

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

"Diseño y simulación de una micro celda de combustible para un  
laboratorio de celdas microfluídicas"

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Emmanuel Antonio Sornoza Cabrera

Jonathan Jossue Yépez Reyes

**GUAYAQUIL - ECUADOR**

Año: 2018

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecido infinitamente con Dios, por darme siempre salud para alcanzar mis metas y sueños, a mi abuelita Fanny quien lo representa todo para mi familia y para mí, a mi mami Carmen, mis hermanos, Marce y Dani, y a mi novia Nicole, quienes han sido un apoyo incondicional en mis momentos más difíciles, siempre aconsejándome, dándome aliento y mucho amor para seguir adelante, y es que son mi felicidad, el motivo de mantenerme en pie y despertarme cada mañana, sintiéndome un hombre muy bendecido y afortunado.

**Emmanuel Antonio Sornoza Cabrera**

A Dios, a mis padres Patricia y Bolívar, a mis hermanos Christian y Jeremy, cada uno representa mi motivo de despertarme y crecer cada día, su apoyo y amor son mi luz, mi pista de aterrizaje, mi bendición, mi vida entera, y a Dayse, por ser la hermana que siempre soñé, decirme “Tú puedes” cuando más lo necesitaba y enseñarme como un simple café traería consigo los mejores recuerdos que me llevo de mi vida universitaria, que afortunado fui al encontrarte.

**Jonathan Jossue Yépez Reyes**

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Emmanuel Antonio Sornoza Cabrera* y *Jonathan Josué Yépez Reyes* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



---

Emmanuel Sornoza C.




---

Jonathan Yépez R.

## EVALUADORES



**M.Sc. Jorge Marcial Hernández**  
PROFESOR DE LA MATERIA



**Ph.D. Mayken Espinoza Andaluz**  
PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Las celdas de combustible representan un avance tecnológico y energético que se ha desarrollado durante los últimos años. Su funcionamiento consiste en la producción de energía eléctrica a partir de reacciones químicas, sin embargo, el desarrollo de nuevas tecnologías de escala micro conlleva a una búsqueda de nuevas formas de almacenamiento de energía, por lo cual el estudio y análisis de celdas de combustible a pequeñas escalas, representa una solución acertada.

El objetivo de nuestro proyecto es diseñar una celda de combustible microfluídica para el Laboratorio de Fuentes Renovables (LabFREE) de ESPOL con el fin de brindar un aporte de carácter investigativo y académico, mediante la selección de los diferentes insumos y componentes que se requirió en el diseño, dimensionamiento de canal, selección de bombas y materiales de fabricación. La simulación nos permitió evaluar el diseño para luego realizar un modelado en 3D de todo el sistema.

Los resultados obtenidos de densidad de corriente fueron comparados con graficas teóricas de publicaciones ya realizadas en diferentes centros de investigación. Un análisis de la fabricación y costos nos permitió determinar la cotización requerida para la implementación del prototipo para el LabFREE.

Como conclusión se obtuvo que el mejor diseño de la celda de combustible microfluídica cuenta con un canal en Y, utilizando como combustible ácido fórmico y como oxidante el oxígeno, con un electrolito de ácido sulfúrico y electrodos de Paladio.

**Palabras Clave:** Celda de combustible, canal, densidad de corriente, ácido fórmico, oxígeno, ácido sulfúrico.

## **ABSTRACT**

*Fuel cells represent a technological and energy advance that has been developed during the last years. Its operation consists in the generation of electrical energy from chemical reaction, however the development of new micro-scale technologies leads to a search for new forms of energy production, for which the study and analysis of fuel cells at small scales, represents a suitable solution.*

*The objective of our project is the design of a microfluidic fuel cell to be used in the Laboratory of Renewable Sources (LabFREE) of ESPOL in order to provide a contribution of researching and teaching nature, by selecting the different inputs and components that it was required in the design, channel sizing, selection of pumps and manufacturing materials. The simulation allowed us to evaluate the design and then perform a 3D modeling of the entire system.*

*The obtained results of current density were compared with theoretical graphs of publications already carried out in different research centers. An analysis of the manufacturing and costs allowed us to determine the costs required for the implementation of the prototype, to the LabFREE.*

*As a result, the best design of the microfluidic fuel cell was obtained. It has a Y-channel, using formic acid as fuel and oxygen as oxidant, with a sulfuric acid electrolyte and Palladium electrodes.*

*Keywords: Fuel cell, channel, current density, formic acid, oxygen, sulfuric acid.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Justificación del proyecto.....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General .....	3
1.3.2 Objetivos Específicos .....	3
1.4 Marco teórico .....	3
1.4.1 Celdas de combustible .....	3
1.4.2 Principio de funcionamiento de una celda de combustible.....	4
1.4.3 Tipología de celdas de combustible .....	4
1.4.4 Celda de combustibles de flujo laminar LM $\mu$ FFC .....	5
1.4.5 Transporte de masa en una LM $\mu$ FFC .....	5
1.4.6 Número de Reynolds (Re) en una LM $\mu$ FFC.....	6
1.4.7 Ecuaciones de Navier Stokes en una LM $\mu$ FFC.....	6
1.4.8 Ecuación de Butler-Volmer.....	7
1.4.9 Reacción anódica y catódica en una LM $\mu$ FFC.....	8
1.4.10 Análisis de elementos finitos (AEF) para una LM $\mu$ FFC.....	8
CAPÍTULO 2 .....	10
2. Metodología.....	10
2.1 Planteamiento de alternativas de diseño de una LM $\mu$ FFC .....	11
2.2 Selección de elementos de la LM $\mu$ FFC .....	11
2.2.1 Selección del combustible .....	11

2.2.2	Selección del electrolito.....	15
2.2.3	Selección del oxidante.....	18
2.2.4	Selección de material para electrodos.....	20
2.2.5	Selección del diseño de la celda de combustible .....	24
2.3	Diseño Conceptual de la LM $\mu$ FFC .....	26
2.4	Dimensionamiento del canal de la LM $\mu$ FFC .....	27
2.5	Perfil de velocidad y Número de Reynolds en el canal de la LM $\mu$ FFC .....	28
2.5.1	Perfil de velocidad en el canal central de la LM $\mu$ FFC .....	28
2.5.2	Número de Reynolds en el canal central de la LM $\mu$ FFC .....	31
2.5.3	Variación del ángulo de la LM $\mu$ FFC .....	31
2.6	Electroquímica de celda de combustible LM $\mu$ FFC.....	33
2.6.1	Concentraciones de combustible y oxidantes iniciales en la LM $\mu$ FFC...	33
2.6.2	Reacciones químicas en los electrodos de la LM $\mu$ FFC.....	34
2.6.3	Electrocinética de la LM $\mu$ FFC .....	35
2.7	Selección de bomba para el sistema de la LM $\mu$ FFC.....	36
2.8	Pérdidas por fricción en mangueras y selección de pernos .....	36
CAPÍTULO 3 .....		37
3.	Resultados y análisis .....	37
3.1	Análisis de densidad de corriente obtenido en la LM $\mu$ FFC.....	37
3.2	Optimización del modelo obtenido de la LM $\mu$ FFC .....	39
3.2.1	Concentración de combustible .....	39
3.2.2	Densidad de corriente de intercambio .....	40
3.2.3	Stacks de LM $\mu$ FFC.....	41
3.3	Diseño CAD de la LM $\mu$ FFC .....	42
3.4	Proceso de Fabricación de la LM $\mu$ FFC.....	42
3.5	Estimación de costos de fabricación.....	52
3.6	Análisis de costos de manufactura de la LM $\mu$ FC .....	54
CAPÍTULO 4 .....		56
4.	Conclusiones Y RECOMENDACIONES.....	56
4.1	Conclusiones .....	56
4.2	Recomendaciones .....	58
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		



## ABREVIATURAS

AEF	Análisis de Elementos Finitos
ASTM	American Society for Testing and Materials
CAD	Computer Aided Design
CC	Celda de Combustible
CFD	Computational Fluid Dynamics
EBV	Ecuación de Butler-Volmer
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FDA	Food and Drug Administration
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica en Ciencias de la Producción
ISO	International Organization for Standardization
LABFREE	Laboratorio de Energías Renovables
LM $\mu$ FFC	Micro Celda de Combustible de flujo Laminar (siglas en ingles)
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MSDS	Material Safety Data Sheet
PEM	Proton Exchange Membrane

## SIMBOLOGÍA

$\alpha_a$	Coeficiente de transferencia de carga anódico
$\alpha_c$	Coeficiente de transferencia de carga catódico
$A_e$	Área de electrodo
$A_p$	Área transversal del perno
$Au$	Oro
$CH_2O_2$	Ácido fórmico
$CO_2$	Dióxido de carbono
$Cu$	Cobre
$D$	Diámetro de la manguera
$D_L$	Diámetro o longitud característica del ducto
$Dh$	Diámetro hidráulico de canal
$Dp$	Diámetro del área transversal de perno
$e^-$	Electrón
$F$	Coeficiente de fricción
$F_R$	Fuerza resultante que actúa en los pernos
$F$	Constante de Faraday
$F_1$	Fuerza primaria
$F_2$	Fuerza secundaria
$F_{2X}$	Componente en x de la fuerza secundaria
$F_{2Y}$	Componente en y de la fuerza secundaria
$f_c$	Coeficiente de fricción para el combustible
$f_o$	Coeficiente de fricción para el oxidante
$G$	Gravedad
$H$	Altura del canal
$H^+$	Ion de Hidrógeno
$H_2O_2$	Agua oxigenada
$H_2O$	Agua
$H_2SO_4$	Ácido sulfúrico
$HCOOH$	Ácido fórmico
$h_{fc}$	Pérdida por fricción en el combustible
$h_{fo}$	Pérdida por fricción en el oxidante

$h_m$	Pérdidas menores
$I_T$	Corriente total
$j$	Densidad de corriente de intercambio por unidad de superficie
$j_o$	Densidad de corriente local
$k_L$	Coefficiente de pérdida
$KOH$	Hidróxido de Potasio
$L$	Longitud
$L_c$	Brazo o distancia al centroide
$L_m$	Longitud de manguera
$L_D$	Dosis letal
$M$	Molaridad
$M_T$	Momento total
$ml/h$	Mililitros por hora
$ml$	Mililitros
$mm$	Milímetros
$mm/s$	Milímetros por segundos
$MPa$	Mega pascales
$mW/cm^2$	Mili watts por centímetros cuadrados
$Ni$	Níquel
$nm$	Nanómetros
$N$	Número de pernos
$NF$	Factor de seguridad
$nl/min$	Nano litros por minuto
$O_2$	Oxígeno
$P$	Presión
$Pd$	Paladio
$PDMS$	Poli Dimetil Siloxano
$PEB$	Horneado de exposición posterior
$Pt$	Platino
$Ti$	Titanio
$R$	Constante de gases universal
$R$	Distancia perpendicular de la fuerza
$Re$	Número de Reynolds
$S_Y$	Resistencia a la fluencia

$T$	Temperatura
$\tau$	Esfuerzo cortante
$UV$	Ultravioleta
$v$	Velocidad
$V_1$	Volumen
$w$	Ancho del canal
$W_1$	Peso de la celda
$W_2$	Peso del acople de flujo de entrada
$W_3$	Peso del acople de flujo de salida
$\mu$	Viscosidad del flujo
$\rho$	Densidad del flujo
$n$	Número de electrones
$v_{act}$	Polarización de activación
$v_i$	Coefficiente estequiométrico
$^{\circ}$	Grados
$^{\circ}C$	Grados Celsius

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema del funcionamiento de una CC convencional PEM.....	4
Figura 1.2 Esquematación del canal de una LM $\mu$ FFC .....	5
Figura 2.1 Dimensiones del canal en Y de la LM $\mu$ FFC .....	28
Figura 2.2 Modelado del canal y electrodos para el estudio de velocidades y Re.....	29
Figura 2.3 Perfil de velocidades a diferentes alturas: a) 0.25 b) 0.50 y c) 0.75 mm .....	30
Figura 2.4 Perfil de Número de Reynolds a 0.50 mm de la superficie inferior .....	31
Figura 2.5 Diseño CAD del canal en Y a diferentes ángulos .....	32
Figura 2.6 Perfil de velocidad y Re en el plano medio del canal de la LM $\mu$ FFC.....	33
Figura 2.7 Perfil de densidad de corriente en el canal Y de la LM $\mu$ FFC.....	36
Figura 3.1 Curva de potencial vs densidad de corriente.....	37
Figura 3.2 Perfil de densidad de corriente del canal en Y para un potencial de 0.2 V...38	
Figura 3.3 Curvas comparativas de la LM $\mu$ FFC obtenida y de Choban .....	38
Figura 3.4 Curva Potencia vs Densidad de corriente obtenida.....	39
Figura 3.5 Ensamble final de la LM $\mu$ FFC .....	42
Figura 3.6 Curva de espesor de recubrimiento vs velocidad de giro .....	47
Figura 3.7 Curvas de dosis de exposición de energía UV vs espesor de película .....	48

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Calificación del Método Ordinal Corregidos de Criterios Ponderados .....	11
Tabla 2.2 Criterios establecidos para la selección del combustible de la LM $\mu$ FFC .....	12
Tabla 2.3 Rangos de niveles de toxicidad en la escala Hodge y Stermer .....	12
Tabla 2.4 Cotización local de las alternativas de combustibles .....	13
Tabla 2.5 Ponderación de los criterios para la selección del combustible .....	14
Tabla 2.6 Rango de calificación para la selección del combustible .....	14
Tabla 2.7 Calificación y ponderación para cada alternativa de combustible .....	14
Tabla 2.8 Criterios establecidos para la selección del electrolito en una LM $\mu$ FFC.....	15
Tabla 2.9 Grado de toxicidad de Hodger y Stermer para los electrolitos.....	16
Tabla 2.10 Cotización local de las alternativas de electrolito.....	17
Tabla 2.11 Calificación y ponderación para cada alternativa de electrolito .....	17
Tabla 2.12 Criterios establecidos para la selección del oxidante de la LM $\mu$ FFC.....	18
Tabla 2.13 Ponderación de criterios para la selección del oxidante .....	19
Tabla 2.14 Calificación y ponderación para cada alternativa de oxidante .....	20
Tabla 2.15 Criterios establecidos para la selección de catalizadores de la LM $\mu$ FFC ....	20
Tabla 2.16 LM $\mu$ FFC desarrolladas hasta la actualidad .....	22
Tabla 2.17 Ponderación para cada criterio en la selección del electrodo .....	23
Tabla 2.18 Calificación y ponderación para cada alternativa de electrodo .....	23
Tabla 2.19 Criterios para la selección de la geometría para una LM $\mu$ FFC.....	24
Tabla 2.20 Ponderación para cada criterio en la selección de la geometría .....	25
Tabla 2.21 Calificación y ponderación para cada alternativa de diseño de LM $\mu$ FFC ....	26
Tabla 2.22 Densidad y viscosidad de los ácidos que se emplean en la LM $\mu$ FFC .....	27
Tabla 2.23 Velocidades de entrada de los flujos .....	28
Tabla 2.24 Velocidades y Re obtenidos a diferentes ángulos de entrada .....	32
Tabla 2.25 Parámetros electroquímicos para la simulación del canal en Y.....	35
Tabla 3.1 Variación de concentraciones (M) de ácido fórmico HCOOH .....	40
Tabla 3.2 Densidad de corriente de Intercambio en diferentes electrodos de Pd.....	41
Tabla 3.3 Desempeño de stacks de LM $\mu$ FFC desarrollados en la actualidad.....	41
Tabla 3.4 Velocidad de grabado por pulverización catódica (500 eV. 1 mA/cm <sup>2</sup> ) .....	43
Tabla 3.5 Condiciones de operación típica para el proceso de Sputtering .....	44
Tabla 3.6 Condiciones de recubrimiento para el proceso de fotolitografía UV .....	46

Tabla 3.7 Espesor de recubrimiento en función de la velocidad de giro.....	46
Tabla 3.8 Parámetros de horneado en función del espesor para fotolitografía UV .....	47
Tabla 3.9 Parámetros de PEB en función del espesor para fotolitografía UV .....	49
Tabla 3.10 Tiempo de revelado en función del espesor para fotolitografía UV .....	49
Tabla 3.11 Especificaciones técnicas de electrocatalizador de Pd/XC-72 .....	51
Tabla 3.12 Cotización de materiales y químicos para la fabricación de la LM $\mu$ FFC.....	53
Tabla 3.13 Costo de adquisición de materiales de sujeción y acople.....	54
Tabla 3.14 Costos parciales de manufactura y apoyo de personal especializado.....	54

## **ÍNDICE DE PLANOS**

- PLANO 1 Ensamble final de la celda de combustible microfluídica
- PLANO 2 Vista en explosión de la celda de combustible microfluídica
- PLANO 3 Base de canal en Y de la celda de combustible microfluídica
- PLANO 4 Base superior e inferior de la celda de combustible microfluídica



# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Las celdas de combustible son dispositivos electroquímicos encargados de convertir energía química, obtenida de las reacciones producidas entre el flujo, continuo y controlado, de combustible y oxidante, en energía eléctrica, por medio de un circuito externo. Consisten en dos corrientes acuosas (combustible y oxidante), electrodos y una sustancia electrolítica para facilitar el transporte iónico dentro de las corrientes. El funcionamiento general consiste en que el combustible ingresa en una placa por el lado del ánodo, donde por medio de una reacción química, se desprenden electrones, los cuales son direccionados para generar corriente y realizar un trabajo. El oxígeno ingresa por el cátodo los cuales se combinan con los electrones que regresan y los iones de hidrogeno que viajan por medio del electrolito. Las condiciones de funcionamiento de las celdas de combustible microfluídicas se basan en que los flujos son accionados a presión, en un régimen laminar donde  $Re < 10$ .

Este equipo representa un nuevo camino en el campo de las energías renovables, debido a la alta demanda energética que requieren de un tiempo de vida prolongado. En la actualidad las pilas de combustible representan una base para el campo energético, pero presentan problemas asociados con su funcionamiento, uno de ellos es que la eficiencia de la pila depende de la temperatura, lo cual limita a trabajar a valores altos de temperatura, donde también se limita su eficiencia, lo cual se puede evitar utilizando celdas de combustibles del tipo microfluídicas.

Las celdas de combustible del tipo microfluídicas presentan una gran variedad de usos y aplicaciones, no solo en el área automotriz o electrónica, sino también aeroespacial (Apolo, NASA), que presentó un auge en la década de los 60s, debido a sus largos períodos de operabilidad, sin la necesidad de recarga, convirtiéndola en una fuente de energía eficiente y sostenible en el tiempo.

### 1.1 Descripción del problema

Los estudios relacionados con celdas de combustible microfluídicas en el país son limitados, lo que conlleva a una escasa aplicación de estas, en diversos dispositivos electrónicos portátiles utilizados, tanto por la industria como por

la sociedad. La escasa utilización de este tipo de celdas responde a la carencia de equipos y/o laboratorios especializados. La presente propuesta pretende llenar esta brecha, incentivando, en mayor o menor grado, el uso de esta tecnología. El campo de estudio de celdas de combustible es muy amplio y diverso, ya que guarda relación con las energías limpias y/o amigables con el medio ambiente, es decir, las energías renovables, las cuales no han sido desarrolladas en su totalidad en el Ecuador, salvo las ya reconocidas energías eólica, hidráulica y solar. Todo esto debido a la falta de equipos, máquinas, dispositivos, herramientas o incluso laboratorios especializados que permitan al estudiante de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, familiarizarse con esta rama científica que se halla en constante crecimiento.

## **1.2 Justificación del proyecto**

El incremento de la demanda social de una amplia variedad de pequeños dispositivos, por lo general portátiles, que tengan la capacidad de funcionamiento para largos períodos de operatividad, han dado inicio a investigaciones en el avance de fuentes de energía a escala micrométrica. Las aplicaciones portátiles no solo se hallan relacionadas con teléfonos celulares, o computadoras y organizadores portátiles, sino también con aparatos más especializados empleados para pruebas clínicas y de diagnóstico, sistemas micro analíticos para pruebas de campo y sistemas de ubicación global. La búsqueda de información relativa a sistemas de microescala se ha encaminado principalmente a la reducción de componentes funcionales, abriendo paso a estudios e investigaciones relacionados con la reducción del tamaño de las fuentes de energía.

Por ello, el laboratorio de Energías Renovables (LabFREE) de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP), encargado de estudios relacionados con energía eólica y solar, así como energía eléctrica generada a partir de pilas de combustible, requiere de un laboratorio para celdas de combustible del tipo microfluídicas para el desarrollo de investigaciones y pruebas de índole académicas, que ayuden al estudiante de

la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción en el desarrollo de aptitudes y destrezas vinculadas con el creciente auge de las denominadas energías limpias.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar una micro celda de Combustible del tipo microfluídicas, con fines académicos e investigativos en el campo energético, mediante software de simulación.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Determinar el dimensionamiento y demás características físicas de los componentes de las celdas de combustible.
2. Construir un modelo mediante software de elementos finitos o CFD, para verificación de cálculos analíticos.
3. Analizar los métodos de fabricación que intervienen en el diseño de los diferentes componentes de las celdas de combustibles.
4. Analizar costos del diseño, que sirvan de soporte para una futura implementación dentro de la facultad FIMCP.

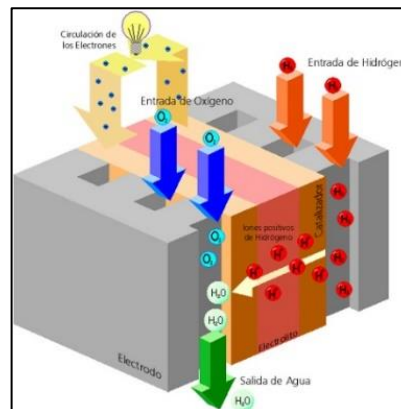
### **1.4 Marco teórico**

#### **1.4.1 Celdas de combustible**

Una celda de combustible (CC) consiste en un dispositivo electroquímico el cual tiene un similar principio de funcionamiento que las baterías ordinarias. A partir de reacciones químicas se produce energía en forma de electricidad mediante el uso de un combustible y un oxidante sin el riesgo de causar contaminación al ambiente, es decir, producción de energía limpia. Dentro de la celda de combustible se produce reacciones de oxidación y reducción, alcanzado valores de eficiencia elevados en el sistema (CENIDET, 2006).

### 1.4.2 Principio de funcionamiento de una celda de combustible

El combustible y su electrodo reaccionan y permiten la ionización del mismo, con el fin de liberar electrones para enviarlos a un circuito externo y producir energía. Del lado del oxidante se da una reacción de reducción donde se van a combinar con el mismo y formar iones. Los iones se combinan en un medio electrolítico, el cual permite el transporte de los iones entre los electrodos. A continuación, se muestra el funcionamiento de una CC tipo PEM, es decir, con membrana de intercambio protónico por sus siglas en inglés (Figura 1.1).



**Figura 1.1 Esquema del funcionamiento de una CC convencional PEM**

Fuente: (Paula Sánchez Sobrini, 2014)

### 1.4.3 Tipología de celdas de combustible

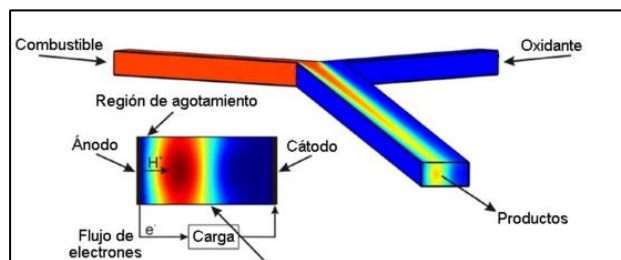
Las celdas de combustible se clasifican de diferentes formas, según el tipo de combustible, el diseño de la misma celda, la potencia de salida, etc. La selección de un tipo determinado de celda de combustible dependerá de los parámetros de costos, aplicaciones, eficiencia, entre otros. La principal clasificación se fundamenta en el diseño de la CC:

- Celdas de combustibles convencionales
- Bioceldas de combustible
- Celdas de combustible de flujo laminar (LM $\mu$ FFC)

De las cuales, el presente proyecto se enfoca en las LM $\mu$ FFC.

#### 1.4.4 Celda de combustibles de flujo laminar LM $\mu$ FFC

También conocidas como celdas de combustible microfluídicas, el combustible y el oxidante viajan por separado, y se unen mediante un canal, donde el flujo se encuentra en régimen laminar, además de presentar valores de número de Reynolds bajos ( $Re < 10$ ), el cual se puede obtener mediante el dimensionamiento del canal y las variaciones de velocidades. El cátodo y el ánodo se encuentran a lo largo del canal, produciendo un potencial de circuito abierto en la celda (Eric R. Choban, Larry J. Markoski, Andrzej Wieckowski, Paul J.A. Kenis, 2004). El intercambio de protones se realiza en la interfaz líquido-líquido, mientras que el flujo de electrones es direccionado por un circuito externo. (Figura 1.2).



**Figura 1.2 Esquemización del canal de una LM $\mu$ FFC**

Fuente: (A. Ebrahimi Khabbazi, AJ Richards, M. Hoorfar, 2010)

El régimen laminar de los flujos da como resultado la ausencia de una mezcla convectiva en los flujos, además que se produce una difusión transversal a los flujos, donde se da la aparición de una zona de mezcla (interfaz líquido-líquido) por lo cual entran en contacto los flujos en el centro del canal.

#### 1.4.5 Transporte de masa en una LM $\mu$ FFC

El transporte de masa es uno de los principales fundamentos teóricos en una LM $\mu$ FFC, ya que se encuentran limitadas a las altas densidades de corriente. Para mejorar el transporte de masa es necesario el aumento de las concentraciones de los reactivos, como también influye el diseño del

canal, ya que debe ser lo menos ancho posible para que disminuya la distancia de recorrido. Los reactivos con propiedades de alta difusión mejoran el desempeño de la LM $\mu$ FFC (Colleen Spiegel, 2008).

#### 1.4.6 Número de Reynolds (Re) en una LM $\mu$ FFC

El funcionamiento de una LM $\mu$ FFC se caracteriza principalmente en que los microfluidos se encuentran en estado laminar, para ello es necesario definir el Número de Reynolds (Ecuación 1.1):

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (1.1)$$

Donde:

- $\rho$  = Densidad del flujo (kg/m<sup>3</sup>)
- $v$  = velocidad del flujo (m/s)
- $D$  = diámetro o longitud característica del ducto (m)
- $\mu$  = Viscosidad del flujo (Pa.s)

Como ya se mencionó, un Re bajo permite un mayor transporte iónico a través de los flujos. Para una LM $\mu$ FFC es necesario que el valor de Re sea menor a 10 para obtener un estado laminar (Colleen Spiegel, 2008).

#### 1.4.7 Ecuaciones de Navier Stokes en una LM $\mu$ FFC

El flujo colaminar en el canal de las celdas de combustible microfluídicas puede presentar efectos por viscosidad o tensión superficial. Es por ello por lo que es necesario establecer las ecuaciones de Navier Stokes para la deducción del campo de velocidades (Ecuación 1.2):

$$\rho \left( \frac{\delta \bar{u}}{\delta t} + \bar{u} \nabla \bar{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \bar{u} + f \quad (1.2)$$

Donde P equivale a la presión, y f son las fuerzas en función del volumen. Teniendo en consideración que el número de Reynolds es bajo, la parte

de la ecuación que representa la aceleración convectiva  $\bar{u}\nabla\bar{u}$  , se puede despreciar. Además, que los flujos se rigen a la ecuación de continuidad (Erik Kjeang, Ned Djilali, David Sintona, 2008) (Ecuación 1.3):

$$\frac{\delta\bar{\rho}}{\delta t} + \nabla(\rho\bar{u}) = 0 \quad (1.3)$$

Donde se asume que los flujos son incompresibles, por lo cual su densidad no va a variar y se anula el primer término de la ecuación (Eric R. Chohan, Larry J. Markoski, Andrzej Wieckowski, Paul J.A. Kenis, 2004), por lo tanto (Ecuación 1.4):

$$\nabla(\rho\bar{u}) = 0 \quad (1.4)$$

#### 1.4.8 Ecuación de Butler-Volmer

La ecuación de Butler-Volmer (EBV), nos permite dar una aproximación la densidad de corriente en cada electrodo de la celda de combustible (Boming Zhu, 2010). Definiendo la ecuación general (Ecuación 1.5):

$$j = j_0 \exp\left[\frac{\alpha_a n F v_{act}}{RT}\right] - j_0 \exp\left[\frac{\alpha_c n F v_{act}}{RT}\right] \quad (1.5)$$

Donde:

- $j_0$ = Densidad de corriente de intercambio (A/m<sup>2</sup>)
- $\alpha_a$ =Coeficiente de transferencia de carga anódico
- $\alpha_c$ =Coeficiente de transferencia de carga catódico
- $F$ =Constante de Faraday
- $T$ =Temperatura de operación (K)
- $R$ =Constante de gases universal (8.314 J/mol\*K)
- $v_{act}$  =Polarización de activación (V)

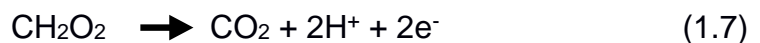
A partir del valor calculado de densidad de corriente es posible estimar la corriente neta que se obtiene de una LM $\mu$ FFC (Ecuación 1.6):

$$i_T = JA_e \quad (1.6)$$

Donde  $J$  es la densidad de corriente y  $A_e$  es el área del electrodo.

#### 1.4.9 Reacción anódica y catódica en una LM $\mu$ FFC

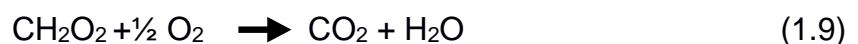
En lo que implica las reacciones que se presentan en el funcionamiento de una celda de combustible tenemos dos reacciones: anódica y catódica. Como ejemplo tomamos de combustible al ácido fórmico y como oxidante el oxígeno O<sub>2</sub> (Ecuación 1.7):



La ecuación anterior nos muestra que el ácido fórmico libera electrones en la reacción anódica los cuales se direccionan al cátodo en un circuito externo, mientras que los protones viajan por medio de la interfaz de los dos flujos hasta el cátodo. Los electrones y los protones reaccionan junto con el oxígeno del lado de cátodo, produciendo una reacción catódica (Ecuación 1.8):



A partir de ello podemos reescribir en forma general la ecuación química en función de sus entradas de combustible y oxidante (ácido fórmico y oxígeno) y sus productos (Ecuación 1.9) (Wei Ping Zhou ,Adam Lewera, Robert Larsen, Rich I. Masel, Paul S. Bagus, 2006):



#### 1.4.10 Análisis de elementos finitos (AEF) para una LM $\mu$ FFC

El análisis de una LM $\mu$ FFC involucra problemas con áreas complejas, propiedades físicas y química de materiales y fluidos, cargas distribuidas,

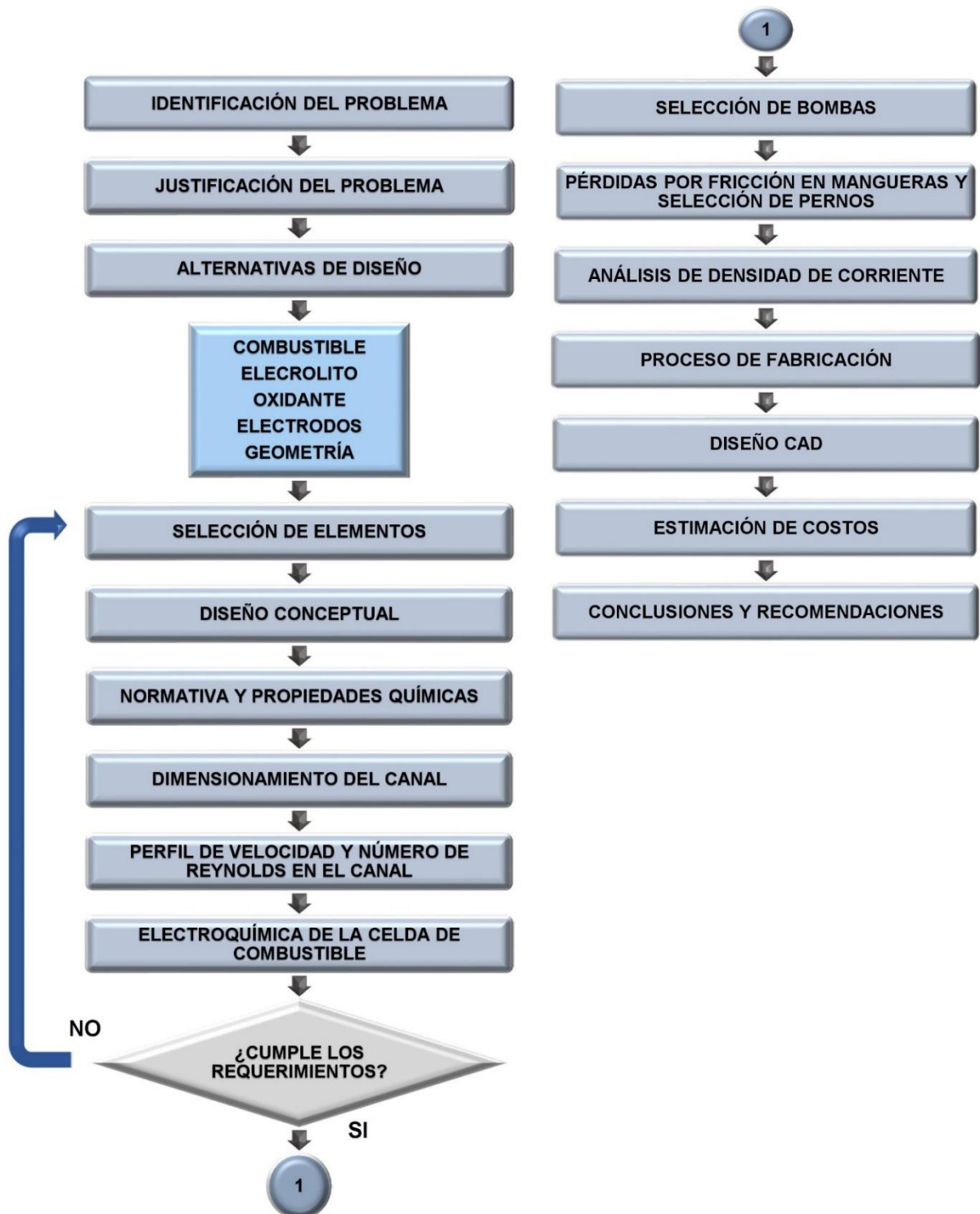


los cuales son parámetros que nos direccionan al uso de AEF para la realización del proyecto. El AEF nos permite obtener una solución numérica de forma aproximada de un cuerpo, fluido o elemento, el cual se divide en un número finito de “elementos”, los cuales se encuentran interconectados por puntos denominados “nodos”. Por lo tanto, para la resolución de los cálculos en este proyecto se utilizará un software de simulación que se fundamente en el AEF y a su vez establecer las teorías físicas que rigen el modelado del diseño y análisis de la LM $\mu$ FFC.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

La metodología por emplear para el desarrollo del proyecto se encuentra detallada en el siguiente diagrama:



## 2.1 Planteamiento de alternativas de diseño de una LM $\mu$ FFC

El diseño de una LM $\mu$ FFC depende de diferentes parámetros que intervienen en el rendimiento de una celda de combustible. Para nuestro proyecto se consideró, la selección de: combustible, electrolito, oxidante, electrodos y geometría de la celda. Para la ponderación respectiva de los criterios que se tomarán en cuenta en cada elemento del diseño, se utilizó el “Método Ordinal Corregidos de Criterios Ponderados” (Carles Ribas, 2002) con el fin de seleccionar la mejor alternativa correspondiente. El método consiste en la evaluación en pareja de todos los criterios utilizando tres valores establecidos para la calificación (Tabla 2.1):

**Tabla 2.1 Calificación del Método Ordinal Corregidos de Criterios Ponderados**

Calificación	Criterios
1	Criterio 1 > Criterio 2
0.5	Criterio 1 = Criterio 2
0	Criterio 1 < Criterio 2

Fuente: (Carles Ribas, 2002)  
Elaboración propia

Para cada elemento se estableció criterios los cuales van a ser evaluados para obtener su ponderación correspondiente con respecto a la tabla anterior y de esa manera realizar la respectiva calificación y selección de la mejor alternativa para los diferentes elementos o sustancias químicas

## 2.2 Selección de elementos de la LM $\mu$ FFC

### 2.2.1 Selección del combustible

El combustible representa un parámetro importante para el funcionamiento de una LM $\mu$ FFC, ya que interviene en la reducción anódica y en el fenómeno de transporte de masa por difusión. Para ello se selección tres posibles alternativas de combustible: metanol, ácido fórmico y etanol ya que son los más utilizados para este tipo de celda. Los criterios por evaluar para la selección del combustible se han tabulado para su respectivo análisis (Tabla 2.2):

**Tabla 2.2 Criterios establecidos para la selección del combustible de la LM $\mu$ FFC**

Criterio	Descripción
A	Disponibilidad en el mercado
B	No tóxico
C	Fácil almacenamiento
D	Bajo costo
E	No sea inflamable

Elaboración propia

**Disponibilidad en el mercado:** ya que se requiere que los insumos se puedan encontrar en el mercado local con el fin de minimizar costos.

**No tóxico:** debido a que se encontrará a disposición del área académica de los profesores y estudiantes. Para ello se utilizó hojas de seguridad de (Quimpac, 2016), y obtener los rangos de toxicidad de cada sustancia. El nivel de toxicidad para el ácido fórmico, metanol y etanol fueron de 730, 87.5 mg/kg-rata respectivamente.

**Tabla 2.3 Rangos de niveles de toxicidad en la escala Hodge y Stermer**

Clasificación de Toxicidad	Comúnmente usado	Rutas de toxicidad		
		Oral LD50 (una sola dosis para rata) mg/kg	Inhalación LC50 (exposición de ratas por 4 horas) ppm	Dermal LD50 (una única aplicación a la piel de conejos) mg/kg
1	Extremadamente tóxico	1 o menos	10 o menos	5 o menos
2	Altamente tóxico	1-50	10-100	5-43
3	Moderadamente tóxico	50-500	100-1000	43-340
4	Ligeramente tóxico	500-5000	1000-10000	350-2810
5	Prácticamente no-tóxico	5000-15000	10000-100000	2820-22590
6	Relativamente nocivo	15000 o más	100000	22660 o más

Fuente: (CCSO, 2006)

Su utilizo la tabla de toxicidad de Hodger y Stermer (CCSO, 2006) para evaluar los niveles de toxicidad antes mencionados (Tabla 2.3), donde se puede verificar que el ácido fórmico (verde) es menos tóxico que el metanol (rojo), por lo cual tendrá una mayor valoración en lo que respecta la selección del combustible.

**Fácil almacenamiento:** debe ser un recipiente sellado, fresco y fácil de almacenar, lejos de sustancias que puedan no ser compatibles con el metanol, etanol o ácido fórmico.

**Bajo costo:** el laboratorio de celdas de combustible requiere de costos accesibles para la implementación y realización de prácticas. Para ello se realizó la cotización respectiva en diferentes distribuidores locales los cuales nos proporcionaron los siguientes valores (Tabla 2.4):

**Tabla 2.4 Cotización local de las alternativas de combustibles**

1 L de ácido fórmico	\$ 4.00
1 L de etanol	\$ 5.00
1 L de metanol	\$ 2.00

Elaboración propia

Estos valores otorgados por las distribuidoras locales nos permiten verificar que con respecto a costo el uso del metanol es más viable mientras que el etanol refleja un valor mayor con respecto a los otros dos combustibles.

**No sea inflamable:** el funcionamiento de las celdas de combustible estará expuesto a temperaturas ambiente, y requiere de no tenga propiedades de inflamabilidad, De igual forma, se utilizó las hojas de seguridad, donde a partir de ellas se obtendrá las características de inflamabilidad respectiva para el metanol, etanol y ácido fórmico. Se procedió a determinar la ponderación de los criterios de la tabla anterior (Tabla 2.2), para luego aplicar el Método Ordinal Corregidos de Criterios Ponderados y obtener el peso respectivo de cada criterio (Tabla 2.5):

**Tabla 2.5 Ponderación de los criterios para la selección del combustible**

	A	B	C	D	E	$\sum +1$	Ponderación
A		1	0.5	0.5	0	3	0.20
B	0		1	1	0.5	3.5	0.23
C	0.5	0		0	0.5	2	0.13
D	0.5	0	1		1	3.5	0.23
E	1	0.5	0.5	0		3	0.20
TOTAL						15	1.00

Elaboración propia

**Tabla 2.6 Rango de calificación para la selección del combustible**

Rango de calificación	Categoría
10	Excelente
9-8	Muy bueno
7-6	Bueno
5-4	Regular
3-2	Malo
1-0	Muy malo

Elaboración propia

Una vez determinado las ponderaciones correspondientes a cada criterio para la selección del combustible, se utiliza la tabla de rango de calificación con el fin de evaluar cada una de las alternativas (Tabla 2.6). El siguiente paso es evaluar cada una de las alternativas de combustible (Tabla 2.7), utilizando las hojas de seguridad de los combustibles (Quimpac, 2016):

**Tabla 2.7 Calificación y ponderación para cada alternativa de combustible**

C.S.	Po.	Alternativas de combustible					
		Metanol		Ácido fórmico		Etanol	
		Calificación	Po.	Calificación	Po.	Calificación	Po.
A	0.20	10	2	10	2	10	2
B	0.23	6	1.38	5	1.15	4	0.92

C	0.13	7	0.91	8	1.04	7	0.91
D	0.23	10	2.3	8	1.84	6	1.38
E	0.20	6	1.2	8	1.60	6	1.20
		Total	7.79	Total	7.99	Total	6.41

\*Po: Ponderación

\*C.S.: Criterio de Selección

Elaboración propia

Como resultados de la aplicación del método, se obtuvo que la alternativa con mayor calificación fue el ácido fórmico H-COOH. Este combustible es electroquímicamente más activo que las otras dos alternativas, además como ya se obtuvo es bajo en toxicidad, y no es inflamable en condiciones normales.

### 2.2.2 Selección del electrolito

El electrolito es una sustancia que en una disolución proporciona iones, y permite el paso de corriente eléctrica, por lo cual es necesario que se disuelva tanto en el combustible como en el oxidante. Los electrolitos más empleados son el hidróxido de potasio o el ácido sulfúrico (E.R. Choban a,b, J.S. Spendelowa, L. Gancs, A. Wieckowski c, P.J.A. Kenis, 2005). Para la selección del electrolito se planteó de igual manera el método de ponderación realizado para el combustible. A continuación, se detallan los criterios para la selección de la mejor alternativa de electrolito (Tabla 2.8).

**Tabla 2.8 Criterios establecidos para la selección del electrolito en una LM $\mu$ FFC**

Criterio	Descripción
A	Disponibilidad en el mercado
B	No toxico
C	Fácil almacenamiento
D	Bajo costo
E	No sea inflamable

Elaboración propia

**Disponibilidad en el mercado:** es necesario que la sustancia electrolítica se encuentre dentro del mercado local ya que es necesario para la

conducción eléctrica en el diseño. Estos insumos se pueden encontrar en las distribuidoras del país, lo cual es un punto factible la selección del electrolito.

**No tóxico:** De igual forma, el electrolito se encontrará a disposición del personal docente del área y de los estudiantes para la realización de prácticas y estudio, y se requiere evitar lesiones por inhalación. Para ello se utilizó las hojas de seguridad de QUIMPAC (Quimpac, 2016), y obtener los rangos de toxicidad de cada sustancia. El nivel de toxicidad para el hidróxido de potasio y ácido sulfúrico son de 273 y 2014 mg/kg-rata respectivamente. Utilizando la tabla de toxicidad de Hodger y Stermer (Tabla 2.9).

**Tabla 2.9 Grado de toxicidad de Hodger y Stermer para los electrolitos**

		Rutas de toxicidad		
		Oral LD50	Inhalación LC50	Dermal LD50
Clasificación de Toxicidad	Comúnmente usado	(una sola dosis para rata) mg/kg	(exposición de ratas por 4 horas) ppm	(una única aplicación a la piel de conejos) mg/kg
1	Extremadamente tóxico	1 o menos	10 o menos	5 o menos
2	Altamente tóxico	1-50	10-100	5-43
3	Moderadamente tóxico	50-500	100-1000	43-340
4	Ligeramente tóxico	500-5000	1000-10000	350-2810
5	Prácticamente no-tóxico	5000-15000	10000-100000	2820-22590
6	Relativamente nocivo	15000 o más	100000	22660 o más

Fuente: (CCSO, 2006)  
Elaboración propia

Mediante la tabla anterior se puede verificar que el hidróxido de potasio es moderadamente tóxico, mientras que el nivel de toxicidad en el ácido sulfúrico es ligero.



**Fácil almacenamiento:** el electrolito debe estar almacenado en un lugar fresco con su respectiva etiqueta MSDS (Material Safety Data Sheet) de seguridad, donde no se encuentre en contacto con fuentes de calor o ignición. El recipiente debe estar cerrado y realizar inspecciones en un tiempo establecido para la detección de fisuras o fugas (Quimpac, 2016).

**Bajo costo:** Como se mencionó en el apartado anterior, el costo del proyecto debe ser accesible para una futura implementación del proyecto. Para ello se realizó una estimación de costos mediante cotizaciones en diferentes distribuidores de hidróxido de potasio y ácido sulfúrico:

**Tabla 2.10 Cotización local de las alternativas de electrolito**

1 L de hidróxido de potasio	\$ 2.00
1 L de ácido sulfúrico	\$ 1.50

Elaboración propia

**No sea inflamable:** el funcionamiento de las celdas de combustible estará expuesto a temperaturas ambiente. Con ello el siguiente paso es calificar los diferentes criterios para obtener la mejor alternativa de electrolito a utilizar (Tabla 2.11):

**Tabla 2.11 Calificación y ponderación para cada alternativa de electrolito**

Criterio de selección	Pond.	Alternativas de electrolito			
		Hidróxido de potasio KOH		Ácido sulfúrico H <sub>2</sub> S <sub>04</sub>	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
A	0.20	10	2.00	10	2.00
B	0.23	5	1.15	8	1.85
C	0.13	8	1.04	8	1.04
D	0.23	7	1.61	8	1.84
E	0.20	9	1.80	9	1.80
		Total	7.60	Total	8.53

Elaboración propia

Se utilizó la misma ponderación de criterios usados para la selección del combustible (Tabla 2.5) además de los mismos rangos de calificación (Tabla 2.6).

### 2.2.3 Selección del oxidante

El agente oxidante comúnmente usado para el desarrollo de CC es el oxígeno saturado. Sin embargo, algunos estudios han evaluado el desempeño de las CC utilizando otros agentes oxidantes, como es el caso del aire y agua oxigenada  $H_2O_2$ . A continuación, se presenta la tabla de criterios para la selección la mejor alternativa de oxidante (Tabla 2.12):

**Tabla 2.12 Criterios establecidos para la selección del oxidante de la LM $\mu$ FFC**

Criterio	Descripción
A	Disponibilidad en el mercado
B	Bajo costo
C	Fácil almacenamiento
D	Densidad de energía

Elaboración propia

**Disponibilidad en el mercado:** El oxidante representa el segundo flujo involucrado en el sistema, el cual es necesario que la mejor alternativa se encuentre disponible en el medio local. El aire representa la alternativa más factible debido a que se lo puede obtener del medio ambiente y además que posee un 20% de  $O_2$  en su composición. De igual manera el uso de agua oxigenada u oxígeno, se encuentran con facilidad en el medio, pero requiere de un costo adicional.

**Bajo Costo:** como se mencionó en el apartado anterior, el aire representa la alternativa más económica. En segundo lugar, se encuentra el agua oxigenada con un valor de 1 dólar el litro aproximadamente en los distribuidores locales. Por último, el oxígeno puro representa una inversión mayor que las dos mencionadas.

**Fácil almacenamiento:** con lo que respecta el almacenamiento para el agua oxigenada y oxígeno, se debe tener en cuenta que se encuentre situado en áreas alejadas de la luz del sol, además del uso de válvulas de seguridad, la temperatura en las áreas de almacenamiento no debe exceder de los 50°C, indicado en la hoja de seguridad.

**Densidad de energía:** para los diferentes oxidantes mencionados se obtuvo que los valores más altos de densidad de energía se presenciaron con el uso de oxígeno como oxidante, siendo este alrededor de 6.7 mW/cm<sup>2</sup> utilizando 0.5 M de ácido fórmico HCOOH superando los valores de 3.7 y 6 mW/cm<sup>2</sup> correspondientes al aire y al agua oxigenada, lo cual equivale a que un mayor desempeño de la celda de combustible (A. Déctor, M.J. González, M. Guerra-Balcázar, J. Ledesma-García, N. Sabaté, 2012).

**Tabla 2.13 Ponderación de criterios para la selección del oxidante**

	A	B	C	D	$\sum +1$	Ponderación
A		1	0.5	0.5	3	0.31
B	0		1	0.5	2.5	0.27
C	0.5	0		0.5	1.5	0.16
D	0.5	0.5	0.5		2.5	0.26
	TOTAL				9.5	1.00

Elaboración propia

Con los criterios ya establecidos para la selección del oxidante, se procedió a determinar la ponderación de los criterios utilizando el método Ordinal corregidos de criterios ponderados como se hizo en los casos anteriores. Para el oxidante se determinó las siguientes ponderaciones detalladas (Tabla 2.13). Con los valores de ponderación de criterios calculado, podemos realizar la tabla de calificación y ponderación (Tabla 2.14) de cada alternativa de oxidante (aire, oxígeno y agua oxigenada) utilizando los mismos rangos de calificación como se ha ido realizando en esta sección (Tabla 2.6).

**Tabla 2.14 Calificación y ponderación para cada alternativa de oxidante**

C.S.	Po.	Alternativas de oxidante					
		Aire		Oxigeno O <sub>2</sub>		Agua oxigenada H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	
		Calificación	Po.	Calificación	Po.	Calificación	Po.
A	0.31	8	2.48	8	2.48	9	2.79
B	0.27	8	2.16	7	1.89	7	1.89
C	0.16	8	1.28	7	1.12	7	1.12
D	0.26	6	1.56	9	2.34	7	1.82
		Total	7.48	Total	7.83	Total	7.62

\*Po.: Ponderación

\*C.S.: Criterio de Selección

Elaboración propia

Con los valores totales obtenidos en cada alternativa de oxidante, se puede verificar que la mejor opción es el oxígeno a pesar de que es menos económico que el aire, representa mayor viabilidad en el ámbito de desempeño, además que ya se han realizado estudios, donde es el oxidante de mayor uso en el desarrollo de celdas de combustibles.

#### 2.2.4 Selección de material para electrodos

Para nuestro proyecto se ha tomado en consideración los dos tipos de electrodos más utilizados: platino (Pt) y paladio (Pd). Como ya se ha realizado en secciones anteriores, establecemos los criterios más representativos para su selección (Tabla 2.15):

**Tabla 2.15 Criterios establecidos para la selección de catalizadores de la LM $\mu$ FFC**

Criterio	Descripción
A	Disponibilidad en el mercado
B	Bajo costo
C	Eficiencia
D	Densidad de energía

Elaboración propia

**Disponibilidad en el mercado:** los electrodos se pueden sintetizar, los cuales involucran métodos de deposición o dispersión. En nuestro mercado local, la síntesis de electrodo no es común tanto para las dos alternativas, lo cual nos conlleva al estudio de la fabricación que se detalla más adelante.

**Costo:** los electrodos de platino representan un costo elevado en el mercado y es un motivo por el cual su uso en la aplicación de celdas es limitado. En lo que respecta al paladio, el precio es mucho menor, aproximadamente la mitad, dando como resultado un bajo costo en lo que respecta a la implementación de una celda de combustible (MIT Technology Review, 2010).

**Eficiencia:** tanto como el paladio (Pd) y el platino (Pt) presentan propiedades similares, pero mediante estudios y pruebas de laboratorio se ha demostrado la eficacia que tiene el platino en este tipo de aplicaciones, además que son metales que pueden operar en medios ácidos. Como se puede observar en la siguiente tabla, el paladio y el platino son los más utilizados en el desarrollo de esta tecnología (Tabla 2.16):

**Tabla 2.16 LM $\mu$ FFC desarrolladas hasta la actualidad**

Reactantes (ánodo y cátodo)	Electrolito	Electrodos (ánodo y cátodo)	Diseño de canal	Posición de electrodos	Características
Vanadio (II) reducción 1 M	Ácido Sulfúrico (25%)	---	Co-laminar	Fondo de canal	3 celda para formación plana
Vanadio (V) Red. 1 M			Forma-Y		
Ácido fórmico (2.1M)	Ácido Sulfúrico (0.5M)	Pt negro	Co-laminar	En las paredes del canal	-----
Oxígeno saturado			Forma-Y		
Permanganato de Potasio (0.144M)			0.5 o 1 mm y 30 mm		
Metanol (1M)	Ácido Sulfúrico (0.5 M) o Hidróxido de potasio (0.1 a 1M)	Nanopartículas Pt/Ru	Co-laminar	En las paredes del canal	Operación de mezclado medio
Oxígeno saturado		Nanopartículas Pt negro	Forma-Y 0.5 o 1 mm y 30 mm		
Metanol (1M)	Ácido Sulfúrico (0.1 M) o Hidróxido de potasio (0.1 a 1M)	Nanopartículas Pt/Ru	Co-laminar	En las paredes del canal	--
Oxígeno saturado		Nanopartículas Pt negro	Forma-Y 0.5 o 1 mm y 30 mm		
Hidrógeno	Ácido Sulfúrico (0.1 M) o Hidróxido de potasio (0.1 a 1M)	Pt	Electrodo pasivo	Fondo de canal	Impregnación de gas a través de PDMS
Oxígeno		Pt	0.2 mm/ 20 mm		
Hidrógeno	Ácido Sulfúrico (5 M) o Hidróxido de Sodio (2.5 a 1M)	Pd/Pt	Electrodo pasivo	Fondo de canal	Impregnación de gas a través de PDMS
Aire		Pt	0.2 mm/ 20 mm		
Ácido fórmico (0.5)	Ácido Sulfúrico (0.1 M)	Pt	Co-laminar	Arriba y fondo de canal	Stack de microcanales
Oxígeno saturado		Pt	Forma-Y 0.38 a 1 mm y 50 mm		
Hidrógeno saturado.	Hidróxido de potasio (0.1 a 1M)	Pt	Co-laminar	Arriba y fondo de canal	Stack de microcanales
Oxígeno saturado		Pt	Forma-Y		

Fuente:(Erik Kjeang, Ned Djilali, David Sintona, 2008)

Mediante el método de ponderación utilizado en las secciones anteriores se calculó la valoración de cada criterio (Tabla 2.17):

**Tabla 2.17 Ponderación para cada criterio en la selección del electrodo**

	A	B	C	$\sum +1$	Ponderación
A		0.5	1	2.5	0.42
B	0.5		1	2.5	0.42
C	0	0		1	0.16
	TOTAL				1.00

Elaboración propia

Con los valores de ponderación de criterios calculado, el siguiente paso es realizar la tabla de calificación y ponderación de cada alternativa de electrodo (Tabla 2.18) tanto para el paladio o platino, utilizando los rangos de calificación definidos en esta sección (Tabla 2.6).

**Tabla 2.18 Calificación y ponderación para cada alternativa de electrodo**

Criterio de selección	Po.	Alternativas de electrodo			
		Platino (Pt)		Paladio (Pd)	
		Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
A	0.42	6	2.52	6	2.52
B	0.42	5	2.10	8	3.36
C	0.16	8	1.28	6	0.96
		Total	5.9	Total	6.84

Elaboración propia

Los valores totales obtenidos nos muestran que la mejor alternativa para el uso como electrodos es el paladio. Ambas alternativas son viables para fines académicos, pero en lo que relaciona el costo, es la principal diferencia, debido a que la obtención de platino representa una inversión mayor en lo que respecta al paladio, como ya se mencionó anteriormente, se procura minimizar los costos de fabricación de la celda.

### 2.2.5 Selección del diseño de la celda de combustible

La revisión literaria de una serie de publicaciones de artículos científicos ha otorgado un contexto más claro y conciso acerca de la variedad de configuraciones existentes para la fabricación de celdas de combustibles microfluídicas. Los criterios considerados para la evaluación y selección de la mejor alternativa para el diseño de la celda de combustible microfluídica se describen en la tabla adjunta (Tabla 2.19).

**Tabla 2.19 Criterios para la selección de la geometría para una LM $\mu$ FFC**

Criterio	Descripción
A	Simplicidad en la fabricación
B	Permisividad de operación en diferentes medios
C	Afinidad con combustibles y oxidantes variados
D	Rendimiento energético
E	Densidad de potencia entregada
F	Amigable con el Medio Ambiente

Elaboración propia

**Simplicidad en la fabricación:** Este factor hace referencia al procedimiento llevado a cabo para la elaboración de los distintos dispositivos de acuerdo a su geometría y a los materiales involucrados para su desarrollo.

**Permisividad de operación en diferentes medios:** Este factor considerado para la evaluación de las diferentes alternativas, hace referencia a los medios ácidos, básicos o a la combinación de ambos (mixto) en el desempeño de la LM $\mu$ FFC.

**Afinidad con combustibles y oxidantes variados:** La variedad de combustibles y oxidantes revisados en la literatura, y la relación con las distintas geometrías y demás materiales componentes de las celdas, determinan el rendimiento de este dispositivo microfluídico.



**Rendimiento energético:** Este factor es considerado en función de la cantidad de energía entregada y de material empleado (costo de materiales) de cada una de las geometrías revisadas en la literatura.

**Densidad de potencia entregada:** Se consideró este factor debido a que la diversidad de estudios realizados de las celdas de combustible y sus diferentes configuraciones, han permitido entregar valores aproximados de esta variable para aplicaciones electrónicas, en el campo de la biomedicina, entre otros.

**Amigable con el Medio Ambiente:** Debido a la baja emisión de productos contaminantes al medio exterior respecto a los productos químicos empleados en cada una de las geometrías conocidas.

Con los criterios ya establecidos para la selección de la geometría, se determinó la ponderación de los criterios utilizando el método Ordinal corregido de criterios ponderados según como se procedió con los factores de diseño mostrados con anterioridad (Tabla 2.20):

**Tabla 2.20 Ponderación para cada criterio en la selección de la geometría**

	A	B	C	D	E	F	$\sum +1$	Ponderación
A		1	0.5	0.5	0.5	0.5	4	0.19
B	0		0.5	1	1	0.5	4	0.19
C	0.5	0.5		0.5	0.5	0.5	3.5	0.16
D	0.5	0	0.5		0.5	0	2.5	0.12
E	0.5	0	0.5	0.5		0	2.5	0.12
F	0.5	0.5	0.5	1	1		4.5	0.21
	TOTAL						21	1.00

Elaboración propia

Con los valores de ponderación de criterios calculado, podemos realizar la tabla de calificación y ponderación de cada alternativa de geometría (Tabla

2.21) para las diferentes formas Y, F, y H. Utilizando los rangos de calificación de la Tabla 2.6, se tiene lo siguiente:

**Tabla 2.21 Calificación y ponderación para cada alternativa de diseño de LM $\mu$ FFC**

C.S.	Po.	Alternativas de Diseño de LM $\mu$ FFC					
		Y		F		H	
		Calif.	Po.	Calif.	Po.	Calif.	Po.
<b>A</b>	0.19	10	1.90	9	1.71	9	1.71
<b>B</b>	0.19	10	1.90	9	1.71	8	1.52
<b>C</b>	0.16	9	1.44	6	0.96	6	0.96
<b>D</b>	0.12	9	1.08	10	1.20	10	1.20
<b>E</b>	0.12	7	0.84	10	1.20	8	0.96
<b>F</b>	0.21	7	1.47	8	1.68	10	2.10
		Total	8.63	Total	8.46	Total	8.45

\*Po: Ponderación

\*C.S.: Criterio de Selección

Elaboración propia

Con los valores totales obtenidos en cada alternativa de las distintas configuraciones existentes, se puede verificar que la mejor opción es la forma Y para la fabricación y desarrollo de una celda de combustible del tipo microfluídica, siendo relativamente más económico que los demás diseños existentes, por lo tanto, presenta una mejor viabilidad en cuanto al ámbito de desempeño en su elaboración y adquisición.

### 2.3 Diseño Conceptual de la LM $\mu$ FFC

El diseño conceptual abarca las especificaciones de diseño de la LM $\mu$ FFC:

- El número de Reynolds debe ser menor a 10 para que los flujos mantengan un estado laminar.
- La distancia que van a recorrer los protones, o la longitud característica del canal debe ser de 1 mm.
- El espesor de la LM $\mu$ FFC se encuentra en un rango de 0.5 a 1 mm
- El ancho de los canales tendrá un valor de 1 a 2 mm.

A partir de las matrices de decisiones elaboradas en el apartado anterior podemos establecer las alternativas para el diseño:

- El combustible por utilizar será el ácido fórmico HCOOH al 85%.
- El oxidante seleccionado fue el oxígeno O<sub>2</sub>.
- El electrolito seleccionado tanto para el combustible como el oxidante es el ácido sulfúrico H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.
- El Electrodo en el ánodo y catodo seleccionado fue el paladio (Pd).

Para la tecnología de celdas de combustibles se está desarrollando su respectiva normativa por el comité técnico ISO TC 197:

- IEC/CD 62282: Tecnología de Celdas de Combustible

A continuación, se muestra los valores de densidades y viscosidades que se utilizaron para el cálculo en el software en base al combustible y oxidante seleccionado en la sección anterior. Estos valores fueron obtenidos de las hojas de seguridad de cada sustancia (Quimpac, 2016).

**Tabla 2.22 Densidad y viscosidad de los ácidos que se emplean en la LM $\mu$ FFC**

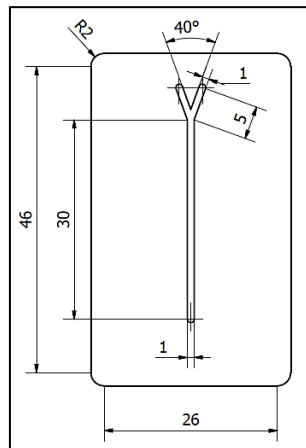
	Ácido fórmico (HCOOH)	Oxígeno (O <sub>2</sub> )	Ácido sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1220	1429	1840
Viscosidad (Pa.s)	0.001	----	0.001

Elaboración propia

## 2.4 Dimensionamiento del canal de la LM $\mu$ FFC

Las dimensiones de las entradas y el canal central de la LM $\mu$ FFC se basaron en las diferentes configuraciones que se han estudiado hasta la actualidad. Entre ellas se tomó el analizado por Chang (M. A. Fathallah, A. F. Tayel, M. Elsayed, 2010) tomando como referencia una geometría en Y como se acordó en la matriz de decisión realizada, además de un valor de ancho de canales de entrada de 1 mm. Para nuestro primer diseño se utilizó entre ángulo de canales de entradas de 40°

grados donde los flujos van a ingresar al canal central de la celda de aproximadamente 1 mm como se muestra a continuación (Figura 2.1):



**Figura 2.1 Dimensiones del canal en Y de la LM $\mu$ FFC**  
Elaboración propia

El diseño fue realizado en un software CAD para luego ser importado en un programa de análisis de flujo y electrocinética, para ello fue necesario realizar un modelo CAD 3D solo del canal microfluídico con sus respectivos electrodos para realizar el análisis correspondiente.

## 2.5 Perfil de velocidad y Número de Reynolds en el canal de la LM $\mu$ FFC

### 2.5.1 Perfil de velocidad en el canal central de la LM $\mu$ FFC

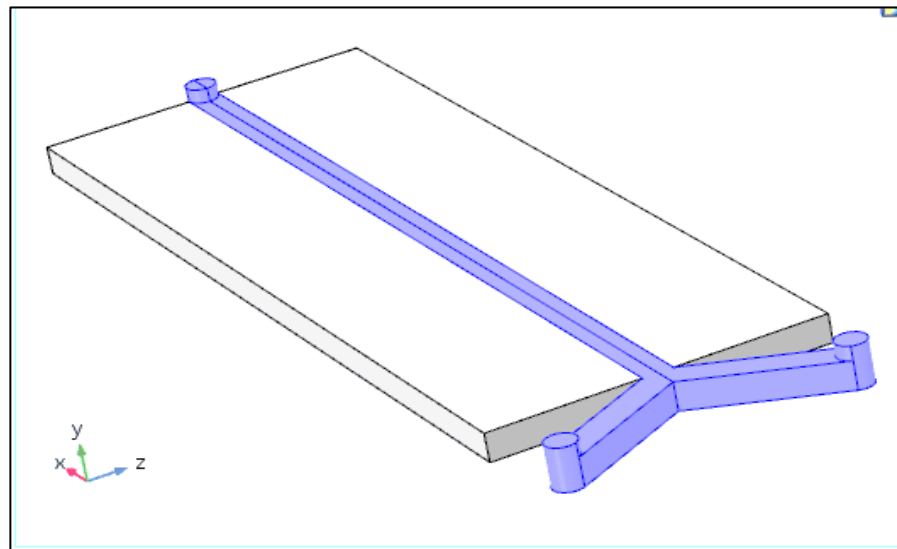
La velocidad de flujo es un parámetro de entrada para el cálculo del perfil de velocidades en el canal central de la celda de combustible LM $\mu$ FFC, para lo cual se utilizó los valores óptimos de flujo volumétrico para celdas de combustibles que se encuentran entre 0 y 0.3 ml/min como lo señala el estudio realizado por Ranga (Ranga S. Jayashreea, Seong Kee Yoonb, Fikile R. Brushett, 2010). Entonces se utilizó los valores óptimos de flujo para el combustible y oxidante.

**Tabla 2.23 Velocidades de entrada de los flujos**

	Flujo volumétrico (ml/min)
Flujo de combustible	0.05
Flujo de oxidante	0.10

Elaboración propia

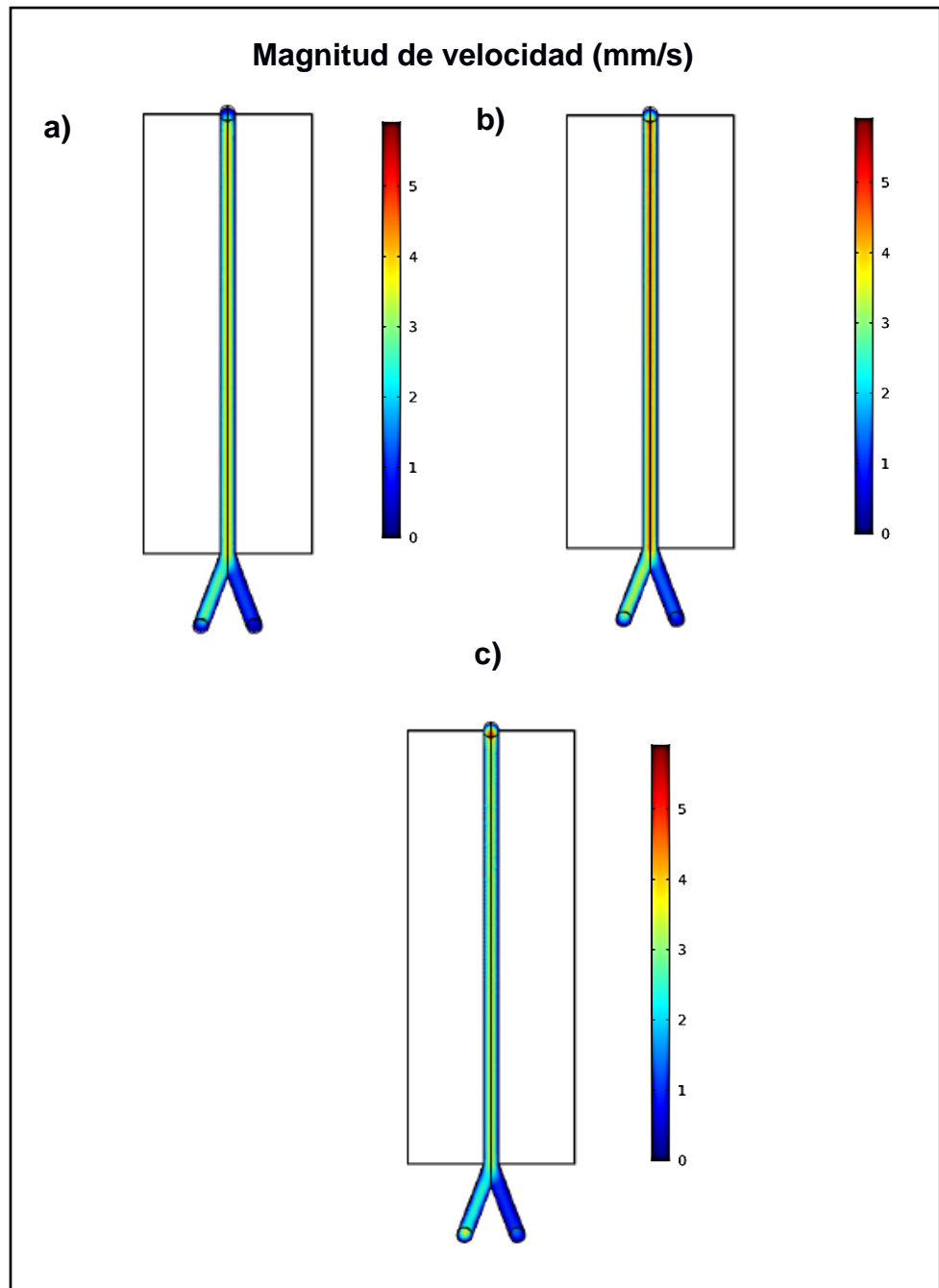
Los valores mostrados en la tabla son ingresados en el software de simulación junto con los valores de propiedades físicas y químicas para la obtención del perfil de velocidad de flujo. El software utilizado resuelve de las ecuaciones de Navier Stokes mencionadas en el Capítulo 1 para la solución numérica además de que cumple con la Ley de continuidad de los fluidos. Para la simulación fue necesario realizar el ensamble de los electrodos y el canal con sus respectivas entradas tanto para el flujo de combustible como para el flujo de oxidante, donde se establecieron las propiedades químicas como densidad, viscosidad y velocidades iniciales obtenidas de la Tabla 2.23. El modelo a simular se muestra a continuación (Figura 2.2):



**Figura 2.2 Modelado del canal y electrodos para el estudio de velocidades y Re**

Elaboración propia

Se realizó el análisis de perfil de velocidad para diferentes planos con respecto a la base del canal (parte inferior de la celda) con el fin de determinar en cuál de ellos produce los mayores perfiles de velocidad y analizar los efectos de la fuerza de gravedad. Se tomó como referencia los planos de 0.25, 0.50 y 0.75 mm en la dirección vertical con respecto a la base inferior del canal, donde se obtuvo los siguientes perfiles de velocidad (Figura 2.3)



**Figura 2.3 Perfil de velocidades a diferentes alturas: a) 0.25 b) 0.50 y c) 0.75 mm**

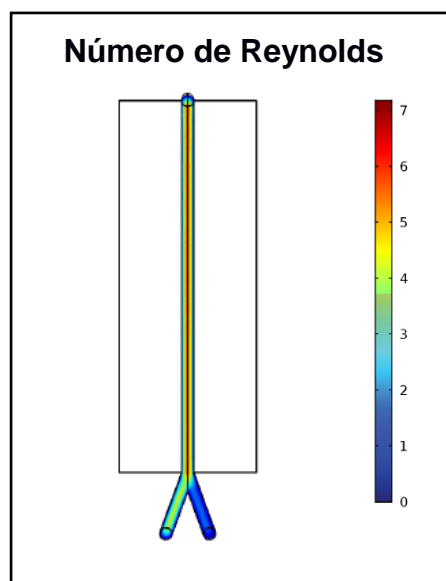
Elaboración propia

Se puede apreciar que los valores promedio de velocidad para cada plano de referencia fueron de 3.6, 4.6 y 3.1 mm/s, es decir, el plano medio de la celda presentó los mayores valores de velocidad; sin embargo, los valores no representan una variación considerable, lo cual indica que la fuerza gravitatoria no afecta en mayor proporción a la celda a causa de

que las dimensiones son reducidas. Se optó por trabajar en el plano medio para el cálculo del Número de Reynolds y evaluar si los valores de velocidad de entrada son los adecuados ya que estos permitirán determinar el flujo volumétrico necesario para seleccionar la bomba requerida para los fluidos.

### 2.5.2 Número de Reynolds en el canal central de la LM $\mu$ FFC

El Número de Reynolds se obtuvo mediante la Ecuación 1.1 mostrada en el Capítulo 1, en el cual para el modelo prototipo se puede apreciar que se obtuvieron valores de aproximadamente 6 lo que nos indica que el flujo tiene un comportamiento laminar como se había establecido en la teoría. A partir de ellos se realizó variaciones en el ángulo central del canal con el fin de obtener los valores de Reynolds más bajos posibles ya que esto facilita el transporte de iones (Figura 2.4):

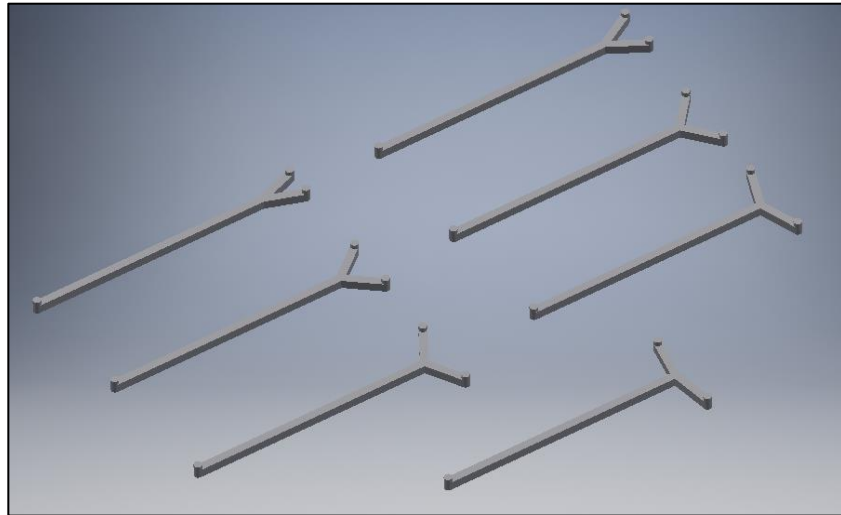


**Figura 2.4 Perfil de Número de Reynolds a 0.50 mm de la superficie inferior**  
Elaboración propia

### 2.5.3 Variación del ángulo de la LM $\mu$ FFC

Para la validación de nuestro primer prototipo se realizó el análisis con respecto a la variación del ángulo central. Para ello se realizó un modelo en CAD 3D para ángulos de 40°, 60°, 80°, 100°, 120°, 140°, y 160° (Figura

2.5) para luego ser importados en el software y realizar el análisis de velocidad y Número de Reynolds para cada diseño.



**Figura 2.5 Diseño CAD del canal en Y a diferentes ángulos**  
Elaboración propia

Utilizando los valores de densidad y viscosidad asignados (Tabla 2.22), se procedió a validar los valores de Número de Reynolds para diferentes ángulos y seleccionar el menor ángulo para el cual se va a proceder al análisis electroquímico respectivo (Tabla 2.24):

**Tabla 2.24 Velocidades y Re obtenidos a diferentes ángulos de entrada**

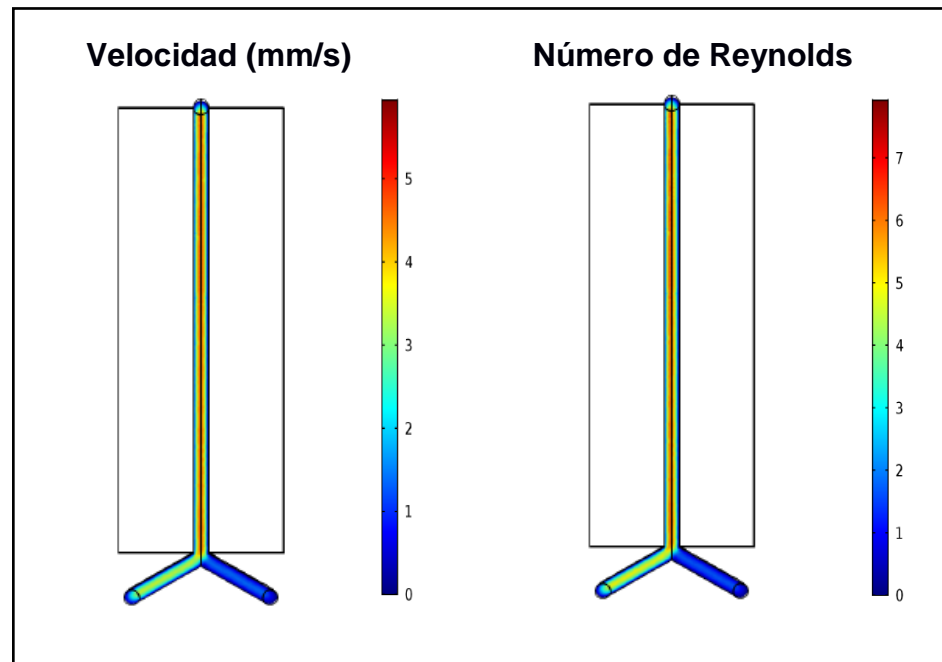
Angulo (°)	Número de Reynolds	Velocidad promedio (mm/s)
40	6.42	4.81
60	6.49	4.85
80	6.51	4.93
100	6.43	4.83
120	6.39	4.72
140	6.47	4.70
160	6.79	4.75

Elaboración propia

A partir de la tabla anterior podemos ver que los valores de Número de Reynolds no varían de manera considerable, a pesar de ello se seleccionó



el valor mínimo el cual se dio en la celda con un ángulo de apertura de 60°, con una velocidad promedio de 4.72 mm/s y un Re de 6.39, asegurando de esa forma el régimen laminar establecido para el funcionamiento de la celda.



**Figura 2.6 Perfil de velocidad y Re en el plano medio del canal de la LM $\mu$ FFC**

Elaboración propia

## 2.6 Electroquímica de celda de combustible LM $\mu$ FFC

### 2.6.1 Concentraciones de combustible y oxidantes iniciales en la LM $\mu$ FFC

La concentración inicial de combustible y oxidante está relacionada directamente con la densidad de corriente  $i_o$  que se obtiene como resultado del análisis, ya que son parámetros que varían a medida que se consume la cantidad de combustible y oxidante en el canal central. Para ello se tomó como referencia valores de concentración utilizados en investigaciones ya realizadas, así como los valores de constante de difusión. Cabe recordar que el fenómeno de transporte de masa ocurre cumpliendo la ley de Fick, la cual depende de la concentración de las especies y de su constante de difusión. El software modela la ecuación

de Fick mediante los parámetros de velocidades ya calculadas y concentraciones iniciales. Para nuestro trabajo se utilizó una concentración de 2.1 M para el combustible, es decir, ácido fórmico y 0.5 M para el oxidante, en una solución de 0.5 M de ácido sulfúrico como electrolito la cual fue seleccionado en la sección anterior. El software utiliza el módulo de “Transporte de especies diluidas” para el modelado de la Ley de Fick, con los parámetros ya mencionados y selección de áreas de entrada y salidas de flujo se procede a evaluar las respectivas concentraciones.

### 2.6.2 Reacciones químicas en los electrodos de la LM $\mu$ FFC

Como ya se mencionó, las reacciones anódicas y catódicas (Ecuación 1.7) y (Ecuación 1.8) respectivamente, se dan lugar en los electrodos donde reacciona el combustible y el oxidante en cada lado. Estas reacciones son parámetros que conectan el modelo de “transporte de especies diluidas” con el modelo electrocinético “Distribución de corriente secundaria” en el cual se rige en la ecuación de Butler Volmer como se discutirá en la sección siguiente. Para ello es necesario insertar los coeficientes estequiométricos respectivos de cada reacción en la configuración de cada electrodo, además del número de electrones que se gana y pierde en la reacción, donde la reacción anódica pierde 2 electrones mientras que en la reacción catódica el oxidante gana 4 electrones. La ecuación que rige el modelo es la ecuación de velocidad de reacción de especies:

$$S_i = \frac{v_i j_o}{nF} \quad (2.1)$$

Donde:

- $v_i$ = coeficiente estequiométrico
- $n$ = numero de electrones
- $F$  = constante de Faraday
- $j_o$  = densidad de corriente local (A/m<sup>2</sup>)

La densidad de corriente local es un parámetro que se lo designa en el modelo de electrocinética de cada reacción en los electrodos, la cual es utilizada para los cálculos de la EBV.

### 2.6.3 Electrocinética de la LM $\mu$ FFC

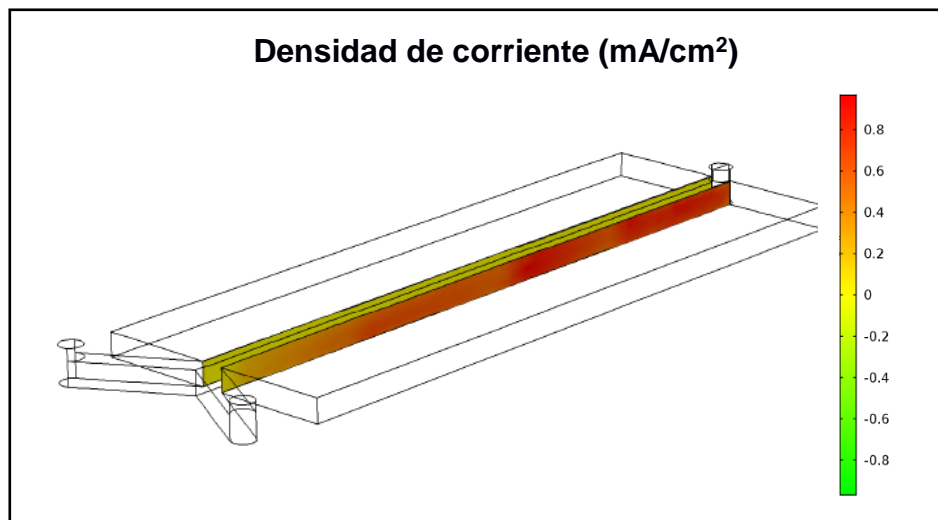
El siguiente paso fue estudiar la electrocinética que se produce en la LM $\mu$ FFC, donde la base fundamental fue la ecuación de Butler Volmer EBV (Ecuación 1.5). El modelo de la EBV se encuentra en el módulo de “Distribución de Corriente Secundaria” en el cual se utilizó la ecuación que tenga dependencia a la concentración de las especies. El modelo por implementar requiere de parámetros experimentales y de valores de constantes universales las cuales fueron tabuladas a continuación en base a la investigación previa (Boming Zhu, 2010).

**Tabla 2.25 Parámetros electroquímicos para la simulación del canal en Y**

	Ánodo	Cátodo	Unidad
Densidad de corriente ( $j_0$ )	$3.82 \times 10^{-5}$	100	A/m <sup>2</sup>
Voltaje de equilibrio (V)	0.2	1.23	V
Conductividad electrolítica	11.47	43	S/m
Difusividad (D)	$2.59 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$	m <sup>2</sup> /s
Concentración de referencia ( $C_{ref}$ )	2100	0.5	Mol/m <sup>3</sup>
Constante de Faraday(F)	96500		C/mol
Constante de gases (R)	8.314		J/mol-K
Temperatura (T)	25		C

Fuente: (Boming Zhu, 2010)  
Elaboración propia

Los parámetros de la tabla anterior se ingresan en el software de simulación y se procedió a realizar el análisis respecto de densidad de corriente en los electrodos utilizando los valores de concentración de combustible y oxidante calculados mediante la Ley de Fick, para ello es necesario establecer la concentración inicial de cada flujo. Para nuestro análisis se consideró trabajar con 0.5M de Oxígeno y 2.1 M de ácido fórmico La distribución de corriente obtenida se puede apreciar en la Figura 2.9.



**Figura 2.7 Perfil de densidad de corriente en el canal Y de la LM $\mu$ FFC**

Elaboración propia

## 2.7 Selección de bomba para el sistema de la LM $\mu$ FFC

Para la selección de la bomba se requirió establecer un caudal de operación que cumpla con los requerimientos de la celda. Como ya se mencionó se seleccionó un caudal de 3 a 6 ml/h en ambos flujos para lo cual es necesario una bomba de jeringa que se encuentre en ese rango de operación. En el mercado nacional no se dispone de este tipo de bombas, por lo cual se cotizo por medio de importadores. Las bombas seleccionadas fue la Syringe Pump NE-300 (Micrux Technologies, 2019). Las especificaciones respectivas se detallan en la sección de Apéndice C.

## 2.8 Pérdidas por fricción en mangueras y selección de pernos

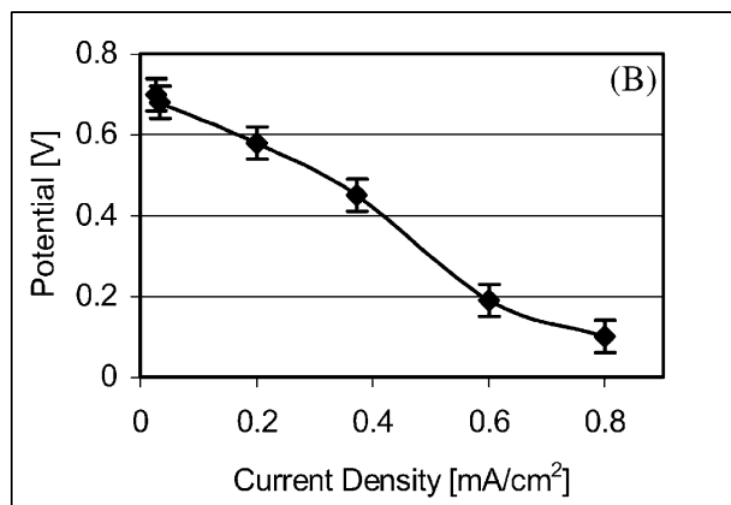
Las pérdidas por fricción se producen por los cambios de sección y acoples a lo largo de la manguera, por lo cual se realizó los cálculos respectivos y evaluar como los resultados afectan al sistema de la celda de combustible (Apéndice B). Como parte complementaria se determinó el diámetro de pernos y material que se van a utilizar en el ensamble (Apéndice B).

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Análisis de densidad de corriente obtenido en la LM $\mu$ FFC

Como resultados del primer análisis, se obtuvo un valor de densidad de corriente promedio de 0.65 mA/cm<sup>2</sup> a un potencial de 0.2 V aproximadamente, lo cual representa un valor aceptable para este tipo de celdas. Para la validación de estos valores se procedió a estimar la curva Voltaje de celda vs Densidad de corriente, para ello se calculó los valores de densidad de corriente para un voltaje de 0.2 a 0.8 V con un paso de 0.1 V, con el fin de ser comparados con la curva obtenida experimentalmente por Choban (Figura 3.1) (Eric R. Choban, Larry J. Markoski, Andrzej Wieckowski, Paul J.A. Kenis, 2004):

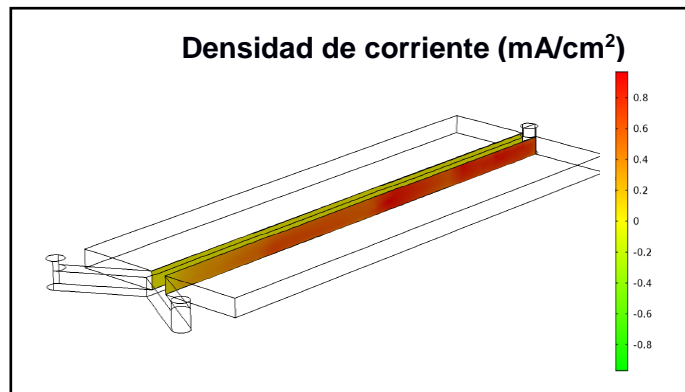


**Figura 3.1 Curva de potencial vs densidad de corriente**

Fuente: (Eric R. Choban, Larry J. Markoski, Andrzej Wieckowski, Paul J.A. Kenis, 2004)

La curva realizada por Choban se basó en condiciones similares de concentraciones de combustible y oxidante a las que se estudió en este proyecto. En el software de simulación se evaluó los valores de densidad de corriente en función del voltaje de celda, donde se obtiene el rango de colores en el área activa de electrodo de 0.3 cm<sup>2</sup> donde va a ocurrir la reacción anódica y catódica respectiva. La densidad de corriente resultante representa la diferencia de

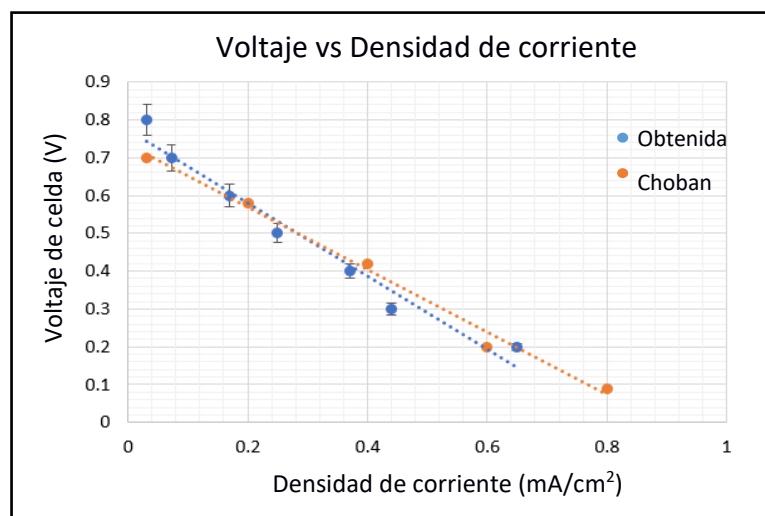
densidad de corriente del ánodo menos cátodo. Como se puede apreciar en la Figura 3.2, se obtuvo la variación de densidad de corriente en el ánodo dando como resultado un valor promedio de  $0.65 \text{ mA/cm}^2$  aproximadamente para un valor de voltaje aplicado de  $0.2 \text{ V}$  (Figura 3.2).



**Figura 3.2 Perfil de densidad de corriente del canal en Y para un potencial de  $0.2 \text{ V}$**

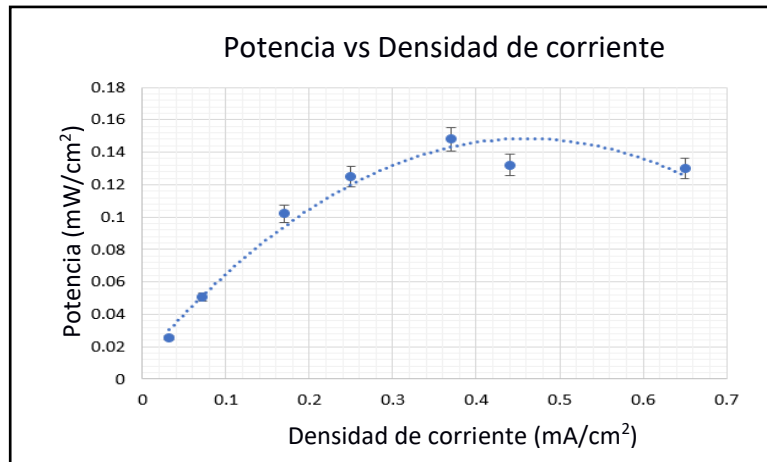
Elaboración propia

El estudio realizado, efectúa un análisis para diferentes valores de flujo a un potencial de  $0.3 \text{ V}$ , donde se obtuvo un valor de  $0.51 \text{ mA/cm}^2$ . La curva obtenida para nuestra  $\text{LM}\mu\text{FFC}$  se muestra en comparación con la curva de Choban (Figura 3.3) donde se puede verificar que para la misma condición de flujo y voltaje se obtuvo un valor de  $0.45 \text{ mA/cm}^2$  es decir un error aceptable estimado del 11%.



**Figura 3.3 Curvas comparativas de la  $\text{LM}\mu\text{FFC}$  obtenida y de Choban**

Elaboración propia



**Figura 3.4 Curva Potencia vs Densidad de corriente obtenida**  
Elaboración propia

A partir de los valores de voltaje y densidad de corriente obtenidos en la simulación, se realizó la curva Potencia vs Densidad de corriente (Figura 3.4), donde se puede apreciar el punto de operación de nuestro diseño el cual fue de 0.15 mW/cm<sup>2</sup> para un valor de densidad de corriente de 0.47 mA/cm<sup>2</sup> aproximadamente, el área del electrodo fue de 0.3 cm<sup>2</sup>, obteniendo como resultado un valor de 0.045 mW y 0.1 mA, los cuales son cercanos a los obtenidos por Choban. El desempeño de nuestra celda puede verse afectado debido a la creación de burbujas producidas por la oxidación del ácido fórmico, lo cual distorsionaría la corriente de flujo, sin embargo, el desempeño de la celda puede mejorar al aumentar el área activa de los electrodos por medio de ánodos y cátodos porosos, y la implementación de stacks de celdas microfluídicas (Erik Kjeang, Ned Djilali, David Sintona, 2008).

## 3.2 Optimización del modelo obtenido de la LM $\mu$ FFC

### 3.2.1 Concentración de combustible

La optimización de los resultados obtenidos (Figura 3.3 y 3.4) se lleva a cabo en base a la concentración de combustible empleado en la entrada del canal. El uso de ácido fórmico representa un mayor desempeño de densidad de corriente en lo que respecta al uso de metanol y etanol. Como son combustibles orgánicos, las burbujas producidas por el CO<sub>2</sub> afectan

al desempeño de la celda como se mencionó. Por ello una mayor concentración de ácido fórmico bajara el desempeño de la celda, por otro lado, una menor concentración provoca bajos gradientes de concentración. Por esta razón se realizó un estudio de concentraciones de combustibles de ácido fórmico HCOOH con el fin de evaluar un valor optimo, a partir de los valores de flujos y geometrías ya definidos en la celda. Se vario valores de concentraciones y se obtuvo los diferentes valores de densidad de corriente y potencia (Tabla 3.1).

**Tabla 3.1 Variación de concentraciones (M) de ácido fórmico HCOOH**

Concentración de ácido fórmico (M)	Densidad de corriente (mA/cm <sup>2</sup> )	Potencia de corriente (mW/cm <sup>2</sup> )
0.10	3.86	1.74
0.50	4.18	2.07
1.00	3.48	1.75
1.50	3.04	1.35
2.10	0.47	0.15

Elaboración propia

En la tabla anterior se puede verificar como afecta la variación de concentración de combustible, debido a que valores bajos de concentración provoca bajos gradientes de concentración y bajos potenciales debido a que las velocidades de transferencia de masa en las cercanías de los electrodos son bajas. Por otro lado, los valores altos presentan formaciones de burbujas de CO<sub>2</sub>, lo que afecta al flujo laminar por ende el rendimiento de la celda se ve afectado. En conclusión, un valor intermedio de concentración de combustible aproximado de 0.5 M mejora el rendimiento de la celda

### 3.2.2 Densidad de corriente de intercambio

Otro aspecto que considerar para la optimización de la celda es el estudio de nuevas combinaciones de materiales de electrodos, ya que estos difieren en sus valores de densidades de corriente de intercambio. Estos



valores son proporcionales a la densidad de corriente obtenida. A continuación, se muestra combinaciones experimentales de Paladio con Níquel (Ni) con un porcentaje de carbono (C):

**Tabla 3.2 Densidad de corriente de Intercambio en diferentes electrodos de Pd**

Electrodo	Densidad de corriente de intercambio $\times 10^{-5}$ (A/m <sup>2</sup> )
Pd/C	1.24
Pd <sub>4</sub> Ni/C	5.87
Pd <sub>2</sub> Ni/C	22.4
Pd <sub>4</sub> Ni/C	22.5
Pd <sub>4</sub> Ni <sub>5</sub> /C	41.3
Pd <sub>2</sub> Ni <sub>3</sub> /C	39.8

Fuente: (Zhiyong Zhang, Le Xin , 2011)

Elaboración propia

Para nuestro proyecto se consideró un valor de  $3.85 \times 10^{-5}$  A/m<sup>2</sup> para un valor de paladio comercial como se encontró en la literatura (Boming Zhu, 2010). Por lo tanto, la combinación de Níquel con el Paladio mejora los valores los valores finales de densidad de corriente y potencia.

### 3.2.3 Stacks de LM $\mu$ FFC

A partir de un prototipo de celda de combustible de flujo laminar es posible el diseño de stacks de celdas lo cual mejora en un porcentaje algo el rendimiento de la celda. Estos diseños cuentan con una alta complejidad y se han desarrollado de a poco en la actualidad, de los cuales se han obtenido resultados de corriente y potencia como se puede apreciar a continuación en el siguiente estudio:

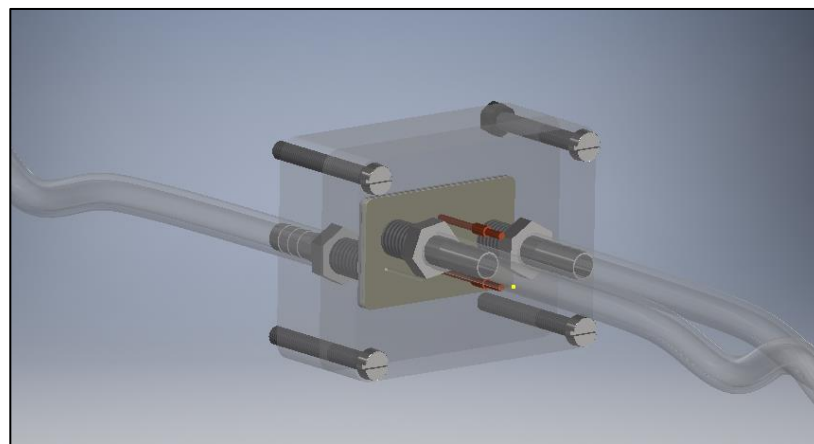
**Tabla 3.3 Desempeño de stacks de LM $\mu$ FFC desarrollados en la actualidad**

Celda	Flujo (ml/h)	Voltaje (V)	Corriente (mA)	Potencia (mW)
Stack 1	16	0.71	35.96	7.52
Stack 2	12	0.71	30.90	6.31

Fuente: (CIDETEC, 2014)

### 3.3 Diseño CAD de la LM $\mu$ FFC

Utilizando la geometría definida con cada uno de sus elementos se procedió a realizar el modelo CAD-3D en un software libre, con el fin de esquematizar la celda de combustible con sus respectivos componentes como son los electrodos, colectores de corriente, canal, tornillos, mangueras y accesorios (Figura 3.5).



**Figura 3.5 Ensamble final de la LM $\mu$ FFC**

Elaboración propia

En el Apéndice A se puede apreciar los planos del ensamble final y cada elemento que conforma la celda de combustible microfluídica además se encuentra tabulado la cotización de cada uno de los elementos para su fabricación (Tabla 3.13). Para la selección de pernos se desarrolló el cálculo respectivo que se encuentra en el Apéndice B, así de igual forma se calculó las pérdidas por fricción y menores que se pueden presentar en la manguera y en los acoples de flujo de entrada y salida respectivos

### 3.4 Proceso de Fabricación de la LM $\mu$ FFC

La descripción del procedimiento a seguir para la fabricación de la LM $\mu$ FFC en forma de Y, luego de una revisión exhaustiva en la literatura relacionada con este tipo de dispositivos, en general involucra el uso de un portaobjetos de vidrio con recubrimiento de metal, que comprende tanto los electrodos como el microcanal a base de polímero, en forma de Y, por donde fluyen el oxidante y el combustible (A. Déctor, M.J. González, M. Guerra-Balcázar, J. Ledesma-García, N. Sabaté, 2012).

El proceso da inicio con la deposición por pulverización catódica (sputtering) de capas finas de titanio (Ti) de aproximadamente 50 nm de espesor, así como níquel (Ni) de 150 nm de espesor, que son los materiales denominados depositantes o blancos (Wei, 2010), de acuerdo a un bombardeo de estos sobre una placa portaobjetos (sustrato) cuyas dimensiones son de 76 mm x 26 mm x 1.15 mm. La Tabla 3.1 enlista los diferentes materiales de destino (sustrato) con sus respectivas tasas de grabado en  $\left[\frac{\text{Å}}{\text{min}}\right]$ . Para este proyecto, se considera pertinente la selección de una tasa de 400  $\left[\frac{\text{Å}}{\text{min}}\right]$  para el portaobjetos, que en su mayoría pueden estar elaborados de vidrio (compuesto de  $\text{SiO}_2$ ), vidrio de borosilicato o incluso plástico. El portaobjetos considerado para esta cuestión es hecho a base de compuestos de  $\text{SiO}_2$ .

**Tabla 3.4 Velocidad de grabado por pulverización catódica (500 eV. 1 mA/cm<sup>2</sup>)**

Material de destino	Composición	Tasa de Grabado $\left[\frac{\text{Å}}{\text{min}}\right]$
Plata	Ag	1400
Aluminio	Al	520
Alúmina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100
Oro	Au	1400
Berilio	Be	180
Bismuto	Bi	8500
Carbono	C	50
Cadmio	CdS(1010)	2100
Cobalto	Co	510
Cromo	Cr	530
Cobre	Cu	820
Disprobio	Dy	1050
Erbio	Er	880
Hierro	Fe	380
Óxido de hierro	FeO	470
Arseniuro de galio	GaAs(110)	1500
Galio gadolinio granate	GaGd	280
Fosfuro de galio	GaP(111)	1400
Antimonio de galio	GaSb(111)	1700
Gadolinio	Gd	1000
Hafnio	Hf	590
Antimonio de indio	InSb	1300
Iridio	Ir	540
Niobato de litio	LiNbO <sub>3</sub> (Y.cat.)	400
Manganeso	Mn	870
Molibdeno	Mo	230
Niobio	Nb	390
Níquel	Ni	500

Níquel de hierro	NiFe	500
Osmio	Os	450
Plomo	Pb	3100
Teluro de plomo	PbTe(111)	3000
Paladio	Pd	1100
Platino	Pt	780
Rubidio	Rb	4000
Renio	Re	470
Rodio	Rh	650
Rutenio	Ru	580
Antimonio	Sb	3200
Silicio	Si	370
Carburo de silicio	SiC(0001)	320
Dióxido de silicio	SiO <sub>2</sub>	400
Samario	Sm	960
Estaño	Sn	1200
Tantalio	Ta	380
Torio	Th	740
Titanio	Ti	320
Uranio	U	660
Vanadio	V	340
Tungsteno	W	340
Itrio	Y	840
Zirconio	Zr	570
Resistor	AZ 1350J	300
	COP	800
	PBS	900
	KTFR	290
	PMMA	560
	Riston 14	250
	Kodak 809	320
Vidrio (Na, Ca)		200
Acero Inoxidable		250

Fuente: (Thin Film Processes II, 1991)  
Elaboración propia

Como dato importante, es sabido que el poli dimetil siloxano (PDMS) puede ser unido de manera sencilla a placas de vidrio por medio de la activación de su superficie al encontrarse en un medio de plasma de oxígeno. A continuación, se presentan las condiciones de operación típica para un proceso de "Sputtering".

**Tabla 3.5 Condiciones de operación típica para el proceso de Sputtering**

Construcción	
<b>Cámara de grabado</b>	∅=280 mm (cámara de vidrio)
<b>Sistema de vacío</b>	Bomba de turbo
<b>Potencia RF</b>	13.56 MHz MAX 300 W

<b>Tabla de muestra</b>	∅=150 mm
<b>Monitor</b>	Espectroscopia de masas
	Espectroscopia óptica
<b>Potencia</b>	Máximo 100 V, 15 A
<b>Condiciones típicas del proceso</b>	
<b>Grabado</b>	Resina SU-8, 8 – 10 nm/min
	Presión del gas: 1.7 Pa (O <sub>2</sub> )
	Potencia RF: 50 W
<b>PDMS/unión de vidrio</b>	Presión del gas: 1.7 Pa (O <sub>2</sub> )
	Potencia RF: 50 W
	Tiempos de irradiación: 30 s a 5 min

Fuente: (Thin Film Processes II, 1991)

Elaboración propia

Posterior a la deposición metálica, se realiza una fotolitografía UV sobre esta superficie con la finalidad de delimitar el área conductora. Al emplear este procedimiento, se asegura la remoción de áreas conductoras no deseadas a través de un grabado químico del metal. Esta parte del proceso consiste en el depósito de la resina (fotoreistor) SU-8 sobre el sustrato. Previo a esto se requiere la selección y limpieza de este último con solvente o un enjuague con ácido diluido, incluso con alcohol isopropílico o acetona, seguido de un enjuague con agua desionizada (DI) y secado con nitrógeno. Luego de la limpieza del sustrato, se lo deberá depositar sobre el mandril del Spin-coating, colocando previamente una capa de Omniccoat™ (Microchem Corp., Newton, MA, USA) la cual se centrifuga mediante el proceso de Spin-coating a 2000 rpm por un periodo de tiempo de 35 s, para luego realizar un horneado por 1 min a 200 °C para vaporizar el solvente. Después, una capa de SU-8 se centrifuga por spin-coating a 2000 rpm por 35 s (estos parámetros son requeridos para alcanzar 50 µm de espesor). Este recubrimiento se realiza, prefijando en el equipo, la velocidad mencionada a la cual se harán girar los componentes para esparcir la resina por medio de fuerzas centrífugas. El espesor deseado dependerá de la combinación de factores como la velocidad de giro y la viscosidad del fotoreistor, en cuya hoja técnica se puede encontrar las condiciones de operación para un correcto recubrimiento del sustrato. A continuación, se presenta en la Tabla 3.3 las condiciones a tener en consideración para distintos tipos de resistencias SU-8:

**Tabla 3.6 Condiciones de recubrimiento para el proceso de fotolitografía UV**

<b>1) Dispensador Estático</b>	Aproximadamente 1 ml de SU-8 por pulgada de diámetro del sustrato.
<b>2) Ciclo de propagación</b>	Descender de 500 rpm a $100 \frac{rpm}{s}$ de aceleración. Esto llevará 5 segundos.
<b>(3) Ciclo de centrifugado</b>	Descender a la velocidad de centrifugado final a una aceleración de $300 \frac{rpm}{s}$ y se mantiene durante un total de 30 segundos.

Fuente: (Resina Tono Negativo, 2019)  
Elaboración propia

De igual manera se presentan en la Tabla 3.4 datos sobre el espesor respecto a la velocidad de giro, así como las curvas que relacionan estas variables para resistencias SU-8 determinadas.

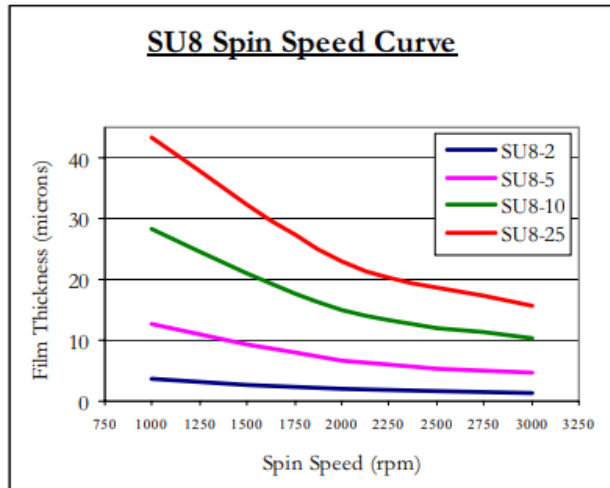
**Tabla 3.7 Espesor de recubrimiento en función de la velocidad de giro**

Nombre del Producto	Viscosidad (cSt)	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Velocidad de giro (rpm)
SU-8 2	45	1.5	3000
		2	2000
		5	1000
SU-8 5	290	5	3000
		7	2000
		15	1000
Su-8 10	1050	10	3000
		15	2000
		30	1000
SU-8 25	2500	15	3000
		25	2000
		40	1000

Fuente: (Resina Tono Negativo, 2019)  
Elaboración propia

Luego de aplicado la resina sobre el sustrato se horneará suavemente para evaporar el solvente y densificar la película, este proceso se lleva a cabo en una placa calefactora nivelada, aunque bien pueden ser usados hornos de convección.

En la Tabla 3.5 se presentan los parámetros de horneado suave para los diferentes fotoresistores SU-8.



**Figura 3.6 Curva de espesor de recubrimiento vs velocidad de giro**

Fuente: (Resina Tono Negativo, 2019)

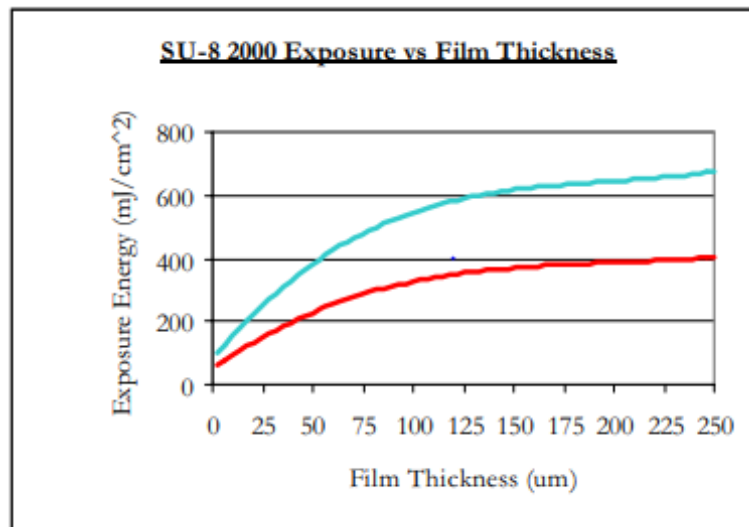
El SU-8 una vez horneado, y enfriado aproximadamente 10 horas en la placa calefactora nivelada hasta alcanzar los 25 °C, estará listo para ser expuesto a los rayos UV (350-400 nm).

**Tabla 3.8 Parámetros de horneado en función del espesor para fotolitografía UV**

Nombre del Producto	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Precocido a 65°C	Cocido suave a 95°C
SU-8 2	1.5	1	1
	2	1	3
	5	1	3
SU-8 5	5	1	3
	7	2	5
	15	2	5
Su-8 10	10	2	5
	15	2	5
	30	3	7
SU-8 25	15	2	5
	25	3	7
	40	5	15

Fuente: (Resina Tono Negativo, 2019)  
Elaboración propia

En la literatura se hace uso de una dosis de 190 mJ/cm<sup>2</sup> mediante una hoja transparente de impresión como máscara, la sombra que se genera debido a esta cubre las zonas que no se desean remover, el componente se expuso a luz UV por 1 min a 65 °C sobre un plato, y posterior a esto, se ingresó por 5 min a 95 °C en un horno de convección para separar la fotoresina del sustrato. Así es importante mencionar que la dosis de exposición óptima dependerá del espesor de la capa (capas más gruesas necesitan de una dosis mayor) y los parámetros del proceso. Si se expone a la oblea utilizando un alineador de máscara con las máscaras de transparencia diseñadas, bajo los rayos UV; la energía de exposición total debe ser de aproximadamente unos 300  $\frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}$ . Se presentan las recomendaciones de dosis de exposición respecto al requerimiento de un grosor específico, en la gráfica de la Figura 3.6, adjunta.



**Figura 3.7** Curvas de dosis de exposición de energía UV vs espesor de película

Fuente: (Resina Tono Negativo, 2019)  
Elaboración propia

Luego de realizada la exposición, se deberá llevar a cabo un proceso horneado de exposición posterior (PEB) en una placa caliente o en un horno de convección, para reticular de manera selectiva las partes expuestas de la película. A continuación, se especifican las condiciones de operación en la Tabla 3.6, para los distintos fotoresistores a diferentes espesores y temperaturas empleados en el proceso de fotolitografía UV



**Tabla 3.9 Parámetros de PEB en función del espesor para fotolitografía UV**

Nombre del Producto	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	PEB 1 a 65°C	PEB 2 a 95°C
SU-8 2	1.5	1	1
	2	1	1
	5	1	1
SU-8 5	5	1	1
	7	1	1
	15	1	2
Su-8 10	10	1	2
	15	1	2
	30	1	3
SU-8 25	15	1	2
	25	1	3
	40	1	4

Fuente: (Resina Tono Negativo, 2019)  
Elaboración propia

**Tabla 3.10 Tiempo de revelado en función del espesor para fotolitografía UV**

Nombre del Producto	Espesor ( $\mu\text{m}$ )	Revelado (min)
SU-8 2	1.5	1
	2	1
	5	1
SU-8 5	5	1
	7	1
	15	3
Su-8 10	10	2
	15	3
	30	5
SU-8 25	15	3
	25	4
	40	6

Fuente: (Resina Tono Negativo, 2019)  
Elaboración propia

Las resistencias SU-8 se han habilitado para ser usadas con el revelador SU-8 de MicroChem. Es posible utilizar procesos de inmersión, rociado o charco. También

se pueden usar otros reveladores a base de solventes, como el lactato de etilo y el alcohol diacetona. Los tiempos de revelados recomendados se muestran en la Tabla 3.7 para los procesos de inmersión.

Posterior a esto, se deberá efectuar un enjuague y secado del sustrato, al cual se le añadirá alcohol isopropílico (IPA) y luego se secará con una suave corriente de aire o nitrógeno. Es sabido que la resina SU-8 tiene buenas propiedades mecánicas, por lo que normalmente no se requieren horneados duros. Por otro lado, para aplicaciones en las que la resistencia de la imagen debe dejarse como parte del dispositivo final, la resistencia puede ser horneada en incremento/descenso de temperaturas entre 150-200 ° C en una placa caliente o en un horno de convección para reticular el material. Los tiempos de horneado varían según el tipo de proceso de horneado y el espesor de la película. Para eliminar el SU-8, hay que calentar el baño a 50- 80 °C y sumergir los sustratos durante 30 a 90 minutos.

Luego de retirado el fotoresistor, se electrodeposita (vía “Shadow Evaporation”) una capa de cromo (Cr, 2 – 50 nm) como una capa de adhesión, luego una capa de “semilla” (base) de oro (Au) de 2  $\mu\text{m}$  de espesor, en las trayectorias conductoras definidas (Zhou, Johnson, Hone, & Smith, 2003). Por último, se deposita los electrocatalizadores anódico y catódico, sobre los colectores de corriente metálicos (capas de semilla) mediante técnica de deposición por aspersión sobre áreas de 1  $\text{cm}^2$  en cada electrodo. La técnica de deposición por pulverización (aspersión) se basa en la dispersión de materiales catalizadores, haciendo uso de un aerógrafo, sobre el área del electrodo definida, que se verifica empleando una lupa. La tinta de catalizador puede contener 7  $\mu\text{L}$  de Nafion (considerado un buen conductor protónico) al 5%, 73  $\mu\text{L}$  de alcohol isopropílico, por cada 1 mg de materiales catalizadores, mezclados en un baño de ultrasonidos durante 20 minutos, aproximadamente. Cabe mencionar que los electrocatalizadores pueden tratarse de Pd/XC-72 (20% en peso en Vulcan XC-72) y Pd/XC-72 (40% en peso en Vulcan XC-72) para el ánodo y cátodo, respectivamente, la cantidad final de metal depositado, se ajusta a 1  $\text{mg}/\text{cm}^2$  (A.

Déctor, M.J. González, M. Guerra-Balcázar , J. Ledesma-García, N. Sabaté, 2012). Cabe mencionar que para la selección de la mejor alternativa para los electrocatalizadores, se concluyó que la sustancia química mejor valorada a emplear fue el Paladio (Pd). A continuación, se muestran las especificaciones de los electrocatalizadores en las Tablas adjuntas:

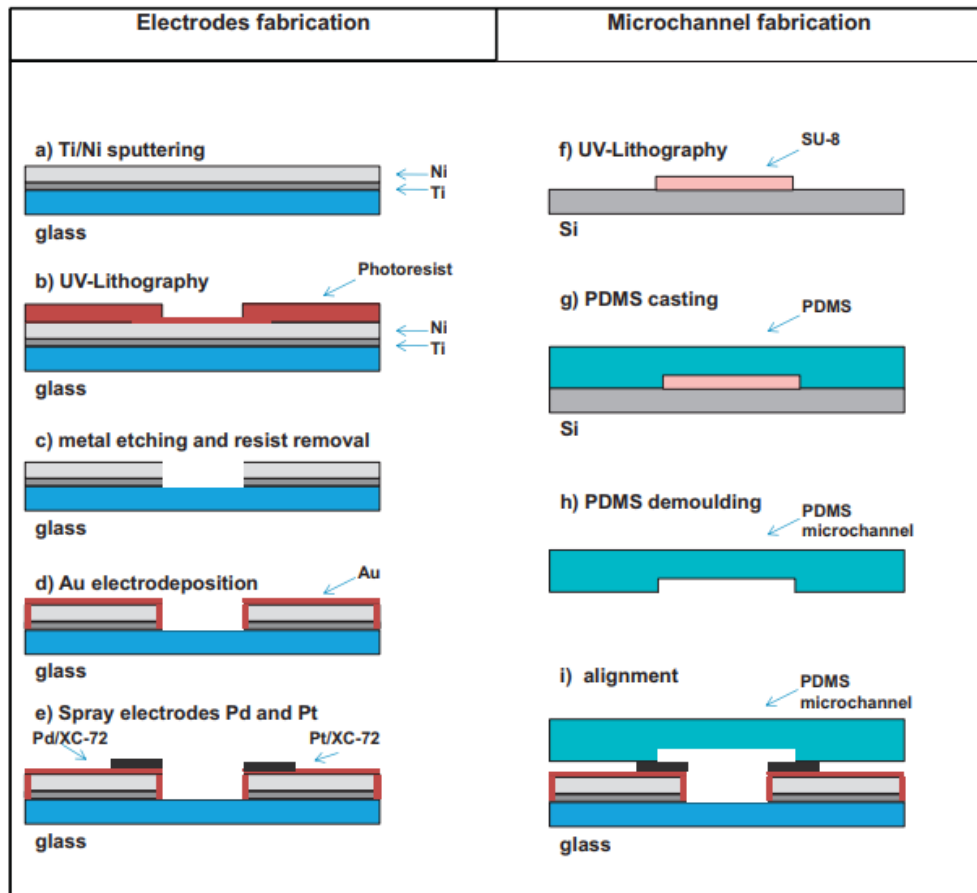
**Tabla 3.11 Especificaciones técnicas de electrocatalizador de Pd/XC-72**

<b>Contenido de Pd</b>	40%	20%
<b>Área Superficial</b>	70 m <sup>2</sup> /g (Pd)	100 m <sup>2</sup> /g (Pd)
<b>Tamaño de Cristalita XRD</b>	5 - 8 nm	3 - 5 nm

Fuente: (Hoja Técnica Pd/XC-72 (40%), 2019)  
Elaboración propia

Por otro lado, el microcanal puede ser fabricado con poli dimetil siloxano (PDMS). Este polímero posee algunas propiedades interesantes, como la capacidad de replicar patrones de alta resolución en entornos que no son de sala limpia, biocompatibilidad, impermeabilidad y flexibilidad. El proceso da inicio con la fabricación de un “maestro” que define la forma del microcanal, el cual deberá ser replicado en PDMS mediante litografía suave. Este maestro consiste en patrones de fotoresistor SU-8 definidos por litografía UV (fotolitografía) sobre una oblea de silicio (Xia & Whitesides, 1998). Las dimensiones del microcanal pueden ser de 2 mm de ancho, 75 µm de alto y 25 mm de largo. Después de esto, el pre-polímero de PDMS y su agente de curado se mezclan, se desgasifican y se vierten sobre el maestro. El PDMS se cura a 85 °C durante 2 horas y se retira del maestro (Chiang, Yeh, Peng, Liao, & Tung, 2017). Las cavidades para las entradas y salidas se realizan haciendo uso de un perforador de agujeros. El dispositivo se monta finalmente, para realizar la caracterización, mediante la alineación del microcanal PDMS y el portaobjetos de vidrio metalizado y se los coloca entre dos piezas de metacrilato (material acrílico), que se apretarán y ajustarán con pernos de soporte (Tabla 3.11) (A. Déctor, M.J. González, M. Guerra-Balcázar , J. Ledesma-García, N. Sabaté, 2012). El procedimiento aquí descrito es un caso particular para la fabricación de una LMµFFC en forma de Y, por lo que las medidas del microcanal y procesos de fabricación pueden variar según la

geometría del microcanal, los materiales a emplear para la elaboración, los compuestos químicos, oxidante y combustible, por ejemplo, que serán utilizados para la generación de energía eléctrica, entre otros factores.



**Figura 3.5** Proceso de fabricación de LM $\mu$ FFC

Fuente: (Déctor, y otros, 2013)

### 3.5 Estimación de costos de fabricación

Luego de desarrollado el diseño, la simulación y descrito el proceso de fabricación, se procura estimar costos involucrados para la construcción de la LM $\mu$ FFC en forma de Y. Esta estimación de costos involucra en su mayoría materiales o insumos a ser utilizados para la fabricación del dispositivo en cuestión. Cabe destacar que la mayoría de los precios fueron tomados de páginas web que ofrecen en su catálogo de productos, materiales e insumos químicos relacionados con las celdas de combustible.

**Tabla 3.12 Cotización de materiales y químicos para la fabricación de la LM $\mu$ FFC**

<b>Materiales / Insumos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Especificación</b>	<b>Precio</b>
Titanio (Polvo)	1	50 g	\$ 250.00
Níquel (Polvo)	1	50 g	\$ 179.00
Oro (Polvo)	1	5 g	\$ 275.68
Cromo (Polvo)	1	50 g	\$ 232.4
2-propanol	1	100 mL	\$ 72.90
Nafion	1	25 mL	\$ 344.04
Placa de vidrio (portaobjetos)	50	76 mm x 26 mm x 1.1 mm	\$ 2.00
40% en peso de Paladio (Pd) en carbono (Vulcan XC-72)	1	1 g	\$ 227.00
20% en peso de Paladio (Pd) en carbono (Vulcan XC-72)	1	1 g	\$ 210.00
Poli dimetil siloxano (PDMS)	1	500 g	\$ 284.00
Solución polimérica orgánica	1	1 kg	\$ 142.40
Revelador resistencia negativa	1	250 mL	\$ 74.28
Resistencia negativa (SU-8)	1	100 mL	\$ 296.20
<b>COSTO TOTAL</b>			<b>\$ 2589.90</b>

Elaboración propia

Observando la tabla adjunta, es posible evidenciar que los costos de adquisición de insumos, como sustancias y materiales químicos, son relativamente elevados, obteniéndose un valor total de aproximadamente \$ 2590, ya que la mayoría serían importados de Estados Unidos (USA), sin considerar el coste de la mano de obra que se encargaría del proceso de fabricación de la LM $\mu$ FFC. Por otro lado, el costo de consumo energía eléctrica (en función de las horas de trabajo y las potencias consumidas) de los equipos y máquinas empleados en el proceso, no se ha considerado debido a los altos costos de adquisición que involucraría el importar este tipo de tecnología muy especializada y precisa, para efectuar los procedimientos mencionados en este documento, en nuestro país. Con estos valores estimados finales se obtiene un costo final de adquisición de materiales e insumos para la fabricación de la LM $\mu$ FFC, de aproximadamente \$3323.40. De igual forma se realizó la cotización de materiales relacionados con la sujeción y soporte estructural del objeto de estudio, así como del sistema de bombeo de fluidos

**Tabla 3.13 Costo de adquisición de materiales de sujeción y acople**

<b>Materiales / Insumos</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Especificación/material</b>	<b>Precio x Unidad</b>	<b>Precio Total</b>
Bombas de jeringa	2	NE 300	\$ 350.00	\$ 700.00
Manguera de silicón	3	½ in silicón	\$ 8.00	\$ 21.00
Acoples de flujo	3	Acero inoxidable	\$ 3.50	\$ 10.50
Pernos de soporte	4	Acero al carbono	\$ 0.50	\$ 2.00
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>733.50</b>

Elaboración propia

### 3.6 Análisis de costos de manufactura de la LM $\mu$ FC

Analizados los costos de adquisición de materia prima, y/o insumos químicos necesarios para el proceso de fabricación de la LM $\mu$ FC, se requiere también conocer costos de manufactura, para complementar el estudio económico de una manera más factible, para una futura implementación de este microdispositivo en el Laboratorio de Energías Renovables, según lo solicitado preliminarmente. En la Tabla 3.14 se presentan costos estimados tomados de la página web oficial de Nanotech, que es una Organización establecida en el edificio de Ciencias de Ingeniería en la Universidad de California, Santa Bárbara, considerada como líder mundial en ciencias de los materiales, investigación en dispositivos electrónicos y optoelectrónicos, así como en nanofabricación (John & Thibeault, 2019).

**Tabla 3.14 Costos parciales de manufactura y apoyo de personal especializado**

<b>Detalle/Especificación</b>	<b>Costo/hora</b>
Litografía Ebeam	\$ 180.00
Capacitación/Usos de instalaciones y equipos	\$ 37.50
Apoyo de personal especializado	\$ 100.00

Fuente: (John & Thibeault, 2019)

Elaboración propia

Se observa la consideración de un proceso alternativo de fabricación del microcanal tipo Y, por medio de litografía Ebeam, es decir, litografía por haz de electrones, que consiste en la emisión de un haz de electrones sobre una superficie, con la finalidad de grabar geometrías personalizadas, sobre la superficie del sustrato,

recubierta con una capa sensible a los electrones, denominada resina (resistencia), cambiando la solubilidad de esta última, por medio de la remoción, de manera selectiva, de zonas expuestas o no expuestas a la misma, cuando es sumergida en un solvente o revelador. Este proceso alternativo descrito en el inciso 3.4, presenta similitudes con el proceso descrito de litografía UV, ya que se emplean similares materiales químicos; por lo que el costo estimado que se muestra en la Tabla 3.15, adjunta, puede ser considerado como viable para el desarrollo del proyecto. Teniendo en cuenta que un proceso típico de fabricación de una LM $\mu$ FC, demora en promedio, 20 horas (en base al análisis realizado en este proyecto), el costo total de manufactura para la micro celda diseñada sería de aproximadamente \$ 2934. Además, se evidencia que los costos estimados presentes, son relativamente bajos en comparación con los costos de adquisición de materiales, por lo que la adquisición de una LM $\mu$ FC con sus componentes podría ser implementada posteriormente en FIMCP.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño de un laboratorio de celdas de combustible de flujo laminar para el Laboratorio de Energías Renovables LABFREE de ESPOL representa un aporte de carácter investigativo hacia los estudiantes con el fin establecerse futuros estudios sobre la implementación de nuevas fuentes de energías.

El proyecto realizado nos dio la oportunidad de indagar en ciencias afines a la carrera como es la teoría que abarca electroquímica lo cual fue indispensable para comprender los resultados y análisis respectivos para la implementación del modelo presentado.

El diseño de la celda de combustible de flujo laminar cuenta con un sistema de bombeo de flujos por medio de bombas de jeringa por los valores de flujo volumétrico bajos. Se aplicaron conocimientos de mecánica de fluidos en conjunto con transporte de masa y electroquímica, además del análisis de métodos de fabricación de las diferentes partes de la celda.

Mediante la futura implementación del laboratorio de celda de combustible microfluídicas, los estudiantes evaluarán métodos de mejora continua al diseño, nuevos insumos a diferentes concentraciones molares o diferentes geometrías con el fin de optimizar resultados de densidad de corriente.

### 4.1 Conclusiones

- La celda de combustible de flujo laminar diseñada dio como resultado un valor de densidad de corriente de  $0.65 \text{ mA/cm}^2$  a  $0.2\text{V}$ , lo cual fue comparado con valores teóricos de publicaciones y artículos, donde se realizó la curva voltaje de celda vs densidad de corriente (V vs J) para realizar la comparación de resultados respectivas dando como resultado un error de densidad de corriente del 11% máximo lo cual es aceptable para el prototipo diseñado con respecto al



modelo de Choban (E.R. Choban a,b, J.S. Spindelowa, L. Gancs, A. Wieckowski c, P.J.A. Kenis, 2005). Estos valores de densidad de corriente pueden ser mejorados mediante la utilización de materiales especiales o electrodos porosos, los cuales aumentan la superficie activa, lo cual es proporcional al desempeño de la celda.

- El Número de Reynolds máximo obtenido en el flujo colaminar fue de aproximadamente de 6.39 lo cual es menor a 10. Esta condición de Re nos permite mejorar el transporte iónico dentro del canal. Para ello se seleccionó un caudal de operación de 3 y 6 ml/h para el flujo de combustible y oxidante respectivamente, lo cual implica el uso de un sistema de bombeo que opere en esa condición por tal razón se seleccionó dos bombas de jeringa NE-300.
- Las pérdidas por fricción en la manguera y acoples son prácticamente nulas debido a que se opera en un régimen laminar y por las dimensiones reducidas del sistema. Los mismos resultados se obtuvieron para la selección de pernos debido a que las fuerzas cortantes que se generan son menores a 1 N, lo cual nos permitió utilizar pernos comerciales para el ensamble.
- La utilización del software de modelado Inventor nos permitió realizar el prototipo 3D cada una de las partes que conforma la celda, además de sus conexiones, acoples y pernos con las dimensiones seleccionadas.
- Los insumos seleccionados como combustible y oxidante fueron el ácido fórmico y oxígeno, los cuales son comercialmente accesible y costo por litro no representa un valor elevado. Como electrolito se utilizó ácido sulfúrico el cual va a ser utilizado en ambos flujos con el fin de mejorar el transporte de carga.
- Una vez revisado en la literatura las etapas del proceso de fabricación de una celda de combustible del tipo microfluídica, se evaluó y consideró en términos monetarios una futura implementación del proyecto. El costo aproximado para la micro celda de combustible diseñada, junto con el equipo del sistema de bombeo que permitirá el flujo de combustible y oxidante, es de \$ 6256.40
- La micro celda de combustible diseñada no es factible construirla localmente, ya que no se tienen los equipos y laboratorios especializados, además de que los insumos y materiales químicos no se encuentran en su totalidad en el país, para la manufactura precisa de la celda microfluídica.

## 4.2 Recomendaciones

- El almacenamiento de los ácidos debe ser de forma sellada y evitar la exposición a la luz solar además de utilizar recipientes de polietileno y evitar los golpes físicos o congelamientos como lo sugiere la hoja de seguridad MSDS.
- Realizar pruebas utilizando diferentes concentraciones molares de combustible y oxidantes, para evaluar el desempeño y proponer mejoras en el desarrollo del modelo.
- Los costos de adquisición de materia prima para el desarrollo del proyecto, debido a que son elevados, se recomienda realizar en su totalidad, la elaboración de la celda de combustible del tipo microfluídica en el exterior, para evitar gastos secundarios relacionados con el ingreso de insumos químicos al país.

# BIBLIOGRAFÍA

- A. Déctor, M.J. González, M. Guerra-Balcázar, J. Ledesma-García, N. Sabaté. (2012). *Formic acid microfluidic fuel cell evaluation in different oxidant conditions*. Queretaro, Mexico.
- A. Ebrahimi Khabbazi, AJ Richards, M. Hoorfar. (2010). *Estudio numérico del efecto de la geometría del canal y del electrodo en el rendimiento de las celdas de combustible microfluidadas*. Canada: Diario de Power Sources.
- Bandgood. (2019). *Laminas de titanio*. Obtenido de [https://www.banggood.com/es/2x100x100mm-Titanium-Plate-Sheet-TA2GR2-Sheet-p-1041525.html?rmmds=category&cur\\_warehouse=CN](https://www.banggood.com/es/2x100x100mm-Titanium-Plate-Sheet-TA2GR2-Sheet-p-1041525.html?rmmds=category&cur_warehouse=CN)
- Bandgood. (2019). *Láminas finas de láminas de níquel-láminas de alta pureza Placa 1mm x 100mm x 100mm*. Obtenido de [https://www.banggood.com/es/High-Purity-Nickel-Plate-Nickel-Foil-Thin-Sheet-Plate-1mm-x-100mm-x-100mm-p-1044061.html?cur\\_warehouse=CN](https://www.banggood.com/es/High-Purity-Nickel-Plate-Nickel-Foil-Thin-Sheet-Plate-1mm-x-100mm-x-100mm-p-1044061.html?cur_warehouse=CN)
- Biomed. (2019). *Caja porta objeto para laboratorio*. Guayaquil, Ecuador.
- Boming Zhu. (2010). *Microfluidic Fuel Cells – Modeling and Simulation*. Concordia .
- Carles Ribas. (2002). *El enmarque del diseño*. Barcelona, España.
- CCSO. (2006). *¿Qué es un LD50 y LC50?* Obtenido de Centro Canadiense de Salud y Seguridad Ocupacional: <http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/ld50.html>
- Cengel, Y. A. (2005). *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*. North Carolina: The McGraw-Hill Companies.
- CENIDET. (2006). *Modelado Dinamico de Celdas de Combustibles*. Obtenido de <http://www.cenidet.edu.mx/subplan/biblio/seleccion/Tesis/MK%20Enrique%20Escobedo%20Hernandez%202006.pdf>
- Chiang, H.-J., Yeh, S.-L., Peng, C.-C., Liao, W.-H., & Tung, Y.-C. (23 de Febrero de 2017). *Polydimethylsiloxane-polycarbonate Microfluidic Devices for Cell Migration Studies Under Perpendicular Chemical and Oxygen Gradients*. Journal Article, Academia Sinica, Centro de Ciencias Aplicadas.
- CIDETEC. (2014). *Desempeño de celdas de combustibles microfluidicas*. Queretaro.
- Colleen Spiegel. (2008). *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using MATLAB*. Oxford: Elsevier.

- Déctor, A., J.P., E., M.J., G., M., G.-B., Ledesma-García, J., Sabaté, N., & Arriaga, L. (2013). *Formic acid microfluidic fuel cell evaluation in different oxidant conditions*. Artículo Científico, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro de Investigación y Desarrollo en Tecnología Electroquímica, Santiago de Querétaro.
- Drazer, G., & Callegari, G. (s.f.). *Fabricación de Dispositivos Microfluídicos*. Universidad de Buenos Aires, Departamento de Física, Buenos Aires. Recuperado el 13 de Diciembre de 2018
- E.R. Choban a,b, J.S. Spendelowa, L. Gancs, A. Wieckowski c, P.J.A. Kenis. (2005). *Membraneless laminar flow-based micro fuel cells operating in alkaline acidic, and acidic/alkaline media*. Illinois, USA.
- Ecumangueras. (2018). *Manguera Silicon*. Guayaquil: Ecumangueras S.A.
- Eric R. Choban, Larry J. Markoski, Andrzej Wieckowski, Paul J.A. Kenis. (2004). Microfluidic fuel cell based on laminar flow. *Journal of Power Sources* 128, 54–60.
- Erik Kjeang, Ned Djilali, David Sintona. (2008). *Microfluidic fuel cells: A review*. Canada.
- Fuel Cell Store. (2009). *Silicon Tubing*. Obtenido de <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-silicon-tubing>
- Fuel Cell Store. (Enero de 2019). Recuperado el 12 de Enero de 2019, de Fuel Cell Store: <https://www.fuelcellstore.com/20-palladium-vulcan?search=20%%20Palladium%20on%20Vulcan>
- Fuel Cell Store. (2019). Retrieved Enero 12, 2019, from Fuel Cell Store: <https://www.fuelcellstore.com/40-palladium-vulcan?search=40%%20Palladium%20on%20Vulcan>
- Gullerdolf. (2019). *Corrosion Servicios*. Guayaquil, Ecuador.
- John, D. D., & Thibeault, B. (2019). *Nanotech*. Recuperado el 12 de Febrero de 2019, de Nanotech: <https://www.nanotech.ucsb.edu/index.php/submit-a-project>
- M. A. Fathallah, A. F. Tayel, M. Elsayed. (2010). *The Effect of Fuel and Oxidant Pumping on the Performance of a Membraneless Microfluidic Fuel Cell*. Alexandria, Egypt: Department of Mechanical Engineering Alexandria University.
- MicroChem. (2019). Recuperado el 22 de Diciembre de 2018, de MicroChem: [www.microchem.com](http://www.microchem.com)
- Micrux Technologies. (2019). *Syringe Pumps*. Obtenido de <https://www.micruxfluidic.com/es/instrumentacion/sistemas-de-bombeo/serie-ne/>

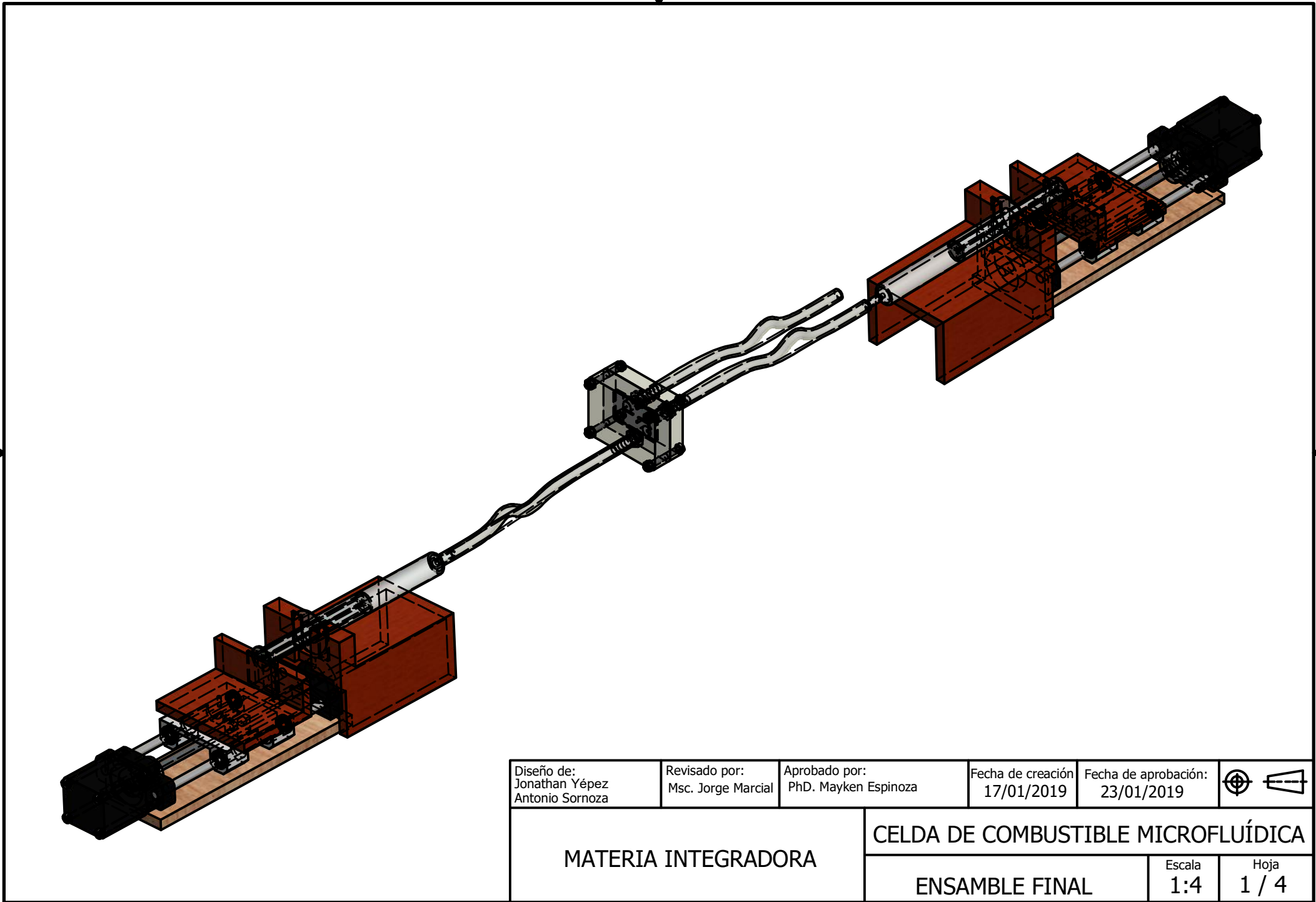
- MIT Technology Review. (2010). *Un mejor catalizador de platino para pilas de combustible*. California.
- Paula Sánchez Sobrini. (2014). *Sistema de cogeneración basado en un sistema de pila de combustible de carbonatos fundidos para abastecer las necesidades de edificios y distritos*. Obtenido de Construible: <https://www.construible.es/comunicaciones/sistema-cogeneracion-basado-sistema-pila-combustible-carbonatos-fundidos-para-abastecer-necesidades-edificios-distritos>
- Quimpac. (2016). *Hoja de seguridad de materiales: Acido formico* . Guayaquil: Quimpac Ecuador S.A.
- Quimpac. (2016). *Hoja de seguridad: Acido sulfurico*. Guayaquil: Quimpac Ecuador S.A.
- Quinney, T. (01 de Febrero de 2005). *MicroChem Corp*. Recuperado el 15 de Diciembre de 2018, de MicroChem Corp.: [www.microchem.com](http://www.microchem.com)
- Ranga S. Jayashreea, Seong Kee Yoonb, Fikile R. Brushett. (2010). On the performance of membraneless laminar flow-based fuel cells. *Journal of Power Sources*, 3569–3578.
- Robert L. Norton. (2011). *Diseño de Maquinas* . Mexico: Pearson.
- Scotti, G. (2014). *Tecnologías de fabricación de micro celdas de combustible*. Universidad de Aalto, Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Helsinki: Nordic Ecolabel.
- Thin Film Processes II. (1991). En J. L. Vossen, & W. Kern (Edits.), *Thin Film Processes II* (pág. 857). San Diego, Estados Unidos de América: Harcourl Brace Jovanovich.
- Tornilleria Sodoya. (enero de 2019). *Catalogo tornilleria Sodoya*. Obtenido de [http://www.soyoda.com/webpages/cat/Cata%CC%81logo\\_Tornilleri%CC%81a\\_Soyoda17.pdf](http://www.soyoda.com/webpages/cat/Cata%CC%81logo_Tornilleri%CC%81a_Soyoda17.pdf)
- Universidad de Atacama. (2015). *Perdidas primarias y secundarias*. Obtenido de Mecanica de Fluidos e Hidraulica: <https://vdocuments.mx/perdidas-primarias-y-secundarias.html>
- Wei Ping Zhou ,Adam Lewera, Robert Larsen, Rich I. Masel, Paul S. Bagus. (2006). *Size Effects in Electronic and Catalytic Properties of Unsupported Palladium Nanoparticles*. Texas,USA.

- Wei, F. (2010). *Aluminum Doped Zinc Oxide Thin Film for Organic*. Degree of Master of Applied Science, University of Toronto, Department of Materials Science and Engineering, Toronto.
- Xia, Y., & Whitesides, G. M. (1998). *Litografía Suave*. Harvard University, Department of Chemistry and Chemical Biology. Massachusetts: Wiley-VCH.
- Zhiyong Zhang, Le Xin . (2011). Pd-Ni electrocatalysts for efficient ethanol oxidation reaction in alkaline electrolyte. *International journal of hydrogen energy*, 12686-12697.
- Zhou, Y. X., Johnson, A. T., Hone, J., & Smith, W. F. (2003). *Fabricación simple de circuitos moleculares por evaporación de máscara de sombra*. Artículo Científico, Sociedad Química Americana , Pensilvania.

# APÉNDICES

**APÉNDICE A**  
**PLANOS ESQUEMÁTICOS DE LA LM $\mu$ FFC**

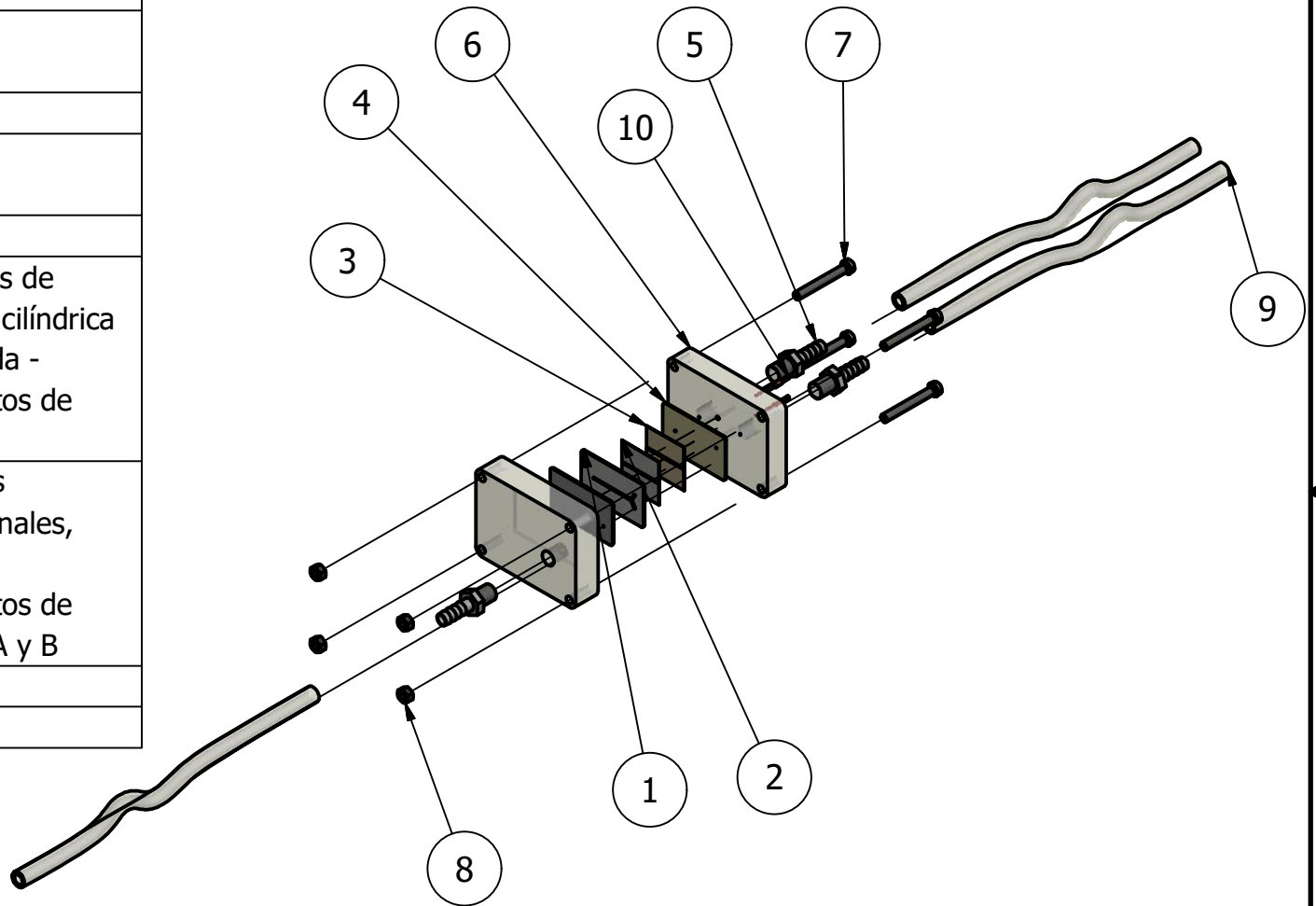




Diseño de: Jonathan Yépez Antonio Sornoza	Revisado por: Msc. Jorge Marcial	Aprobado por: PhD. Mayken Espinoza	Fecha de creación 17/01/2019	Fecha de aprobación: 23/01/2019	
---	-------------------------------------	---------------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	--

MATERIA INTEGRADORA	CELDA DE COMBUSTIBLE MICROFLUÍDICA		
	ENSAMBLE FINAL	Escala 1:4	Hoja 1 / 4

LISTA DE PIEZAS			
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA	DESCRIPCIÓN
1	1	Base de canal Y	
2	2	Electrodo	
3	2	Colector de corriente	
4	2	Cubierta	
5	3	Acople de manguera	
6	2	bases	
7	4	ISO 1207 - M5 x 40	Tornillos de cabeza cilíndrica ranurada - Productos de clase A
8	4	ISO 4033 - M5	Tuercas hexagonales, tipo 2 - Productos de clases A y B
9	3	Manguera	
10	2	Pogo pin	



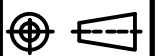
Diseño de:  
Jonathan Yépez  
Antonio Sornoza

Revisado por:  
Msc. Jorge Marcial

Aprobado por:  
PhD. Mayken Espinoza

Fecha de creación  
17/01/2019

Fecha de aprobación:  
23/01/2019



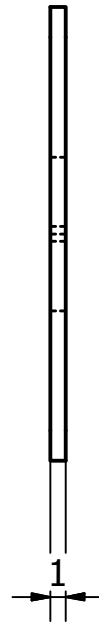
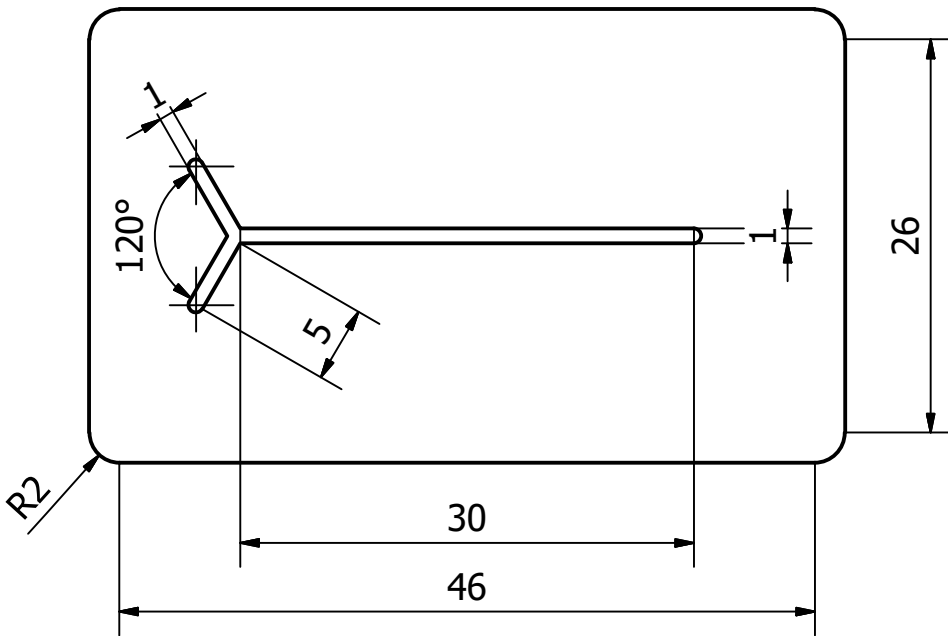
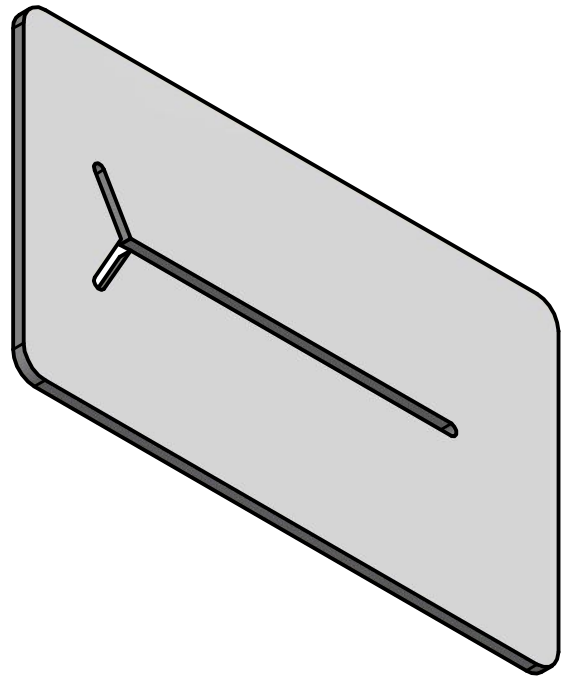
MATERIA INTEGRADORA

CELDA DE COMBUSTIBLE MICROFLUÍDICA

VISTA EN EXPLOSIÓN

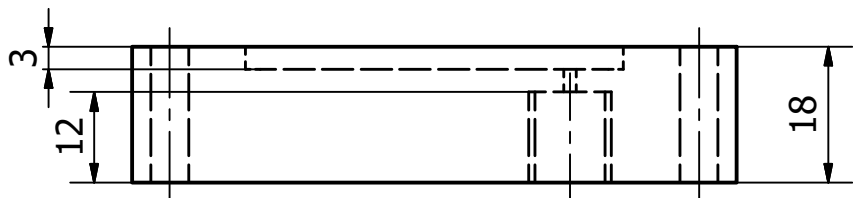
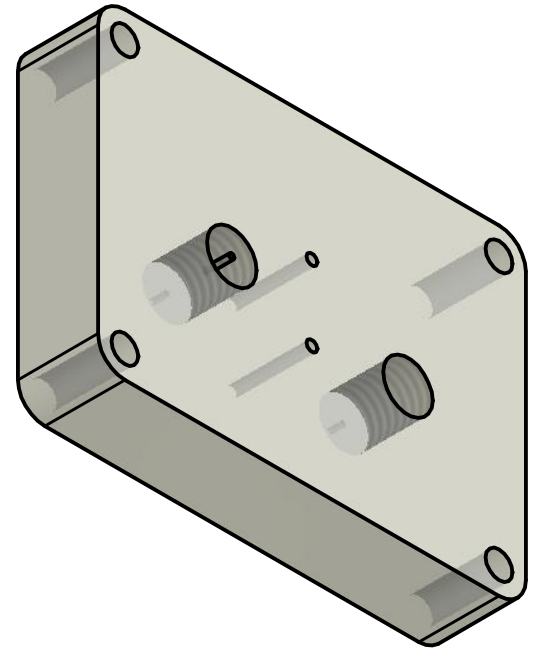
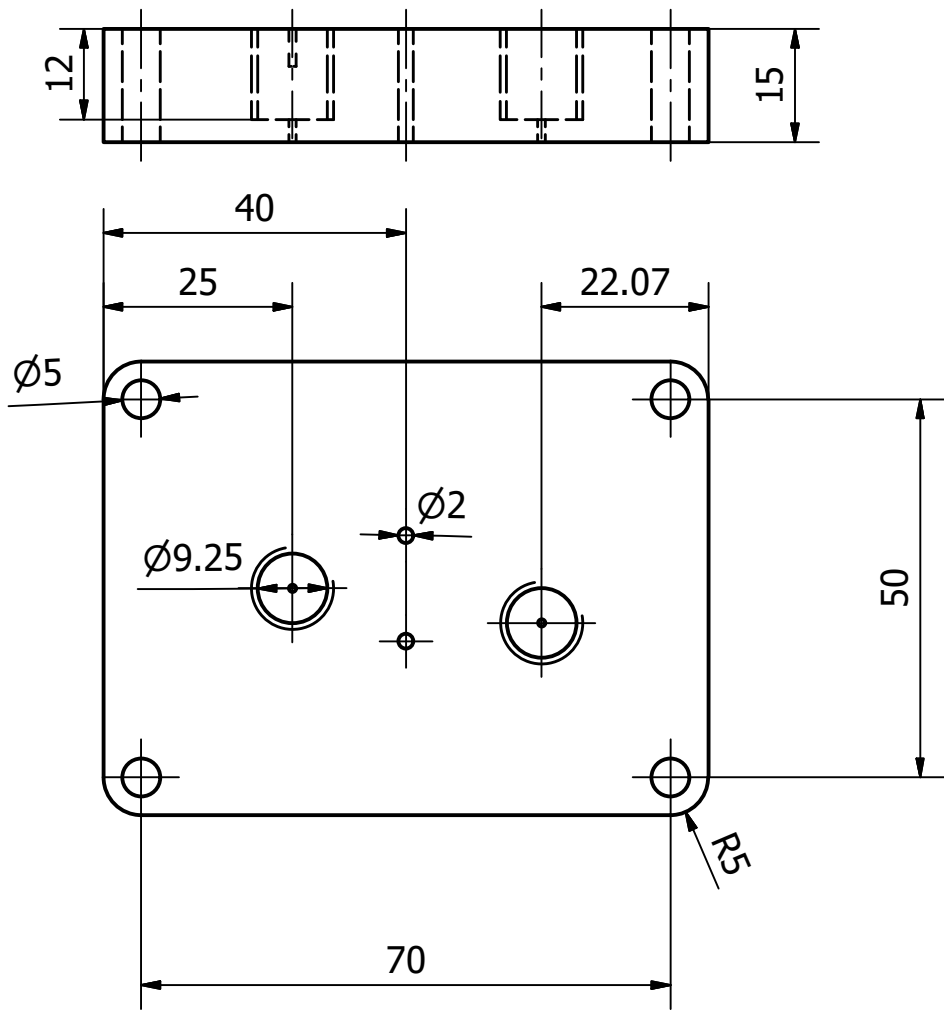
Escala  
1:4

Hoja  
2 / 4

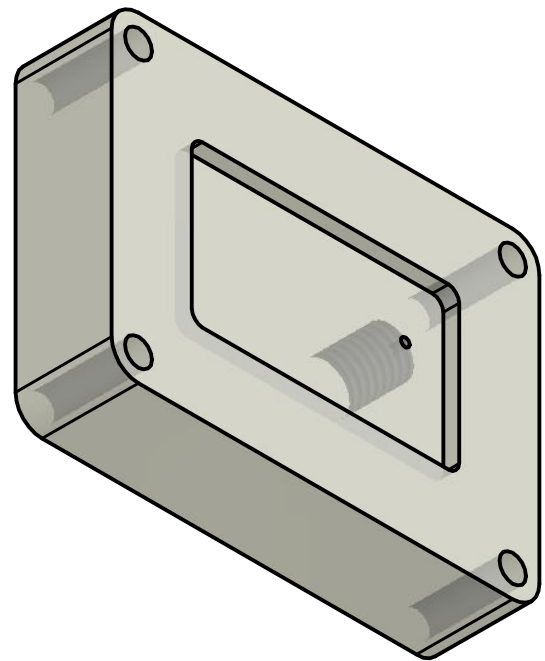
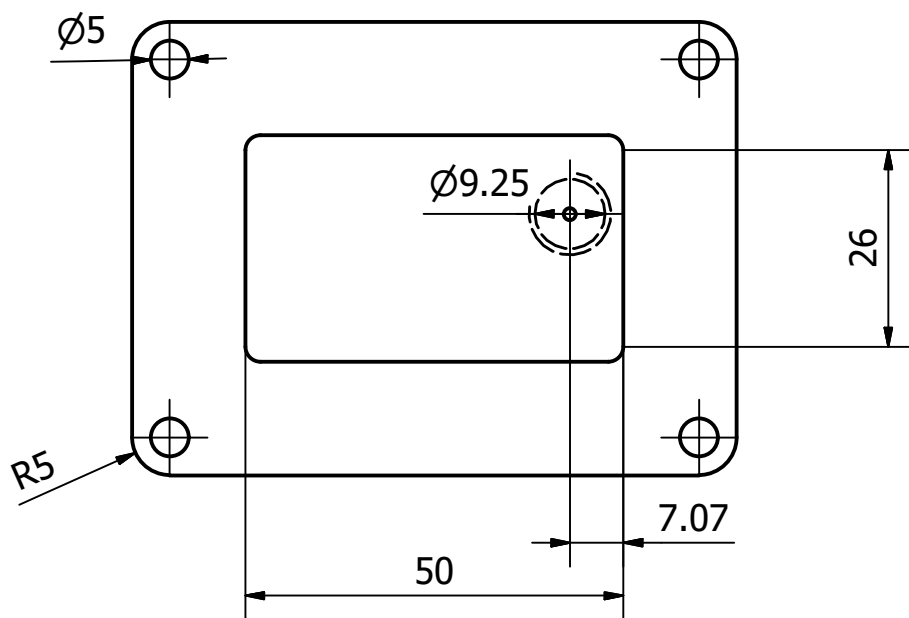




Diseño de: Jonathan Yépez Antonio Sornoza	Revisado por: Msc. Jorge Marcial	Aprobado por: PhD. Mayken Espinoza	Fecha de creación 17/01/2019	Fecha de aprobación: 23/01/2019	
MATERIA INTEGRADORA		CELDA DE COMBUSTIBLE MICROFLUÍDICA			
		BASE DE CANAL EN Y	Escala 2:1	Hoja 3 / 4	

### BASE SUPERIOR



### BASE INFERIOR



Diseño de: Jonathan Yépez Antonio Sornoza	Revisado por: Msc. Jorge Marcial	Aprobado por: PhD. Mayken Espinoza	Fecha de creación: 17/01/2019	Fecha de aprobación: 23/01/2019	 
MATERIA INTEGRADORA			CELDA DE COMBUSTIBLE MICROFLUÍDICA		
			BASE SUPERIOR E INFERIOR	Escala: 1:1	Hoja: 4 / 4

## APÉNDICE B

### CÁLCULOS REPRESENTATIVOS

#### Determinación del diámetro de mangueras

Para la selección del diámetro de mangueras se basó en el material a emplear, en el cual son mangueras de silicón. Se utilizó el catálogo de Ecumangueras S.A. donde se especifican los diferentes valores de presión y diámetro, los cuales se rigen a las normas sanitarias 3-A de la FDA (Food and Drug Administration) y la Norma ISO 10993 para la Evaluación Biológica de Dispositivos Médicos.

**Tabla B.1 Especificaciones de las mangueras de silicón a utilizar**

<b>Presión de trabajo (Psi)</b>	5 a 15
<b>Material</b>	Silicon virgen, translúcida, curada
<b>Temperatura de trabajo (°C)</b>	15 a 180
<b>Diámetros internos disponibles (in)</b>	1/8 a 3/4

Fuente: (Ecumangueras, 2018)

La selección para el diámetro de la manguera se basó en la disponibilidad del mercado nacional para acoples de acero inoxidable debido a que los flujos son químicos ácidos es necesario que el acople evite problemas de corrosión. El diámetro adecuado fue de ¼ in.

Utilizando el caudal de operación óptimo  $Q = 0.05$  y  $0.1$  ml/min o ( $3$  ml/h y  $6$  ml/h) para el flujo de combustible y oxidante:

$$Q = \frac{v}{A} \tag{B.1}$$

Donde:

- $v$  = velocidad del flujo
- $A$  = Área transversal de la manguera

Para un diámetro de ¼ in:

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$v = \frac{Q}{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)}$$

Para el flujo de combustible:

$$v = \frac{\left(3 * \frac{1}{1000} * \frac{1}{1000} * \frac{1}{3600}\right)}{\left(\frac{\pi(0.00635)^2}{4}\right)} = 2.63 \times 10^{-5} \frac{m}{s}$$

Para el flujo de oxidante:

$$v = \frac{\left(6 * \frac{1}{1000} * \frac{1}{1000} * \frac{1}{3600}\right)}{\left(\frac{\pi(0.00635)^2}{4}\right)} = 5.26 \times 10^{-5} \frac{m}{s}$$

Mediante esa velocidad nos permitirá calcular la pérdida a lo largo de la manguera

### **Pérdidas por fricción en la manguera**

- **Número de Reynolds en las mangueras**

La pérdida por fricción en la manguera se determinó mediante el cálculo del Número de Reynolds utilizando la Ecuación 1.1 con el fin de determinar el estado del flujo (laminar o turbulento). Se realizó el cálculo para los dos flujos:

Para el flujo de combustible:

$$Re_c = \frac{v\rho D}{\mu} \tag{1.1}$$

$$Re_c = \frac{(2.63 \times 10^{-5})(1429)(0.00635)}{0.001} = 0.23$$

Para el flujo oxidante:

$$Re_o = \frac{(5.26 \times 10^{-5})(1220)(0.00635)}{0.001} = 0.40$$

Donde se puede apreciar que ambos flujos se encuentran en un régimen laminar.

- **Coefficiente de fricción:**

El siguiente procedimiento fue calcular el valor del coeficiente de fricción, una vez determinado que se encuentran en flujo laminar se utiliza la ecuación correspondiente:

$$f_c = \frac{64}{Re_c} \quad (B.2)$$

Para el flujo combustible y oxidante:

$$f_c = \frac{64}{0.23} = 268$$

$$f_o = \frac{64}{0.40} = 156$$

- **Pérdidas de fricción  $h_f$ :**

Con los valores de coeficiente de fricción calculados se procedió a determinar las pérdidas que se producirán a lo largo de manguera mediante la ecuación de Darcy:

$$h_f = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (B.3)$$

Donde:

- $f$ = Coeficiente de fricción
- $L$ = Longitud de manguera [m]
- $D$ = Diámetro de la manguera [m]
- $v$ = Velocidad [m/s]
- $g$ = Gravedad [m/s<sup>2</sup>]

Por lo tanto, reemplazando con los valores ya obtenidos, además de considerar de 0.3 m de longitud de manguera:

Para el flujo de combustible y oxidante:

$$h_{fc} = f_c \frac{L v^2}{D 2g} = 268 \frac{0.3}{(0.00635)} \frac{(2.63 \times 10^{-5})^2}{2(9.81)}$$

$$h_{fc} = 4.46 \times 10^{-7} \text{ m}$$

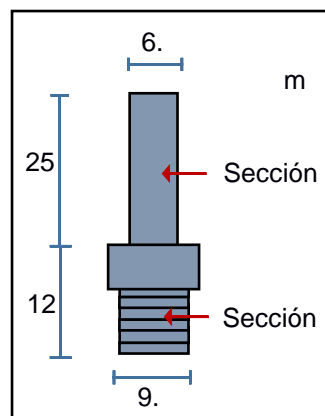
$$h_{fo} = f_c \frac{L v^2}{D 2g} = 156 \frac{0.3}{(0.00635)} \frac{(5.26 \times 10^{-5})^2}{2(9.81)}$$

$$h_{fo} = 1.04 \times 10^{-6} \text{ m}$$

Revisando los resultados se puede concluir que las pérdidas por fricción en las mangueras de silicón son pequeñas debido a que el equipo es de un tamaño reducido y funciona a velocidades de flujos muy bajas.

### Pérdidas por fricción en el acople de la manguera

El acople de la manguera en el mercado nacional cuenta con las siguientes dimensiones (Figura B.1):



**Figura B.1 Dimensiones del acople de flujo de manguera de 1/2 in**

Fuente: Elaboración propia



Para lo cual se realizó el procedimiento similar en la sección anterior, donde a partir del valor de flujo volumétrico  $Q= 12 \text{ m}^3/\text{h}$  utilizando los diámetros de cada sección, se calculó el valor de velocidad, y Número de Reynolds en cada sección establecida. Los valores fueron tabulados para sección del acople (Tabla B.2):

**Tabla B.2 Valores obtenidos de perdidas por fricción para el acople 1 del flujo de combustible**

Flujo de combustible		
	Sección 1	Sección 2
<b>Diámetro [m]</b>	0.00635	0.00925
<b>Velocidad [m/s]</b>	$2.63 \times 10^{-5}$	$1.17 \times 10^{-5}$
<b>Re</b>	0.23	0.16
<b>factor de fricción f</b>	268.02	402.02
<b><math>h_f</math></b>	$3.72 \times 10^{-8}$	$3.53 \times 10^{-9}$

Fuente: Elaboración propia

De igual forma se realizó el mismo procedimiento para el flujo de oxidante:

**Tabla B.3 Valores obtenidos de perdidas por fricción para el acople 1 del flujo de oxidante**

Flujo de comburente		
	Sección 1	Sección 2
<b>Diámetro [m]</b>	0.00635	0.00925
<b>Velocidad [m/s]</b>	$5.26 \times 10^{-5}$	$2.33 \times 10^{-5}$
<b>Re</b>	0.40	0.27
<b>factor de fricción f</b>	156.97	235.46
<b><math>h_f</math></b>	$8.72 \times 10^{-8}$	$8.27 \times 10^{-9}$

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, los valores de  $h_f$  en el acople son pequeños como se esperaba.

### **Pérdida por fricción en la entrada del canal**

Para los cálculos de pérdidas se estimó el diámetro hidráulico del canal mediante la siguiente fórmula:

$$D_h = \frac{2hw}{h+w} \quad (\text{B.4})$$

Donde:

- $h$ = altura del canal
- $w$ = ancho del canal

La geometría del canal es cuadrada por lo tanto  $h=w$ , entonces:

$$D_h = \frac{2hh}{h+h} = h = w$$

$$D_h = 0.001 \text{ m}$$

Como se realizó en la anterior sección para la manguera y el acople, se determinó los valores de  $h_f$  en la entrada del canal, para los dos flujos (Tabla B.4):

**Tabla B.4 Valores obtenidos de pérdidas en la entrada de los canales**

	<b>combustible</b>	<b>comburente</b>
<b>Diámetro hidráulico [m]</b>	0.001	0.001
<b>Velocidad [m/s]</b>	$9 \times 10^{-4}$	$2.2 \times 10^{-3}$
<b>Re</b>	1.53	3.06
<b>factor de fricción f</b>	41.81	20.09
<b><math>h_f</math> [m]</b>	$7.54 \times 10^{-6}$	$1-50 \times 10^{-5}$

Fuente: Elaboración propia

Los valores de velocidad obtenidos de la Tabla B.4, son los que se van a ingresar al software de simulación.

### **Pérdidas menores $h_m$ en el acople**

Las pérdidas menores que se presentan se deben a los cambios de diámetros que existe entre el acople, donde se utilizó la Ecuación B.5 definida por (Cengel, 2005):

$$h_m = k_L \frac{v^2}{2g} \quad (\text{B.5})$$

Donde:

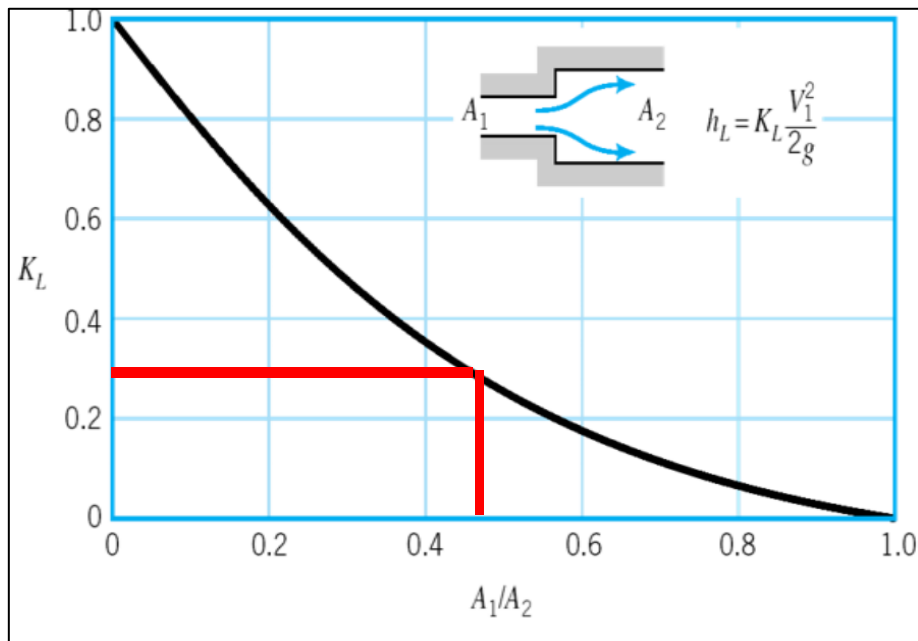
- $k_L$ = coeficiente de perdida

- $v$ = velocidad [m/s]
- $g$ = gravedad [m/s<sup>2</sup>]

Para el primer cambio de sección se dio una expansión repentina del área para lo cual se utilizó la siguiente gráfica para calcular el coeficiente de pérdida  $k_L$  y mediante la razón de áreas:

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = \left(\frac{0.00635}{0.0095}\right)^2 = 0.44$$

Se estima el valor de  $k_L$  mediante la razón de áreas de 0.44 (Figura B.2):



**Figura B.2** Curva de  $k_L$  vs  $A_1/A_2$  para un cambio de sección de ampliación

Fuente: (Universidad de Atacama, 2015)

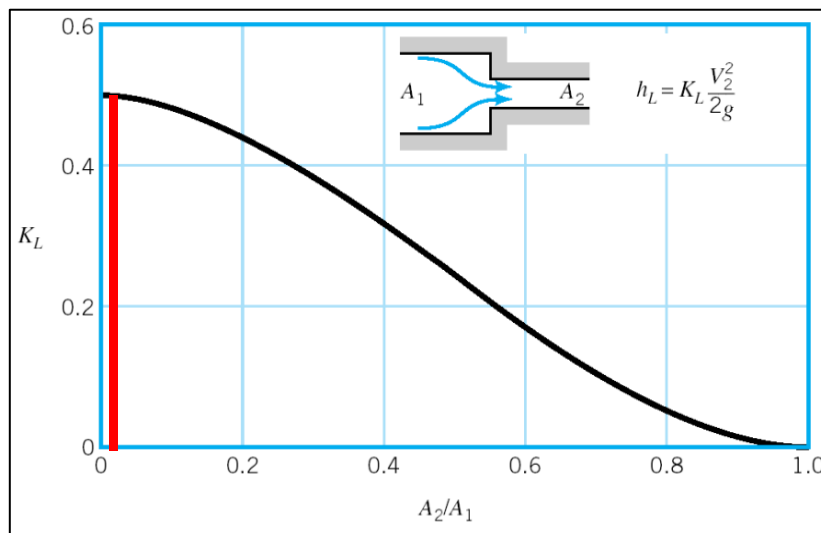
Donde se obtuvo un valor aproximado de 0.3, el cual será reemplazado para obtener el valor de  $h_m$ :

$$h_m = k_L \frac{\left(\frac{Q}{A_1}\right)^2}{2g} = k_L \frac{\left(\frac{4Q}{\pi d_1^2}\right)^2}{2g} = 0.3 \frac{\left(\frac{4(8.33 \times 10^{-10})}{\pi(0.00635^2)}\right)^2}{2(9.81)} = 1.05 \times 10^{-11} \text{ m}$$

Para la sección 2, se da una contracción repentina para lo cual es necesario determinar la relación de áreas correspondiente.

$$\frac{A_2}{A_1} = \left( \frac{7.85 \times 10^{-7}}{7.08 \times 10^{-5}} \right) = 0.01$$

Se procedió a estimar el valor de  $k_L$  mediante el valor razón de áreas de 0.01 (Figura B.3).



**Figura B.3 Curva de  $K_L$  vs  $A_2/A_1$  para un cambio de sección de reducción**

Fuente: (Universidad de Atacama, 2015)

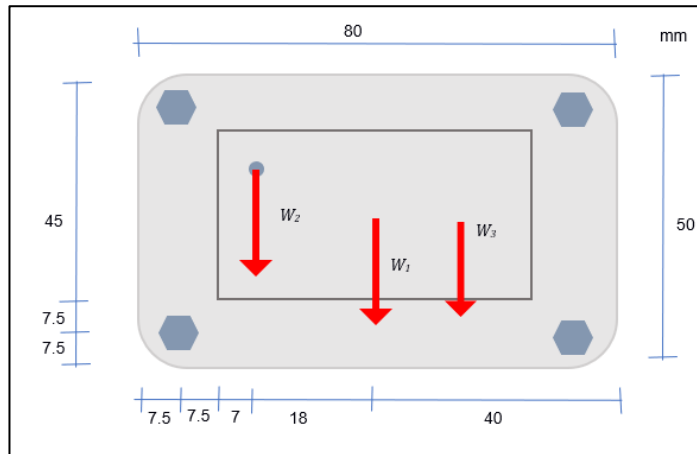
Donde se puede obtener un valor de 0.5 de  $k_L$ , el posterior paso fue determinar el valor de pérdida:

$$h_{m2} = k_L \frac{\left(\frac{Q}{A_2}\right)^2}{2g} = k_L \frac{\left(\frac{4Q}{\pi d_2^2}\right)^2}{2g} = 0.5 \frac{\left(\frac{4(8.33 \times 10^{-10})}{\pi(0.001^2)}\right)^2}{2(9.81)} = 2.86 \times 10^{-8} \text{ m}$$

Para el flujo de oxidante se realizó el mismo procedimiento para un valor de caudal de 6 ml/h dando como resultados valores de  $h_{m1}$  y  $h_{m2}$  de  $4.23 \times 10^{-11}$  y  $1.14 \times 10^{-7}$  m respectivamente.

### Selección de diámetro de pernos

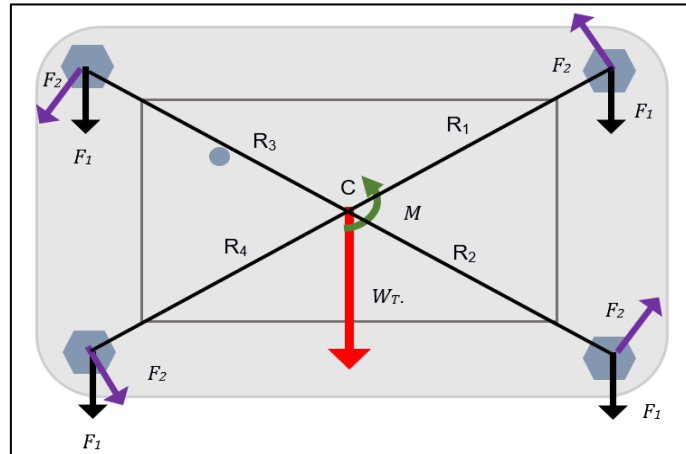
La selección del diámetro de pernos se basa en los esfuerzos a los que se encuentran sometidos los pernos además se consideró el peso de la estructura de acrílico  $W_1$  y de los acoples de manguera  $W_2$  y  $W_3$  como se muestra en el diagrama (Figura B.4):



**Figura B.4 Diagrama de cuerpo libre de la celda de combustible**

Elaboración propia

Una vez realizado el diagrama de cuerpo libre, se procede a establecer el diagrama de fuerzas primarias  $F_1$  y secundarias  $F_2$  con el momento generado  $M$  al trasladar  $W_2$  (Figura B.5):



**Figura B.5 Diagrama de cuerpo libre de fuerzas y momentos trasladados al centroide**

Elaboración propia

### Determinación de la fuerza secundaria $F_2$ :

#### Cálculo de Momento

La fuerza secundaria se obtiene a partir del momento total  $M$  generado al trasladar la fuerza  $W_2$  correspondiente al peso del acople de entrada de flujo y  $W_3$  (peso de acople de salida de flujo) al centroide. Se plantea la siguiente ecuación para el acople de entrada de flujo:

$$M_1 = W_2 * L \quad (\text{B.6})$$

Donde:

- $W_2$ : peso del acople de entrada de flujo
- $L$ : brazo o distancia al centroide

Como el equipo cuenta tres acoples, dos de ellos producen un momento  $M_1$  (dos acoples de entrada en cada lado de la celda) y el otro produce un  $M_2$ . Para los acoples de  $W_2$  se multiplica el peso por dos, la masa del acople es aproximadamente de 0.008 kg obtenida experimentalmente:

$$M_1 = W_2 * L = (2 * 0.008 * 9.81)(0.018) = 2.83 \times 10^{-3} \text{ N.m}$$

Para el acople de  $W_3$  se realiza el mismo calculo obteniendo un momento contrario. El momento resultante es la suma de ambos momentos

$$M_2 = (1 * 0.008 * 9.81)(0.007) = -5.49 \times 10^{-3} \text{ N.m}$$

$$M = M_1 + M_2 = -2.66 \times 10^{-3} \text{ N.m}$$

### Cálculo de la fuerza secundaria $F_2$

Por medio de conocimiento de geometría se determina los valores de las distancias  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  y  $R_4$ . Por principios de geometría se obtiene que  $R_1=R_2=R_3=R_4$  (Figura B.5):

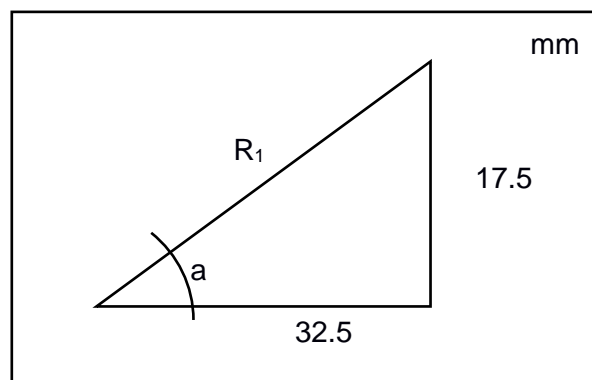


Figura B.6 Sección de la celda para el cálculo de la distancia  $R_1$

Elaboración propia

$$R_1 = \sqrt{32.5^2 + 17.5^2} = 27.38 \text{ mm} = 0.027 \text{ m}$$

$$a = \sin^{-1} \frac{17.50}{27.38} = 39.42^\circ$$

Una vez calculado el valor de  $R_1$ , se procedió a determinar la fuerza secundaria utilizando la Ecuación B.7 (Robert L. Norton, 2011), además por geometría  $r = R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ :

$$F_2 = \frac{Mr}{nr^2} \quad (\text{B.7})$$

Donde:

- $M$ = momento
- $n$ = número de pernos
- $r$ = distancia perpendicular de la fuerza

reemplazando:

$$F_2 = \frac{Mr}{nr^2} = \frac{(2.66 \times 10^{-3})(0.027)}{4(0.027)^2} = 0.024 \text{ N}$$

Es necesario descomponer la fuerza  $F_2$  en sus componentes  $x$  y  $y$ :

$$F_{2x} = F_2 \cos a = (0.024) \cos(39.42) = 0.018 \text{ N}$$

$$F_{2y} = F_2 \sin a = (0.024) \sin(39.42) = 0.015 \text{ N}$$

### **Determinación de la fuerza primaria $F_1$ :**

El cálculo de la fuerza secundaria involucra los pesos del material  $W_1$ , el peso de los dos acoples de flujo de entrada  $W_2$  y el peso del acople de flujo de salida  $W_3$  los cuales serán distribuidos de manera igual en los 4 pernos, por lo tanto:

$$F_1 = \frac{W_1 + 2W_2 + W_3}{n} \quad (\text{B.8})$$

El peso de la celda se lo obtuvo mediante la densidad del material aproximadamente de  $1200 \text{ kg/cm}^3$  y de volumen  $V_1$ , el cual tiene un espesor de 33 mm, aplicando la relación de masa, volumen y densidad:

$$W_1 = mg \tag{B.9}$$

$$W_1 = \rho V_1 g = (1200)(0.050 \times 0.080 \times 0.033)(9.81) = 1.55 \text{ N}$$

Reemplazando, y considerando que los tres acoples son iguales  $W_2 = W_3$ :

$$F_1 = \frac{W_1 + 2W_2 + W_3}{n} = \frac{1.55 + (3 * 0.08 * 9.81)}{4} = 0.97 \text{ N}$$

### Fuerza resultante en cada perno:

La fuerza resultante representa la suma vectorial de la fuerza primaria y secundaria, además de fuerzas que estén actuando externamente. La fuerza obtenida por la conservación de momento es pequeña la cual puede ser despreciable para los cálculos, por lo cual:

$$\sum F_x = F_{2x} = 0.018 \text{ N}$$

$$\sum F_y = F_{2y} + F_1 = 0.015 + 0.97 \text{ N} = 0.98 \text{ N}$$

$$F = \sqrt{\sum F_x^2 + \sum F_y^2} = \sqrt{0.018^2 + 0.98^2} = 0.98 \text{ N}$$

Una vez determinada la fuerza total, se procedió a determinar el diámetro del perno para la celda. Para ello se seleccionó un perno de acero de bajo carbono con un valor de resistencia mínima a la fluencia  $S_y$  de 240 MPa (Tabla B.5), utilizando un factor de seguridad  $N_f$  de 1 para evaluar el caso crítico.

**Tabla B.5 Especificaciones de resistencias para pernos de acero**

Número de clase	Intervalo del tamaño del diám. ext. (mm)	Resistencia de prueba mínima (MPa)	Resistencia a la fluencia mínima (MPa)	Resistencia a la tensión mínima (MPa)	Material
4.6	M5-M36	225	240	400	bajo o medio carbono
4.8	M1.6-M16	310	340	420	bajo o medio carbono
5.8	M5-M24	380	420	520	bajo o medio carbono
8.8	M3-M36	600	660	830	medio carbono, Q&T
9.8	M1.6-M16	650	720	900	medio carbono, Q&T
10.9	M5-M36	830	940	1 040	martensita al bajo carbono, Q&T
12.9	M1.6-M36	970	1 100	1 220	aleación, templada y revenida

Fuente: (Robert L. Norton, 2011)



$$S_{ys} = 0.5 S_y \quad (\text{B.10})$$

$$S_{ys} = 0.5 (240) = 120 \text{ MPa}$$

Por lo cual el esfuerzo cortante producido (Ecuación B.11):

$$\tau = \frac{S_y}{N_f} \quad (\text{B.11})$$

$$\tau = S_y = 120 \text{ MPa}$$

Definiendo el esfuerzo cortante en los pernos (Ecuación B.12):

$$\tau = \frac{F}{A_p} \quad (\text{B.12})$$

Donde:

- $F$ = fuerza resultante que actúa en los pernos
- $A_p$ = es el área transversal del perno

$$\tau = \frac{4F}{\pi d_p^2}$$

$$d_p = \sqrt{\frac{4F}{\pi\tau}}$$

$$d_p = \sqrt{\frac{4(0.98)}{\pi(120 \times 10^6)}} = 0.10 \text{ mm}$$

Debido a que el diámetro es muy pequeño y no se encuentra en el mercado nacional, se seleccionó uno de mayor tamaño, en nuestro caso se utilizó un perno de  $d_p = 5 \text{ mm}$  y una longitud de 40 mm, utilizando el catálogo de Tornillería Sodoya (Tornillería Sodoya, 2019):

$$F = \frac{\tau \pi d_p^2}{4}$$

$$F = \frac{(120 \times 10^6) \pi (5 \times 10^{-3})^2}{4}$$

$$F = 2.3 \text{ kN}$$

Donde podemos ver que para ese diámetro la fuerza que soportan los pernos es mayores dando como resultado que los pernos no fallarán por esfuerzos cortantes.

**Tabla B.6 Catálogo de pernos en el mercado local**

CÓDIGO:	DIÁMETRO:	LONGITUD:
TMGCM03010	3 MM	10 MM
TMGCM03020	3 MM	20 MM
TMGCM03025	3 MM	25 MM
TMGCM03035	3 MM	35 MM
TMGCM03040	3 MM	40 MM
TMGCM03050	3 MM	50 MM
TMGCM04010	4 MM	10 MM
TMGCM04015	4 MM	15 MM
TMGCM04020	4 MM	20 MM
TMGCM04025	4 MM	25 MM
TMGCM04030	4 MM	30 MM
TMGCM04040	4 MM	40 MM
TMGCM04050	4 MM	50 MM
TMGCM05010	5 MM	10 MM
TMGCM05015	5 MM	15 MM
TMGCM05020	5 MM	20 MM
TMGCM05025	5 MM	25 MM
TMGCM05030	5 MM	30 MM
TMGCM05035	5 MM	35 MM
TMGCM05040	5 MM	40 MM
TMGCM05050	5 MM	50 MM
TMGCM05060	5 MM	60 MM
TMGCM05070	5 MM	70 MM
TMGCM05080	5 MM	80 MM
TMGCM06010	6 MM	10 MM
TMGCM06015	6 MM	15 MM
TMGCM06020	6 MM	20 MM
TMGCM06025	6 MM	25 MM
TMGCM06030	6 MM	30 MM

Fuente: (Tornillería Sodoya, 2019)

## APÉNDICE C

### Selección de bombas de jeringa

La bomba que se escogió debe cumplir con los parámetros de que los flujos permanezcan en un régimen laminar, por lo cual se requiere que trabaje a valores bajos de caudal. Para nuestro proyecto el caudal de operación del flujo de combustible y oxidante fue de 3 y 6 ml/h, con el cual se obtuvo valores aceptables de densidades de corrientes. Utilizando el catálogo de Micrux Technologies (Micrux Technologies, 2019) para bombas de jeringas se seleccionó dos bombas idénticas NE 300, las cuales pueden trabajar en un rango de flujo de 12nl/min a 20 ml/min. A continuación, se muestra el catalogo de bombas de jeringas disponibles con sus respectivos parámetros de operación (Tabla B.6)

**Tabla B.6 Especificaciones de bombas de jeringa de Micrux Techonologies**

	NE-300	NE-1000	NE-4000	NE-1600 / 1800 / 1200
» Working Mode:	Infusion	Infusion / withdrawal		
» Channels:	1		2	up to 12
» Motor type:	Step motor			
» Motor step per resolution:	400		200	
» Microstepping:	1/8 to 1/2 depending on motor speed			
» Advance per step:	0.2126 $\mu\text{m}$ to 0.504 $\mu\text{m}$ depending on motor speed		0.4252 $\mu\text{m}$ to 1.7009 $\mu\text{m}$ depending on motor speed	0.1323 $\mu\text{m}$ to 0.5292 $\mu\text{m}$ depending on motor speed
» Maximum speed:	38 mm/min	51 mm/min	184 mm/min	35 mm/min
» Minimum speed:	0.7 $\mu\text{m}/\text{min}$		1.3 $\mu\text{m}/\text{min}$	0.4 $\mu\text{m}/\text{min}$
» Linear force:	> 150 N at minimum speed, 80 N at maximum speed		> 400 N at minimum speed, 80 N at maximum speed	> 700 N at minimum speed, 130 N at maximum speed
» Accuracy:	Within +/- 1% over length of syringe, exclusive of syringe variations			
» Flow rate:	12 nL/min – 20 mL/min	12 nL/min – 30 mL/min	25 $\mu\text{L}/\text{min}$ – 100 mL/min	8 nL/min – 20 mL/min
» Syringe size:	1 – 60 mL [140 mL partially filled]			0.5 $\mu\text{L}$ – 140 mL
» Number of program phases:	--	41		
» Communication interface:	--	RS-232 [network up to 100 pumps]		
» Power supply:	Unregulated linear external wall adapter, country and power source specific (or compatible regulated power supply)			
» Dimensions (D X W X H):	229 x 146 x 114 mm			260 x 381 x 127 mm
» Weight:	1.63 Kg			4.6 Kg

Fuente: (Micrux Technologies, 2019)



**Figura B.6 Bomba de jeringa seleccionada modelo NE-300**

Fuente: (Micrux Technologies, 2019)