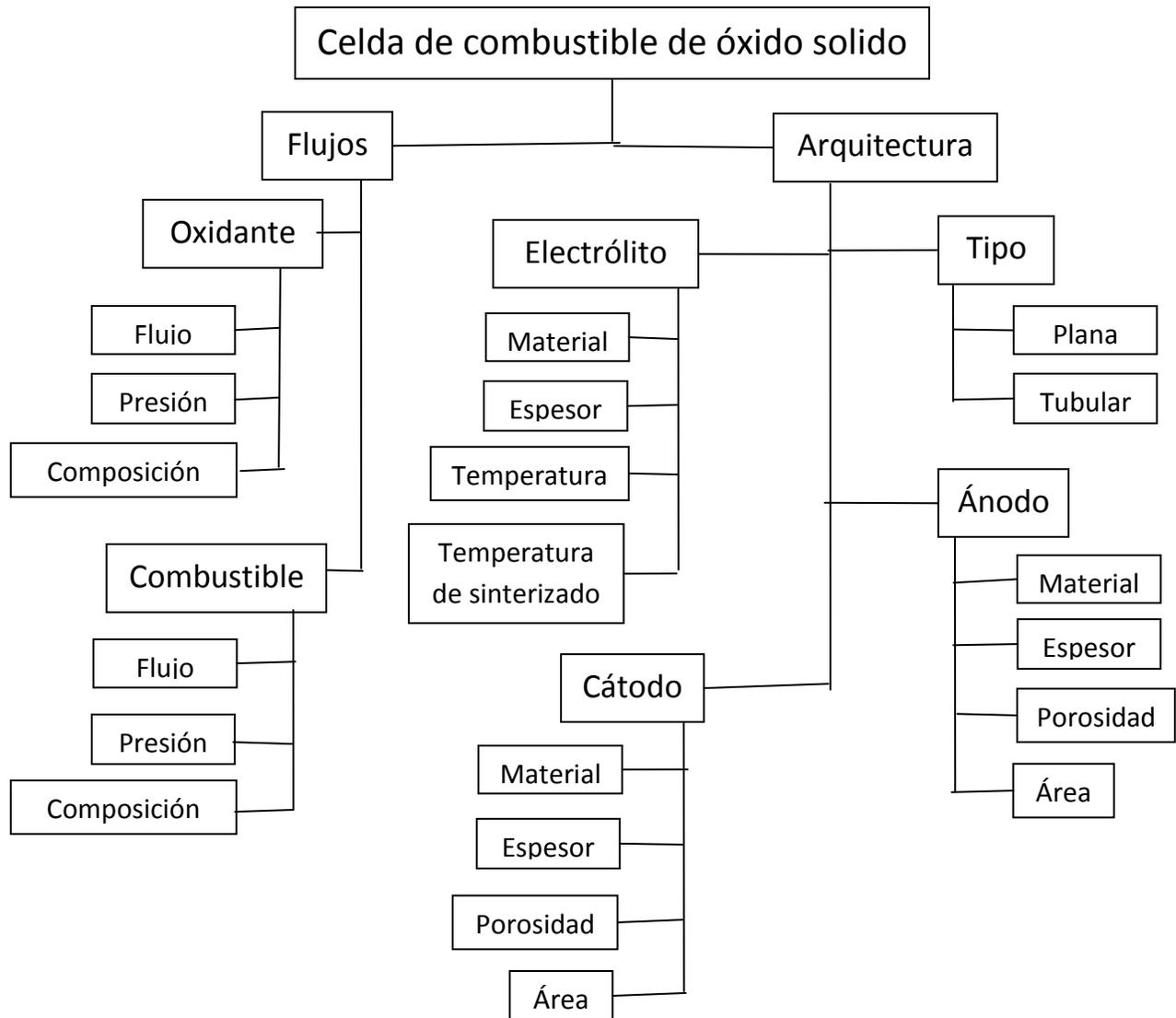


Figura 1a. Diagrama de las partes que componen una celda y las principales variables para la selección.

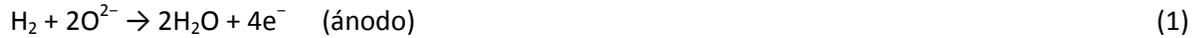
Antes de que una celda pueda producir energía eléctrica debe pasar por una serie de pasos, cada uno ha sido investigado y desarrollado desde un punto de vista matemático lo que permite plantear diferentes soluciones con el simple hecho de variar alguno o todos los parámetros. Los pasos mencionados son:

1. Transporte del combustible y del aire hacia la celda de combustible.
2. Reacción electroquímica.
3. Conducción iónica a través del electrolito y conducción eléctrica a través de un circuito externo.

#### 4. Retiro de productos finales de la celda de combustible.

En el primer punto se trata de suministrar algún tipo de combustible, en la mayoría de los casos para este tipo de celda se utiliza hidrógeno pero debido a la versatilidad de esta tecnología es posible utilizar monóxido de carbono, hidrocarburos o metano reformado. Las ecuaciones que se desarrollan entre los diferentes combustibles, el oxígeno y el cátodo y ánodo <sup>[28]</sup>.

Utilizando hidrógeno las reacciones electroquímicas quedan de la siguiente forma:



Utilizando monóxido de carbono las ecuaciones quedan de la siguiente forma:



A altas temperaturas, el monóxido de carbono se puede oxidar con agua para formar dióxido de carbono y gas hidrogenado como una reacción de cambio de agua-gas.



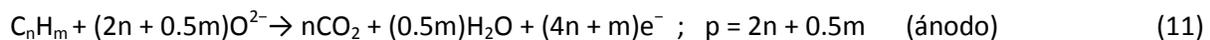
Utilizando metano las reacciones quedan de la siguiente forma:



En ocasiones la reacción de reformado del metano es utilizada en lugar de la reacción de combustión electroquímica directa del metano, usualmente se considera como:



Por último veremos cómo se da la interacción del hidrocarburo como combustible quedando de la siguiente forma:





La reacción del reformado del hidrocarburo es descrita de la siguiente forma:



Como se ha mencionado la función principal de las celdas de combustible es la de generar energía eléctrica. A continuación se muestra el modelado electroquímico desarrollado por Milewski Jaroslaw <sup>[28]</sup>, no se pretende copiar a detalle las ecuaciones pero si mostrar lo más importante.

#### Modelado químico

En una celda de combustible de óxido sólido se calcula un voltaje total cuando hay un voltaje máximo menos las pérdidas que puedan darse debido a la resistencia del electrolito, por activación por polarización y por la concentración de la polarización. Como obtener cada pérdida así como el voltaje total se mostrara con las siguientes ecuaciones. Para obtener el voltaje de la celda se utiliza la siguiente ecuación:

$$E = E_{\text{nernst}} - \eta_{\text{act}} - \eta_{\text{ohm}} - \eta_{\text{con}} \quad (15)$$

El circuito es de voltaje abierto y varía en función de las propiedades de la sustancia, tales como la concentración de especies las cuales pueden ser obtenidas de la ecuación de Nernst:

$$E_{\text{nernst}} = E_0 - (RT/2F) * (\rho_{H_2O} / \rho_{H_2} * \rho_{O_2}^{1/2}) \quad (16)$$

Donde

$$E^0 = -\Delta \hat{g}_r^0 / n_e F \quad \text{voltaje reversible en estado estándar} \quad (17)$$

La presión asumida debe ser la misma para los canales del cátodo y el ánodo. El potencial reversible a condiciones estándar es obtenido del cambio en la energía libre de Gibbs en condiciones estándar.

Las pérdidas están relacionadas con la densidad de corriente. La activación del sobrepotencial es definido por una representación de una relación empírica dado por la limitada forma de la ecuación Butler-Volmer.

$$\eta_{\text{ohm}} = \sum R_{\text{ohm}} * j \quad (18)$$

para la última pérdida se asocia con el transporte de los gases en dirección perpendicular a la superficie del electrodo y se escribe de la siguiente forma

$$\eta_{\text{con}} = (RT/nF) * (1 - j/j_0) \quad (19)$$

$$\eta_{\text{act}} = (RT/n\alpha F) * (j/j_0) \quad (20)$$

Transporte en los canales de gas y en los electrodos.

Dentro de la celda de combustible existen dos fases presentes, gas y sólido. En los canales de combustible y del oxidante el consumo de ambos no afecta las densidades de ambos fluidos. El aire se considera un fluido incompresible, las propiedades son constantes y no hay reacción en los canales ni del oxígeno ni del hidrogeno.

El transporte en los electrodos porosos ocurre tanto en la fase sólida como gaseosa, las ecuaciones gobernantes son incorporadas con las reacciones electroquímicas. En gran parte del análisis de modelos la reacción utilizada se da en fase gaseosa. Con respecto a las ecuaciones de energía incluye generación de calor debido a las reacciones químicas al igual que la ecuación de concentración.

Por tanto las principales ecuaciones son la de conservación de masa <sup>[29]</sup>

$$\delta(\rho\varepsilon)/\delta t + \nabla \cdot (\rho\varepsilon\mathbf{V}) = S_{m,i} \quad (21)$$

donde  $S_m$  representa las fuentes adicionales de masa

la ecuación de conservación de momento

$$\delta(\rho\varepsilon\mathbf{V})/\delta t + \nabla \cdot (\rho\varepsilon\mathbf{V}\mathbf{V}) = -\varepsilon\nabla p + \nabla \cdot (\varepsilon\boldsymbol{\zeta}) + \varepsilon 2\mu\mathbf{V}/\kappa \quad (22)$$

el ultimo término del lado derecho es conocido como la ley de Darcy, la cual cuantifica la viscosidad de arrastre del fluido en un medio poroso.

La ecuación de balance de especie queda como:

$$\delta(\rho\varepsilon c_i)/\delta t + \nabla \cdot (\rho\varepsilon\mathbf{V}c_i) = -\nabla \cdot \boldsymbol{\varepsilon} J_i + S_{s,i} \quad (23)$$

donde el ultimo término del lado derecho representa las fuentes adicionales de especie  $i$  o la relación de la producción o consumo de especies  $i$ . El termino fuente  $S_{s,i}$  en los canales del aire y del combustible son debido a las reacciones electroquímicas en los electrodos es obtenido mediante la ecuación:

$$S_{m,i} = \pm M_{ij}/n_e F \quad (24)$$

El signo en la ecuación es positivo para los productos y negativos para los reactantes.

Para el flujo a bajas velocidades en los electrodos porosos se anticipa que el proceso de transporte es dominado por la difusión. Los electrodos son usualmente hechos de cermets porosos, varios investigadores tiene resuelto el problema de transporte de masa en medios porosos usando una de las tres aproximaciones siguiente:

a) La ley de Fick es el modelo más simple de difusión en diluidos o en sistemas binarios.

$$\hat{J}_i = -\rho_t D_i^{eff} \nabla c_i \quad (25)$$

$$\check{N}_i = -\omega_t D_i^{eff} \nabla X_i \quad (26)$$

Donde  $D_i^{eff}$  es el coeficiente de difusión de especies  $i$  el cual combina la difusión efectiva molecular  $D_{m,i}^{eff}$  y la difusión efectiva de Knudsen  $D_{Kn,i}^{eff}$ .

$$D_i^{eff} = (1/ D_{m,i}^{eff} + 1/ D_{Kn,i}^{eff}) \quad (27)$$

b) El modelo de Stefan-Maxwell es más comúnmente usado en sistemas multicomponentes. El modelo para la mezcla de un gas ideal se representa como:

$$-\omega_t \nabla X_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n (X_j \check{N}_i - X_i \check{N}_j) / D_{ij} \quad (28)$$

c) El modelo del Dusty Gas es una versión extendida de Stefan-Maxwell ya que incorpora la difusión de Knudsen para sistemas multicomponentes, se define como:

$$-\omega_t \nabla X_i = (\check{N}_i / D_{Kn,i}) + \sum_{j=1, j \neq i}^n (X_j \check{N}_i - X_i \check{N}_j) / D_{ij} \quad (29)$$

$$-\omega_t \nabla X_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n (X_j \check{N}_i - X_i \check{N}_j) / \gamma_{ij}^{eff} \quad (30)$$

$\gamma_{ij}^{eff}$  es el coeficiente de difusión efectiva de Hussain y se puede obtener de:

$$\gamma_{ij}^{eff} = (\epsilon / \tau) * ( D_{ij} * D_{Kn,i} / (D_{ij} + D_{Kn,i})) \quad (31)$$

La ecuación de conservación de energía se escribe de la siguiente forma:

$$\delta (p\epsilon e) / \delta t - \epsilon * \delta \rho / \delta t + \nabla \cdot (p\epsilon \mathbf{V}e) = \nabla \cdot \epsilon (-k_{eff} \nabla T) + S_e + S_{rad} \quad (32)$$

introduciendo el término de Dagan  $k_{eff}$  el cual se calcula mediante:

$$k_{eff} = -2k_{solid} + 1 / (\epsilon / (2k_{solid} + k_g) + (1 - \epsilon) / 3k_{solid}) \quad (33)$$

tanto Beale y VanderSteen utilizan su término  $k_{eff}$  el cual se calcula:

$$k_{eff} = \epsilon k_g + (1 - \epsilon) k_{solid} \quad (34)$$

$S_e$  representa el calor generado por una reacción electroquímica, reacciones químicas y el efecto Joule. Utilizan la forma de Beale para representar el calor de Joule se tiene que:

$$S_{e,joule} = (E - V_{ac})j / \delta_e \quad (35)$$

La ecuación de conservación de energía en términos de la temperatura se muestra mediante la siguiente ecuación:

$$\delta (p\epsilon C_p T) / \delta t - \epsilon * \delta \rho / \delta t + \nabla \cdot (p\epsilon \mathbf{V}C_p T) = \nabla \cdot \epsilon (-k_{eff} \nabla T) + S_e + S_{rad} \quad (36)$$

Transporte en el electrolito sólido <sup>[30]</sup>

El electrolito sólido sirve tanto como un aislador electrónico y como un conductor iónico, también aísla a los electrodos del aire y del combustible mientras que permite que los iones del oxígeno pasen a través de él. Por este material no ocurre ninguna transferencia de masa debido a la porosidad que presenta. La

única ecuación a considerar es la de conservación de energía y queda en su forma reducida de la siguiente manera:

$$\nabla \cdot \varepsilon(-k_{\text{eff}}\nabla T) + S_e + S_{\text{rad}} = 0 \quad (37)$$

El transporte de los iones O<sup>-</sup> dentro del electrolito es descrito considerando el transporte de ion a partir de la conservación de carga, quedando de la siguiente manera:

$$\nabla \cdot i = 0 = \nabla \cdot i_{\text{io}} + \nabla \cdot i_{\text{el}} \quad (38)$$

$$-\nabla \cdot i_{\text{io}} = \nabla \cdot i_{\text{el}} \quad (39)$$

y de la ley de Ohm queda:

$$i_{\text{io}} = -\sigma_{\text{io}}^{\text{eff}}\nabla\phi_{\text{io}} \quad (40)$$

$$\nabla \cdot (\nabla\phi_{\text{io}}) = \{ \pm j'_{\text{FC}} / \sigma_{\text{io}}^{\text{eff}} \text{ (en las intercargas), } 0 \text{ (en cualquier otra parte)} \quad (41)$$

Donde  $i_{\text{io}}$  y  $i_{\text{el}}$  son los flujos de carga de los iones y electrones respectivamente, y  $\phi_{\text{io}}$  es el potencial iónico en el electrolito. El signo positivo es para la intercarga cátodo/electrolito y el negativo para el ánodo/electrolito. En las intercargas de los electrolitos la ecuación de simplificada de Butler-Volmer es usada para obtener la densidad de corriente volumétrico,  $j'_{\text{FC}}$ , el cual incorpora una superficie reactiva por unidad de volumen de la estructura del electrodo poroso,  $A_{\text{ac}}$ , quedando:

$$j'_{\text{FC}} = A_{\text{ac}}j_{0,\text{electrodo}}(\omega_i/\omega_i^0)^{\nu_i}\{\exp[\beta n_e F\Delta\phi/RT] - \exp[-(1-\beta)n_e F\Delta\phi/RT]\} \quad (42)$$

$$\Delta\phi = \{ \phi_{\text{io}} - \phi_{\text{el}} = \eta_{\text{act,a}} \text{ (en la intercarga ánodo/electrolito), } \phi_{\text{el}} - \phi_{\text{io}} = \eta_{\text{act,c}} \text{ (en la intercarga cátodo/electrolito)} \} \quad (43)$$

El área superficial reactiva representa una pequeña fracción de la estructura del electrodo el cual es accesible por especies reactantes y este valor es uno de los efectos de la morfología del electrodo que a su vez es fuertemente influenciado por la resistencia del electrodo.  $j'_{\text{FC}}$  puede ser utilizado para calcular el termino de fuente en la ecuación de balance de especie mediante la sustitución de este en la densidad de corriente,  $j$ . Por otra parte Beale menciona que el potencial de Nerst es considerado como la suma de las diferencias de potenciales a través del ánodo  $\Delta\phi_a$  y del cátodo  $\Delta\phi_c$  obteniendo:

$$E = \Delta\phi_a + \Delta\phi_c \quad (44)$$

$$\Delta\phi_c = \Delta\phi_c^0 - RT_c/4F(\ln p_c + \ln X_{\text{O}_2}) - \eta_{\text{act,c}} \quad (45)$$

$$\Delta\phi_a = \Delta\phi_a^0 - RT_a/2F(\ln X_{\text{H}_2} + \ln X_{\text{H}_2\text{O}}) - \eta_{\text{act,a}} \quad (46)$$

Donde  $\Delta\phi_a^0$  y  $\Delta\phi_c^0$  son las diferencia de potencial arbitraria a través del ánodo y del cátodo,  $T_a$  y  $T_c$  las temperaturas de lado de cada electrodo respectivamente. Se indica también que si los electrodos son lo suficientemente delgados ambas diferencias de potenciales pueden ser aplicados como fuentes de igual

y opuesta magnitud a ambos lados de la frontera del electrodo, por lo tanto las fuentes de cualquier parte en el electrolito y en el interconector son cero.

Transporte en el interconector<sup>[30]</sup>

El interconector es asumido como un material plano permeable y es usado para coleccionar la corriente de la SOFC, solo se considera la ecuación de balance de energía quedando reducida de la siguiente forma:

$$\nabla \cdot (-k_{int} \nabla T) + S_e + S_{rad} = 0 \quad (47)$$

El transporte del electrón es considerado de la conservación de carga en las intercaras entre los interconectores y los electrodos:

$$\nabla i_{el,electrode} = -\nabla i_{el,interconnect} \quad (48)$$

## **Anexo b: planos de fabricación**

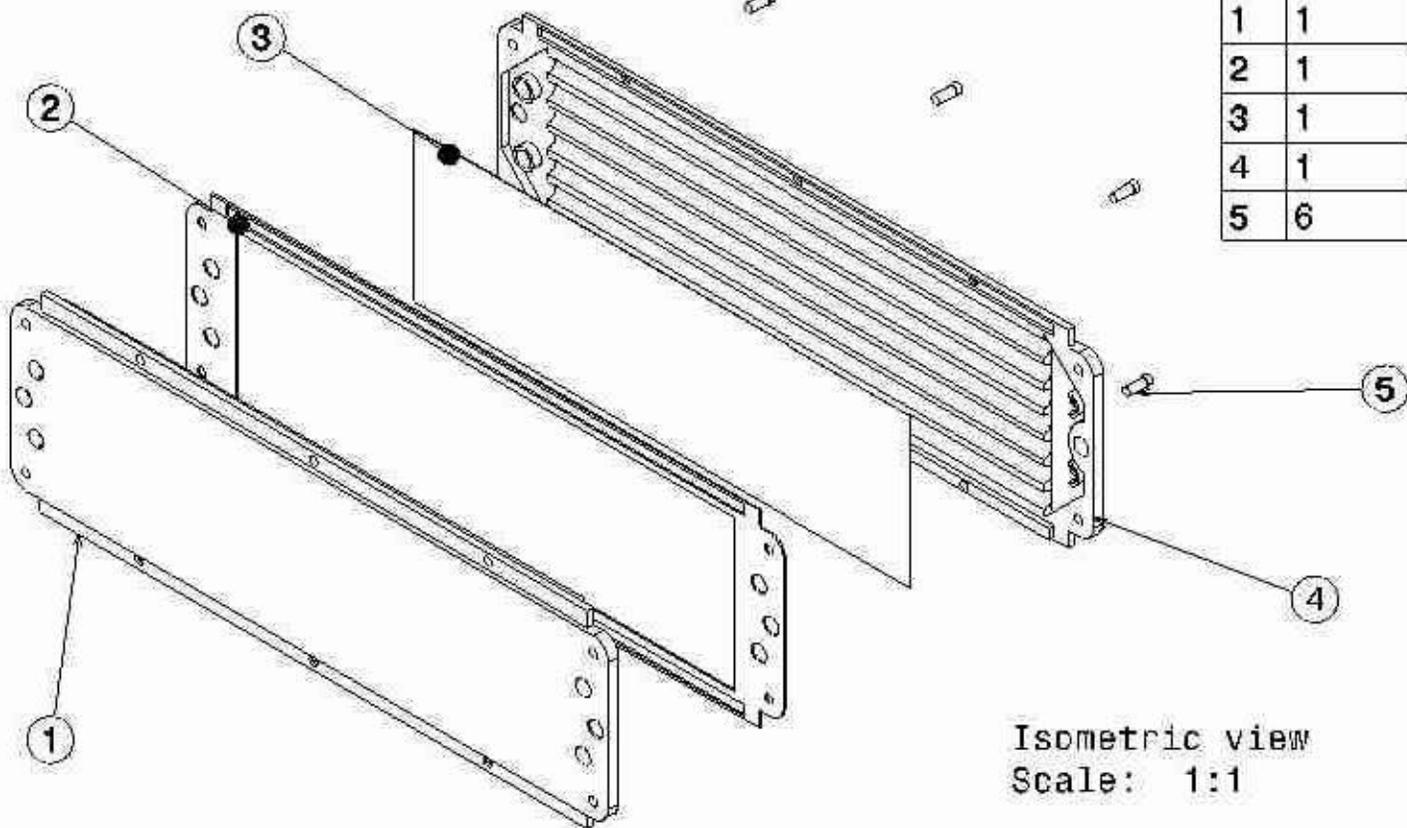
D

C

B

A

N.	Cant.	Nombre	Descr.
1	1	Inter. i	LaSrCrO3
2	1	Sujetador	LaSrCrO3
3	1	PEN	52NiOYSZ
4	1	Inter. s.	LaSrCrO3
5	6	Tornillos	1/16UNF



Isometric view  
Scale: 1:1

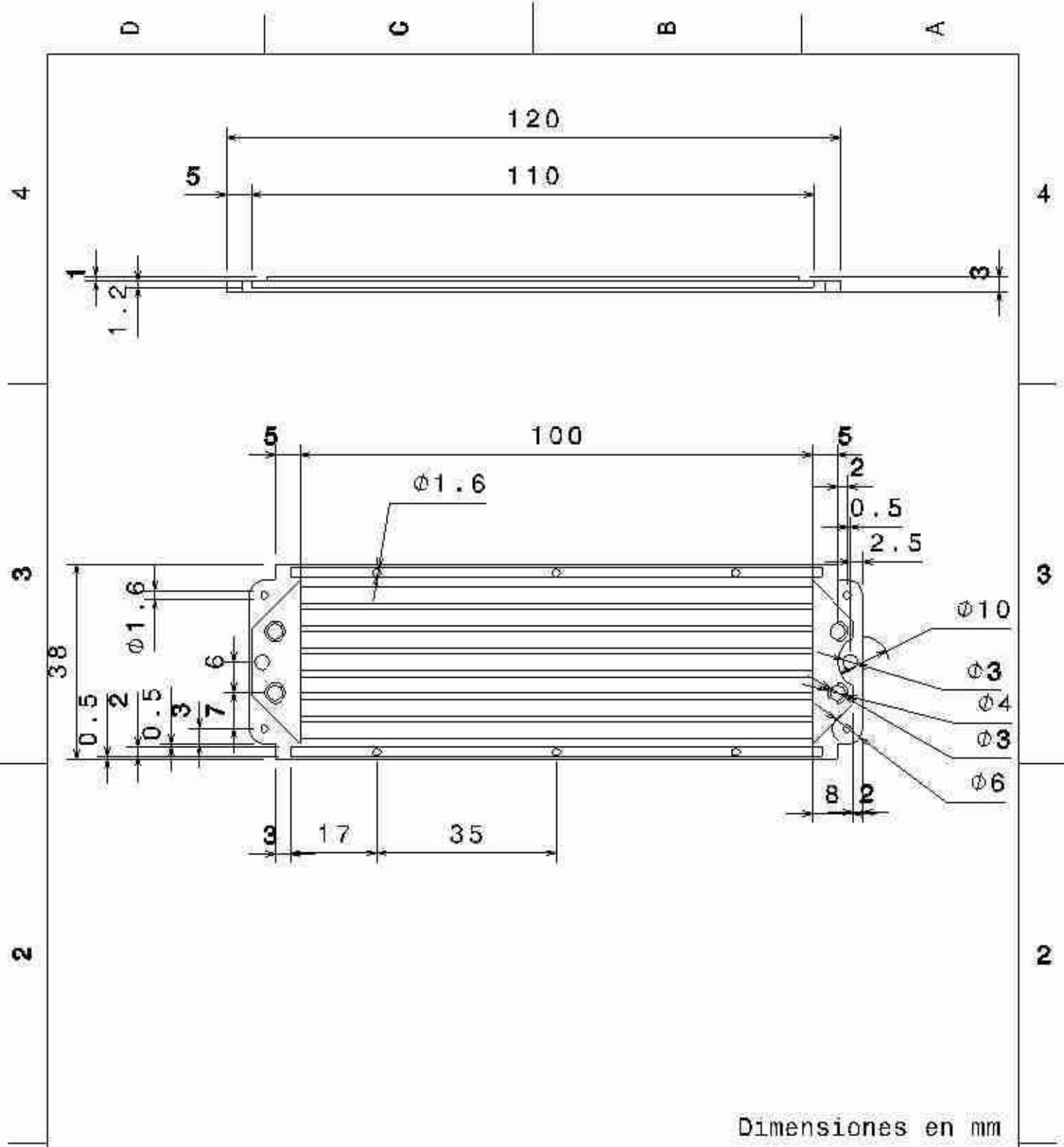
Dimensiones en mm

Ingeniería UNAM		Posgrado Ingeniería UNAM		
DRAWN BY Israel C. M.		DRAWING TITLE Celda de combustible propuesta 1		
DATE 10/18/2011	CHECKED BY XXX	DATE XXX	SIZE A4	DRAWING NUMBER ensamblefinal1
DESIGNED BY Israel C. M.	DATE XXX	SCALE 1:1	REV X	REV X
			SHEET 1/5	

100

D

A



Dimensiones en mm

Ingeniería UNAM		Posgrado Ingeniería UNAM			
DRAWN BY		DRAWING TITLE			
Israel C. M.	DATE 10:19/2011	Interconector propuesta 1 (1/3)			
CHECKED BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER	REV	
XXX	XXX	A4	Canal 1	101 X	
DESIGNED BY	DATE	SCALE	Mat:	☉	☐
Israel C. M.	XXX	1:1	LaSnCr03	SHEET	2/5

D

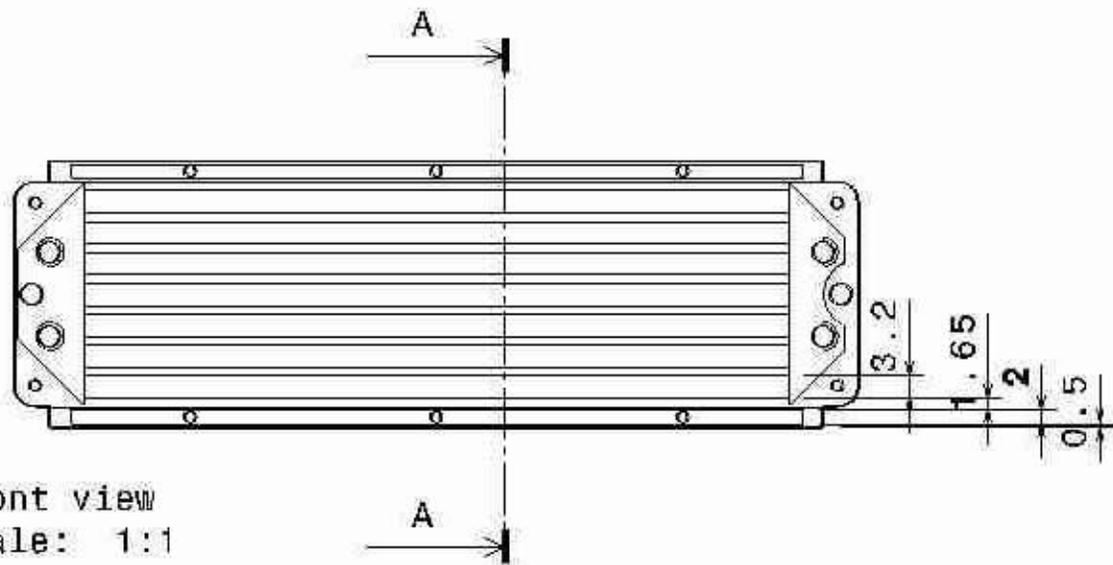
A

D

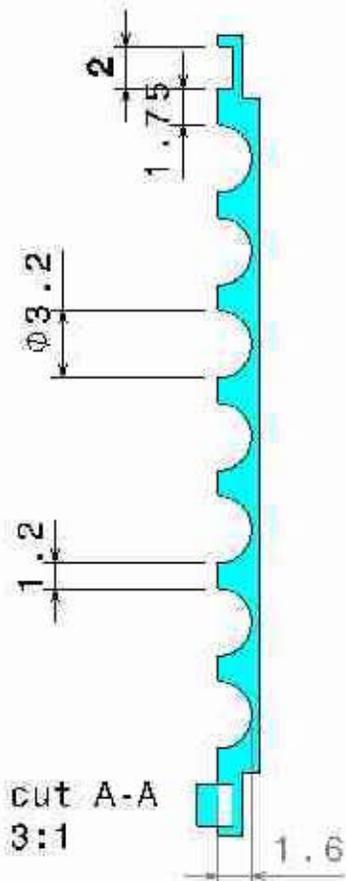
C

B

A



Front view  
Scale: 1:1



Section cut A-A  
Scale: 3:1

Dimensiones en mm

Ingeniería UNAM

Posgrado Ingeniería UNAM

DRAWING TITLE

Interconector propuesta 1 (2/3)

DRAWN BY

Israel C. M.

DATE

10/20/2011

CHECKED BY

XXX

DATE

XXX

DESIGNED BY

Israel C. M.

DATE

XXX

SIZE

A4

DRAWING NUMBER

canal 1

REV

X

SCALE

1:1

Mat:

LaSrCrO3



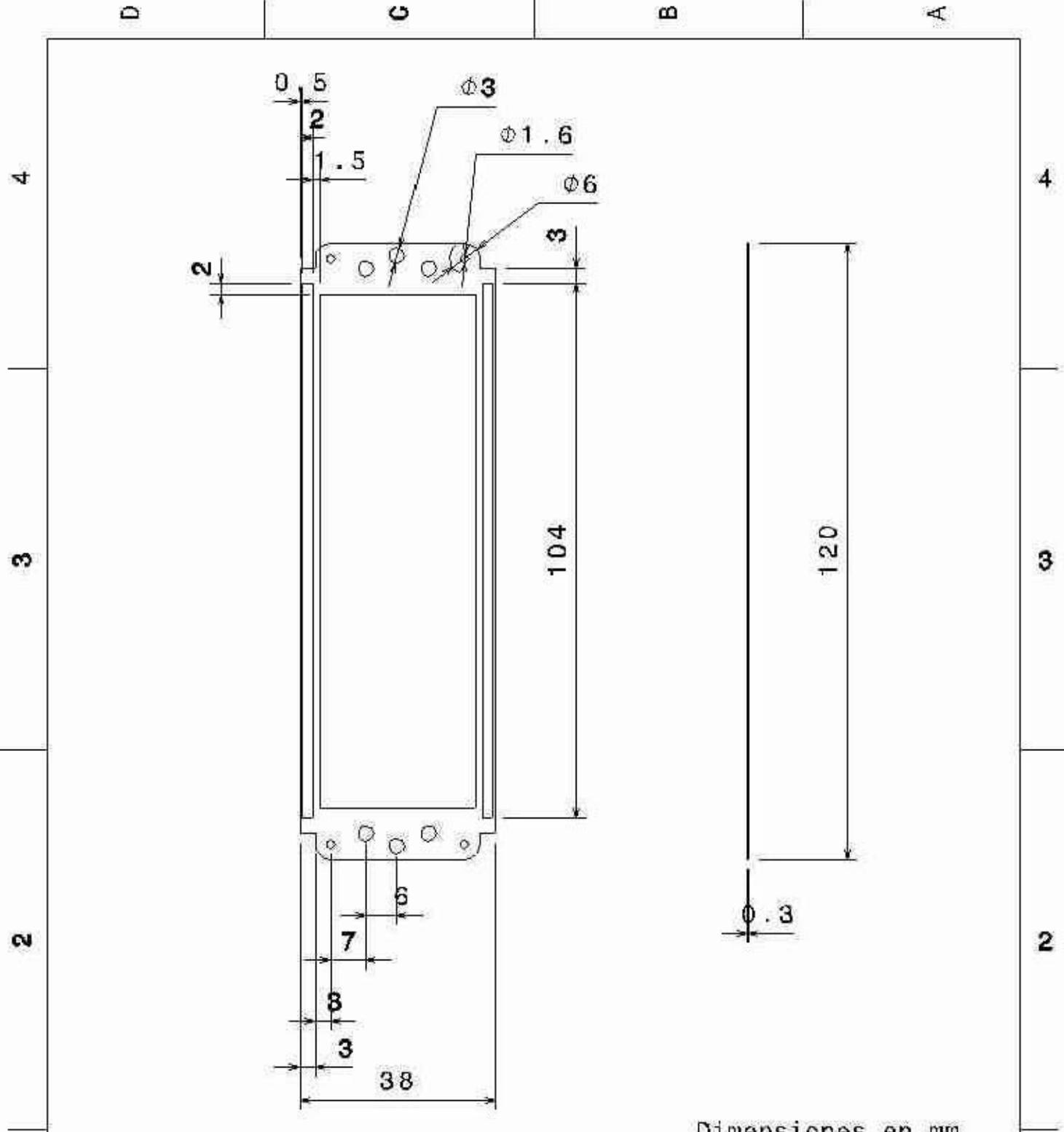
SHEET

3/5

102

D

A



Dimensiones en mm

Ingeniería UNAM		Posgrado Ingeniería UNAM			
DRAWING TITLE		Union entre interconectores			
DRAWN BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER	REV	1
Israel C. M.	10/19/2011	A4	Union	163	
CHECKED BY	DATE			X	
XXX	XXX				
DESIGNED BY	DATE	SCALE	Mat: LaSrCr03	SHEET	
Israel C. M.	XXX	1:1		5/5	

D

A

D

C

B

A

4

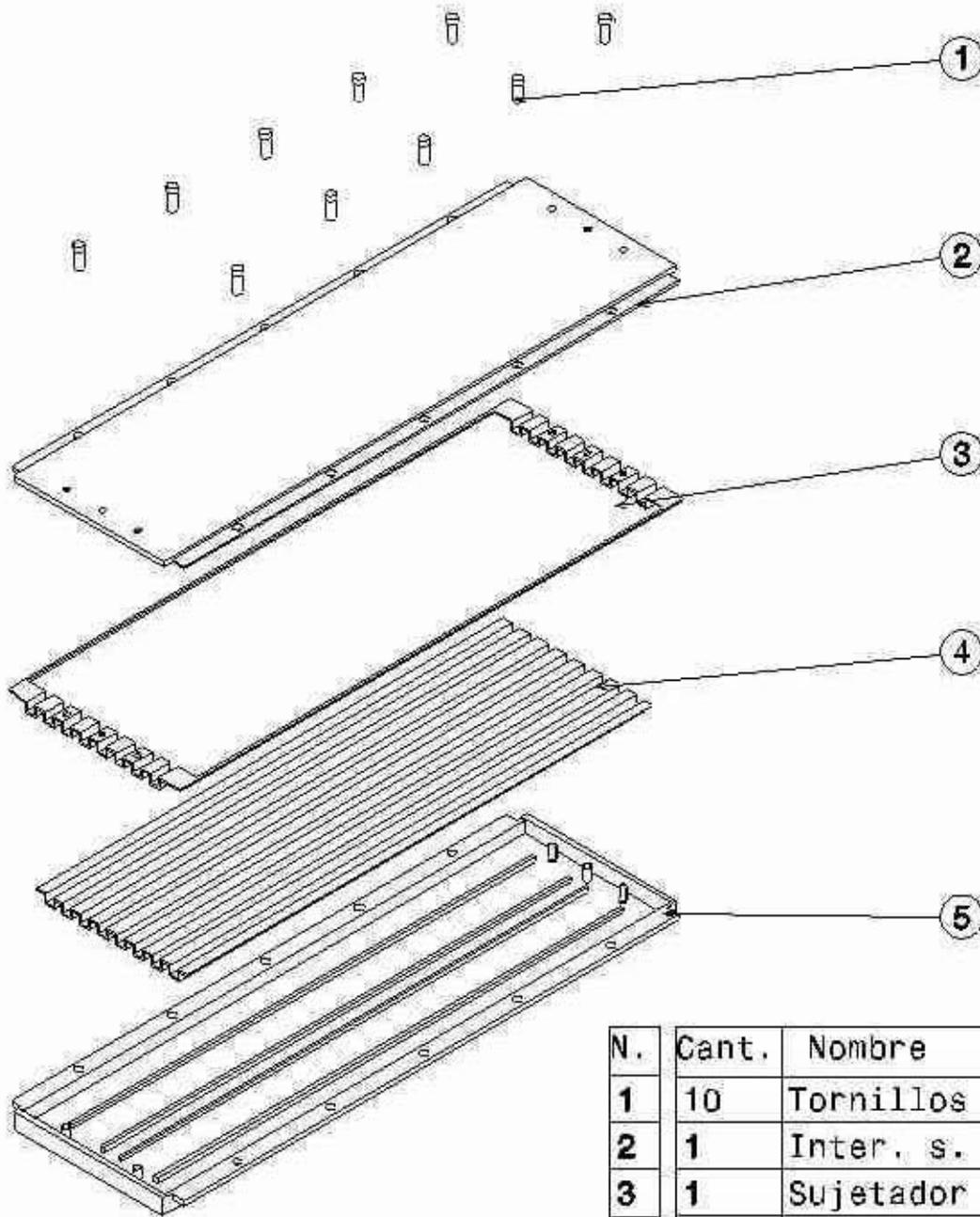
4

3

3

2

2



Isometric view  
Scale: 1:1

N.	Cant.	Nombre	Descrip.
1	10	Tornillos	1/16 UNF
2	1	Inter. s.	LaSrCrO3
3	1	Sujetador	LaSrCrO3
4	1	PEN	52NiOYSZ
5	1	Inter. i.	LaSrCrO3

UNAM Ingeniería

Posgrado Ingeniería UNAM

DRAWN BY

Israel C. M.

DATE

10:18/2011

DRAWING TITLE

Celda de combustible propuesta 2

CHECKED BY

Israel C. M.

DATE

xxx

SIZE

A4

DRAWING NUMBER

ensamblfinal2

REV

104  
X

DESIGNED BY

Israel C. M.

DATE

xxx

SCALE

1:1



SHEET

1/7

1

1

D

A

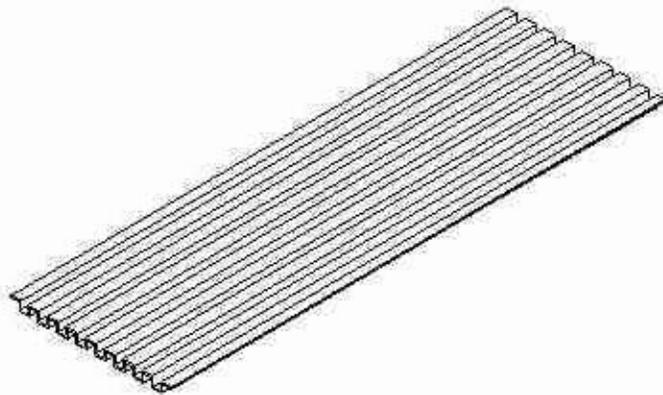
D

C

B

A

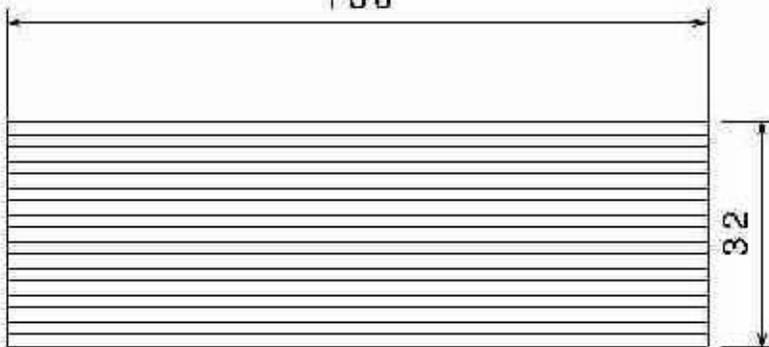
Isometric view  
Scale: 1:1



4

4

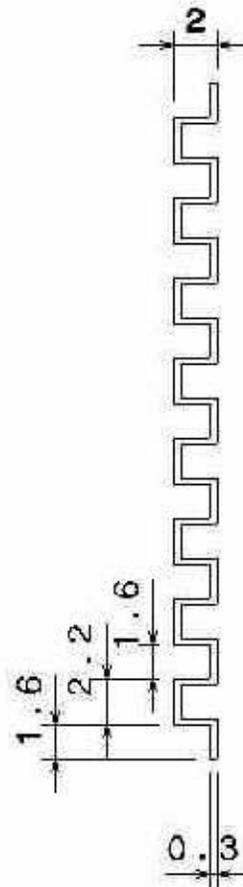
100



3

3

Front view  
Scale: 1:1



2

2

Left view  
Scale: 3:1

Ingeniería UNAM

Posgrado Ingeniería UNAM

DRAWING TITLE

DRAWN BY  
Israel C. M.

DATE  
10/19/2011

Placa dentada

CHECKED BY  
XXX

DATE  
XXX

SIZE  
A4

DRAWING NUMBER  
placadent1

REV  
105  
X

DESIGNED BY  
Israel C. M.

DATE  
XXX

SCALE 1:1 Mat: 52Ni0YSZ



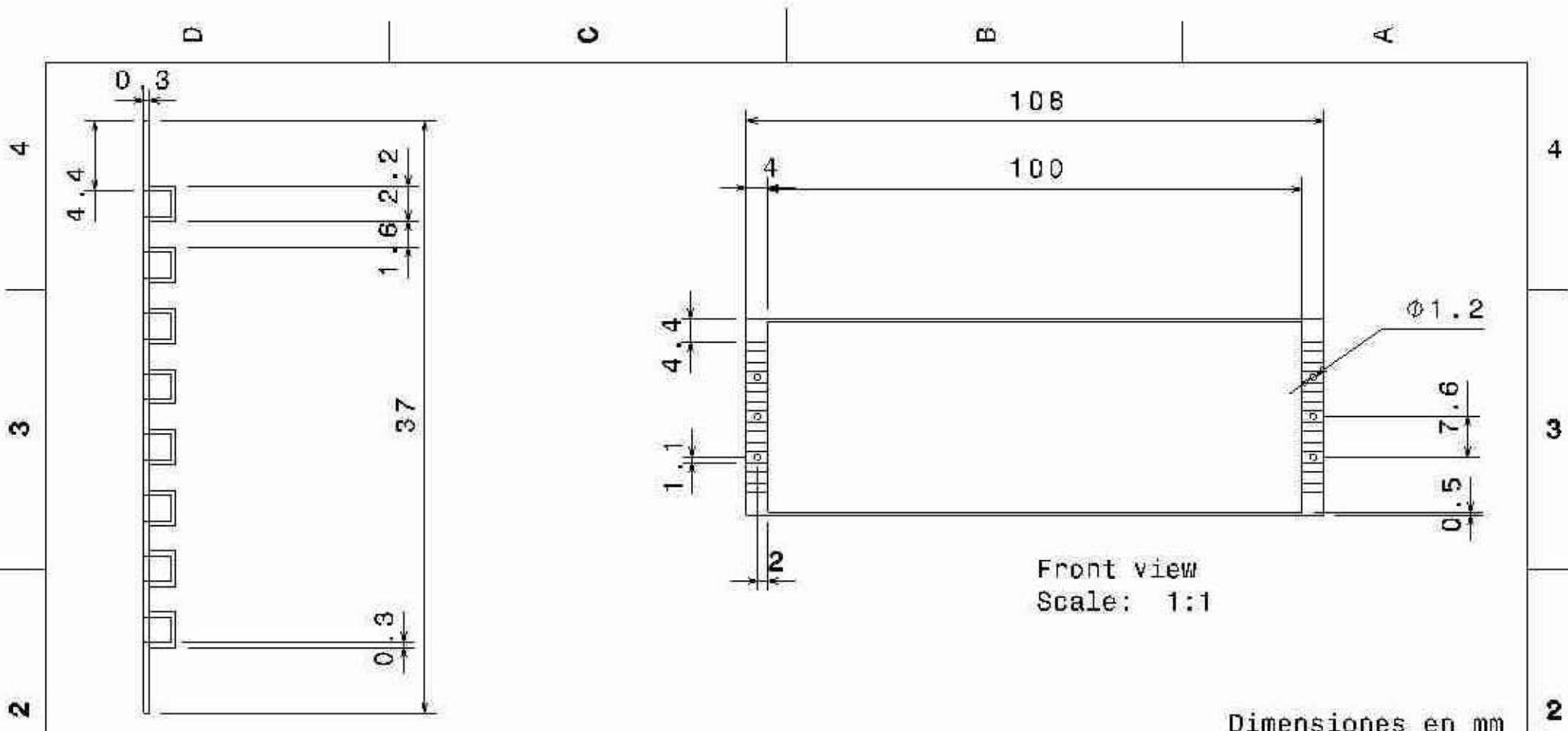
SHEET 2/7

1

1

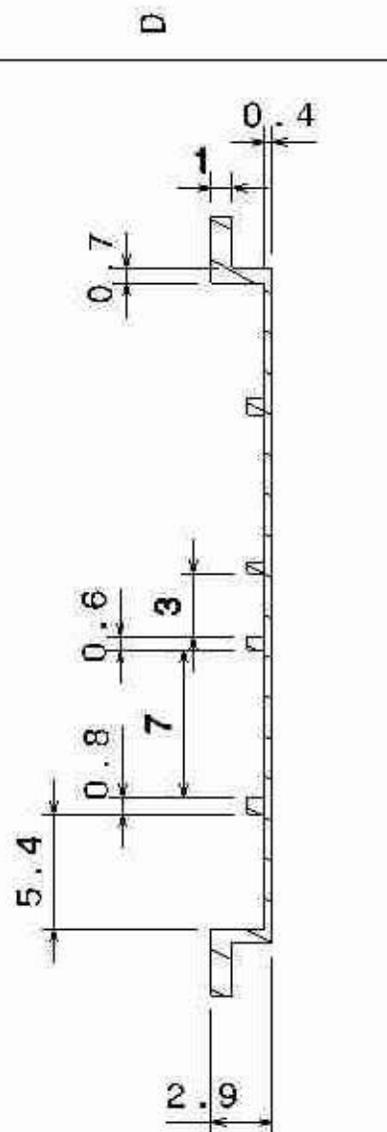
D

A



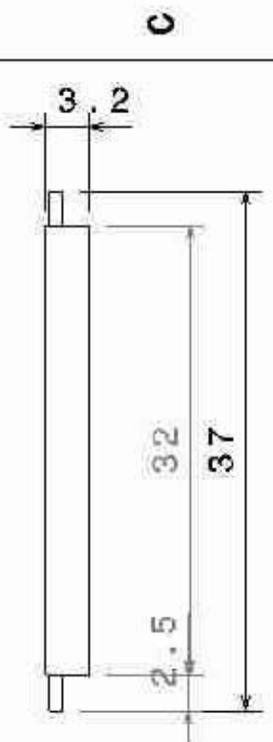
Ingeniería UNAM		Posgrado Ingeniería UNAM		
DRAWN BY Israel C. M.		DRAWING TITLE Sujetador de placa dentada		
DATE 10/19/2011		SIZE A4	DRAWING NUMBER Sujetador 2	REV X
CHECKED BY XXX		SCALE 1:1		SHEET 3/7
DESIGNED BY Israel C. M.		Mat: LaSrCrO3		

106

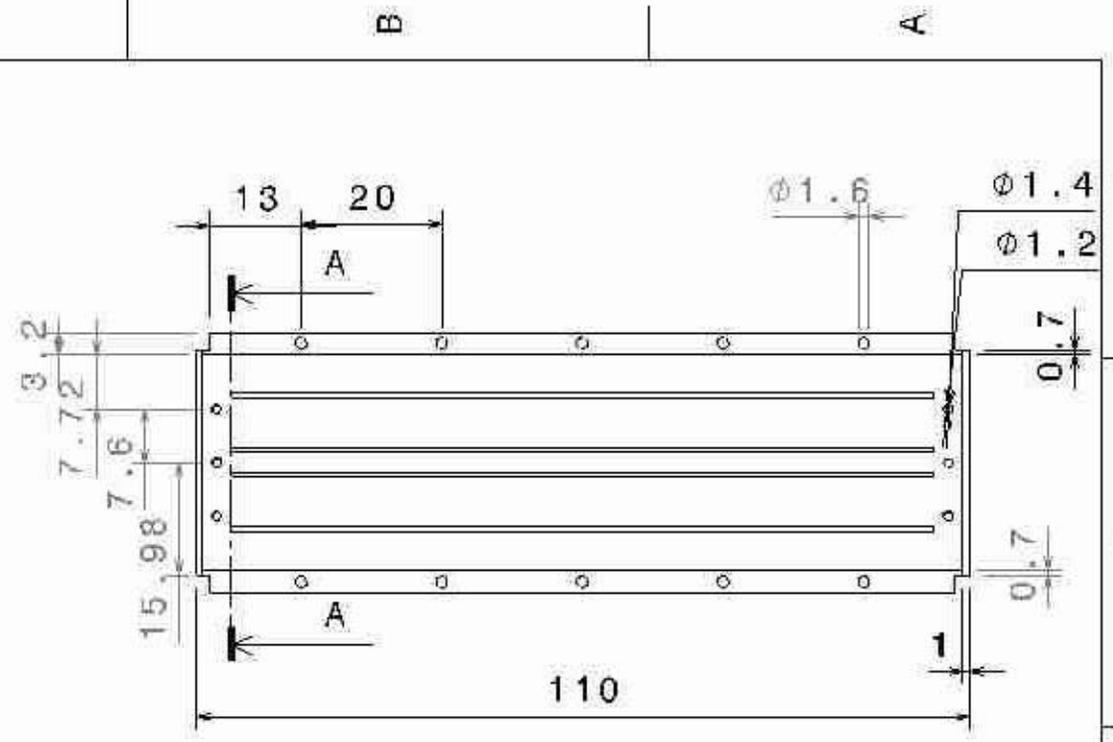


Section cut A-A  
Scale: 3:1

107



Right view  
Scale: 2:1



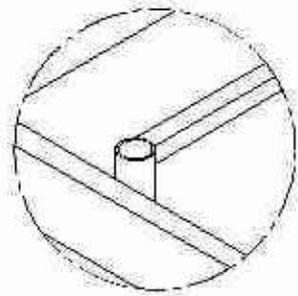
Front view  
Scale: 1:1

Dimensiones en mm

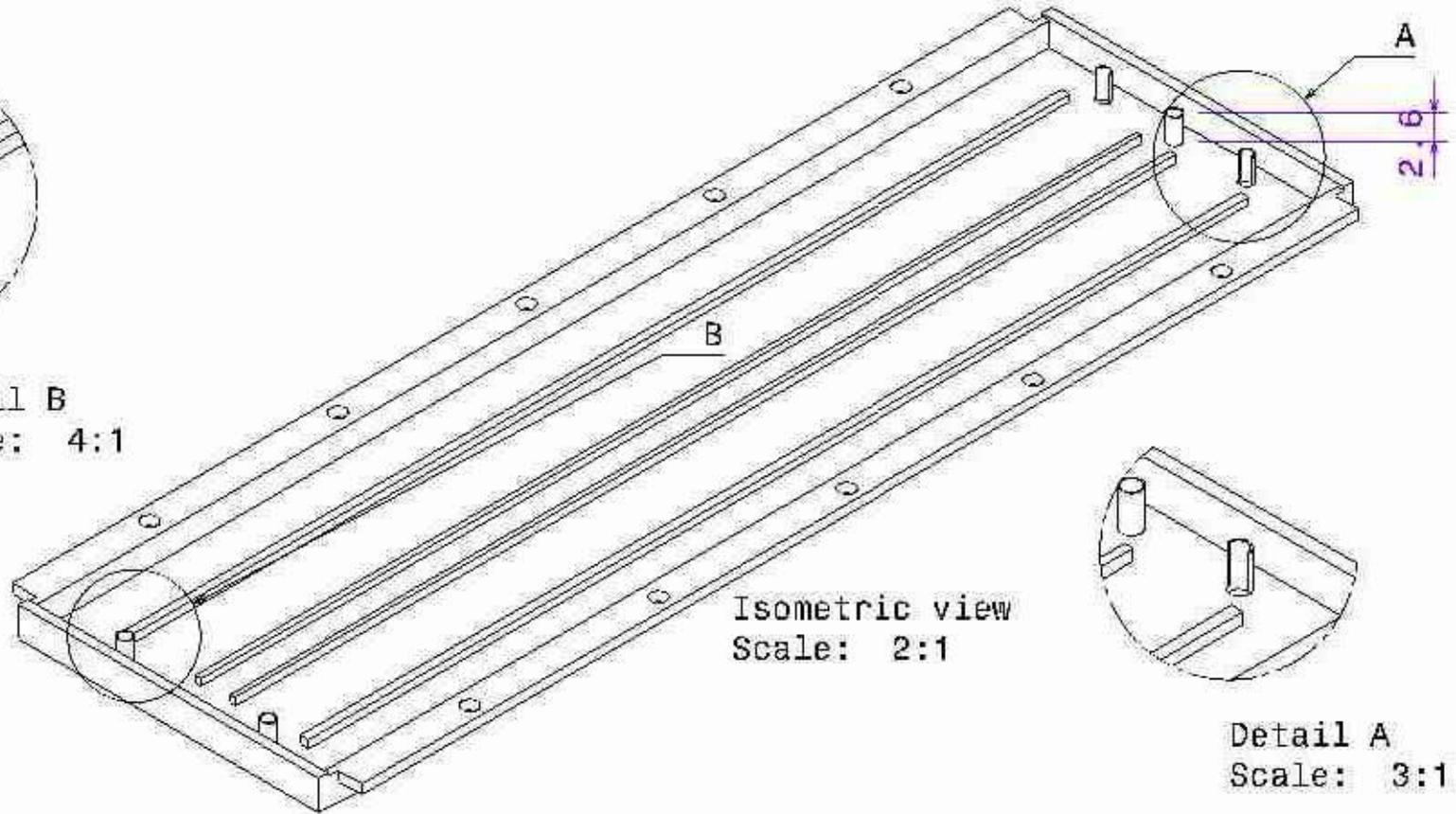
Ingeniería UNAM		Posgrado Ingeniería UNAM		
DRAWING TITLE		Interconector superior (1/2)		
DRAWN BY Israel C. M.	DATE 10/19/2011	SIZE A4	DRAWING NUMBER placadent2	REV X
CHECKED BY XXX	DATE XXX	SCALE 1:1	Mat: LaSrCrO3	SHEET 4/7
DESIGNED BY Israel C. M.	DATE XXX			

D

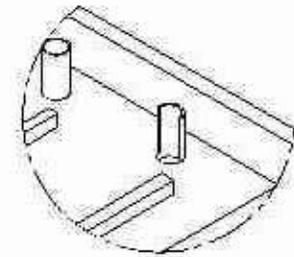
A



Detail B  
Scale: 4:1



Isometric view  
Scale: 2:1



Detail A  
Scale: 3:1

Dimensiones en mm

108

Ingeniería UNAM

Posgrado Ingeniería UNAM

DRAWING TITLE

Interconector superior (2/2)

DRAWN BY

Israel C. M.

DATE

10/19/2011

CHECKED BY

XXX

DATE

XXX

DESIGNED BY

Israel C. M.

DATE

XXX

SIZE

A4

DRAWING NUMBER

placadent2

REV

X

SCALE

2:1

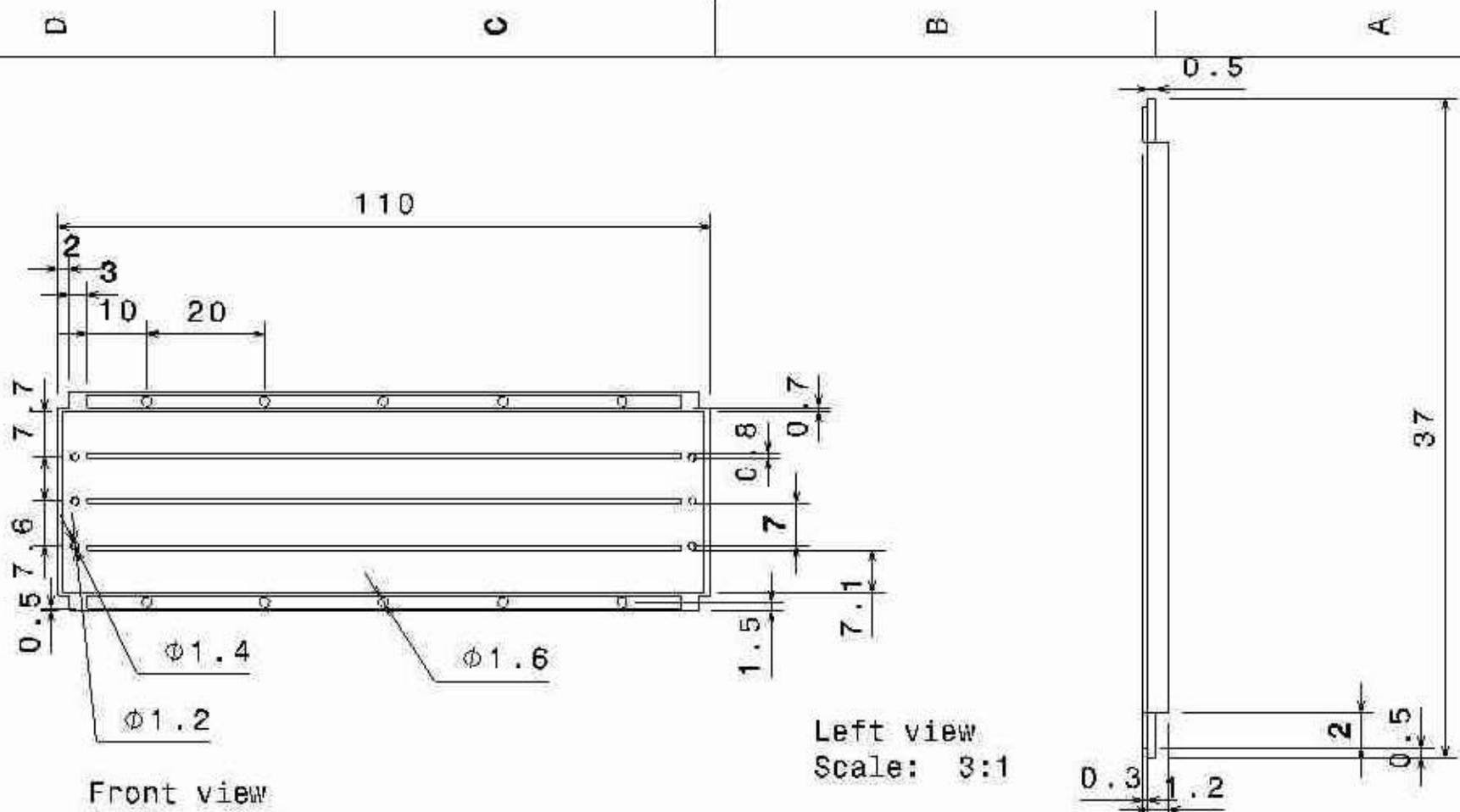
Mat:

LaSrCr03



SHEET

5/7



Front view  
Scale: 1:1

Left view  
Scale: 3:1

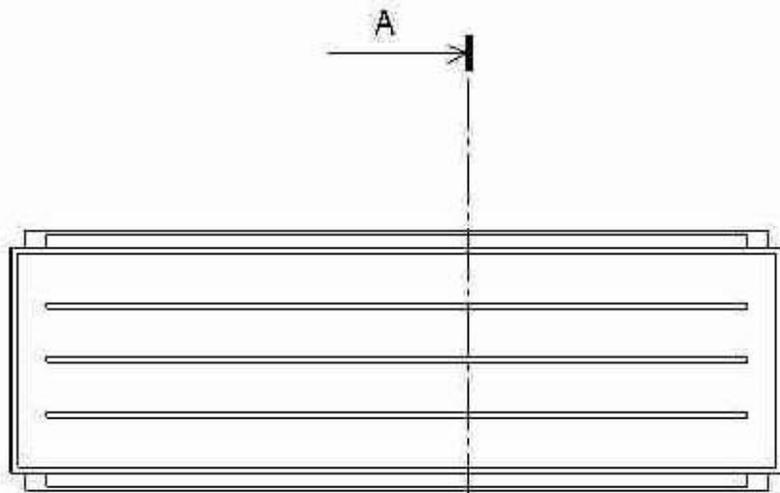
Dimensiones en mm

609

Ingeniería UNAM		Posgrado Ingeniería UNAM		
DRAWN BY Israel C. M.		DRAWING TITLE Interconector inferior (1/2)		
DATE 10/19/2011		SIZE A4	DRAWING NUMBER placa inter1	REV X
CHECKED BY XXX		SCALE 1:1		SHEET 6/7
DESIGNED BY Israel C. M.		Mat: LaSrCr03		

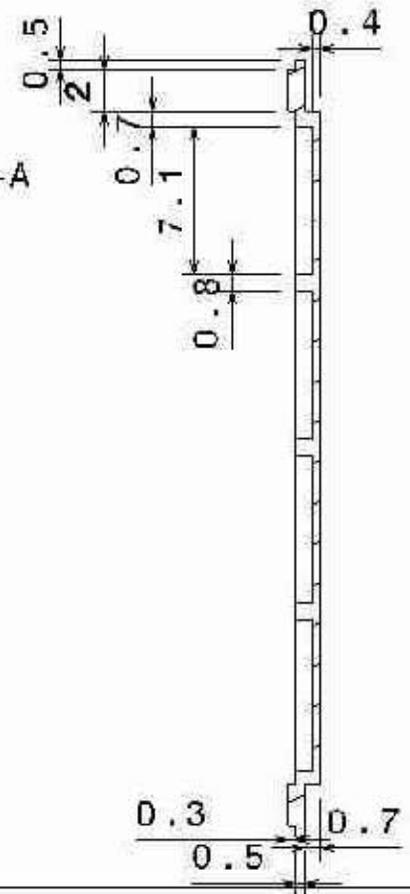


Dimensiones en mm



Front view  
Scale: 1:1

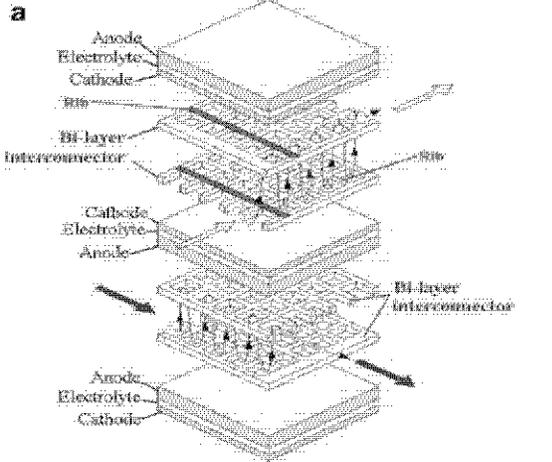
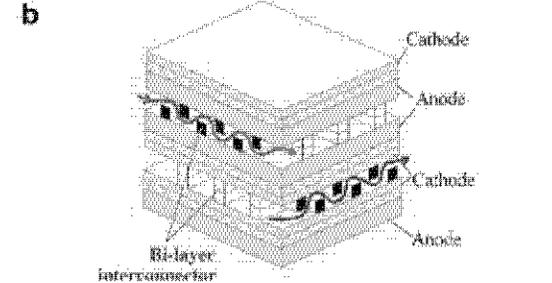
Section view A-A  
Scale: 3:1

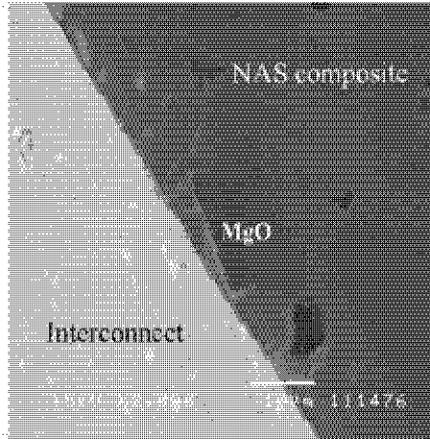
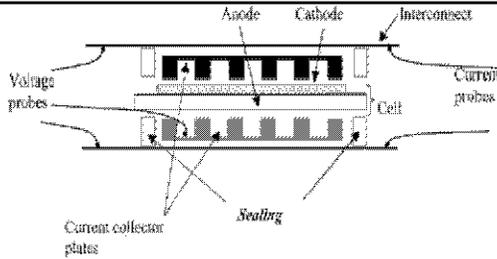


Ingeniería UNAH		Posgrado Ingeniería		
DRAWING TITLE		Interconector inferior (2/2)		
DRAWN BY Israel C. M.	DATE 11/08/2011	SIZE A4	placa inter1	REV X
CHECKED BY XXX	DATE XXX	SCALE 1:1	Mat: LaSrCr03	SHEET 7/7
DESIGNED BY Israel C. M.	DATE XXX			

110

## **Anexo C: Artículos**

	Imagen	Nombre/ventajas y/o desventajas
1	<p><b>a</b></p>  <p><b>b</b></p> 	<p><b>Diseño óptimo de un interconector de bi-capa para SOFC basado en el método CFD-Taguchi [13].</b></p> <p>En este método se buscó proponer un diseño para el flujo de combustible y aire que permitirá tener una mejor distribución de velocidad y de fracción molar, tanto de H<sub>2</sub> como O<sub>2</sub>. Para lograr este objetivo se propuso utilizar el método Taguchi en una celda con soporte en el ánodo, se obtuvieron tres parámetros indeterminados con 125 combinaciones diferentes para el diseño de la bi-capa interconectora. Los parámetros que utilizados son:</p> <p>El flujo del combustible es laminar.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La densidad de corriente es uniforme a lo largo de los electrodos.</li> <li>• Las reacciones electroquímicas toma lugar en la interfaz ánodo-electrolito.</li> <li>• El gas utilizado se considera como un fluido incompresible e ideal.</li> <li>• La temperatura es constante a través de todo el electrodo.</li> </ul> <p>Se realizó un modelo en 2D con el software COMSOL Multiphysics y los resultados más importantes fueron:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Las configuraciones en zigzag formadas con los parámetros obtenidos por el método Taguchi y el diseño convencional de celdas planas muestran una similitud en cuanto a la distribución de fracción molar.</li> <li>• La máxima velocidad alcanzada en esta investigación se logra cuando se utiliza el diseño de doble capa en los casos en que se tuvieron para S(espacio entre tope)xW(largo de tope)xH(alto de tope) los valores de 0.1x0.15x0.08 y 0.2x0.3x0.06 mm, donde se presentaron valores de 5.7 y 3.9 ms<sup>-1</sup>.</li> </ul> <p>Como trabajo a futuro se necesita optimizar este diseño mediante la propuesta de nuevas configuraciones lo cual implica más tiempo y posiblemente nueva generación de</p>
		conceptos.

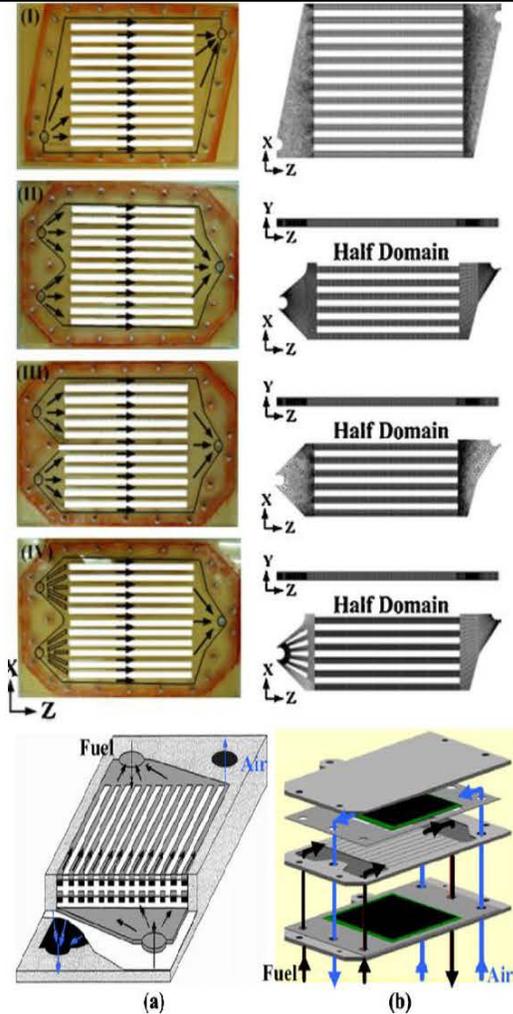


### Sellos de vidrio compuesto utilizado para aplicaciones SOFC [14].

En esta investigación se propuso un material para sellar la celda, el material compuesto de vidrio conocido como Vidrio NAS. Este material consta de  $\text{SiO}_2$  (72.8 mol%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (9.4 mol%),  $\text{Na}_2\text{O}$  (17.8 mol%) y  $\text{MgO}$  (45% vol. de relleno) el cual es derretido a una temperatura de 1650° C para usarse como sellador. Las temperaturas de experimentación fueron de 850 y 950° C para evaluar el rendimiento del sellado, los resultados más significativos fueron:

- Se obtuvo una buena adhesión entre el interconector de acero y el compuesto de vidrio para ambas temperaturas.
- Se redujo la afinidad de los óxidos metálicos y los compuestos para sellar
- El compuesto presentó su mayor rendimiento en las primeras 350 h de ejecución, hubo disminución de fugas y filtraciones.
- Dentro de las ventajas presentadas son que hubo una gran afinidad entre el vidrio y el acero, con lo cual se tendrían que hacer varias pruebas con los diferentes materiales que son usados para el interconector.

La temperatura de trabajo se define en el rango propuesto pero fuera de estas las características se pierden o disminuyen notablemente por lo que siguieren realizar más pruebas a diferentes concentraciones.



### Uniformidad de flujo en varios interconectores y su influencia en el rendimiento de celdas SOFC planas [15].

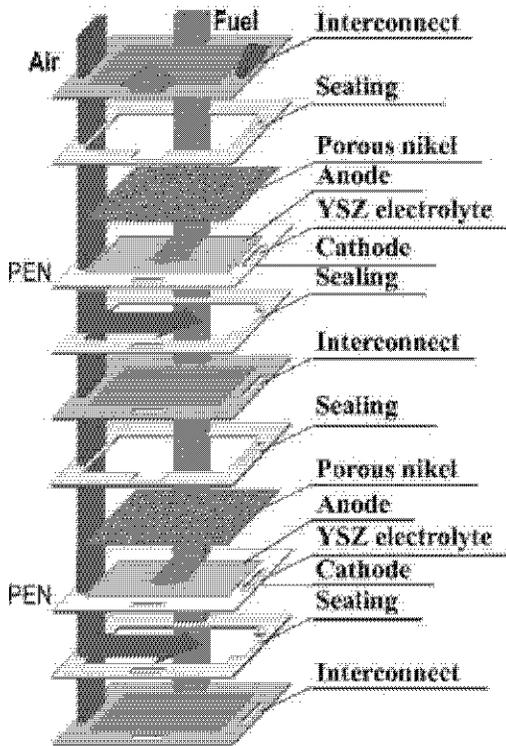
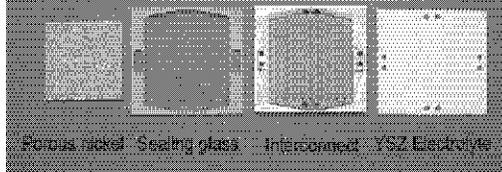
En este artículo se presentó la investigación de la uniformidad de flujos de combustible en varias configuraciones de interconectores y su influencia en la celda plana.

Cada configuración se realizó variando el diseño de entrada y salida única, dos entradas y una salida, así como de diferentes formas en los canales centrales. El flujo se fijó como uniforme por lo que el número de Reynold debía estar entre 0 y 350. Los resultados encontrados mediante la simulación numérica (considerando un flujo constante, laminar e incompresible) fueron:

- Del modelo 2 al 4 hubo un incremento lineal en la velocidad del flujo. El primer diseño presento una ligera mejora en la uniformidad de flujo aunque este presento un mayor problema de recirculación en la entrada de los canales centrales.
- En los diseño 2 y 4 se presentó el mismo caso en el que la temperatura se redujo de 1125 a 1090 K, con lo cual aumento el rendimiento de la celda.

Dependiendo como sea el número de Reynold del aire y/o el combustible puede ayudar a mejorar el rendimiento por lo que se sugieren valores  $R_{air}$  y  $R_{fuel}$  entre 200-300 y 20-50 respectivamente. No se puede tener valores altos de Reynold para el aire debido a que el flujo pasaría de laminar a turbulento.

4



### Investigación de materiales para celdas SOFC planas [16].

Se presentaron propuestas de materiales para el ánodo, cátodo, electrolito, interconector y el sellador, en este caso se considera la temperatura de trabajo alrededor de los 1000° C en celdas planas. Dentro de las propuestas que se presentan para cada parte son:

El electrolito, con un ancho de hasta 200 mm, que se utilizó fue zirconia estabilizada con itrio el cual fue formado mediante una novedosa técnica que combina la fundición de la cinta y la presión isostática para preparar la membrana de YSZ. Con esta técnica se permite la fabricación de una placa cerámica flexible mediante un convencional procedimiento de fundición de material. La conductividad eléctrica de este material depende principalmente del tipo y concentración de los iones dopados, la temperatura de sinterizado y atmosférica. La porosidad tiene un pequeño efecto en la conductividad eléctrica.

Para el interconector se utilizó una combinación con base de cromo, en este caso se presenta el  $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CrO}_3$  el cual es fabricado por compresión isostática en caliente. Este material presenta buena conductividad eléctrica, mejor resistencia a altas temperaturas, buena estabilidad química debido a las reacciones y la reducción en la atmósfera de trabajo. Se sugiere un espesor de placa alrededor de 30-40  $\mu\text{m}$  formado a una temperatura de calentamiento de 1350 y 1400° C.

En el caso del sellador se utilizó  $\text{SiO}_2\text{-CaO-Al}_2\text{O}_3$  el cual se forma por medio de fundición entre 1350-1400° C y posteriormente se recoció 550° C. Los resultados obtenidos durante la prueba fue tener una buena humectabilidad y adherencia tanto para YSZ como para la aleación en base de cromo.

En el ánodo se propuso el uso de cermet Ni+YSZ, este material inicia como NiO el cual se reduce a Ni junto con YSZ. La conductividad incrementa dependiendo del incremento del Ni sin embargo la resistencia del cermet y

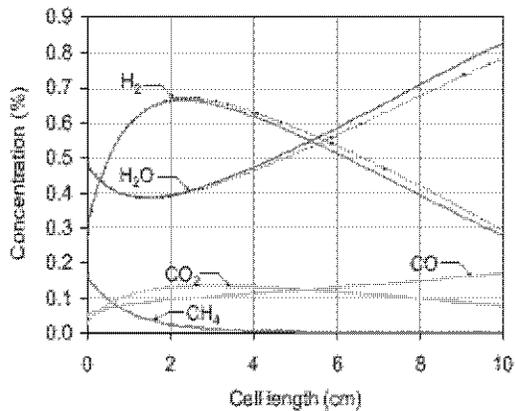
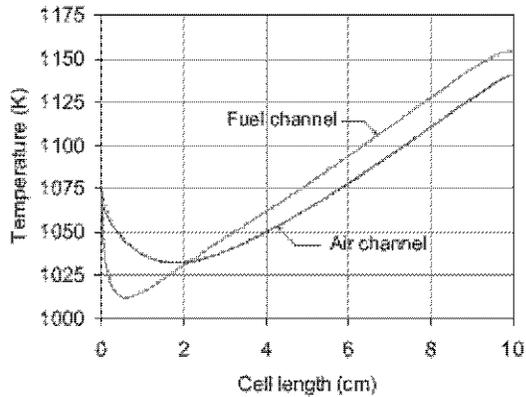
la adhesión disminuyen, se propone utilizar NiO en 60% wt en el cermet. La placa del ánodo poroso debe estar entre 30-40  $\mu\text{m}$ .

El cátodo consta de un sistema de óxido de lantano  $\text{Ln}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$  (Ln=Pr, Nd, Sm, Gd, Yb y Y con  $x \leq 0.5$ ) el cual es formado por un sinterizado a 1400° C. La placa del cátodo fue preparada. La sustitución del Sr influye directamente en la conductividad mediante la concentración x de este componente determina la formación de iones  $\text{Mn}^{4+}$  y electrones libres.

Al final de esta investigación se puso en práctica los materiales en una pila obteniendo valores de: Alrededor de 2.6 V en una pila con 2 celdas y con un suministro de  $\text{H}_2/\text{O}_2$ .

Alrededor de 10 V para una pila de 19 celdas con el mismo suministro.

5



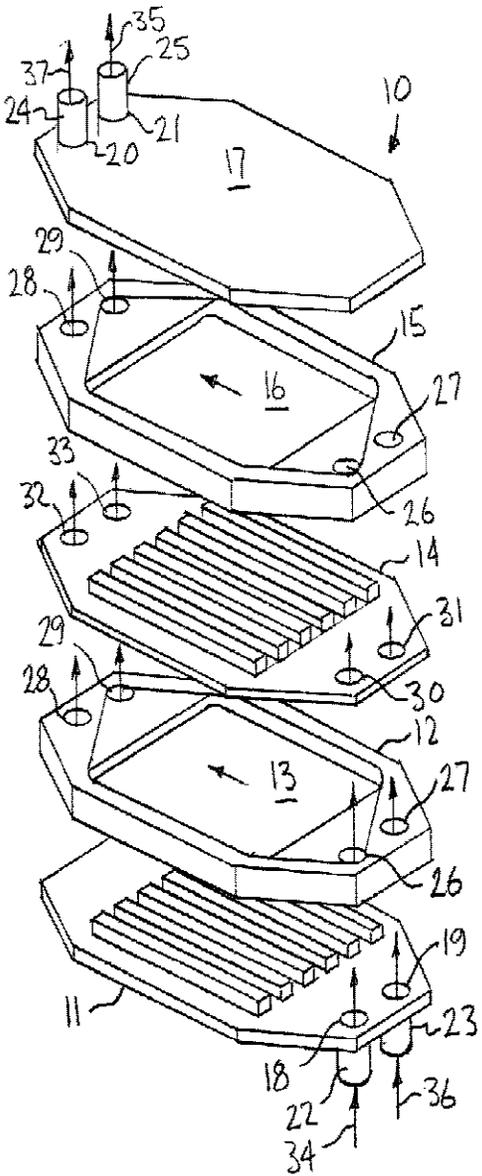
### Efectos de fuentes de calor en el rendimiento celdas planas de óxido sólido [17].

Las pruebas fueron realizadas en una celda plana de ánodo como soporte de 100 mm de largo, 1 mm de alto, espesor del electrolito de 20  $\mu\text{m}$  a una altura de 1 mm para el canal del aire y 0.6 mm para el canal de combustible. Un flujo en paralelo con un reformado interno de combustible, el gas utilizado es metano.

Los resultados encontrados fueron:

- La caída de temperatura se encuentra en el canal de combustible más específicamente cerca de la entrada del combustible/aire debido a una fuerte reacción endotérmica de reformado de metano.
- El calor incrementa a lo largo de la celda debido a la reacción electroquímica y al efecto Joule.
- Baja densidad de corriente en la entrada del aire y combustible de manera similar al comportamiento de la temperatura, ambas incrementan a lo largo de la celda.
- La concentración de combustible y aire disminuye desde la entrada hasta la salida en cambio el agua generada va en aumento, figura 2.

## **Anexo D: patentes**

	Núm. de patente/imágenes	Nombre/Descripción
1	<p data-bbox="370 275 604 306"><b>US2002/0106548 A1</b></p>  <p>The diagram shows an exploded perspective view of a planar SOFC fuel cell stack. It consists of several layers: a top interconnector (10), a top support plate (11), a top intermediate plate (12), a top electrode/electrolyte layer (13), a top intermediate plate (14), a top support plate (15), a middle interconnector (16), a middle support plate (17), a middle electrode/electrolyte layer (18), a middle intermediate plate (19), a middle support plate (20), a bottom interconnector (21), a bottom support plate (22), a bottom electrode/electrolyte layer (23), a bottom intermediate plate (24), a bottom support plate (25), and a bottom interconnector (26). Various ports and seals are labeled with numbers 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, and 36. Arrows indicate the flow of fuel and air through the stack.</p>	<p data-bbox="808 275 1406 348"><b>Co-flow planar SOFC fuel cell stack/Pila de celdas de combustible SOFC plana de flujo paralelo [18].</b></p> <p data-bbox="781 354 1435 516">Presenta el diseño de una celda SOFC plana que presenta un flujo en paralelo. Las mejoras se verán reflejadas en el sellado de la celda, la durabilidad, tiempo de operación y eficiencia.</p> <p data-bbox="781 562 1435 951">La entrada del combustible se muestra en 34 y la salida se da en 35 en cambio para el aire la entrada es en 36 y la salida es en 37. 11, 14, 17 son interconectores y 12, 15 son placas que sirven de soporte. En 13 y 16 representan una placa intermedia que en este caso es el PEN (positivo-electrolito-negativo) o en otras palabras se define ambos electrodos junto con el electrolito. Este modelo tiene la mayor área de contacto con lo cual es posible utilizar el sellador y obtener un menor índice de fuga.</p>

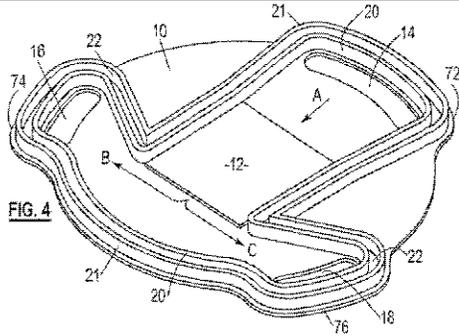


FIG. 4

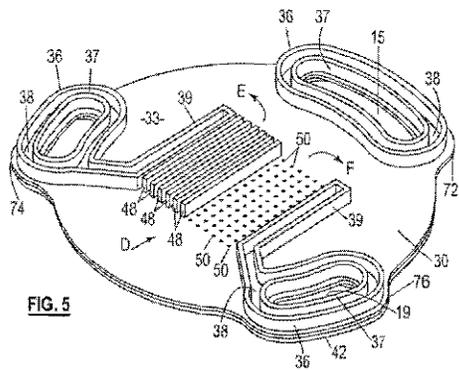
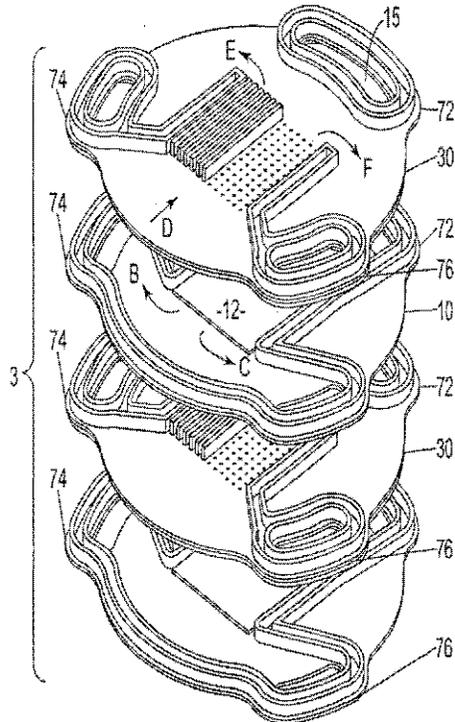


FIG. 5



Este ejemplo de patente se enfoca en el diseño de una celda SOFC plana en el cual el objetivo es tener un flujo constante de aire y combustible. El flujo de combustible entra en las placa 10 y sus similares, la trayectoria se representa por la letra A que pasa por la placa 12 que está compuesta en la parte superior por un ánodo de cermet níquel-zirconia, en la parte central está el electrolito hecho de zirconia estabilizado con itria y en la parte inferior está el cátodo de perovskita tales como manganato, estroncio o lantano. En cambio el oxígeno fluye en la placa 30 donde D representa la entrada del fluido el cual pasa por varias separaciones o aletas las cuales mantienen el flujo en una dirección y una vez que pasan esta parte se divide en E y F para salir.

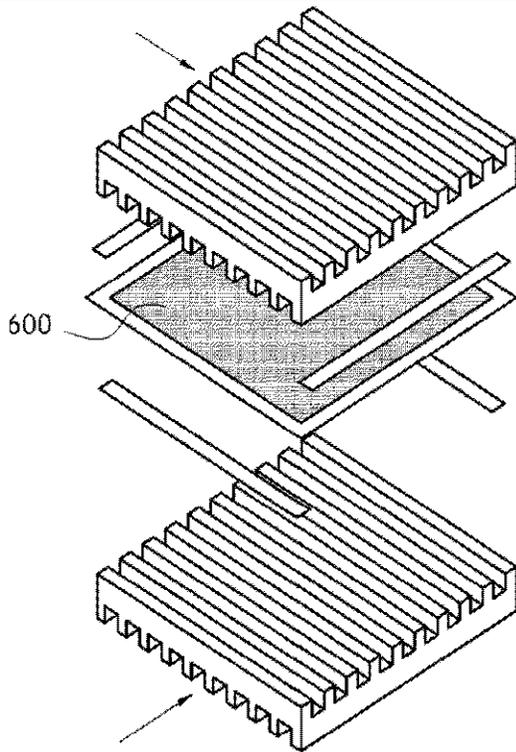
El recolector de corriente son las aletas y se conectan entre el ánodo de una placa con el cátodo de la placa siguiente que contiene un PEN (en este caso se utilizó soporte en el electrolito), esto se repite a lo largo de la pila. Los canales son colocados en los agujeros que pasan en la placa.

El propósito de este diseño es minimizar las fugas y la fatiga que se dan durante el uso prolongado también aumentar el área de reacción y permitir un buen acople entre placas.

3	US2005/0201919 A1	Materiales para cátodo en celdas de combustible de óxido sólido [20].
		<p>El propósito de esta patente fue el de proveer información acerca de materiales para el cátodo que será utilizado en este tipo de celda. Las principales características que se buscaron satisfacer fue que los materiales seleccionados tuvieran un alto número de vacancias para las reacciones, una alta conductividad, ser capaz de acelerar la absorción de las moléculas de oxígeno y difusiones del ion oxígeno que se transcribe en reducir el sobrepotencial del cátodo e incrementar la eficiencia de la generación de corriente eléctrica.</p> <p>Los materiales que presentaron gran parte de las características solicitadas fueron aquellos que tienen la fórmula general <math>Ln_{1-x}A_xCu_{1-y}B_yO_{2.5\pm\delta}</math> donde Ln es un ion lantánido, A es un metal alcalino terreo y B es un metal. El ejemplo más claro fue el perovskita que contiene vacancias de oxígeno con una regularidad de secuencia.</p> <p>En la gráfica mostrada se presenta la electroconductividad del <math>La_{1-x}Sr_xCuO_{2.5\pm\delta}</math> para valores de <math>x=0.15</math> representado por un triángulo, <math>x=0.2</math> por un rombo, <math>x=0.25</math> por un círculo y <math>x=0.3</math> por otro rombo.</p>

4

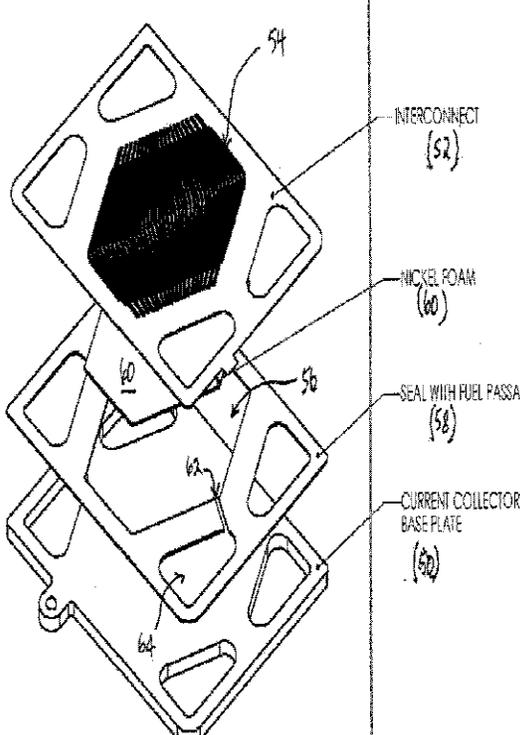
US 2010/0016142 A1

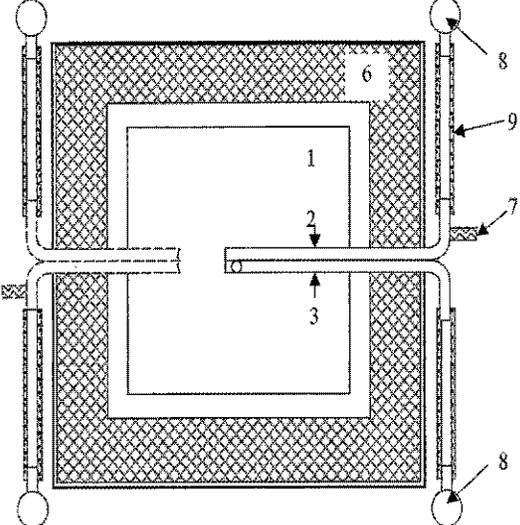
**Método de manufactura de sellado con vidrio para celdas de tipo SOFC de intermedia temperatura [21].**

Se presenta un sellador de vidrio con composición de BaO,  $Al_2O_3$ ,  $B_2O_3$  y  $SiO_2$  a largo de la celda en donde se encuentran óxidos  $CeO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Mn_2O_3$  para mejorar el sellado en este tipo de celdas.

La composición del material que se propone para sellar es una la matriz de vidrio comprende entre 35-45 wt% de BaO, 25-35 wt% de  $SiO_2$ , 10-20 wt% de  $B_2O_3$  y 8-15 wt% de  $Al_2O_3$  y 1-5 wt% de un oxido metálico del grupo de  $CeO_2$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Mn_2O_3$  y  $Cr_2O_3$  relativo al 100 por ciento en partes de la matriz.

La composición del vidrio utilizado como sellador satisface las propiedades mecánicas y térmicas requeridas para el sellado de celdas de intermedia temperatura.

5	<p style="text-align: center;"><b>US 2004/01853321 A1</b></p>  <p>Diagram illustrating the components of a SOFC assembly with a floating current collector. The components are labeled as follows:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>54: INTERCONNECT (52)</li> <li>60: NICKEL FOAM (60)</li> <li>58: SEAL WITH FUEL PASSAGE (58)</li> <li>56: CURRENT COLLECTOR BASE PLATE (56)</li> <li>64: CURRENT COLLECTOR BASE PLATE (64)</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>SOFC con colector de corriente flotante [22].</b></p> <p>El colector flotante se traduce en que no requiere un contacto directo con el interconector. El diseño comprende una placa que da una inferior compresión horizontal, una placa de compresión superior, una pluralidad intercalada de celdas, sellos y conectores, una placa de colector de corriente que funciona como cátodo y una placa colectora de corriente de ánodo. El sellador en este caso funciona como un elemento compresible entre el interruptor y ya sea la terminal del cátodo o del ánodo. El elemento compresible es una espuma de níquel que se define como un camino para el combustible o en caso contrario que lo pueda rodear.</p>
---	---	---

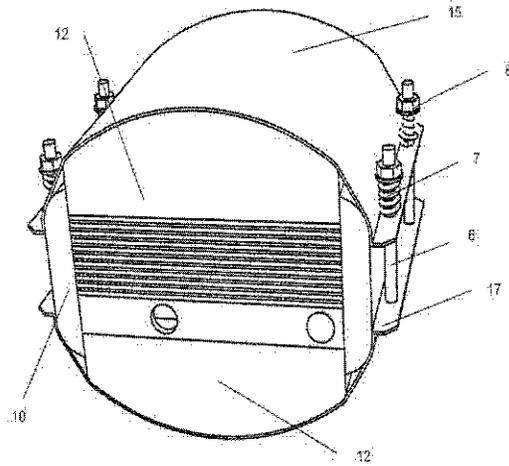
6	WO 2004/008556 A2	<p><b>Una novedosa celda de combustible oxido solido sin sellador [23].</b></p>
		<p>Se propone el diseño de una celda de combustible SOFC que no utiliza un material sellador que en este caso hace uso de tubos que mantendrán sujetos a las placas que conforman a la celda.</p> <p>La función adicional de los tubos, 2 y 3, es proporcionar el combustible y el aire a la celda. Para mejorar la distribución y uniformidad del gas se utiliza una capa intermedia el cual tiene una estructura de porosidad controlada.</p> <p>La placa del interconector se muestra como 1, la salida de la corriente eléctrica es hecha por las pestañas en 7 que se encuentran escalonadas a lo largo de la celda. La alimentación de los gases que vienen de la tubería principal a cada celda de la pila se realiza en 8 y 9 son sujetadores de tubos.</p>



8

US 7858259 B2

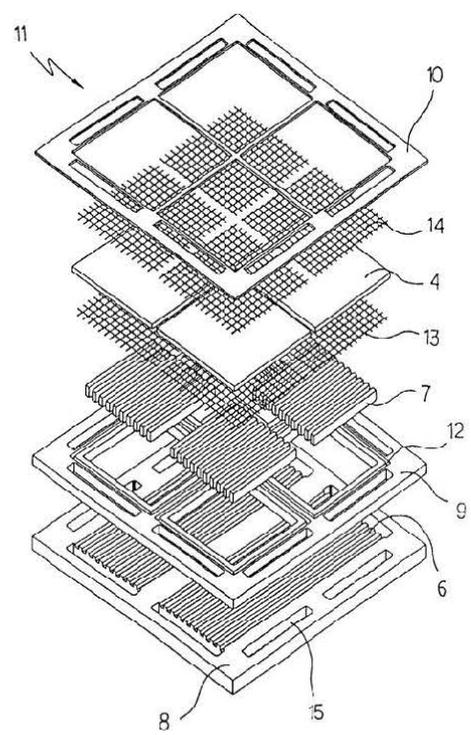
### Estructura de sujeción de una celda SOFC y de una pila SOFC [25].

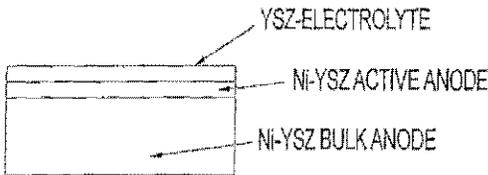


El diseño que es propuesto se enfoca en la sujeción de una celda SOFC plana en el cual se pretende minimizar o evitar completamente el uso del sellador.

En la imagen exhibe en el centro una celda plana, 12 es un bloque que sirve como un aislante al igual que 10, 15 es una placa flexible metálica el cual se adapta al bloque 12, 6 son barras tensoras, 7 resortes, 8 tuercas y 17 placas paralelas.

La gran ventaja que tiene es evitar el uso de un sellado gracias a los sujetadores laterales. Se le aplica la tensión que se requiera y el diseño permite la posibilidad de implantarse en una pila. Debido a que solo son placas encimadas se reduce el uso de material para su fabricación.

9	<p style="text-align: center;"><b>US 6593020 B1</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>Celda sencilla y estructura de pila para pilas de celda de combustible oxido solido [26].</b></p> <p>El principio básico de esta celda es similar a la de otros ejemplos, los cambios que lo diferencian son el uso de dos recolectores de corriente y el diseño doble de celda en el mismo nivel.</p> <p>En las imágenes se muestran en 13 y 14 a los recolectores de corriente que están tanto en la parte superior como inferior de la placa PEN (4), esta consiste en una estructura de soporte por electrolito. 7 es un soporte estructural además de servir de trayectoria para el combustible, el paso del aire es por el recolector 14. La placa separadora se muestra en 8 y la placa aisladora en 10. 6 y 15 son canales de aire y combustible.</p> <p>El electrodo seleccionado consta de zirconia dopada (<math>ZrO_2</math>), ceria dopada (<math>CeO_2</math>), oxido de Bismuto dopado (<math>Bi_2O_3</math>) y perovskita dopada obteniendo un material final con un espesor entre 10 y 50 <math>\mu m</math>. El cátodo seleccionado es de LSM (<math>La_{0.8}Sr_{0.2}MnO_3</math>) y el ánodo de consiste de polvo de óxido de níquel y zirconia estabilizada con itrio (<math>ZrO_2+8Y_2O_3</math>, 8YSZ) en una relación de peso de 50:50.</p>
---	--	--

10	EP 2 031 680 A1	Alta fuerza de soporte por la celda de combustible de óxido sólido [27].
 <p data-bbox="282 646 391 695">FIG. 1.</p>		<p data-bbox="751 415 1386 485">Se presentan materiales para ánodo que será utilizado en ánodo como soporte para una celda de combustible.</p> <p data-bbox="751 520 1386 793">En este caso la placa de ánodo consiste en una doble capa de dos materiales anódicos, las cuales se podían obtener mediante un sinterizado. La aportación de este proceso es la capacidad de sinterizar a menores temperaturas resultando en un menor pérdida de Ni del ánodo las cuales se reflejan en la mejora de la flexión y reduciendo el espesor de la placa.</p> <p data-bbox="751 829 1386 1024">El sinterizado consiste de un grupo de óxido, carbonato y mezclas de los últimos metales del grupo 2 de la tabla periódica, de preferencia Ca, Mg, Sr y Ba aunque la peculiaridad de este proceso es la adición de dolomita para utilizarse en la catálisis.</p> <p data-bbox="751 1060 1386 1213">Los beneficios en la las placas es la mejora de los esfuerzos mecánicos de la doble capa, diseño compacto y ligero a un bajo costo. El efecto del sinterizado se refleja en esfuerzos fluctuantes en varias capas.</p>

# Referencias

- [1] Bagotsky, Vladimir, (2008). Fuel cells: problem and solutions. USA, A John Wiley & sons inc
- [2] Fontell, E., T. Kivisaari, et al. (2004). "Conceptual study of a 250 kW planar SOFC system for CHP application." Journal of Power Sources **131**(1-2): 49-56.
- [3] Hou, S.-e., J. A. Alonso, et al. (2010). "Co-free, iron perovskites as cathode materials for intermediate-temperature solid oxide fuel cells." Journal of Power Sources **195**(1): 280-284.
- [4] Sleiti, A. K. (2010). "Performance of tubular Solid Oxide Fuel Cell at reduced temperature and cathode porosity." Journal of Power Sources **195**(17): 5719-5725.
- [5] Smirnova, O., N. Kumada, et al. (2008). "A new solid electrolyte to fill the gap between low temperatures and high temperatures SOFC materials?" Electrochemistry Communications **10**(3): 485-487.
- [6] Zhou, L., M. Cheng, et al. (2008). "Performance of an anode-supported tubular solid oxide fuel cell (SOFC) under pressurized conditions." Electrochimica Acta **53**(16): 5195-5198.
- [7] Winkler, W. (2000). "The influence of the mass transfer on the geometric design of SOFC stacks." Journal of Power Sources **86**(1-2): 449-454.
- [8] Bansal Narottam (2007). Advances in solid oxide fuel cells II. USA, A John Wiley & son.
- [9] Fergus et. Al. (2009). Solid oxide fuel cells. USA, CRC Press.
- [10] Alcaide, J. (2004). Diseño De Producto - Métodos Y Técnicas. Espana, Alfaomega, Universidad Politécnica de Valencia.
- [11] Benyus, J. (2002). Biomimicry: Innovation Inspired By Nature by Janine Benyus. United State, Perennial.
- [12] W. Baldrige, D. (2003). The metabolic design methodology. School of design. USA, University of Cincinnati. **Master of design**
- [13] Chen, Q., M. Zeng, et al. (2010). "Optimal design of bi-layer interconnector for SOFC based on CFD-Taguchi method." International Journal of Hydrogen Energy **35**(9): 4292-4300.
- [14] Nielsen, K. A., M. Solvang, et al. (2007). "Glass composite seals for SOFC application." Journal of the European Ceramic Society **27**(2-3): 1817-1822.
- [15] Huang, C. M., S. S. Shy, et al. (2008). "On flow uniformity in various interconnects and its influence to cell performance of planar SOFC." Journal of Power Sources **183**(1): 205-213.
- [16] Wen, T. L., D. Wang, et al. (2002). "Material research for planar SOFC stack." Solid State Ionics **148**(3-4): 513-519.

[17] Herring, J. S., J. E. O'Brien, et al. (2007). "Progress in high-temperature electrolysis for hydrogen production using planar SOFC technology." International Journal of Hydrogen Energy **32**(4): 440-450.  
Ho, T. X., P. Kosinski, et al. (2010). "Effects of heat sources on the performance of a planar solid oxide fuel cell." International Journal of Hydrogen Energy **35**(9): 4276-4284.

[18] Chung et. al. (2002). Co-flow planar SOFC fuel cell stack. Patent application publication. L. L. N. Laboratory. United State, The regents of the University of California

[19] Thomas et. al. (2005). Solid oxide fuel cell stack configuration Patent application publication. B. S. K. Birch. United State.

[20] Yu et. al. (2005). Material for cathode in solid oxide fuel cells. Patent application publication. T. I. o. pllc. United State.

[21] Kim (2010). Manufacturing method of sealing glass it planar sofc. Patent application publication. E. a. p. d. llp. United State, Hyundai motor company.

[22] Sutherland et. al. (2004). Sofc with floating current collectors. Patent application published. United State.

[23] Lindsay et. al. (2002). A novel planar seal less fuel cell stack. International publication. United State.

[28] Bove, R. and S. Ubertini (2006). "Modeling solid oxide fuel cell operation: Approaches, techniques and results." Journal of Power Sources **159**(1): 543-559.

[24] Cheng et. al. (2010). Stack flow path of planar solid oxide fuel cell. United State, Institute of nuclear energy research.

[25] Erikstrup Niels (2010). Fuel cell stack clamping structure and solid oxide fuel cell stack. United State, Topsoe Erikstrup.

[26] Yoo et al. (2003). Single cell and stack structure for solid oxide fuel cell stacks. United State, Korea hydro & nuclear power co.

[27] Kailash et. al. (2008). High strength support for solid oxide fuel cell. France, Delphi technologies inc.

[28] Mileswki .J. et al. (2011). Advanced Methods of Solid Oxide Fuel Cell Modeling. London, Springer.

[29] Hussain, M. M., X. Li, et al. (2006). "Mathematical modeling of planar solid oxide fuel cells." Journal of Power Sources **161**(2): 1012-1022.

[30] Bove, R. and S. Ubertini (2006). "Modeling solid oxide fuel cell operation: Approaches, techniques and results." Journal of Power Sources **159**(1): 543-559.

## **Bibliografía adicional**

Aguiar, P., D. J. L. Brett, et al. (2007). "Feasibility study and techno-economic analysis of an SOFC/battery hybrid system for vehicle applications." Journal of Power Sources **171**(1): 186-197.

Apfel, H., M. Rzepka, et al. (2006). "Thermal start-up behaviour and thermal management of SOFC's." Journal of Power Sources **154**(2): 370-378.

Bai, W., K. L. Choy, et al. (1998). "The process, structure and performance of pen cells for the intermediate temperature SOFCs." Solid State Ionics **113-115**: 259-263.

Cabouro, G., G. Caboche, et al. (2006). "Opportunity of metallic interconnects for ITSOFC: Reactivity and electrical property." Journal of Power Sources **156**(1): 39-44.

Campanari, S. and P. Iora (2004). "Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for a tubular cell geometry." Journal of Power Sources **132**(1-2): 113-126.

Chen, L., Z. Yang, et al. (2005). "Clad metals, roll bonding and their applications for SOFC interconnects." Journal of Power Sources **152**: 40-45.

Damm, D. L. and A. G. Fedorov (2005). "Radiation heat transfer in SOFC materials and components." Journal of Power Sources **143**(1-2): 158-165.

Föger, K. and J. G. Love (2004). "Fifteen years of SOFC development in Australia." Solid State Ionics **174**(1-4): 119-126.

Fu, C., K. Sun, et al. (2007). "Electrochemical characteristics of LSCF-SDC composite cathode for intermediate temperature SOFC." Electrochimica Acta **52**(13): 4589-4594.

Funahashi, Y., T. Shimamori, et al. (2007). "Fabrication and characterization of components for cube shaped micro tubular SOFC bundle." Journal of Power Sources **163**(2): 731-736.

Geng, S. J., J. H. Zhu, et al. (2006). "Evaluation of Haynes 242 alloy as SOFC interconnect material." Solid State Ionics **177**(5-6): 559-568.

Haanappel, V. A. C., V. Shemet, et al. (2005). "A novel method to evaluate the suitability of glass sealant-alloy combinations under SOFC stack conditions." Journal of Power Sources **141**(1): 102-107.

Huijsmans, J. P. P. (2001). "Ceramics in solid oxide fuel cells." Current Opinion in Solid State and Materials Science **5**(4): 317-323.

Huijsmans, J. P. P., F. P. F. van Berkel, et al. (1998). "Intermediate temperature SOFC - a promise for the 21st century." Journal of Power Sources **71**(1-2): 107-110.

Hussain, M. M., X. Li, et al. (2009). "A numerical investigation of modeling an SOFC electrode as two finite layers." International Journal of Hydrogen Energy **34**(7): 3134-3144.

Ivers-Tiffée, E., A. Weber, et al. (2001). "Materials and technologies for SOFC-components." Journal of the European Ceramic Society **21**(10-11): 1805-1811.

Karcz, M. (2009). "From 0D to 1D modeling of tubular solid oxide fuel cell." Energy Conversion and Management **50**(9): 2307-2315.

Kulikovsky, A. A. (2009). "A model for SOFC anode performance." Electrochimica Acta **54**(26): 6686-6695.

Laosiripojana, N. and S. Assabumrungrat (2006). "The effect of specific surface area on the activity of nano-scale ceria catalysts for methanol decomposition with and without steam at SOFC operating temperatures." Chemical Engineering Science **61**(8): 2540-2549.

Larrain, D., J. Van herle, et al. (2004). "Generalized model of planar SOFC repeat element for design optimization." Journal of Power Sources **131**(1-2): 304-312.

Leah, R. T., N. P. Brandon, et al. (2005). "Modelling of cells, stacks and systems based around metal-supported planar IT-SOFC cells with CGO electrolytes operating at 500-600 °C." Journal of Power Sources **145**(2): 336-352.

Lee, S. F. and C. W. Hong (2010). "Multi-scale design simulation of a novel intermediate-temperature micro solid oxide fuel cell stack system." International Journal of Hydrogen Energy **35**(3): 1330-1338.

Lim, T.-H., J.-L. Park, et al. (2010). "Fabrication and operation of a 1 kW class anode-supported flat tubular SOFC stack." International Journal of Hydrogen Energy **35**(18): 9687-9692.

Lin, C.-K., T.-T. Chen, et al. (2007). "Thermal stress analysis of a planar SOFC stack." Journal of Power Sources **164**(1): 238-251.

Liu, Y., S.-I. Hashimoto, et al. (2007). "Fabrication and characterization of micro-tubular cathode-supported SOFC for intermediate temperature operation." Journal of Power Sources **174**(1): 95-102.

Mahcene, H., H. B. Moussa, et al. (2011). "Study of species, temperature distributions and the solid oxide fuel cells performance in a 2-D model." International Journal of Hydrogen Energy **36**(6): 4244-4252.

Molenda, J., K. Swierczek, et al. (2007). "Functional materials for the IT-SOFC." Journal of Power Sources **173**(2): 657-670.

Molin, S., B. Kusz, et al. (2008). "Evaluation of porous 430L stainless steel for SOFC operation at intermediate temperatures." Journal of Power Sources **181**(1): 31-37.

Niewolak, L., E. Wessel, et al. (2010). "Potential suitability of ferritic and austenitic steels as interconnect materials for solid oxide fuel cells operating at 600 °C." Journal of Power Sources **195**(22): 7600-7608.

Oulmi, K., B. Zitouni, et al. (2011). "Total polarization effect on the location of maximum temperature value in planar SOFC." International Journal of Hydrogen Energy **36**(6): 4236-4243.

Pramuanjaroenkij, A., S. Kakaç, et al. (2008). "Mathematical analysis of planar solid oxide fuel cells." International Journal of Hydrogen Energy **33**(10): 2547-2565.

Santin, M., A. Traverso, et al. (2009). "Liquid fuel utilization in SOFC hybrid systems." Applied Energy **86**(10): 2204-2212.

Serincan, M. F., U. Pasaogullari, et al. (2009). "A transient analysis of a micro-tubular solid oxide fuel cell (SOFC)." Journal of Power Sources **194**(2): 864-872.

Shi, J. and X. Xue (2010). "CFD analysis of a novel symmetrical planar SOFC design with micro-flow channels." Chemical Engineering Journal **163**(1-2): 119-125.

Sugita, S., Y. Yoshida, et al. (2008). "Cathode contact optimization and performance evaluation of intermediate temperature-operating solid oxide fuel cell stacks based on anode-supported planar cells with LaNi<sub>0.6</sub>Fe<sub>0.4</sub>O<sub>3</sub> cathode." Journal of Power Sources **185**(2): 932-936.

Suzuki, T., Y. Funahashi, et al. (2008). "Development of cube-type SOFC stacks using anode-supported tubular cells." Journal of Power Sources **175**(1): 68-74.

Suzuki, T., T. Yamaguchi, et al. (2006). "Fabrication and characterization of micro tubular SOFCs for operation in the intermediate temperature." Journal of Power Sources **160**(1): 73-77.

Van herle, J., R. Ihringer, et al. (2000). "Concept and technology of SOFC for electric vehicles." Solid State Ionics **132**(3-4): 333-342.

Williams, K. R. and G. T. Burstein (1997). "Low temperature fuel cells: Interactions between catalysts and engineering design." Catalysis Today **38**(4): 401-410.

Wincewicz, K. C. and J. S. Cooper (2005). "Taxonomies of SOFC material and manufacturing alternatives." Journal of Power Sources **140**(2): 280-296.

Xue, X., J. Tang, et al. (2005). "Dynamic modeling of single tubular SOFC combining heat/mass transfer and electrochemical reaction effects." Journal of Power Sources **142**(1-2): 211-222.

Yakabe, H., T. Ogiwara, et al. (2001). "3-D model calculation for planar SOFC." Journal of Power Sources **102**(1-2): 144-154.

Yamaguchi, T., S. Shimizu, et al. (2008). "Fabrication and characterization of high performance cathode supported small-scale SOFC for intermediate temperature operation." Electrochemistry Communications **10**(9): 1381-1383.

Zhao, Y., N. Shah, et al. "Comparison between two optimization strategies for solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid cycles." International Journal of Hydrogen Energy **In Press, Corrected Proof**.

Yamanis et. al. (2004). Interconnect for solid oxide fuel cell. patent application publication. P. C. Bachman & Lapointe. United State.

Agnew et. al. (2004). Solid Oxide fuel cell stack. Patent application publication M. D. Selter. United State.

Kwon et. al. (2005). Stack supported solid oxide fuel cell. Patent application publication. T. L. A. IIP. United State.

Rakowski et. al.(2006). Interconnects for solid oxide fuel cells and ferritic stainless steels adapted for use with solid oxide fuel cells. Patent application publication. A. technologies. United State.

Lee et.al. (2009). Innovation control process for specific porosity/gas permeability of electrode layers of sofc-mea. Patent application publication. M. lin. United State.

Armstrong et. al. (2010). Fuel cell stack components and materials. Patent application publication. F. a. I. IIP. United State.

Lin et. al. (2010). Device for transporting planar sofc stack. Patent application publication. I. property. United State, Institute of nuclear energy.

Carter et. al. (2010). Method of sealing a bipolar plate supported solid oxide fuel cell with a sealed anode compartment. Patent application publication. J. pennington. United State, Chicago argon.

He et. al. (2011). Solid oxide fuel cell systems with heat exchanges. Patent application publication.

Gordon Arnold (1991). Solid oxide fuel cell assembly. United State, IGR Enterprise inc.

Kendall Kevin (1998). Solid oxide fuel cell structures. United State, Keele university.

Geisbrecht et. al. (2003). Planar solid oxide fuel cell with staged indirect internal air and fuel preheating and reformation. United State, EU Department of energy.

Kearl Daniel (2005). Hybrid thin film/thick film solid oxide fuel cell and method of manufacturing the same. United State, Hewlett Packard development company.

Kushibiki et al.(2010). Single cell for fuel cell and solid oxide fuel cell. United State, Nissan Motor co.

Thompson et. al. (2003). Glass ceramic coatings and sealing arrangements and their use in fuel cells. United State, Alstom UK ltd.

Wood et. al. (2008). Cell materials variation in sofc stacks to address thermal gradients in all planes. V. p. s. ltd. United State.

Singhal et. al. (2002). High Temperature solid oxide fuel cells: fundamentals, design and applications. USA, Elsevier.

Bedogni, S., S. Campanari, et al. (2007). "Experimental analysis and modeling for a circular-planar type IT-SOFC." Journal of Power Sources **171**(2): 617-625.

Bhattacharyya, D. and R. Rengaswamy (2009). "Transport, sensitivity, and dimensional optimization studies of a tubular Solid Oxide Fuel Cell." Journal of Power Sources **190**(2): 499-510.

Bhattacharyya, D. and R. Rengaswamy (2010). "Dimensional optimization of a tubular solid oxide fuel cell." Computers & Chemical Engineering **34**(11): 1789-1802.