



**UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO**  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**SISTEMA DE CONTROL TÉRMICO Y  
POSICIONAMIENTO DE MUESTRAS PARA LA  
MANUFACTURA DE ELECTRODOS POROSOS**

**TESIS  
PARA OBTENER EL GRADO DE**

**Ingeniero en Sistemas de Energía**

**PRESENTA  
Felix Justiniano Caamal**

**DIRECTORA DE TESIS  
Dra. Edith Osorio de la Rosa**

**ASESORES  
Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool  
Dr. Guillermo Becerra Núñez  
Dra. Beatriz Escobar Morales  
Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar**





UNIVERSIDAD DE QUINTANA ROO  
DIVISIÓN DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TRABAJO DE TESIS TITULADO

“Sistema de control térmico y posicionamiento de muestras para la manufactura de electrodos porosos”

ELABORADO POR  
Felix Justiniano Caamal

BAJO SUPERVISIÓN DEL COMITÉ DE ASESORÍA Y APROBADO COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

**Ingeniero en Sistemas de Energía**

COMITÉ DE TESIS

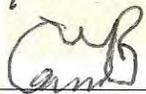
DIRECTORA:

  
Dra. Edith Osorio de la Rosa

ASESOR:

  
Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool

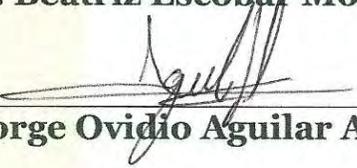
ASESOR:

  
Dr. Guillermo Becerra Núñez

ASESORA:

  
Dra. Beatriz Escobar Morales

ASESOR:

  
Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar



PÁGINA EN BLANCO

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi comité de tesis, que lo conforman: el Dr. Gliserio Romeli Barbosa Pool, Dr. Jorge Ovidio Aguilar Aguilar, Dra. Beatriz Escobar Morales y especialmente al Dr. Guillermo Becerra Núñez por guiarme y motivarme durante todo el proceso de este trabajo de tesis, y a la Dra. Edith Osorio de la Rosa, quien en todo momento tuvo la disposición de asistirme y apoyarme en lo que estuviera dentro de sus posibilidades.

Agradezco al personal técnico y académico de la División de Ciencias e Ingenierías (DCI) de la Universidad de Quintana Roo, al M.S. Set Jubal Castillo Ávila por el apoyo con las herramientas necesarias para la realización de este trabajo de tesis.

También agradezco la colaboración del personal de la unidad de energías renovables del Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán (CICY) por el soporte técnico recibido durante mi estancia de investigación.

Agradezco al Ing. Alexis Rabagos por el apoyo prestado en la programación, ensamblado y puesta a punto del sistema CNC.

Agradezco de igual forma a Max, Juan Carlos, Anahí, Fabian, Carlos, Jesús, Alexis, José, Normand, Anfernee, Cristóbal y especialmente a María por su apoyo durante todo este tiempo.

Un especial agradecimiento al CONACYT (proyecto FSE-2014-01-254667), por el apoyo económico brindado bajo el proyecto “Consolidación del Laboratorio de Energías Renovables del Sureste (LENERSE)”.

A mis padres, Concepción y Alejandro, por todo el apoyo que me han brindado durante mi formación profesional, la confianza que han depositado en mí durante toda mi vida, las enseñanzas y los valores que me han impartido y que han ayudado a formar la persona que soy ahora y especialmente por darme el mejor regalo que un padre pueda dar un hijo, “LA EDUCACIÓN”.

A mi hermano, Erick, quien ha sido un modelo a seguir desde mi infancia, me ha motivado a seguir adelante y ser una mejor persona, y a mi abuelita, Melba, por ser un pilar a lo largo de mi vida.

PÁGINA EN BLANCO

# ÍNDICE

<b>RESUMEN .....</b>	<b>1</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES .....</b>	<b>5</b>
1.1 Las energías renovables.....	5
1.1.1 Un panorama mundial .....	5
1.1.2 Las energías renovables en México.....	7
1.1.3 Energías renovables en la Península de Yucatán.....	11
1.2 Hidrógeno como combustible.....	13
<b>CAPÍTULO 2. LA CELDA DE COMBUSTIBLE .....</b>	<b>15</b>
2.1 Fundamentos.....	15
2.2 Celda de combustible de membrana de intercambio protónico.....	18
2.3 Componentes de una celda de combustible.....	20
2.3.1 Electroodos .....	20
2.3.2 Ensamble membrana-electrodo .....	20
2.4 Técnicas de fabricación de la MEA.....	23
2.4.1 Método de transferencia por calcomanía.....	24
2.5 Variables de fabricación que afectan al ensamble.....	25
2.5.1 Presión .....	25
2.5.2 Temperatura.....	26
<b>CAPÍTULO 3. FABRICACIÓN DE LA FC .....</b>	<b>27</b>
3.1 Sistema de control numérico computarizado.....	28
3.1.1 Planeación del diseño .....	31
3.2 Descripción de la máquina .....	34
3.2.1 Sistema electrónico.....	35
3.2.2 Paquetería de programación .....	39
3.2.3 Sistema de control .....	45
3.2.4 Sistema de desplazamiento del CNC.....	52
<b>CAPÍTULO 4. Prensado de la MEA.....</b>	<b>53</b>

4.1 Estado actual de la prensa termo-neumática.....	53
4.1.1 Componentes actuales de la prensa .....	55
4.1.2 Módulo térmico .....	60
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS .....</b>	<b>61</b>
5.1 Posicionamiento de muestras.....	61
5.1.1 Configuración de los componentes electrónicos .....	61
5.1.2 Trayectorias de trabajo .....	67
5.1.3 Corte de los materiales .....	73
5.2 Control térmico.....	92
5.2.1 Punzón .....	92
5.2.2 Estudio de esfuerzos mecánicos .....	93
5.2.3 Análisis térmico.....	96
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>100</b>
<b>PERSPECTIVAS.....</b>	<b>101</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>102</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>103</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b> Múltiples fuentes de energía en todo el mundo, gráfica adaptada de [6].	5
<b>Figura 1.2</b> Reservas de petróleo comprobadas en todo el mundo, gráfica adaptada de [7].	6
<b>Figura 1.3</b> Participación de las energías renovables en la demanda energética global, gráfica adaptada de [7].	7
<b>Figura 1.4</b> Fuentes de generación eléctrica en México, gráfica adaptada de [4].	8
<b>Figura 1.5</b> Distribución global de irradiancia dentro del solar belt, figura obtenida de [4].	9
<b>Figura 1.6</b> Irradiancia solar en México, figura obtenida de [4].	9
<b>Figura 1.7</b> Velocidades del viento a 120 m de altitud, figura obtenida de [4].	10
<b>Figura 1.8</b> Radiación solar anual en la Península de Yucatán, figura obtenida de [10].	12
<b>Figura 1.9</b> Técnicas empleadas para la producción de hidrógeno, diagrama adaptado de [5].	14
<b>Figura 2.1</b> Esquema del principio de funcionamiento de una FC, figura adaptada de [16].	16
<b>Figura 2.2</b> Esquema de los componentes de un Stack de FC, figura adaptada de [14].	17
<b>Figura 2.3</b> Diseño esquemático de una PEMFC, figura adaptada de [21].	19
<b>Figura 2.4</b> a) configuración ideal de una MEA, b) corte transversal de una MEA real, figuras adaptadas de [15, 22].	21
<b>Figura 2.5</b> Diagrama esquemático del proceso de manufactura de una MEA por el método DTM, figura adaptada de [19].	24
<b>Figura 2.6</b> a) rendimiento de la transferencia del catalizador (RTC) para los diferentes sustratos, b) RTC a diferentes presiones, c) comparación del RTC a diferentes temperaturas por los métodos de DTM y LTDM, d) RTC a diferentes tiempos de prensado, graficas adaptadas de [22].	25
<b>Figura 3.1</b> Diseño esquemático de la celda de combustible manufacturada en la UQROO.	27
<b>Figura 3.2</b> Componentes de una máquina CNC: 1) programa, 2) controlador, 3) herramienta y 4) mesa de soporte, figura obtenida de [23].	30
<b>Figura 3.3</b> Flujo de trabajo del sistema CAD/CAM para la obtención de un producto manufacturado mediante CNC.	31
<b>Figura 3.4</b> Estructura CNC con cortador láser.	34
<b>Figura 3.5</b> Fuentes de alimentación del sistema CNC: a) modelo FUE-36V360W de WANTAI MOTOR entregando 360 W de potencia y b) modelo ATX500wPSU-101 de Vorago entregando 500 W de potencia.	36
<b>Figura 3.6</b> Motor a pasos modelo WT57STH.	37
<b>Figura 3.7</b> Imagen del diodo láser utilizado en este trabajo.	39

<b>Figura 3.8</b> Interfaz del programa Inkscape.....	42
<b>Figura 3.9</b> Interfaz de la extensión desarrollada por JTech Photonics para la creación del código-G mediante el programa Inkscape. ....	42
<b>Figura 3.10</b> Interfaz del software Pronterface. ....	44
<b>Figura 3.11</b> Placa del microcontrolador Arduino Mega 2560.....	45
<b>Figura 3.12</b> Placa del shield RAMPS 1.4, para aumentar las funcionalidades del Arduino Mega 2560.....	48
<b>Figura 3.13</b> Driver DQ542MA de Wantai Motor para controlar los motores a pasos.....	49
<b>Figura 3.14</b> Final de carrera utilizado Mechanical EndStop V1.2 de RepRap.....	51
<b>Figura 3.15</b> Diagrama esquemático del Mechanical EndStop V1.2. ....	51
<b>Figura 3.16</b> Componentes de deslizamiento: a) guía lineal deslizable, b) rodamiento de bola tipo husillo, figuras obtenidas de [24]. ....	52
<b>Figura 4.1</b> Diagrama de los vectores de fuerza sufridos por la armadura de soporte durante el ciclo de fuerza, figura obtenida de [19].....	54
<b>Figura 4.2</b> Etapas que componen el ciclo neumático: a) suministro, b) control y c) actuación, diagrama obtenido de [19]. ....	56
<b>Figura 4.3</b> Etapas que componen el ciclo eléctrico: 1) suministro, 2) control y 3) actuación, figura obtenida de [19].....	58
<b>Figura 4.4</b> Diagrama del módulo térmico, donde: A) superficie superior de la placa, B) barrenado para la posición de las termorresistencias y C) superficie lateral del sensor PT-100. ....	60
<b>Figura 5.1</b> RAMPS 1.4 montada sobre el Arduino Mega 2560.....	61
<b>Figura 5.2</b> Diagrama de conexiones de los componentes electrónicos del CNC.....	62
<b>Figura 5.3</b> Ruta para personalizar la cama virtual del CNC, donde 400 y 450 son las dimensiones expresadas en milímetros. ....	64
<b>Figura 5.4</b> Diagrama de conexiones de los finales de carrera. ....	64
<b>Figura 5.5</b> Diagrama esquemático para la conexión de los drivers y motores.....	65
<b>Figura 5.6</b> Configuración de los micropasos mediante el uso de la calculadora de micropasos....	66
<b>Figura 5.7</b> Herramienta de dibujo del software Inkscape. ....	68
<b>Figura 5.8</b> Ruta de láser generada por la extensión. ....	69
<b>Figura 5.9</b> Ejemplo N°1 de grabado mediante CNC de corte láser sobre triplay. ....	69
<b>Figura 5.10</b> Imagen en blanco y negro importada al Inkscape para su transformación en código-G. ....	72
<b>Figura 5.11</b> Generación de bordes de una imagen para su conversión a código-G.....	72

<b>Figura 5.12</b> Ejemplo N°6 de grabado mediante CNC de corte láser sobre triplay. ....	73
<b>Figura 5.13</b> Prueba de traspaso del láser sobre el Mylar donde: a) muestra el posicionamiento de la muestra y b) muestra los resultados de perforación a 30 segundos, 45 segundos y 1 minuto.....	75
<b>Figura 5.14</b> Resultados del primer corte a 1mm/min y 5 pasos de corte, donde: a) vista completa del material y b) vista desde microscopio. ....	75
<b>Figura 5.15</b> Mylars con recubrimiento en su superficie a) papel contact y papel obscuro, b) plumón permanente y c) plumón a base de agua. ....	76
<b>Figura 5.16</b> Resultados de los cortes utilizando diferentes recubrimientos (derecha vista a través de microscopio, izquierda vista completa) a) plumón permanente, b) ensamble tipo sándwich y c) plumón a base de agua. ....	77
<b>Figura 5.17</b> Modificación de la mesa de trabajo con muestra de Mylar recubierta con pintura de plumón a base de agua para su corte. ....	78
<b>Figura 5.18</b> Prueba para calcular la velocidad de corte del material. ....	82
<b>Figura 5.19</b> Resultado del corte a 12 mm/min sobre la cara recubierta con carbón. ....	83
<b>Figura 5.20</b> Vista microscópica del corte, donde se aprecian los hilos de la tela a lo larga de la sección transversal. ....	83
<b>Figura 5.21</b> Elastómero SILASTIC® J. ....	85
<b>Figura 5.22</b> Mediciones realizadas para encontrar el tiempo que tarda el láser en atravesar al material. ....	86
<b>Figura 5.23</b> Mediciones de traspaso del láser con el material recubierto mediante plumón. ....	86
<b>Figura 5.24</b> Primer corte realizado al elastómero. ....	87
<b>Figura 5.25</b> Cinta de teflón utilizada en este estudio. ....	90
<b>Figura 5.26</b> Primera prueba de corte del teflón. ....	90
<b>Figura 5.27</b> Resultado de corte del teflón después de pintar su superficie con plumón negro a base de agua, sin embargo, la pintura no puede ser removida una vez aplicada. ....	91
<b>Figura 5.28</b> Resultados del corte a 1500 mm/min, donde: a) vista completa del material y b) vista a través del microscopio. ....	91
<b>Figura 5.29</b> Punzón propuesto para su implementación en la prensa termo-neumática. ....	92
<b>Figura 5.30</b> Estudio de esfuerzos mecánicos del punzón (Tensiones de Von Mises). ....	96
<b>Figura 5.31</b> Condiciones iniciales para el análisis térmico. ....	97
<b>Figura 5.32</b> Resultados de las condiciones iniciales del análisis térmico. ....	98
<b>Figura 5.33</b> Resultados del análisis térmico y ubicación de las condiciones de frontera donde: flechas verdes representan la restricción circunferencial aplicada al pistón y las flechas marrones representan a la restricción en el eje vertical aplicada a la cara inferior del punzón. ....	99

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1</i> Localización, capacidad instalada y generación de plantas fotovoltaicas en México, tabla adaptada de [4].....	10
<i>Tabla 2</i> Principales tipos de celdas de combustible y sus aplicaciones dependiendo de su temperatura de operación.....	16
<i>Tabla 3</i> Características fundamentales de las PEMFCs, tabla adaptada de [20].....	19
<i>Tabla 4</i> Ventajas y desventajas del uso del Nafion como membrana en la PEMFC, tabla adaptada de [15].....	23
<i>Tabla 5</i> Comparativa entre las herramientas utilizadas mediante la manera artesanal y las herramientas capaces de automatizar el sistema.....	32
<i>Tabla 6</i> Características principales de las fuentes de poder utilizadas en este proyecto.....	36
<i>Tabla 7</i> Características principales de los actuadores.....	38
<i>Tabla 8</i> Principales características del diodo láser.....	39
<i>Tabla 9</i> Características del microcontrolador Arduino Mega 2560.....	46
<i>Tabla 10</i> Características principales de la shield utilizada en este trabajo de investigación.....	48
<i>Tabla 11</i> Entradas del controlador para los motores a pasos.....	49
<i>Tabla 12</i> Resultado del estudio de análisis de esfuerzos.....	54
<i>Tabla 13</i> Componentes del ciclo neumático.....	56
<i>Tabla 14</i> Componentes del ciclo eléctrico.....	58
<i>Tabla 15</i> Ejemplos de grabado de dibujos en 2D.....	70
<i>Tabla 16</i> Calculo de velocidades para cada condición de recubrimiento.....	76
<i>Tabla 17</i> Resultados del estudio modificando los parámetros de corte.....	79
<i>Tabla 18</i> Parámetros y cortes de 2 rectángulos de Mylar.....	81
<i>Tabla 19</i> Comparación entre el número de pasos y el resultado obtenido para el corte de la tela de carbón.....	84
<i>Tabla 20</i> Resultados de los cortes del elastómero al modificarle los parámetros de corte.....	88
<i>Tabla 21</i> Resultados de los cortes al pintar y cortar ambas caras del elastómero.....	89
<i>Tabla 22</i> Propiedades físicas del acero 4340.....	93
<i>Tabla 23</i> Condiciones de frontera para el análisis de esfuerzos.....	94
<i>Tabla 24</i> Resultados del análisis de esfuerzos mecánicos sufridos por el punzón.....	96

## RESUMEN

En este trabajo se documenta el diseño, configuración, programación y resultados de un sistema automatizado para la manufactura de electrodos porosos para celdas de combustible de membrana de intercambio protónico. Este estudio se dividió principalmente en dos objetivos: el primero se centró en la implementación de un sistema de control numérico computarizado (CNC) de corte láser con el fin de fabricar los componentes internos de las celdas de combustible, mientras que el segundo objetivo, se basó en la conceptualización del diseño de un punzón y la simulación evaluando su uso dentro de un sistema de termo-prensado, para el mismo fin.

El sistema CNC es controlado mediante Arduino y toda la paquetería instalada para su óptimo funcionamiento es *open source*, lo que le brinda un carácter amigable, permitiendo modificar o implementar cualquier componente necesario para diferentes proyectos. Además esto permitió reducir gastos y se logró un producto final que cumplió con las necesidades de este trabajo de tesis. Para la manufactura de los componentes internos de la celda de combustible se encontraron los parámetros idóneos de corte como: velocidad, potencia del láser, pasos y condiciones externas necesarias para cada material, logrando así cortes limpios y precisos sobre Mylar, Tela de carbón, Elastómero SILASTIC® J y PTFE Gore-TX®.

Para el diseño del punzón, se utilizó el complemento *Simulations* de SolidWorks con el cuál se realizaron los estudios pertinentes que avalan su uso dentro del sistema de termo-prensado.

## **ABSTRACT**

In this work the design, configuration, programming and results of an automated system for the manufacture of porous electrodes of PEMFCs is presented. This study was divided mainly in two objectives. The first was focused on the implementation of a computerized numerical control system (CNC) laser cutting for the preparation of a fuel cell's internal components.

The CNC system is controlled by Arduino and all the parcel installed, for its optimal operation is open source, which gives it a friendly character to any user allowing to modify or implement any necessary component for different projects, this also allowed to reduce expenses and achieved a final product that met the needs of this research work. For the manufacture of the internal components of the fuel cell were found the ideal cutting parameters such as: speed, laser power, steps and external conditions necessary for each material, thus achieving clean and precise cuts on Mylar, Carbon cloth, Elastomer SILASTIC® J and PTFE Gore-TX®.

For the design of the punch, the Simulations complement of SolidWorks was used, with which the pertinent studies were carried out that endorse its use within the thermo-pressing system.

## INTRODUCCIÓN

Debido al gran incremento de los gases de efecto invernadero, así como la actual demanda energética, el uso de nuevas tecnologías de generación eléctrica que sean amigables con el ambiente son imprescindibles. Actualmente las principales fuentes renovables de energía eléctrica son la eólica, solar, hidráulica y geotérmica. Sin embargo, su utilización es un tanto complicada debido a su fluctuación e intermitencia, implicando contar con un sistema de almacenamiento de energía donde el candidato más potencial es el hidrógeno [1].

La principal ventaja del hidrógeno como portador energético es la diversidad de su producción mediante fuentes primarias de energía, aunque actualmente su producción se basa en fuentes no renovables como: petróleo, gas natural y carbón; es posible y resulta preferible producir el hidrógeno a base de fuentes renovables [2]. En este contexto la idea principal es utilizar los superávits de energía para producir hidrógeno mediante el proceso conocido como electrólisis. El hidrógeno que es producido, posteriormente se almacena y cuando sea necesario puede ser convertido nuevamente en electricidad mediante el uso de celdas de combustible (*Fuel Cell*, FC).

Existe una gran variedad de FC dependiendo de su aplicación y de los materiales en su construcción, sin embargo, las celdas de combustible de membrana de intercambio protónico (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*, PEMFC) son las más prometedoras para el futuro de la generación eléctrica debido a su gran eficiencia y densidad energética [3]. La principal característica de este tipo de celdas es el ensamble membrana-electrodo (*Membrane Electrode Assembly*, MEA) donde el proceso electroquímico ocurre, en otras palabras, la MEA es el corazón de la PEMFC.

Conociendo la importancia de cada uno de los componentes que integran la celda es posible mejorar el rendimiento de la PEMFC, el caso particular de este proyecto se orienta en la investigación sobre el desarrollo de la MEA. A través de la optimización de su estructura se pueden reducir los sobrepotenciales en la FC en las tres zonas de pérdidas. Una de las mejores formas de lograrlo es mediante el proceso de termo-prensado cuya técnica ha sido la más usada en su fabricación [3]. Durante el proceso de ensamble por termo-prensado, tres parámetros deben ser bien considerados; la presión, el tiempo de prensado y la temperatura, cuidando estos valores se logra obtener una MEA que cumpla con las condiciones deseables.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Simular control térmico y diseñar e implementar sistema de corte láser mediante el posicionamiento con control numérico computarizado acoplado al sistema de manufactura de electrodos porosos.

### Objetivos específicos

- ❖ Diseñar e implementar sistema de corte láser mediante control numérico computarizado.
- ❖ Optimización de sistema de corte láser; velocidades de recorrido, altura e intensidad del láser.
- ❖ Cortar materiales específicos que constituyen la celda de combustible, Mylar, papel carbón, elastómero SILASTIC® J y el PTFE GORE-TX®.
- ❖ Diseño y simulación de esfuerzos mecánicos del punzón (control térmico).



# CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

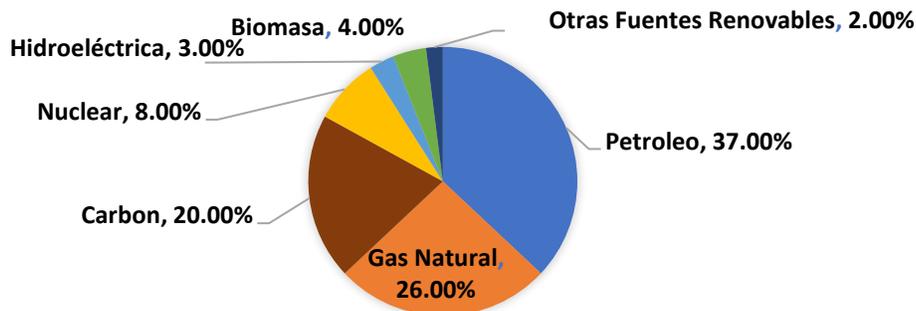
Este capítulo describe de manera detallada uno de los problemas más grandes que acontecen hoy día y el cuál es motivo de este trabajo de tesis, el consumo de energía eléctrica y su producción. Se abarca desde un panorama global y finaliza con una revisión regional, concretamente la Península de Yucatán, se hace énfasis en los métodos de producción de energía eléctrica a base de fuentes renovables, las consecuencias que se tienen actualmente por el uso de los combustibles fósiles, las soluciones gubernamentales propuestas a nivel mundial incluyendo las implementadas por el gobierno mexicano y como dar un salto hacia un futuro energético usando al hidrógeno como combustible.

## 1.1 Las energías renovables

### 1.1.1 Un panorama mundial

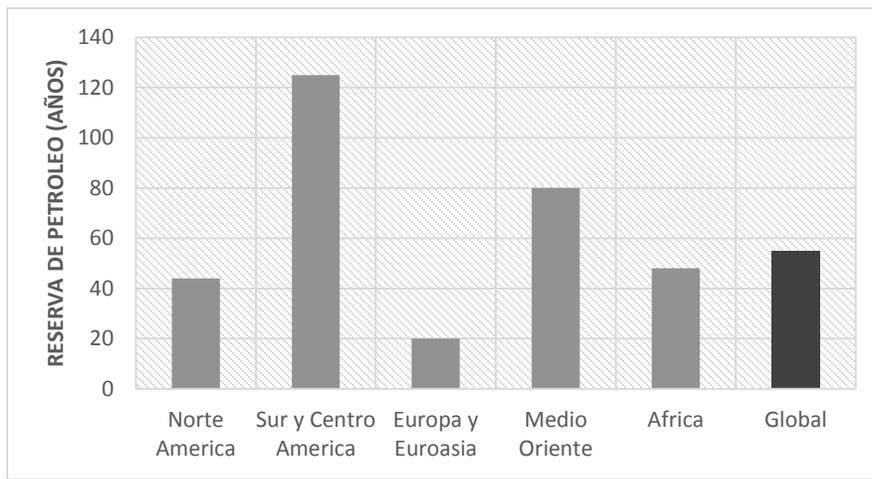
El uso de la energía es el motor del desarrollo económico y social del mundo, el suministro continuo de todas las formas de energía es de vital importancia para cada nación. Sin embargo, su uso excesivo no solo amenaza este desarrollo, sino que también afecta al medio ambiente y la salud humana [4, 5].

De acuerdo con el informe del 2014 de la Administración de Información Energética de EUA, el consumo de energía global como se muestra en la figura 1.1, se estima en 600 Quads (471.8 EJ ó 12,928.4 Mtoe), basado principalmente en petróleo (37%) y todos los combustibles fósiles, suministrando en total 83% de toda la energía. La región con más consumo fue la de Asia y el Pacífico (aproximadamente 35% del consumo global de energía) donde los países más importantes son China, Japón, India y Corea del Sur [4, 6, 7].



*Figura 1.1 Múltiples fuentes de energía en todo el mundo, gráfica adaptada de [6].*

El consumo mundial de energía ha aumentado un 18% entre el 2005 y el 2014 y se espera que aumente un 17% más para el 2035 [4]. Los países con mayor demanda de energía tienen altas emisiones de gases de efecto invernadero, además, los indicadores de desarrollo social y económico están directamente relacionados con altos niveles de consumo de energía per cápita. Por lo tanto, la sociedad moderna se caracteriza por una dependencia cada vez mayor del consumo de energía [8]. Aunado a esto, la creciente demanda de energía provoca más contaminación y se requiere un aumento en la eficiencia energética. Asimismo, se sabe que las reservas de los combustibles fósiles son limitadas, como se observa en las tendencias de la figura 1.2, las reservas globales de petróleo estimadas en 2015 son de 54.2 años y su uso a gran escala está asociado al deterioro ambiental [7], por este motivo es que la consideración de los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) como fuente de energía a largo plazo se está volviendo difícil de justificar.



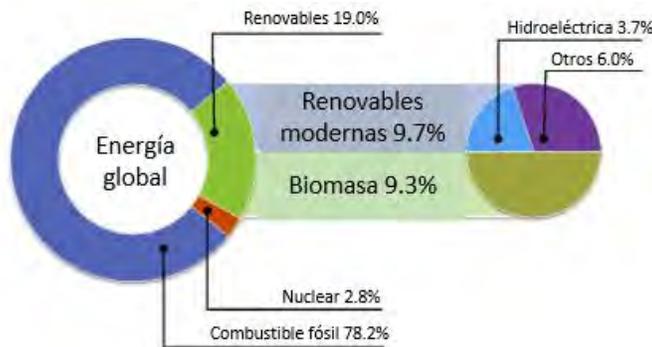
*Figura 1.2 Reservas de petróleo comprobadas en todo el mundo, gráfica adaptada de [7].*

Actualmente, ya se está presenciando serias consecuencias del calentamiento global. Como es la lluvia ácida, el adelgazamiento de la capa de ozono en la estratosfera y el cambio climático global, de esta última se atribuyen las emisiones del efecto invernadero, dióxido de carbono y óxidos nitrosos [6, 7]. Los impactos ambientales, la vulnerabilidad energética y el agotamiento de los combustibles fósiles se convierten en importantes problemas en la ciencia y la política mundial, esto llevó a muchos gobiernos a promover la necesidad de reemplazar los combustibles fósiles por fuentes alternativas de energía, no contaminantes y renovables.

En diciembre del 2015 los gobiernos nacionales de los países desarrollados y en desarrollo acordaron por consenso en la 21ª Conferencia de las Partes (COP21) celebrada en París, limitar el aumento de la temperatura superficial media mundial por debajo de los 2 °C.

Este objetivo requiere que los países involucrados reduzcan sustancialmente sus emisiones de gases de efecto invernadero en las próximas décadas. Se espera que para el 2020 exista una reducción significativa de las emisiones de carbono particularmente en el sector energético [9]. Esto implica invertir en investigación y desarrollo, así como mecanismos para fomentar el despliegue de las energías renovables.

Las fuentes de energías renovables pueden definirse como recursos sostenibles disponibles a largo plazo a un costo razonable que puede usarse sin efectos negativos. Estas incluyen biomasa, energía hidroeléctrica, energía geotérmica, solar, eólica y marina. Para el 2016 suministraron, como se muestra en la figura 1.3, alrededor del 19% de toda la demanda energética global: 9.7% derivó de fuentes renovables, incluyendo la energía hidroeléctrica, eólica, solar, geotérmica y biocombustible; 9.3% provino de la biomasa tradicional. Mientras que la energía hidroeléctrica suministró alrededor del 3.7% de la demanda final global. El resto de las energías renovables modernas proporcionaron aproximadamente el 6.0% [7].



*Figura 1.3 Participación de las energías renovables en la demanda energética global, gráfica adaptada de [7].*

### 1.1.2 Las energías renovables en México

América Latina y México cuentan con un gran potencial para el uso de las energías renovables entre las que se destacan la energía solar, eólica, biomasa, hidroeléctrica y la geotérmica. Sin embargo, como se observa en la figura 1.4, en México, las principales fuentes de energía se centran en los combustibles fósiles, siendo el gas natural el principal portador energético, mientras que las fuentes renovables solo aportan el 3% de la demanda energética del país, asociado a esto, existe un crecimiento anual del 3.4% en la demanda energética. Por tal motivo el gobierno mexicano pretende ratificar el compromiso presentado en la COP21 para reducir sus gases de efecto invernadero en un 50% para el año 2050, generando 35% de

la electricidad mediante el uso de fuentes renovables para el año 2025. Para lograr estos objetivos se necesitarán cambios sociales, así como una gran cantidad de planificación de políticas energéticas y climáticas [4, 9].

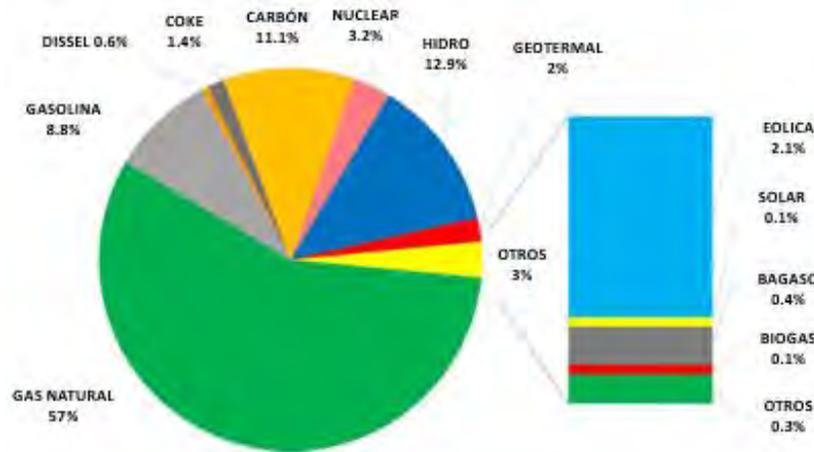


Figura 1.4 Fuentes de generación eléctrica en México, gráfica adaptada de [4].

El gobierno mexicano ha trabajado arduamente desde el 2012 para promover el desarrollo, investigación, inversión y divulgación del uso de las energías renovables comenzando con la Ley General del Cambio Climático en el 2012 y más recientemente en el 2015 con la Reforma Energética Constitucional y la Ley de Transición Energética [9].

Abarcando un área total de 1,972,550 km<sup>2</sup> México no solo ocupa el 13° lugar como uno de los países más grandes del mundo, al igual su privilegiada posición en el globo lo dota de increíbles recursos renovables para la generación de energía eléctrica, a continuación, se describirán las fuentes renovables de energía en México.

### Energía solar

México se encuentra entre los cinco países más atractivos para la inversión en energía fotovoltaica, solo detrás de China y Singapur. Esto es debido a que el país se encuentra dentro de los valores más altos de irradiancia del llamado cinturón solar (*solar belt*) cuyos valores exceden los 5.35 kWh/m<sup>2</sup> al día, figura 1.5.

En México, 62 GWh/año fueron generados usando energía solar fotovoltaica (del 1° de julio del 2014 al 30 de junio del 2015), de los cuales únicamente 13 GWh/año fue producido por la CFE, mientras que el restante 49 GWh/año fue producido por empresas particulares [4, 7].

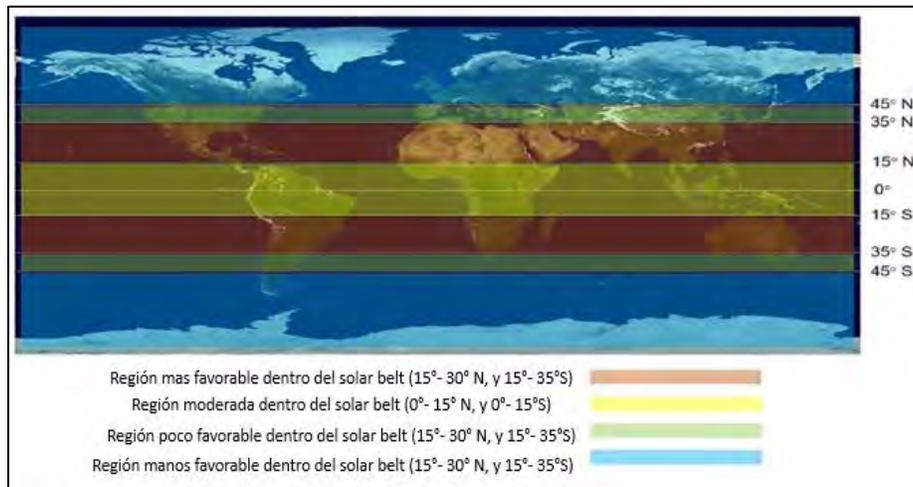


Figura 1.5 Distribución global de irradiación dentro del solar belt, figura obtenida de [4].

En México el potencial de energía solar se acumula enormemente en la parte noroeste del país. En el estado de Baja California Sur se concentra el 61% de la capacidad solar instalada, como se muestra en la figura 1.6 y en la tabla 1, los seis estados productores de energía solar más importantes tienen niveles de irradiación que exceden los 6 kWh/m<sup>2</sup> al día, especialmente en la península de Baja California y Sonora [4, 7].

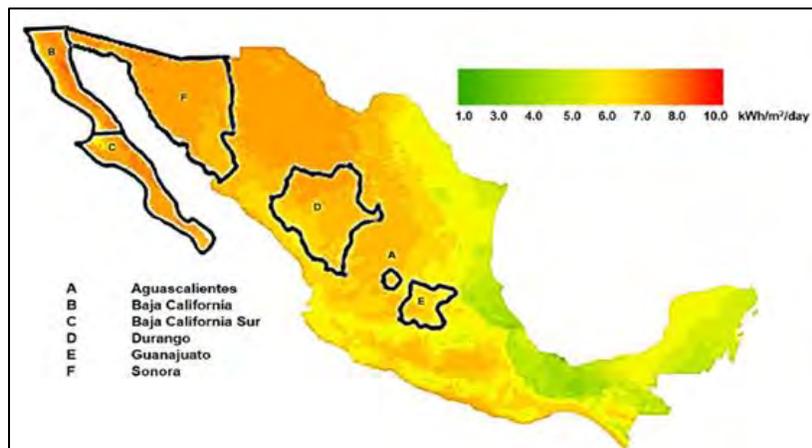


Figura 1.6 Irradiación solar en México, figura obtenida de [4].

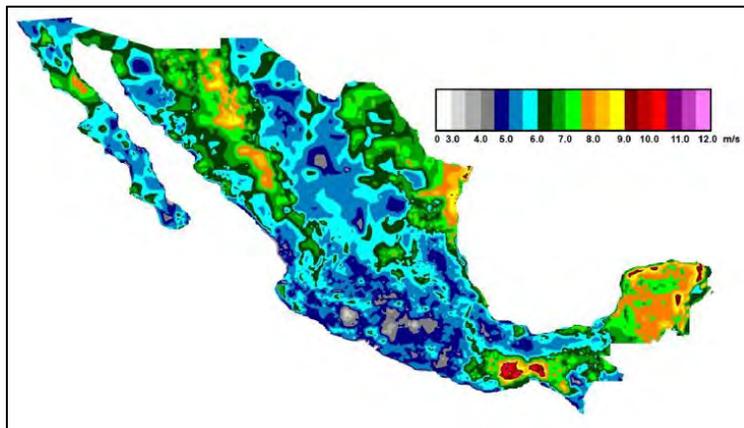
En la tabla 1 se puede apreciar los seis estados que más energía eléctrica producen mediante sistemas fotovoltaicos, así como su uso, la producción anual por estado y el total de la producción de los seis estados.

*Tabla 1 Localización, capacidad instalada y generación de plantas fotovoltaicas en México, tabla adaptada de [4]*

Estado	Nombre	Tipo de producción	Capacidad Instalada (MW)	Generación (GWh/año)
<b>Aguascalientes</b>	Autoabastecimiento renovable S.A. de C.V.	Privado	1	1.66
<b>Baja California</b>	Cerro Prieto	CFE	5	10.83
	Plamex S.A. de C.V.	Privado	1.11	1.76
<b>Baja California Sur</b>	Santa Rosalia	CFE	1	2.07
	Servicios Comerciales de Energía S.A. de C.V.	Privado	38.75	30.43
<b>Durango</b>	Tai Durango Uno S.A.P.I. de C.V.	Privado	16.8	14.58
<b>Guanajuato</b>	Generadora solar Apasco S.A.P.I. de C.V.	Privado	1	1.66
<b>Sonora</b>	Coopel S.A. de C.V.	Privado	1	1.66
<b>Total</b>			65.66	64.65

### *Energía eólica*

En México un total de 7,676 GWh/ año es generado por aerogeneradores, de los cuales 220 GWh/año (3.3%) es producido por la CFE y 7,455 GWh/año (96.7%) es generado por agencias privadas. La velocidad del viento en México es favorable en casi todo el territorio, con rangos de velocidad que varían entre 3 a 10 m/s a 120 m de altitud como se observa en la figura 1.7. De acuerdo con el Inventario Nacional de Energías Renovables (INERE) en México existe un potencial eólico de 40 GW distribuidos entre la península de Baja California, la región central, las costas del Golfo, la Península de Yucatán y el Istmo de Tehuantepec [4].



*Figura 1.7 Velocidades del viento a 120 m de altitud, figura obtenida de [4].*

### *Biomasa, energía geotérmica e hidráulica*

- En México existen 68 proyectos de generación de energía mediante la biomasa con una capacidad instalada de 647.16 MW, y una generación anual de 1,414 GWh/año. Toda la generación es producida por agencias privadas. Hay plantas de generación eléctrica por biomasa en 21 de los 32 estados de la república mexicana, del cual Piasa Cogeneración en el estado de Veracruz es el más importante.
- En el 2015 México se posiciono en 4° lugar a nivel mundial en generación eléctrica a base de la energía geotérmica, proveyendo una capacidad de 858.4 MW y generando 6,026.93 GWh/año. Existen ocho reservas geotérmicas un ejemplo de ellas es Cerro Prieto II en el estado de Baja California, haciendo un total de 41 turbinas en operación que funcionan a base de vapor de las cuales la CFE maneja 38 de las turbinas y las agencias privadas solo manejan 3.
- La energía hidroeléctrica es la fuente renovable que más contribuyó al país en la generación eléctrica, generando 36,991.42 GWh/año. La mayor generación está concentrada en Chiapas, produciendo el 42% de la energía hidroeléctrica del país siguiéndoles el estado de Veracruz con 13% y Oaxaca con el 10% [4].

#### 1.1.3 Energías renovables en la Península de Yucatán

Después de revisar en la sección anterior las fuentes renovables en México, se puede concluir que no es posible utilizar cada una de ellas en una sola área, esto debido a numerosos factores como son la geografía, las áreas naturales protegidas, la sensibilidad del medioambiente, la cultura, la historia y las limitaciones en el uso de la tierra. Se debe escoger cuidadosamente el tipo de energía renovable que se utilizará, tomando en cuenta todos los factores que pudieran impactar negativamente al proyecto o aquellos que puedan generar un mayor daño ambiental. Por lo tanto, muchos autores solo consideran a la energía solar, eólica y a la biomasa como fuentes renovables accesibles en la Península de Yucatán. La Península de Yucatán se encuentra localizada al sureste de México, abarcando una superficie total de 139,897.47 km<sup>2</sup>. La población se estima en 4,103,596 habitantes localizados 20% en Campeche, 32% en Quintana Roo y 48% en Yucatán. A continuación, se describirán los potenciales energéticos para cada una de las tres fuentes de energía renovables (eólica, solar y biomasa) que muchos autores consideran las más prometedoras en esta región.

a) Energía solar

La Península de Yucatán como se observa en la figura 1.6 se sitúa como la segunda región del país con la mayor incidencia de irradiación solar. Se han realizado estudios sobre la irradiancia los cuales muestran picos de hasta  $1000 \text{ W/m}^2$  así como 12 h de irradiancia por encima de los  $600 \text{ W/m}^2$  lo que indica que el recurso solar en la Península puede ser explotado. De manera más específica la figura 1.8, muestra el mapa global de irradiancia solar de la Península de Yucatán, donde podemos observar que la región Norte y Oeste se presentan los mayores índices de insolación solar, valores que superan los  $5.6 \text{ kWh/m}^2$  al día, mientras que la zona Este y Centro la insolación se encuentre dentro los  $4.62 \text{ kWh/m}^2$  y los  $5.48 \text{ kWh/m}^2$  al día [10].

Actualmente en la Península se cuenta con tres proyectos a futuro de plantas operacionales con capacidad industrial las cuales son [11]: a) Eje Verde Fotovoltaico Sustentable, la cual se ubicará en el municipio de Bacalar, Quintana Roo con una capacidad de 30 MW, b) Riviera Maya Fotovoltaica, la cual se encontrará en el municipio de Othon P. Blanco, Quintana Roo y contará con una potencia instalada de 30 MW y c) Photoemeris Sustentable, la planta será ubicada en el municipio de Peto, Yucatán la cual de igual forma contara con 30 MW de capacidad.

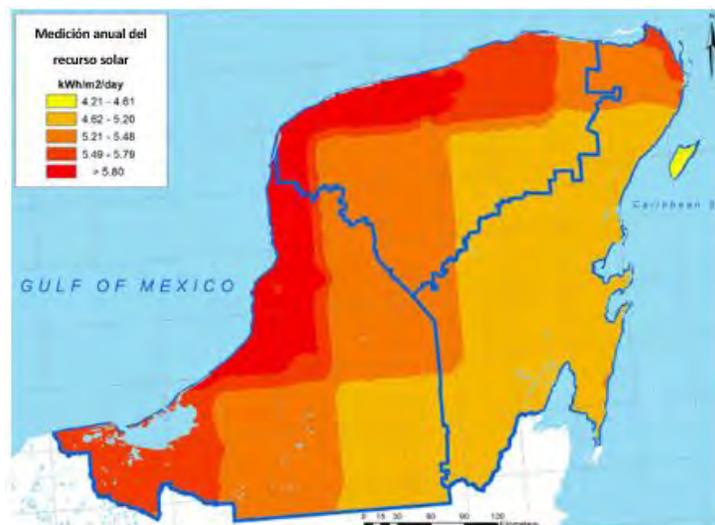


Figura 1.8 Radiación solar anual en la Península de Yucatán, figura obtenida de [10].



## b) Energía eólica

Como puede observarse en el **Anexo 1**, el único estado que dispone de generación eólica en la Península es Quintana Roo, específicamente en el municipio de Benito Juárez, sin embargo, es una pequeña producción a comparación del potencial que puede lograr a obtener. La figura 1.7 muestra que la velocidad del viento en la Península de Yucatán a 120 m de altitud varía entre 6 a 9 m/s especialmente en la región Noreste. Es importante mencionar, que en las ciudades de Cozumel y Cancún existe un potencial de 100 MW el cual de explotarse generaría 175 GWh/año [12, 13].

En el caso de la biomasa, el estado de Quintana Roo (**Anexo 2**) es el único que produce energía eléctrica en toda la Península, sin embargo, tanto como Campeche y Yucatán tienen un alto potencial que aún no ha sido explotado [4].

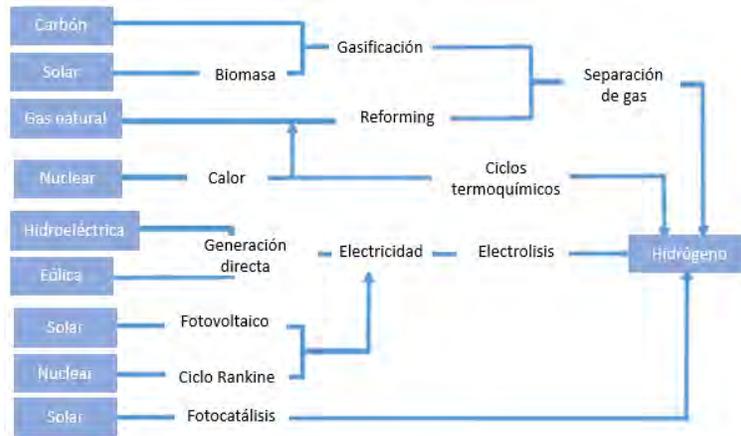
A pesar de que se ha mencionado el gran potencial energético a base de fuentes renovables en la Península de Yucatán, es necesario puntualizar que su utilización y confiabilidad aún representa un gran obstáculo debido a su fluctuación e intermitencia por lo que métodos para el almacenamiento de esta energía son imprescindibles. En este contexto se pretende utilizar los superávits de energía y almacenarlos en forma de hidrógeno y cuando sea necesario convertirlo en electricidad con el uso de las FCs [3].

## 1.2 Hidrógeno como combustible

Diferentes autores reportan que el hidrógeno es un componente clave para desarrollar un sistema energético sostenible [3, 5, 8]. El uso del hidrógeno como vector energético se debe a su gran versatilidad en nuevas aplicaciones, su gran valor calorífico, su gran eficiencia, el hecho de que puede ser usado como un combustible limpio y debido a que es el elemento más abundante en el planeta [5].

En México el hidrógeno se ha convertido en uno de los combustibles alternativos más prometedores, esto en vista de descentralizar a la producción energética a base de petróleo, sin embargo, no es posible encontrarlo en la naturaleza en su forma elemental por lo que debe ser extraído de cualquier materia prima que contenga al átomo de hidrógeno en su composición. En la actualidad, existen diferentes métodos para producir hidrógeno y se caracterizan por la fuente de la que proviene. Entre las fuentes principales de producción se encuentran los combustibles fósiles (gas natural y carbón), así como las fuentes renovables como biomasa, solar, eólica, hidroeléctrica y nuclear. La figura 1.9 muestra las

fuentes principales, así como la tecnología empleada para la producción del hidrógeno [5].



*Figura 1.9 Técnicas empleadas para la producción de hidrógeno, diagrama adaptado de [5].*

En el 2014 se presentó ante el senado mexicano una ley general que apuntaba a la utilización del hidrógeno. Este proyecto propone adoptar un plan nacional de hidrógeno con el objetivo de impulsar el desarrollo tecnológico de la energía con el hidrógeno como portador energético. Actualmente en México la investigación relacionada a las tecnologías del hidrógeno es muy activa, específicamente las contribuciones más importantes se centran en el campo de la producción.

A. López Ortiz et al [5] menciona que las principales actividades relacionadas a la producción del hidrógeno en México se puede resumir en seis campos: producción de hidrógeno a base de procesos biológicos (biorreactores, fermentación de una gran variedad de materia orgánica, bacterias y microorganismos, mecanismos fotosintéticos y electrolisis microbiana), procesos de hidrocarburos (catálisis, descomposición de hidrocarburos, vapor reformado con CO<sub>2</sub> capturado, H<sub>2</sub>S reformado, desplazamiento del gas de agua y oxidaciones parciales mediante metales), fotocatálisis, electrolisis, estudios teóricos y sistemas de control.

El hidrógeno presenta una gran oportunidad para dar paso a un sistema energético sostenible que ayude al medioambiente y aporte a la sociedad las oportunidades necesarias para transitar a una cultura energética sustentable, debido a que los combustibles fósiles están agotándose y su utilización afecta directamente al calentamiento global. Sin embargo, el hidrógeno es un combustible como la gasolina o el diésel y se necesita de un dispositivo que convierta al hidrógeno en electricidad, la celda de combustible es el elemento faltante en este sistema energético renovable.

## CAPÍTULO 2. LA CELDA DE COMBUSTIBLE

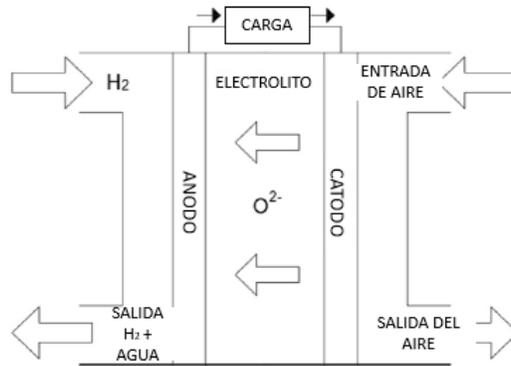
En este capítulo se aborda todo lo relacionado a las celdas de combustible, específicamente a la Celda de Combustible de Membrana de Intercambio Protónico (*PEMFC*, por sus siglas en inglés) desde los conceptos, materiales para su construcción, diagramas esquemáticos, métodos de manufactura, tipos de celdas existentes y aplicaciones. Esto con el fin de iniciar con la meta primordial de este trabajo de investigación el cuál es la construcción de un sistema automatizado para la manufactura de electrodos porosos.

### 2.1 Fundamentos

El descubrimiento del principio de funcionamiento de las celdas de combustible es atribuido al científico inglés Sir William Grove que en 1839 documentó que era posible generar energía eléctrica mediante la reacción de los gases del hidrógeno y el oxígeno [14].

Son dispositivos electroquímicos que convierten la energía química de los reactantes en electricidad (con alta eficiencia) y calor. Específicamente, una FC es un dispositivo de conversión energética para la generación de energía. A diferencia de los múltiples pasos en la generación eléctrica mediante la combustión de combustibles fósiles, la producción de electricidad dentro de una FC es directa y completamente electroquímica [15, 16]. Su estructura básica como se muestra en la figura 2.1, consiste en tres elementos; dos electrodos (ánodo y cátodo) y un electrolito. La electricidad es producida desde el ánodo hacia el cátodo, en el ánodo se produce la reacción de la oxidación del combustible, generando electrones y protones. Los protones formados se difunden hacia el cátodo a través del electrolito, mientras que los electrones siguen un circuito externo. En el cátodo, tiene lugar la reacción de reducción del oxígeno gracias a la combinación entre este y los reactantes procedentes del ánodo. Por último, el electrolito es el medio de transporte de los protones de un electrodo al otro y sirve de separador entre los reactivos anódicos y catódicos [17].

Las FCs pueden utilizar diferentes tipos de combustibles para generar energía cómo, por ejemplo: hidrógeno, metanol, etanol, entre otros. De acuerdo con los materiales usados para la fabricación del electrolito, existen diferentes tipos de celdas de combustible. En este proyecto de investigación el campo de estudio son las PEMFCs.



*Figura 2.1 Esquema del principio de funcionamiento de una FC, figura adaptada de [16].*

De manera más específica se puede clasificar las aplicaciones de las celdas de combustible según su rango de temperatura, esto es debido a numerosos factores incluidos; su calor utilizable, su tiempo de reacción y su facilidad de cambiar su potencia de salida [18]. En la tabla 2 se enlistan diferentes FC y sus aplicaciones dependiendo de su temperatura.

*Tabla 2 Principales tipos de celdas de combustible y sus aplicaciones dependiendo de su temperatura de operación.*

Tipo de celda de combustible	Electrolito	Temperatura de operación (°C)	Aplicaciones
<b>Membrana de Intercambio Protónico (PEMFC)</b>	Polímero Sólido ( $H^+$ )	60 – 80	Sistemas automovilísticos, aplicaciones electrónicas portátiles (reemplazando a las baterías recargables)
<b>Alcalina (AFC)</b>	Solución Acuosa ( $OH^-$ )	65 – 220	Espaciales y generación estacionaria de energía
<b>Alcohol Directo (DAFC)</b>	Polímero Sólido ( $H^+$ )	150 – 200	Sistemas estacionarios de mediana y alta potencia
<b>Ácido Fosfórico (PAFC)</b>	Ácido Fosfórico ( $H^+$ )	205	Estaciones fijas de 200 kW
<b>Carbonato Fundido (MCFC)</b>	Solución de Na, Li y K ( $CO_3^{2-}$ )	600 – 700	Estaciones fijas con potencias en MW
<b>Óxido Sólido (SOFC)</b>	Óxidos refractarios ( $O_2^-$ )	1000	Sistemas eléctricos con capacidades de MW

Al existir diferentes tipos de FC, sus rangos de operación y aplicaciones varían considerablemente, sus aplicaciones se clasifican en tres grandes categorías [15]:

- *Sistemas energéticos estacionarios:* estos se dividen en dos grupos; a) grandes plantas estacionarias de energía (generando energía desde los 300 kW hasta los 20 MW) y b) pequeñas y medianas plantas estacionarias de energía (generando energía desde unos cuantos Watts hasta los 10 kW para las plantas pequeñas, y desde los 10 kW hasta los 300 kW para las plantas medianas).
- *Aplicaciones portátiles:* esta categoría se enfoca en dos grandes mercados; a) generadores de energía portables para uso personal en exteriores y usos de emergencia (campamentos, alpinismo, etc.) y b) uso en aparatos electrónicos (dispositivos móviles).
- *Sistemas de transporte:* se busca invertir en tecnología que ofrezcan reducir significativamente las emisiones dañinas de gases y mejorar la eficiencia de la conversión de energía.

A pesar de que las FC tienen un alto rango de aplicaciones y pueden llegar a ser utilizadas para generar potencias tan grandes del orden de los MW, típicamente una monocelda entrega voltajes muy pequeños y corrientes muy elevadas. Los rangos de operación de una monocelda en general son de 0.4 a 0.9 V y de 0.5 a 1 mA/cm<sup>2</sup> respectivamente [15]. Por este motivo para generar potencias grandes las monoceldas deben de ser apiladas entre ellas, como se muestra en la figura 2.2; a esta configuración se le denomina “*stack*” de celdas. Dependiendo de la potencia de salida y la aplicación, las celdas de combustible pueden variar su tamaño y forma [14].

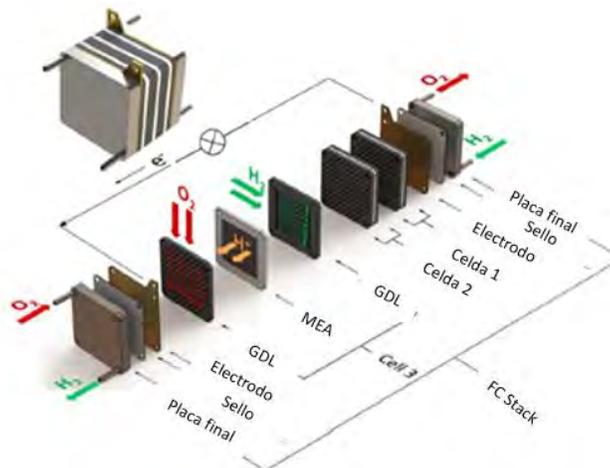
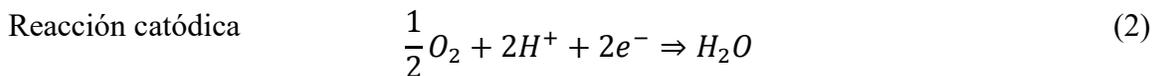


Figura 2.2 Esquema de los componentes de un Stack de FC, figura adaptada de [14].

## 2.2 Celda de combustible de membrana de intercambio protónico

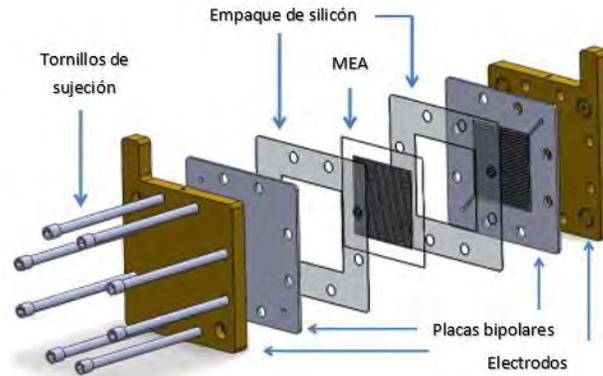
En la PEMFC ocurre la conversión de la energía de una reacción química, directa y continuamente, en energía eléctrica. El principio de funcionamiento de una PEMFC inicia con el suministro de los gases, hidrógeno gaseoso es suministrado como combustible en la parte anódica y oxígeno como oxidante en la parte catódica. En la parte anódica el hidrógeno se distribuye a través de un medio de difusión poroso denominado ensamble membrana-electrodo (MEA); el cual a su vez está compuesto por una capa catalítica, una membrana de intercambio protónico (electrolito sólido polimérico) y una capa difusora de gases. Después, en la superficie del catalizador las moléculas de hidrógeno son adsorbidas y disociadas, los electrones por su parte viajan a través de un circuito externo generando corriente eléctrica, mientras que los protones se mueven dentro de la membrana electrolítica hasta el cátodo combinándose con el oxígeno, teniendo como resultado la formación de agua y la generación de calor [19, 20]. Las reacciones electroquímicas que se producen dentro de una PEMFC son las siguientes:



En la figura 2.3 se muestra un esquema elemental del funcionamiento de una PEMFC, en las siguientes secciones se describirán cada uno sus componentes los cuales son considerados fundamentales para el diseño y buen desempeño del sistema.

Las PEMFC (como se menciona en la sección anterior) son por mucho el tipo de celdas de combustible más adecuadas para diversas aplicaciones debido a su rango de temperatura de funcionamiento (entre 20°C y 100°C) y porque cuenta con uno de los tiempos de respuesta más rápido en comparación con otros tipos de FC [14].

Entre sus muchas aplicaciones se encuentran desde estaciones de potencia hasta dispositivos portátiles, ya que dichas celdas de combustible están disponibles en un amplio rango de potencias. A demás las PEMFC son consideradas las más prometedoras para reemplazar a los motores de combustión interna en vehículos de transporte [20].



*Figura 2.3* Diseño esquemático de una PEMFC, figura adaptada de [21].

En la tabla 3 se enlistan sus principales materiales y características.

*Tabla 3* Características fundamentales de las PEMFCs [20].

Características	Celda de combustible PEM
<b>Electrolito</b>	Electrolito solido polimérico
<b>Electrodo</b>	Carbón (tela o papel)
<b>Catalizador</b>	Platino
<b>Conexiones eléctricas externas</b>	Carbón o metal
<b>Temperaturas de operación</b>	20-100 °C
<b>Carga protónica</b>	H <sup>+</sup>
<b>Potencial teórico</b>	1.23 V
<b>Combustible</b>	Hidrógeno
<b>Oxidante</b>	Oxígeno o Aire
<b>Aplicaciones</b>	Portátiles y estacionarias
<b>Capacidad</b>	3 kW – 250 kW
<b>Eficiencia</b>	<60%

## 2.3 Componentes de una celda de combustible

### 2.3.1 Electroodos

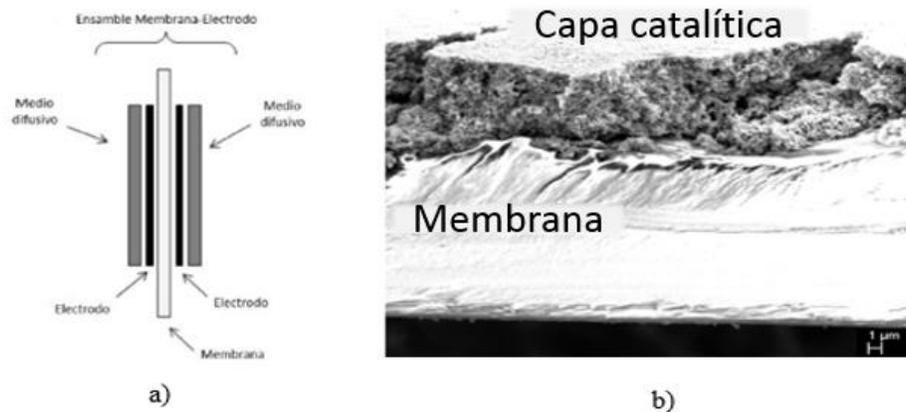
Dentro de los electroodos el transporte de diferentes especies como gases, líquido, iones y electrones debe realizarse de la manera más fácil posible. Se le denomina electrodo a la unión de la capa difusora de gases con la capa catalítica, la combinación de estos dos componentes le otorga al electrodo de las propiedades necesarias para su correcto funcionamiento dentro de la PEMFC. Los electroodos deben ser porosos, iónica y electrónicamente conductivos, electroquímicamente activos y poseer una gran área superficial. Así mismo, es deseable que los electroodos sean compatibles química y termo-mecánicamente con el electrolito, ser químicamente estables bajo condiciones de reducción (ánodo) y oxidación (cátodo), resistentes a envenenamiento por impurezas en el combustible y poseer una gran estabilidad mecánica bajo largos periodos de operación. Parte de la optimización en el diseño de los electroodos consiste en conseguir la correcta distribución de la cantidad de volumen de gases en la capa catalítica entre las tres fases, para reducir las pérdidas de transporte de masa [15].

### 2.3.2 Ensamble membrana-electrodo

El ensamble membrana-electrodo (MEA) es considerado el corazón de las PEMFCs. Esta consiste, como se muestra en la figura 2.4, en una membrana de intercambio protónico ensamblada entre dos capas catalíticas y dos difusores (una del lado del cátodo y otra del lado del ánodo). Es aquí donde se dan lugar las reacciones de oxidación y reducción, la estructura y composición de la MEA es de vital importancia en orden de minimizar cualquier forma de sobre potencial, maximizar la eficiencia en la densidad energética, minimizar el uso de metales nobles y reducir los costos por kW de la celda de combustible [2, 15].

A continuación, se describirán cada una de las partes que conforman a la MEA, sus materiales, funcionamiento y como afectan en el desempeño electroquímico de la celda de combustible.





*Figura 2.4 a) configuración ideal de una MEA, b) corte transversal de una MEA real [15, 22].*

### *Capa difusora de gases*

La capa difusora de gases es un medio poroso que juega un papel importante en el desempeño del funcionamiento de la MEA, entre sus muchas funciones se encuentran: asegurar el transporte efectivo de los reactantes en las capas catalíticas, sirve como un medio de transporte para los electrones en su viaje hacia el circuito externo, además ayuda a la correcta hidratación de la membrana removiendo el exceso de agua con el fin de evitar que se inunde la membrana impidiendo así el paso de los gases.

Los materiales más utilizados en la fabricación de la capa difusora de gases son, medios porosos de fibra de papel de carbón o tela de carbón con recubrimiento hidrofóbico generalmente politetrafluoretinelo (teflón) [20, 19, 15].

### *Capas catalíticas*

La capa catalítica es el lugar donde se lleva a cabo la reacción electroquímica, por lo que debe brindar las condiciones necesarias para obtener la máxima eficiencia de la reacción. La capa catalítica puede ser aplicada tanto en la membrana o en la capa difusora de gases, el objetivo es colocar las partículas de la tinta catalítica, generalmente de platino, con la mayor proximidad a la membrana de intercambio protónico. Como consecuencia de la baja temperatura de operación de la PEMFC se usa como catalizador nanopartículas de platino soportado sobre una base de carbón, sin embargo, aunque el platino sigue siendo el mejor

catalizador en las PEMFC se están desarrollando nuevas tecnologías en materiales para sustituirlo [15, 20]. Las propiedades óptimas de la capa catalítica se enumeran a continuación [20]:

- 1) Área máxima de interfase entre las fases formadas con el gas, conductor electrónico, conductor iónico y catalizador (interfase tri-fásica).
- 2) Transporte eficiente de protones.
- 3) Transporte fácil de los gases reactivos y productos
- 4) Fácil remoción del agua condensada.
- 5) Paso continuo de corriente eléctrica entre el sitio de reacción y el colector.

### *Membrana de intercambio protónico*

Tres diferentes funciones pueden ser identificadas para la membrana polimérica de la PEMFC las cuales son: transportar los protones a través de ella, separar los gases de reactantes y actuar como un aislante electrónico que evita a los electrones pasar por la membrana [15, 19].

Para lograr eficiencias altas en las aplicaciones de la celda de combustible, la membrana debe contar con las siguientes propiedades: una alta conductividad protónica para soportar grandes corrientes con mínimas pérdidas resistivas, cero conductividad electrónica, una fuerte estabilidad mecánica, química y electroquímica en ambientes químicamente difíciles, por sobre un rango de condiciones de operación y baja permeabilidad a los gases del combustible [15, 20].

Entre los electrolitos comerciales más usados para las PEMFC el Nafion®, patentado por Dupont es el que destaca por su composición química. El Nafion® es fabricado a base de politetrafluoretileno (teflón) lo que le brinda un carácter hidrofóbico, aunque también contiene grupos de ácido sulfónico que le brinda un carácter hidrofílico. Sin embargo, el Nafion® solo funciona en condiciones donde se encuentre altamente hidratado, su rango de operación se limita a temperaturas alrededor de 80 °C a presión atmosférica [15].

Como se ha visto en este apartado el Nafion® como membrana polimérica tiene muchas ventajas, pero por otro lado igual presenta muchas desventajas como se enlista en la tabla 4.

**Tabla 4** Ventajas y desventajas del uso del Nafion como membrana en la PEMFC [15].

Uso del Nafion como membrana polimérica	
Ventajas	Desventajas
Posee excelentes propiedades electroquímicas por debajo de los 80 °C	Sensible a los contaminantes
Es un buen conductor protónico en condiciones de buena hidratación	Permeable al metanol
Posee buenas propiedades químicas y mecánicas	Sufre de una baja conductividad iónica en condiciones de deshidratación
Larga vida útil	Baja conductividad iónica a altas temperaturas
Resistencia a ácidos y oxidantes	

## 2.4 Técnicas de fabricación de la MEA

La literatura indica que existen dos tipos de ensambles para la fabricación de la MEA y se diferencian con base en donde es depositada la tinta catalítica para formar al electrodo. Los ensambles donde la tinta es depositada directamente sobre la membrana se denominan CCM (por sus siglas en inglés: *Catalyst Coated Membrane*). Las MEAs producidas mediante el método CCM tienen varias ventajas, tales como, mayor rendimiento y durabilidad debido al mayor uso del catalizador y al mejor contacto interfacial entre la membrana y las capas del catalizador. Aquellos donde la tinta catalítica es depositada sobre la capa difusora de gases para formar al electrodo y luego es prensada sobre el polímero de la membrana es denominado CCS (por sus siglas en inglés: *Catalyst Coated Substrate*) [19, 22]. Existen numerosos métodos para realizar los ensambles como goteo, aerografía, electrospray, técnica de transferencia por calcomanía (DECAL), serigrafía, etc. Sin embargo, no todos proporcionan una distribución del catalizador altamente uniforme o se necesitan de condiciones y ambientes controlados para su utilización, haciéndolos no adecuados para la aplicación automatizada objetivo que se persigue en este trabajo de investigación. A continuación, se describen los métodos que han mostrado mejores resultados en las literaturas revisadas.

Uno de los mejores métodos es el electrospray, **Anexo 3**, el cual consiste en depositar la tinta catalítica sobre el sustrato mediante la electro pulverización, esta sale de una boquilla y mediante el campo magnético generado, el líquido es pulverizado en pequeñas y finas gotas sobre la superficie.

### 2.4.1 Método de transferencia por calcomanía

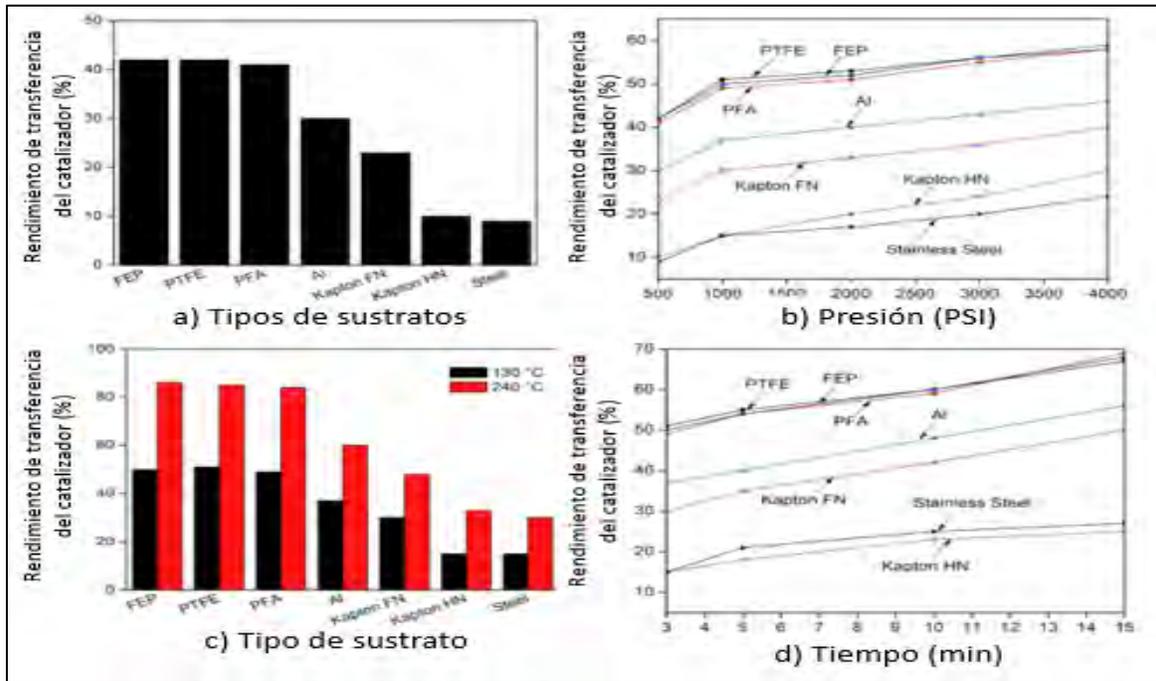
En la manufactura de ensambles tipo CCM, es posible introducir un paso intermedio, vertiendo el electrodo en una película de teflón como sustrato temporal para después con termo-prensado, adherirlo a la membrana y finalmente remover la película de teflón. Este proceso se conoce como método de transferencia por calcomanía (DTM, por sus siglas en inglés: *Decal Transfer Method*) [19, 22]. En la figura 2.5 se muestra esquemáticamente el proceso DTM.



*Figura 2.5 Diagrama esquemático del proceso de manufactura de una MEA por el método DTM [19].*

En el método convencional, la tinta del catalizador se deposita sobre el sustrato de teflón y es transferida hacia la membrana presando a altas temperaturas comúnmente entre los 210 – 250 °C [22]. Sin embargo, la membrana de Nafion no soporta temperaturas tan altas, por lo que técnicas intermedias para la transformación de los iones  $H^+$  en otra forma catódica son necesarias, elevando los costos de la producción masiva de la MEA debido a la complejidad de numerosos procesos en los múltiples pasos involucrados. Debido a esto, diversos estudios se han enfocado en reemplazar los sustratos y/o en reemplazar el método convencional por el método a bajas temperaturas.

Samaneh Shahgaldi et al [21] incorpora la técnica DTM a bajas temperaturas, utilizando siete materiales diferentes como sustratos: papel de aluminio (AF), acero inoxidable (Steel), etileno propileno fluorado (FEP), polímero perfluoroalcoxi (PFA), politetrafluoretileno (Teflón), Kapton HN y Kapton FN. Cada muestra es presada a diferentes presiones y tiempo de prensado. En la figura 2.6 se pueden observar los resultados obtenidos del estudio.



**Figura 2.6** a) rendimiento de la transferencia del catalizador (RTC) para los diferentes sustratos, b) RTC a diferentes presiones, c) comparación del RTC a diferentes temperaturas por los métodos de DTM y LTDM, d) RTC a diferentes tiempos de prensado [22].

Los resultados del estudio posicionan al FEP como el mejor sustrato para el DTM con las siguientes condiciones de prensado: temperatura igual a los 130°C, una presión de 1000 PSI y un tiempo de prensado de 3 min. Sin embargo, para lograr una transferencia del catalizador del 100% es necesaria una capa externa de Nafion adicional sobre la superficie de la capa del catalizador (después de que la capa del catalizador se hace sobre el sustrato y antes del termoprensado).

## 2.5 Variables de fabricación que afectan al ensamble

### 2.5.1 Presión

La literatura indica que la presión por sí sola no juega un papel importante en el desempeño de la celda, sino que es el trabajo de las tres variables (presión, tiempo de prensado y temperatura) lo que le proporciona a la MEA las cualidades necesarias para su correcto desempeño. Se obtienen buenos resultados a presiones altas y tiempos de prensado relativamente cortos.

En el caso de la presión, esta fuerza aplicada al ensamble dependerá de varios factores como son la resistencia mecánica de los materiales, de su porosidad y del grosor que se desea obtener en la MEA, si la fuerza de contacto entre los materiales alcanza un valor óptimo, proveerá un mejor contacto entre ellos y por consecuencia las pérdidas por resistencia en la MEA serán bajas. Por otra parte, si la fuerza de contacto es excesiva no solo provocará una deformación en el área superficial de los materiales, también, colapsará a los electrodos afectando a la difusión de los gases durante el funcionamiento de la celda, además que las partículas de platino pueden atravesar a la capa difusora de gases restando así contenido a la capa catalítica.

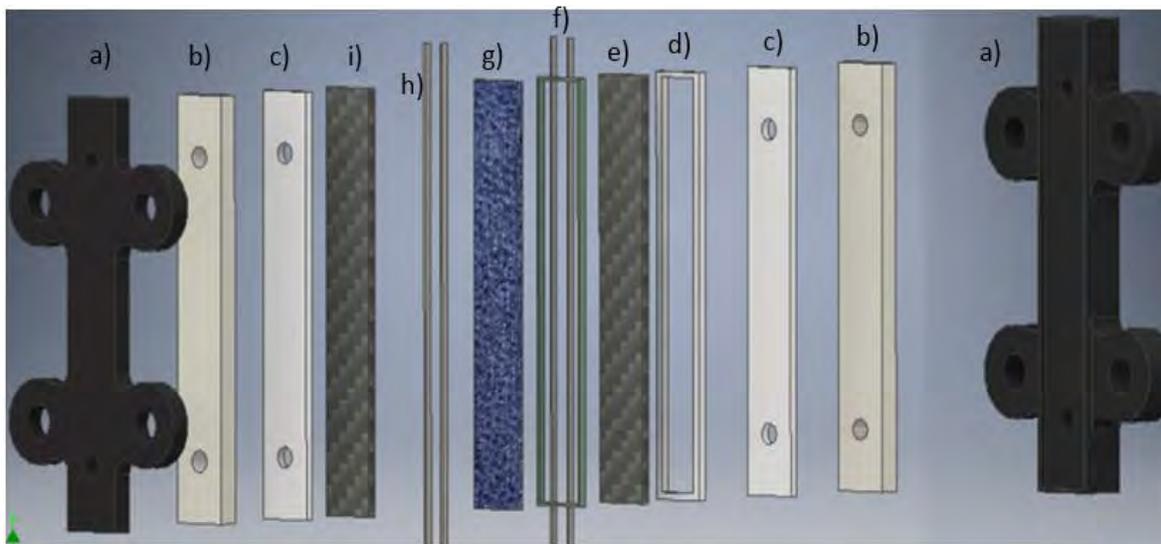
El tiempo de prensado es otra variable a considerar ya que este afecta el estado de deformación de los materiales, si el tiempo es muy corto, no se dará un correcto enlace y un tiempo de prensado largo provocará una deformación permanente. En la literatura se puede encontrar un extenso rango de tiempos de prensado, pero los mejores resultados obtenidos para la fabricación de la MEA esta entre 1 a 6 minutos.

### 2.5.2 Temperatura

Es necesario considerar que la temperatura de transición vítrea del Nafion® es de 125 °C lo que restringe el uso de temperaturas más altas, además a temperaturas elevadas el Nafion pierde su propiedad de retención de agua. Pero a temperaturas muy bajas el Nafion no podría unirse a los demás componentes y la MEA tendría una alta resistencia iónica. El rango de temperaturas ideal utilizado en la literatura es entre los 100 y los 130 °C.

## CAPÍTULO 3. FABRICACIÓN DE LA FC

Como se mencionó en el capítulo anterior, la celda de combustible consta de diferentes componentes que ensamblados entre si logran que el dispositivo funcione correctamente, aunque en la figura 2.3 se muestra un diagrama esquemático de los componentes que la conforman, estos pueden variar en el material, lo que provoca que se anexas o se remuevan ciertos componentes, logrando así diferentes composiciones estructurales. Para el análisis y fines de este estudio se toma en consideración la celda de combustible manufacturada en la Universidad de Quintana Roo.



*Figura 3.1* Diseño esquemático de la celda de combustible manufacturada en la UQROO.

En la figura 3.1, se describen las partes que conforman la celda de combustible que actualmente se está fabricando en la UQROO, donde: a) son las placas finales, elaboradas mediante una impresora 3D con el material PC-ABS, b) son placas de soporte (para darle más rigidez a la estructura) de acero inoxidable, c) son las placas bipolares elaborada con Mylar (además le dan soporte mecánico extra), d) es el canal de flujo elaborado igualmente de Mylar, e) es la capa difusora de gases del ánodo (tela de carbón impregnada con la tinta catalítica), f) es un sello de elastómero con cables de platino embebidos para incrementar el número de MEAs dentro de la celda, g) es la membrana de intercambio protónico, h) cables de platino para mediciones eléctricas, e i) es la capa difusora de gases del cátodo.

Esta celda de combustible es construida de manera artesanal, esto quiere decir que, excluyendo el modo de manufactura de las placas finales, no se emplea ningún método automatizado para su elaboración, provocando así que existan varias variables que no pueden controlarse en su totalidad, como lo son: corte, depósito del material, ensamblaje y errores humanos. Lo que conduce a que en muchas ocasiones no se obtenga el producto final deseado y los parámetros teóricos no concuerden con las pruebas experimentales.

Debido a lo anterior es necesario contar con un sistema automatizado que permita controlar las variables de diseño, corte y fabricación que puedan presentarse durante la manufactura de una FC.

Dando solución a una parte de esta problemática, en la tesis del ingeniero Luciano Belin [19], se propone un sistema de termo-prensado para la manufactura y el ensamblaje de la MEA. Este sistema se enfoca en el componente más importante de la FC, sin embargo, el trabajo no fue concluido en su totalidad, dejando pendientes ciertos aspectos de su construcción que se abordarán más adelante como objetivo de este trabajo de investigación.

Para continuar con la elaboración de un sistema automatizado para la manufactura de FC y más concretamente en la manufactura de electrodos porosos y conociendo las limitantes en el actual método utilizado para su elaboración, se propone en este trabajo de investigación una alternativa que permita mejorar un CNC, el cual se describirá a detalle en la siguiente sección.

### **3.1 Sistema de control numérico computarizado**

Antes de comenzar a describir los componentes, herramientas, diagramas, circuitos y softwares que son empleados para el funcionamiento de la CNC, es importante introducir el concepto de control numérico.

Se trata de una máquina-herramienta capaz de realizar multitud de tareas mediante instrucciones específicamente codificadas a su sistema de control, dichas instrucciones son escritas siguiendo un orden lógico y una forma predeterminada. Al conjunto de instrucciones necesarias para maquinarse una pieza se le denomina programa CNC, el cual puede ser guardado para su uso futuro y usado repetidamente para así lograr el mismo resultado de maquinado en cualquier momento [23, 24].

La tecnología de control numérico tiene sus orígenes a mediados del siglo XX en el año 1950, asociada a la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (USAF), al Instituto tecnológico de



Massachussets (MIT) y al nombre de John Parson [23, 25]. Surge y se desarrolla a lo largo del tiempo con el propósito de ayudar a la manufactura, ya que se buscaba fabricar piezas que no eran fáciles de maquilar debido a su complejidad para ser elaboradas por operadores humanos, logrando así piezas más precisas, rápidas y flexibles.

Inicialmente se utilizaban tarjetas perforadas o cintas magnéticas en las que se encontraba grabado el programa y cualquier modificación requerida implicaba el cambio de estas, este fue el principio del control numérico. Con la llegada de los microprocesadores se hizo posible la conexión entre los ordenadores y las máquinas, logrando así controlarlas, lo que ocasiono su evolución a un sistema CNC el cuál es el que se emplea en la actualidad. Este cambio provoco darle a los programas grabados una mayor flexibilidad para poder realizar cambios con resultados inmediatos debido a que se trata solamente de un archivo guardado en la memoria.

El funcionamiento de una máquina CNC incluye los siguientes aspectos [24]:

- A diferencia de una máquina convencional, es una computadora la que se encarga de controlar la posición y velocidad de los motores que accionan varios ejes de la máquina. Logrando así movimientos que no son posibles de reproducir manualmente como círculos, líneas diagonales o figuras tridimensionales.
- Son capaces de mover la herramienta en sus 3 ejes al mismo tiempo para ejecutar trayectorias multidimensionales.
- Una computadora controla el movimiento de la mesa, el carro y el husillo. Una vez programada la máquina, esta opera por si sola sin la necesidad de que un operador este manejándola.

Las máquinas CNC fueron construidas principalmente para maquinar metales, pero con el tiempo se han realizado adecuaciones para nuevos diseños y así poder trabajar maderas, plásticos, espumas, telas y otros materiales. Sin importar su función todas ellas tienen cuatro características en común: un programa, un controlador, una herramienta y una estructura que la soporte (figura 3.2).

Mientras los sistemas CNC se iban desarrollando, otros crecían de la mano de este, los sistemas CAD/CAM, el cuál es el proceso que utilizan las computadoras para mejorar la fabricación y diseñar los productos, logrando así piezas más precisas y con un coste de fabricación mucho menor [24].

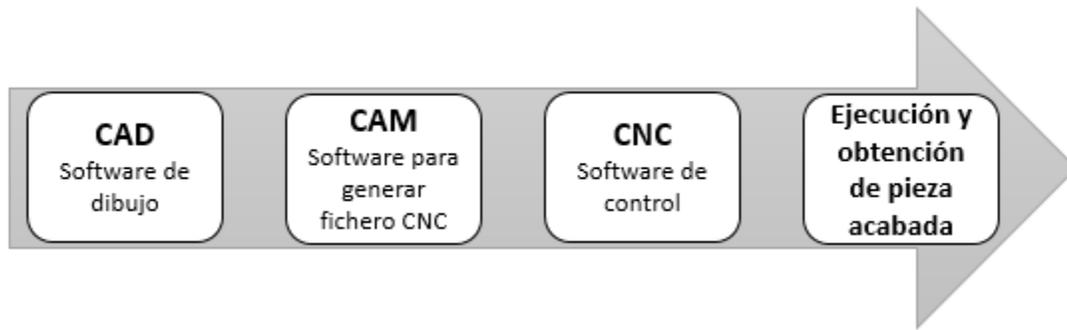


*Figura 3.2 Componentes de una máquina CNC: 1) programa, 2) controlador, 3) herramienta y 4) mesa de soporte, figura obtenida de [23].*

El sistema CAD/CAM engloba dos sistemas diferentes, por un lado el sistema CAD (por sus siglas en inglés: *Computer Aided Design*) son diseños asistidos por computadora y se utilizan para generar los modelos de las piezas que se desean fabricar con todas sus características (tamaño, contornos y la forma de cada componente) dichos diseños se almacenan como dibujos bidimensionales o tridimensionales, los cuales, pueden ser manipulados o modificados por el diseñador y además los sistemas CAD permiten simular el funcionamiento del producto para así observar si se comportará de la manera deseada. Por el otro lado, los sistemas CAM (por sus siglas en inglés: *Computer Aided Manufacturing*) son sistemas de Manufactura por Computadora, se encarga de controlar los equipos de fabricación mediante ordenadores, lo que genera una significativa ventaja en lugar de hacerlo con operadores humanos [24].

Cuando los sistemas CAD se conectan a un sistema CAM (CAD/CAM), se logra generar el programa de mecanizado de manera automática. En el sistema CAD la pieza que se desea manufacturar se diseña en la computadora con herramientas de dibujo y modelado sólido. Posteriormente el sistema CAM toma la información del diseño y genera la ruta de corte que tiene que seguir la herramienta para fabricar la pieza deseada; a partir de esta ruta de corte se genera el programa automáticamente, el cual, puede ser introducido a la máquina mediante un disco, o enviado electrónicamente, dicho flujo de trabajo puede ser observado en la figura 3.3.

Una vez que se han definido los conceptos principales de los sistemas CNC y sus aplicaciones en la industria, el siguiente paso consiste en justificar su uso (ventajas) en la fabricación de electrodos porosos.



*Figura 3.3 Flujo de trabajo del sistema CAD/CAM para la obtención de un producto manufacturado mediante CNC.*

### 3.1.1 Planeación del diseño

La justificación del uso de un sistema CNC para la manufactura de electrodos porosos se centra en la obtención de necesidades, es decir, en el contacto con el usuario final y la solución de los problemas específicos que se presentan. Como se ha estado comentando al inicio de este capítulo, la principal aplicación del sistema de posicionamiento de muestras es la manufactura de electrodos porosos.

Durante la manufactura de forma artesanal de la FC se necesitan realizar diferentes pasos como lo son: 1) Cortes, estos son realizados a mano con la ayuda de un bisturí en diferentes materiales como Mylar, tela de carbón, Nafion 211 y cables de platino, para la obtención de las placas bipolares, el canal de flujo, la membrana de intercambio protónico y los electrodos, respectivamente. 2) Depósito de materiales, este paso se divide en a) el depósito del elastómero dentro de un molde de acrílico con cables de platino embebido y b) la creación de la tinta catalítica mezclando Platino soportado sobre carbón al 20% (CPt 20%), alcohol (2-propanol) y Nafion líquido. 3) Serigrafía con la cual se impregna a la tela de carbón con la tinta catalítica para así crear las capas difusoras de gases y, por último, 4) el ensamble de todos los componentes antes mencionados dentro de dos placas impresas en PC-ABS.

Como se puede observar la elaboración de una FC consta de múltiples pasos, en los cuales la precisión es un factor importante, ya que, el área efectiva de la celda manufacturada en la UQROO es de apenas 7.6 cm<sup>2</sup>. Por tal motivo el uso de un sistema CNC capaz de mejorar el proceso de manufactura, para así lograr todos los pasos mencionados en el párrafo anterior es indispensable.

El objetivo principal es la creación de un sistema de posicionamiento de muestras mediante la obtención de la estructura de un sistema CNC al cuál le sea posible adaptar diferentes herramientas de trabajo que realizarán de forma automatizada los diversos pasos que conlleva la construcción de una FC. Entre las posibles herramientas capaces de realizar estos trabajos, las más adecuadas se enlistan a en la tabla 5. De esta manera se resolverán las necesidades primordiales del proyecto al tratarse de una estructura construida y ensamblada personalmente, a diferencia de los productos existentes en el mercado, logrando así, no solo solucionar los problemas en la manufactura de los electrodos, sino que, permitirá su implementación en diferentes proyectos.

*Tabla 5 Comparativa entre las herramientas utilizadas mediante la manera artesanal y las herramientas capaces de automatizar el sistema.*

Objetivo	Material	Componente elaborado	Herramienta	
			Artesanal	Automatizado
<b>Cortar</b>	Mylar	Placas bipolares, canal de flujo	Bisturí, tijera	láser
	Tela de carbón	Capa difusora de gases, electrodos		
	Membrana Nafion 211	Electrodos		
	Cables de platino			
<b>Depósito de materiales</b>	Elastómero, cables de platino	Sellos para mediciones	Espátula, molde de acrílico, horno, baño iónico, bascula.	Electrospray
	CPT20%, alcohol (2-propanol), Nafion líquido	Tinta catalítica		
<b>Serigrafía</b>	Tela de carbón, tinta catalítica	Electrodos	Serigrafía	Electrospray
<b>Ensamble</b>	Todos los componentes	Celda de combustible	Ensamblada a mano	CNC

Para el correcto funcionamiento del CNC, se optó por implementar la herramienta de corte láser, con el fin de no solo corroborar que el sistema funcione correctamente, sino que, además de esta forma se avanzaría cada vez más hacia el completo sistema automatizado que se desea fabricar para la manufactura de las FCs.

### *Identificación de oportunidades*

La oportunidad de desarrollar el sistema de posicionamiento de muestras surge de la necesidad de maquinar piezas de precisión (componentes internos) para el ensamble de PEMFCs en el taller de hidrógeno de la Universidad de Quintana Roo.

Algunos de los componentes que se desean manufacturar son:

- Placas bipolares.
- Canales de flujo.
- Capas difusoras de gases (papel carbón impregnado con la tinta catalítica).
- Sellos de elastómero con cables de platino embebido.

La precisión de los diferentes componentes que son utilizados en la FC es un factor importante en su funcionamiento, esto es debido a que muchos de los cortes, medidas y material depositado debe ser del orden de los milímetros para que el proceso electroquímico ocurra de la manera esperada y su funcionamiento sea el óptimo. Aunado a esto hay que considerar el futuro uso de la estructura en diferentes proyectos de manufactura.

### *Las prioridades del proyecto*

El conocimiento de los problemas que se presentan a la hora de manufacturar los componentes de la FC de forma artesanal proporciona mucho de los datos importantes del funcionamiento que se desea tenga el sistema de posicionamiento de muestras, es debido a esto que se pueden observar las prioridades e inquietudes que se busca para el usuario final, dichas inquietudes son:

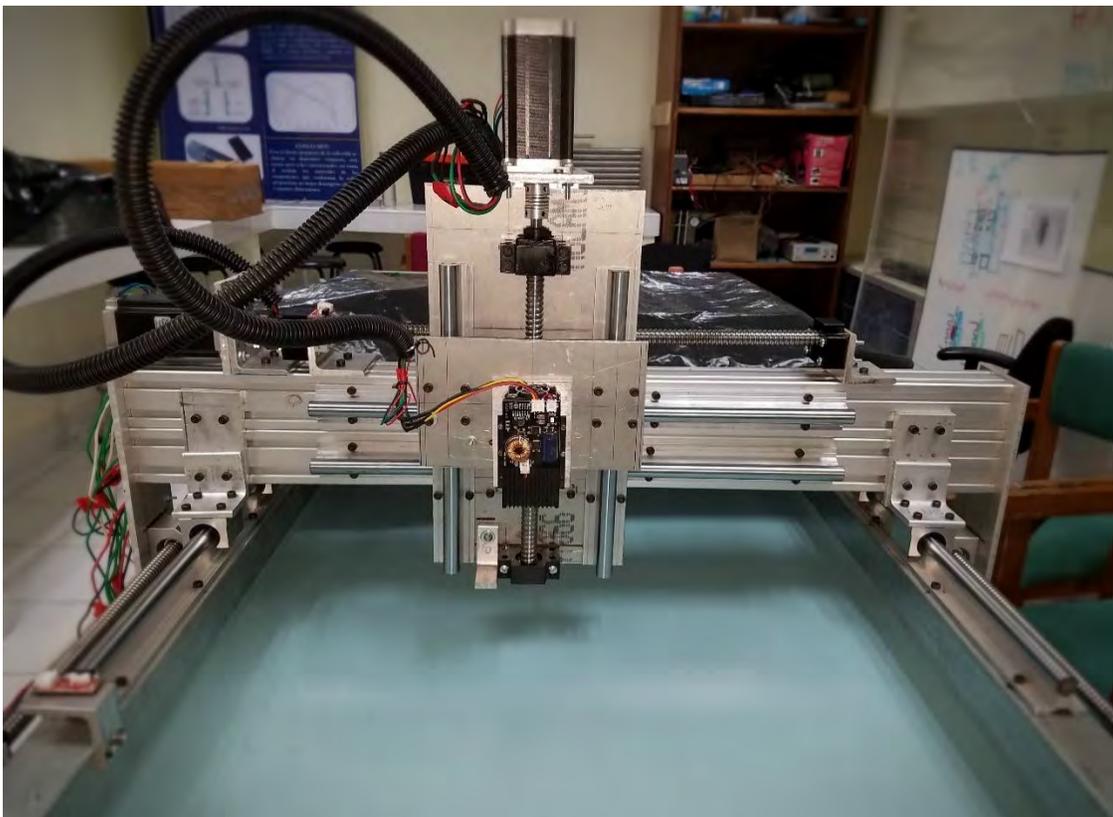
- Se busca una máquina que tenga una precisión adecuada para el maquinado de los componentes de la FC.
- Que la estructura sea fácil de montar y desmontar, esto por cuestiones de espacio y mantenimiento.
- Que sea posible el incremento o el cambio de la herramienta de trabajo.
- Que sea posible el maquinado de piezas tan pequeñas del orden de los milímetros, hasta piezas medianas de aproximadamente 40 cm.

- Que los materiales de los cuales este construida la estructura sean de buena calidad y resistentes.
- Que los materiales de la estructura sean de bajo costo y fáciles de conseguir.
- Los programas para el uso del sistema sean *Open Source* (librería abierta).

Conforme a los requerimientos anteriores es posible comenzar a trabajar en la creación de la estructura, controladores, actuadores y softwares del sistema CNC.

### 3.2 Descripción de la máquina

El CNC de corte láser fue elaborado con la ayuda del ingeniero Alexis Rabago quién fungió como principal proveedor de los componentes necesarios para su construcción, esto permitió aminorar el costo final de la máquina, la cual puede observarse en la figura 3.4.



*Figura 3.4 Estructura CNC con cortador láser.*

La máquina funciona con energía eléctrica a 110 VAC alimentada por separado por 2 fuentes de poder las cuales se mencionan a detalle en la tabla 6. Algunos detalles importantes respecto al CNC de corte láser son:

- La máquina cuenta con 3 ejes de movimiento lineales (X, Y, Z).
- Estructura de aluminio desensamblable.
- Motores de 4.2 A con capacidad de 428 Oz/in de torque.
- Finales de carrera en los puntos mínimos de cada eje.
- Electrónicos controlados por Arduino Mega con shield RAMPS 1.4.
- Módulo de laser de 15 W máximo y 8 W continuo.
- Área de trabajo de aproximadamente 40 cm x 40 cm y distancia de subida (eje Z) de 15 – 20 cm.

A continuación se describirán a detalle todos los componentes utilizados para la construcción y manejo de la máquina, los cuales se dividen en 4 grupos; sistema electrónico, paquetería de programación, sistema de control y sistema de desplazamiento.

### 3.2.1 Sistema electrónico

Entre las características principales del sistema electrónico se encuentra la del suministro de energía eléctrica en CD a todo el sistema, esto en vista de que todos los componentes (a excepción del sistema mecánico) necesitan potencia eléctrica de cierta magnitud para trabajar correctamente. De igual manera dentro de este sistema se encuentran los actuadores, motores a pasos que logran mover toda la estructura con una gran precisión para lograr un buen trabajo de manufactura y el cortador láser.

#### *Alimentación*

Para alimentar al sistema se ha optado por utilizar tres fuentes de poder que trabajarán de manera independiente. Las primeras dos fuentes alimentarán a los controladores de los motores a pasos, mientras que la fuente restante alimentará al láser y a la placa Arduino (de ser necesario). Tuvieron que ser utilizadas dos fuentes de poder diferentes debido a que tanto los controladores de los motores como el láser trabajan a tensiones diferentes.

Las fuentes de poder encargadas de alimentar a los controladores de los motores a pasos se tratan del modelo FUE-36V360W de WANTAI MOTOR, mientras que la encargada de alimentar al láser se trata del modelo ATX500wPSU-101 de Vorago. El aspecto físico de estas fuentes puede observarse en la figura 3.5.



*Figura 3.5 Fuentes de alimentación del sistema CNC: a) modelo FUE-36V360W de WANTAI MOTOR entregando 360 W de potencia y b) modelo ATX500wPSU-101 de Vorago entregando 500 W de potencia.*

Las principales características de estas fuentes de poder pueden observarse a continuación en la tabla 6.

*Tabla 6 Características principales de las fuentes de poder utilizadas en este proyecto.*

Características	FUE-36V360W	ATX500wPSU-101
Tensión de entrada	110 - 220 VAC	110 - 220 VAC
Corriente de entrada	8.4 A	10 A
Tensión de salida	24 - 36 - 48 - 60 VCD	3.3 - 5 -12 VCD
Eficiencia	>82%	>82%
Potencia	360 W	500 W
Protecciones	OVP (Sobre voltaje)	OVP (Sobre voltaje)
	OCP (Sobre corriente)	OCP (Sobre corriente)
	SCP (Corto circuito)	SCP (Corto circuito)



## Motores

En las máquinas CNC es común encontrar como actuadores primarios motores a pasos, estos son dispositivos electromecánicos que convierten una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos, lo que significa que son capaces de avanzar una serie de pasos (grados) dependiendo de la entrada de control [24]. Le brindan a la máquina de una gran precisión del mecanizado mientras trabaja con pares resistentes bajos durante el frenado o la aceleración.

Por tal motivo se ha decidido utilizar este tipo de motores en este proyecto, además, su facilidad de uso, su robustez, su gran precisión y el hecho de poder moverse un paso a la vez por cada pulso que se le aplica (este paso puede variar desde  $90^\circ$  hasta pequeños movimientos de centésimas de grado) lo hacen idóneos para trabajos de este argot. Su principal inconveniente es que para su activación se necesita de una etapa de control lógica, denominada *driver*, de la cual se hablara más adelante.

La limitante en cuanto al motor a emplear es que su consumo nominal no rebase los 4.2 A por fase. Dentro de todas las posibilidades, el que más se ajusta a las características es el modelo WT57STH Nema 23 de WANTAI MOTOR que produce 428 Oz/In (30.81 Kg/cm). El motor puede observarse en la figura 3.6.

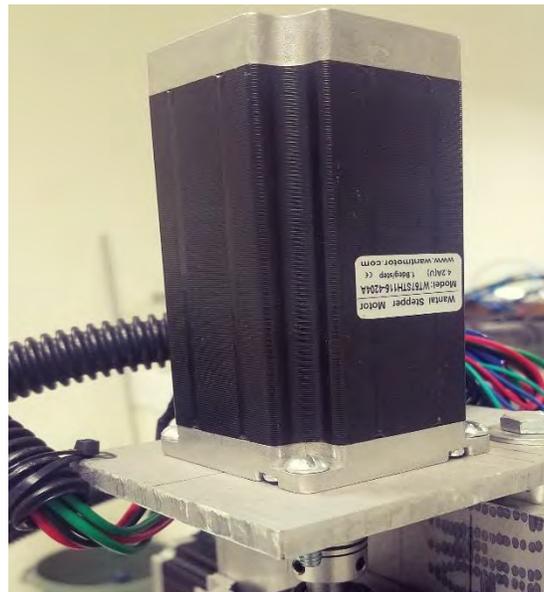


Figura 3.6 Motor a pasos modelo WT57STH.

Las principales características de este motor se enlistan a continuación en la tabla 7.

*Tabla 7 Características principales de los actuadores.*

Características motor a pasos	
Fases	2
Ángulo de pasos	1.8°
Tensión	3.78 V
Corriente	4.2 A/fase
Diámetro del eje	8 mm
Torque	30.81 Kg/cm
Formato	Nema 23

### *Laser*

El corte por amplificación de luz mediante la emisión estimulada de radiación es una técnica de mecanizado especial de índole térmico, que no genera viruta, en el que la eliminación del material se provoca por la fusión y vaporización del mismo al concentrar en una pequeña área elevadas temperaturas [26]. Como la zona afectada por el calor es pequeña las piezas cortadas presentan una deformación mínima. Además, comparado con los procesos convencionales de arranque de viruta, presenta mejores beneficios como:

- Gran nivel de precisión y exactitud.
- Mínima deformación del material.
- Repetibilidad excelente a causa de la ausencia de desgaste en la herramienta de corte.
- Gran velocidad de producción.
- Bordes afilados y limpios.

Para este estudio se trabajó con un diodo láser como se muestra en la figura 3.7, el cuál posee un cristal semiconductor en forma de lámina extremadamente delgada con uno de sus lados altamente reflectante y el otro, reflectante a menor medida.



*Figura 3.7 Diodo láser utilizado en este trabajo.*

Se decidió utilizar este tipo de láser debido a la poca complejidad que presenta, su confiabilidad, eficiencia (alrededor de 1 a 10 años), es económico, fácil de conseguir y presenta un gran rendimiento. Sus principales características pueden observarse en la tabla 8.

*Tabla 8 Principales características del diodo láser.*

Características del diodo láser	
<b>Potencia máxima</b>	15 W
<b>Potencia nominal</b>	8 W
<b>Frecuencia de modulación</b>	TTL O V (off) 5 V (open) <0 KHz de frecuencia PWM
<b>Voltaje de funcionamiento</b>	12 VDC
<b>Corriente de trabajo</b>	< 3 A
<b>Distancia focal</b>	18 mm (No ajustable)
<b>temperatura de trabajo</b>	15 - 45°

### 3.2.2 Paquetería de programación

En este apartado, se hablará de la paquetería de programación (ver **Anexo 4**) con la cuál es posible lograr el funcionamiento deseado del sistema CNC de corte láser, este permitirá una comunicación bidireccional entre la máquina y el operador. Teniendo a consideración que

uno de los objetivos a alcanzar en este proyecto es que los softwares utilizados para la programación de la máquina sean *open source* se indago en la web hasta conocer a una comunidad denominada RepRap. La cual, es una comunidad global de entusiastas que ponen a disposición de los demás planos, programas, materiales, componentes, etc. para la manufactura de prototipos de máquinas auto-replicantes y sistemas CNC, gracias a ellos se obtuvo una paquetería completamente gratuita, la cual se divide en tres partes: a) un firmware, b) un sistema CAD/CAM y c) un software.

### *Firmware*

El firmware es el conjunto de instrucciones de un programa informático que se encuentra registrado en una memoria ROM, flash o similar. Estas instrucciones fijan una lógica primaria que ejerce el control de los circuitos de alguna clase de artefacto. El firmware forma parte del hardware, ya que se encuentra integrado a la electrónica, pero también es considerado parte del software, al estar desarrollado bajo un lenguaje de programación. Funciona como el nexo entre las instrucciones que llegan al dispositivo desde el exterior y sus diversas partes electrónicas.

Cualquier firmware debe cumplir tres funciones claras [24]:

- 1) Otorgar al sistema las rutinas fundamentales de funcionamiento y respuesta con respecto a las peticiones del usuario.
- 2) Establecer una interfaz para que, de esta forma, se pueda realizar la configuración del sistema de forma rápida.
- 3) Controla y gestiona el arranque del sistema del dispositivo, así como la iniciación.

Para este proyecto se utilizó Marlin. Marlin es un firmware de código abierto alojado en Github, fue creado por la comunidad RepRap, específicamente para máquinas que realizan prototipos rápidos replicables (impresoras 3D) se deriva de los programas Sprinter y GRBL, se trata de un controlador sencillo, confiable y adaptable.

Una clave para el uso de este firmware es que se ejecuta en el bajo costo de 8 bits, optimizándolo para su uso en microcontroladores lo que permite utilizar como plataforma de referencia a Arduino. Soportado por una comunidad muy preparada y entusiasta que le da soporte al firmware y a la documentación basta y sólida, Marlin puede ser adaptado a tantos microcontroladores y configuraciones como sea posible, buscando así que sea configurable, personalizable, extensible y económico.

El firmware fue creado principalmente para su uso en impresoras 3D, sin embargo, el funcionamiento mecánico es idéntico al de un CNC de corte laser por lo que es posible utilizar este firmware en este proyecto de investigación.

El firmware Marlin se ejecuta en la placa principal del CNC, administrando todas las actividades en tiempo real de la máquina. Coordina los motores, sensores, luces, láser, botones y todo lo involucrado en el proceso de corte láser.

Para la manipulación del sistema es importante comprender conceptos básicos del código-G. El código-G es un lenguaje de descripción de operaciones para máquinas CNC que puede ser usado para controlar estos dispositivos. El código-G se almacena en formato de texto, es decir, puede leerse y modificarse con un editor de texto plano, aunque lo más habitual es que se genere y se visualice desde una aplicación de modelado y/o fabricación 3D. Este código es un estándar libre para generar rutas y comandos, le dice a una máquina que haga cosas simples como “encender el cortador láser a la potencia deseada” o “mover X, Y a una velocidad F”.

### *Sistema CAD/CAM*

Una gran desventaja de utilizar al firmware Marlin es que solo trabaja usando el código-G, sin embargo, es posible exportar el modelo de un sólido desde CAD hacia un *licer* que lo cortará en este lenguaje y el firmware podrá trabajar sin ninguna falla. Otras maneras de obtener el código-G son: a) mediante cualquier software de rasterizado y conversión a rutas de corte laser como Inkscape con el *plugin tool* de JTech Photonics (el cual es usado en este proyecto), b) utilizando cualquier software CAM que genere código-G para *routers* con movimientos en 2D ignorando el eje Z y c) generando vectores en AutoCAD o cualquier software de precisión e importar los vectores hacia Inkscape o un software CAM.

Inkscape es un editor de gráficos vectoriales de código abierto, similar a programas como Adobe Illustrator, Corel Draw, Freehand o Xara X. Al tratarse de un Software libre, su adquisición no tiene ningún costo y puede ser modificado al gusto del desarrollador. Existe de igual forma una gran comunidad de usuarios dispuestos a ayudar y dar soporte para obtener un producto mucho más sólido y útil. Su interfaz (figura 3.8) es muy amigable, y fácil de utilizar, permitiendo así la creación y manipulación de objetos, rellenos, bordes, soporte de texto, renderización, entre otras cosas.

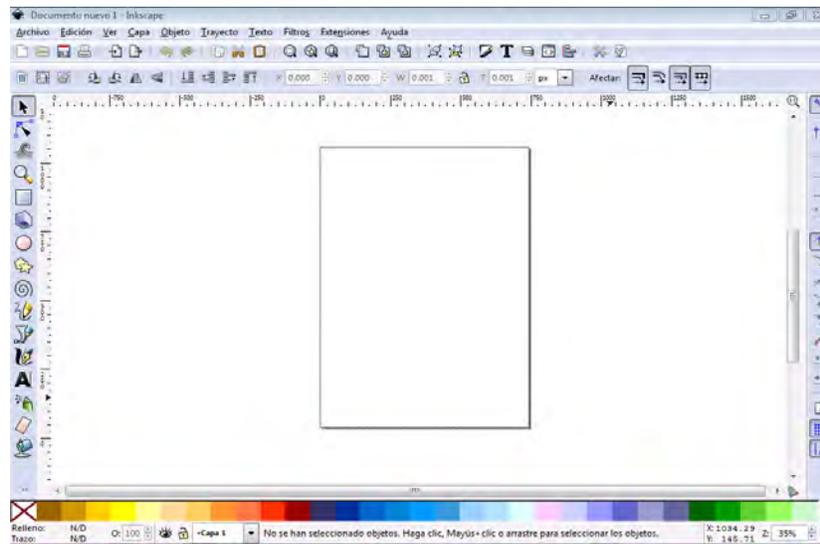


Figura 3.8 Interfaz del programa Inkscape.

Los desarrolladores de JTech Photonics han aprovechado las ventajas de usar el software Inkscape para crear una extensión de corte láser que permite múltiples versiones de comandos de encendido y apagado para diferentes impresoras y máquinas CNC, así como la capacidad de múltiples pasos para cortar. Este complemento permite convertir un objeto de ruta en Inkscape en un archivo de código-G.

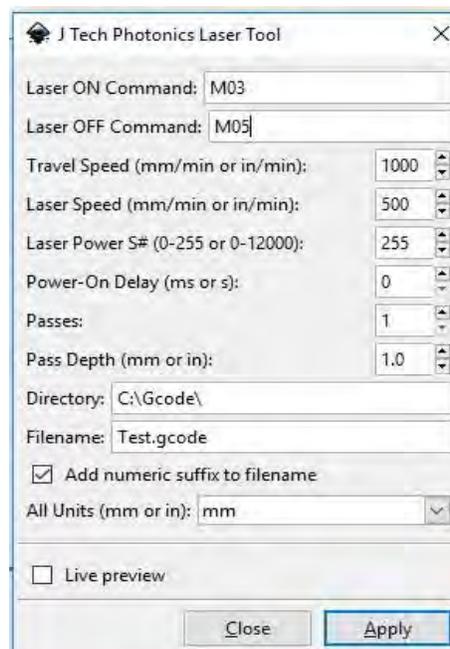


Figura 3.9 Interfaz de la extensión desarrollada por JTech Photonics para la creación del código-G mediante el programa Inkscape.

En la figura 3.9 se puede observar las características de la extensión donde, en orden descendente:

- *Comando laser ON:* Este comando permite encender el láser (por ejemplo, M03 ó M106).
- *Comando láser OF:* Permite apagar el láser (por ejemplo, M05 ó M107).
- *Velocidad de desplazamiento:* Permite ajustar la velocidad de la máquina cuando el láser está desactivado (mm/min).
- *Velocidad láser:* Es la velocidad de la máquina cuando el láser esta encendido (mm/min).
- *Potencia láser:* Para el firmware Marlin se puede ajustar usando un número entre 0 y 250 (250 es potencia máxima).
- *Retraso de encendido:* Este comando encenderá el láser y esperará a moverse hasta que se complete el retraso.
- *Pasos:* Este comando repetirá por completo la ruta de corte las veces que se la hayan asignado.
- *Profundidad del paso:* Este comando moverá el eje Z hacia abajo la longitud establecida en cada paso en milímetros (por ejemplo, una pieza de 3 mm de espesor con 3 pasos puede usar 1 mm por pasada para cortar todo el recorrido).
- *Todas las unidades:* Cambia todas las unidades del archivo a milímetros o pulgadas.
- *Aplicar:* Ejecuta la extensión y se genera el código-G.

Con este complemento además de generar el código-G necesario para que el firmware Marlin funcione, está especialmente pensado para su uso en sistemas CNC de corte láser, por lo que se podrá generar el código-G tanto como para grabado, como para corte.

### *Interfaz máquina-operador*

Se trata del programa que se encargará de mostrar información sobre el estado de la máquina en una pantalla (ordenador) y permitirá la comunicación bidireccional entre el usuario y la CNC. Existen una gran variedad de soluciones dentro de las cuales Mach4 es la más popular debido a que es compatible con cualquier versión de Windows, en el caso de los usuarios Linux es recomendable utilizar EMC2 el cual también es un proyecto totalmente *open source*.

Para poder enviar los comandos al Arduino, es necesario un software de control. El firmware Marlin puede ser controlado por completo desde un software host, la solución para este proyecto es Pronterface otro programa completamente *open source* que a su vez esta optimizado para trabajar sobre Arduino.

Pronterface permite controlar de forma interactiva la máquina, cortar objetos directamente desde el host, así como varias opciones compatibles con impresoras 3D, además admite conexiones serie y Ethernet. Este programa cuenta con diferentes opciones que permitirán configurar el CNC de manera óptima, entre sus tantas configuraciones tenemos:

- *Integración slicer*: Con esta opción se puede elegir los pre-ajustes desde Pronterface para realizar cortes desde el host.
- *Macros y botones personalizados*: Permite definir fácilmente macros (con combinaciones arbitrarias de Python, Shell y código-G) y agregar botones personalizados para un mejor manejo del programa
- *STL y G-code Plater*: Es posible para el programa interpretar cualquiera de los dos lenguajes STL o código-G.

La interfaz del usuario se muestra en la figura 3.10 contiene toda la información pertinente para conocer el estado actual del CNC, en él se puede encontrar información como: indicadores de temperatura o gráficos, controles completos para calibración o ligeros para su uso diario, visor 2D o 3D, entre otras cosas.



Figura 3.10 Interfaz del software Pronterface.



### 3.2.3 Sistema de control

#### *Arduino*

El firmware Marlin se puede considerar como el componente fundamental del sistema de control usa como plataforma de referencia a Arduino, concretamente a Arduino Mega 2560 REV3 con RAMPS 1.4.

Arduino es una plataforma de electrónica de código abierto para la creación de prototipos, basada en software y hardware flexibles y fáciles de usar. Las placas de Arduino son capaces de leer entradas (luz de un sensor, huellas digitales) y transformarlas en acciones (encender un motor, encender un led). El cual se creó para estudiantes, artistas, profesionales y cualquier interesado en crear entornos u objetos interactivos, lo que ha generado una comunidad mundial de fabricantes, capaz de acceder a una increíble cantidad de conocimientos que logra ser de gran ayuda para principiantes y expertos por igual.

El microcontrolador dentro de la placa Arduino, puede ser configurado enviándole un conjunto de comandos, para realizar esto es necesario utilizar el lenguaje de programación que utiliza Arduino (basado en *Wiring*) y su entorno de desarrollo IDE (basado en *Processing*). Los proyectos creados en Arduino pueden ser ejecutados sin la necesidad de conectarse a un ordenador.

Existe una gran variedad de placas Arduino, cada una cuenta con diferentes características determinadas que las hacen idóneas para una aplicación u otra. Para este proyecto se utilizará la placa Arduino Mega 2560 REV3, figura 3.11.

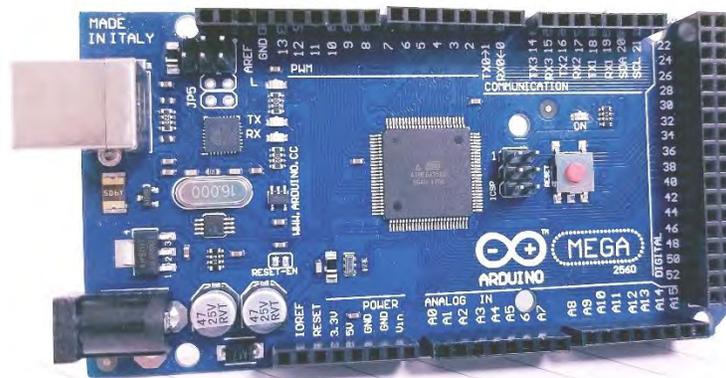


Figura 3.11 Placa del microcontrolador Arduino Mega 2560.

Arduino Mega es una placa basada en el microcontrolador ATmega2560. Dispone de 54 pines digitales de entrada/salida (de los cuales 15 pueden ser utilizados como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puerto serie de hardware), un reloj digital de 16 MHz, un puerto USB, una entrada de alimentación, un encabezado ICSP y un botón de reinicio. La placa contiene todo lo necesario para que el microcontrolador funcione correctamente, por lo que su uso resulta bastante sencillo, el ATmega2560 está diseñado principalmente para este tipo de proyectos. Sus principales características se pueden observar en la tabla 9.

*Tabla 9 Características del microcontrolador Arduino Mega 2560.*

<b>Arduino Mega 2560</b>	
<b>Microcontrolador</b>	ATmega2560
<b>Tensión de funcionamiento</b>	5 V
<b>Tensión de entrada recomendado</b>	7-12 V
<b>Tensión de entrada limite</b>	6-20 V
<b>Pines de E/S digitales</b>	54 (15 PWM)
<b>Pines de entrada analógica</b>	16
<b>Corriente E/S de pin</b>	20 mA
<b>Corriente pin 3.3 V</b>	50 mA
<b>Memoria flash</b>	256 KB (8 KB bootloader)
<b>SRAM</b>	8 KB
<b>EEPROM</b>	4 KB
<b>Velocidad del Reloj</b>	16 MHz

Es posible encontrar muchos otros microcontroladores y plataformas de microcontroladores disponibles para la informática física (Parallax Basic Stamp, BX-24 de Netmedia, Phidgets, Handyboard del MIT) que ofrecen una funcionalidad similar. Todas estas herramientas toman los detalles desordenados de la programación del microcontrolador y lo envuelven en un paquete fácil de usar. Arduino, además de realizar este proceso ofrece algunas ventajas sobre otros microcontroladores que facilitan el trabajo:

- *Económico:* Las placas Arduino son más económicas en comparación con otras plataformas de microcontroladores.
- *Multiplataforma:* Mientras que la mayoría de los sistemas de microcontroladores limitan su instalación a Windows, el software de Arduino puede ser ejecutado en Windows, Macintosh OS X y Linux.

- *Entorno de programación sencillo y claro*: El software de Arduino (IDE) es fácil de usar para principiantes, pero lo suficientemente flexible como para que usuarios avanzados puedan aprovecharlo al máximo.
- *Software de código abierto y extensible*: El software de Arduino se publica bajo una licencia *open source*, y puede ser ampliada por programadores experimentados.
- *Hardware de código abierto y extensible*: Los planos de las placas de Arduino están publicados bajo una licencia de *Creative Commons*, por lo que los diseñadores más avanzados pueden crear su propia versión del módulo, ampliarlo y mejorarlo.

### RAMPS 1.4

Las funcionalidades de cualquier placa Arduino pueden incrementarse exponencialmente mediante el uso de *shields*, estas son placas que pueden ser conectadas encima de la placa Arduino ampliando sus capacidades. Los diferentes *shields* siguen la misma filosofía que las placas Arduino, estas son fáciles de montar y baratas de reproducir.

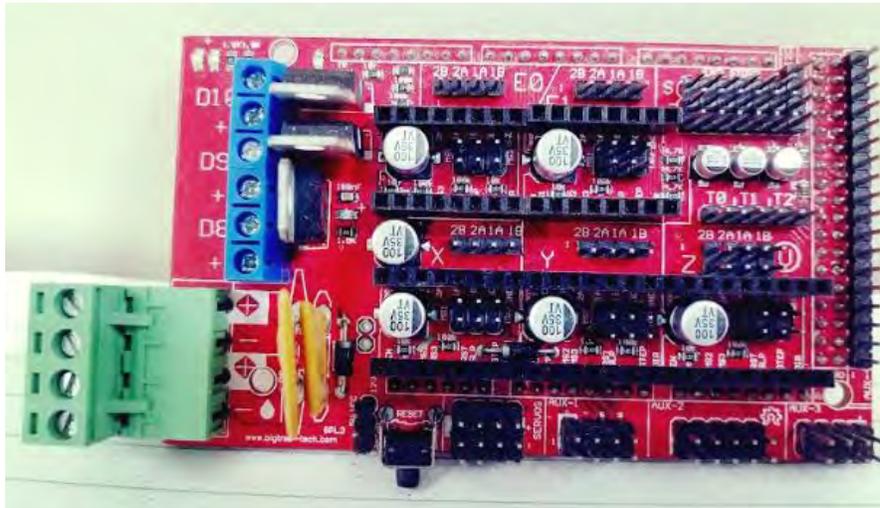
Aunque en realidad existen *shields* de todo tipo para realizar tareas específicas, los más importantes son:

- Conexión wi-fi.
- Conexión Ethernet y módulo SD.
- Soporte para display.
- Driver para motores de CD.

En la ejecución de este proyecto se usará RAMPS 1.4 (Figura 3.12) la cual es una *shield* específica para el firmware Marlin.

La RAMPS, siglas para *Reprap Arduino Mega Polulo Shield* (ahora en la versión 1.4) es un *shield* o placa adicional para Arduino que traduce las ordenes digitales del ordenador en ordenes por pasos, a través de los drivers para los motores a pasos. Son las placas más famosas y con más soporte para la impresión 3D y para los sistemas CNC.

Una ventaja de esta *shield* es su precisión ya que llega a 1/16 pasos, es decir, que un paso lo divide en 16 micropasos, sin embargo, para alcanzar este número de micropasos es necesario que el motor sea compatible.



*Figura 3.12 Placa del shield RAMPS 1.4, para aumentar las funcionalidades del Arduino Mega 2560.*

Algunas de las características principales de esta shield se pueden observar a continuación en la tabla 10.

*Tabla 10 Características principales de la shield utilizada en este trabajo de investigación.*

RAMPS 1.4	
<b>Entorno de compilación</b>	Arduino
<b>Firmware</b>	Marlin
<b>Software para PC</b>	Pronterface
<b>Tensión de funcionamiento</b>	12 V
<b>Corriente de funcionamiento minima</b>	5 A
<b>Corriente de funcionamiento (opcional)</b>	11 A
<b>Capacidad para admitir complementos</b>	SI

### *Drivers*

#### Controlador para motor a pasos

Existe infinidad de posibles soluciones para controlar los motores. De entre todas las posibles soluciones, se optó por utilizar el *driver* DQ542MA de WANTAI MOTOR el cual es un

controlador para un motor a pasos híbrido bifásico, está diseñado para ser utilizado con un motor que tenga un cuerpo de 42 mm a 85 mm de ancho y hasta 4.2 A por fase. El circuito que adopta es similar a un control servo, lo que resulta en un funcionamiento más suave, preciso, sin ruidos y vibraciones.

Este controlador se usa ampliamente en dispositivos de control medianos y grandes, tales como curvadoras, CNC, bordadoras, máquinas de empaquetado, etc.



*Figura 3.13 Driver DQ542MA de Wantai Motor para controlar los motores a pasos.*

En la figura 3.12 se pueden apreciar las entradas para las conexiones de este *driver*, así como otras características para su configuración, en la tabla 11 se enlistan en orden descendente las entradas de este controlador.

*Tabla 11 Entradas del controlador para los motores a pasos.*

Conexiones DQ542MA	
Terminal	Función
<b>PUL + (+5V)</b>	Entrada pulso terminal positiva (3.3 a 5 VDC)
<b>PUL - (PUL)</b>	Entrada pulso terminal negativa
<b>DIR + (+5V)</b>	Entrada de la dirección terminal positiva (3.3 a 5 VDC)

<b>DIR - (DIR)</b>	Entrada de la dirección terminal negativa
<b>ENBL + (+5V)</b>	Entrada de activación de controlador termina positiva (3.3 a 5 VDC)
<b>ENBL - (DIR)</b>	Entrada de activación de controlador terminal negativa
<b>DC -</b>	Entrada principal de voltaje terminal negativa
<b>DC +</b>	Entrada principal de voltaje terminal positiva, hasta 50 VDC
<b>A+</b>	Salida positiva fase A del motor
<b>A-</b>	Salida negativa fase A del motor
<b>B +</b>	Salida positiva fase B del motor
<b>B -</b>	Salida negativa fase B del motor a pasos

La corriente principal que es utilizada por fase puede ser ajustada mediante los interruptores SW 1, 2 y 3 del interruptor DIP como se muestra en el **Anexo 5**.

Este controlador permite de igual manera la resolución de los micropasos configurando los interruptores SW 5, 6, 7 y 8 del DIP como se observa en el **Anexo 6**.

### Finales de carrera

Todos los ejes cartesianos dentro de una máquina CNC necesitan de un punto de referencia (también conocido como posición final o final de carrera) para hacer referencia a sus movimientos. Al comienzo de cada proyecto, cada eje necesita una copia de seguridad hasta alcanzar el punto de referencia. Los finales de carrera también ayudan a proteger la máquina para que no se mueva más allá de su rango de construcción y se dañe a sí misma. Es posible encontrar diferentes tipos de sensores:

- *Mecánicos*: son la forma más básica de finales de carrera, hechas de un interruptor común.
- *Óptico*: este tipo de sensores observan el nivel de luz y reaccionan ante cambios repentinos.
- *Magnéticos*: estos finales de carrera siguen el efecto Hall el cuál es comúnmente utilizado para aplicaciones de proximidad, posicionamiento, etc. Se tratan de transductores que varían su voltaje de salida en respuesta a un campo magnético.

En este trabajo se optó por utilizar el final de carrera tipo mecánico, concretamente uno fabricado por la misma comunidad de la cual se deriva el firmware a utilizar (RepRap). Se trata del *Mechanical EndStop V1.2* el cual tiene el siguiente aspecto:

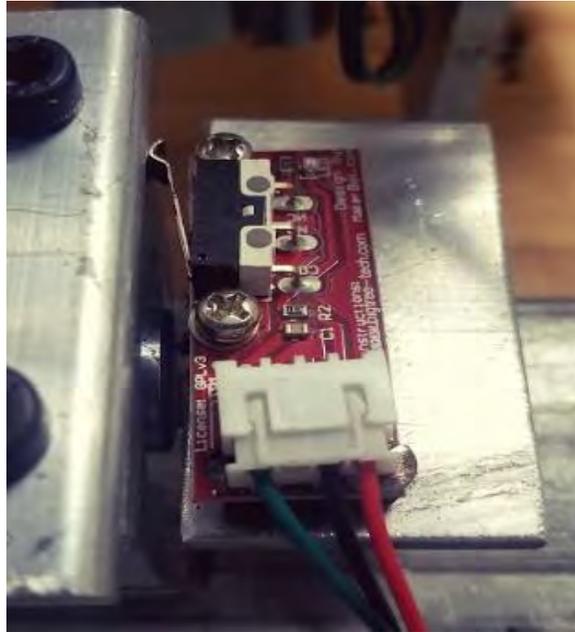


Figura 3.14 Final de carrera utilizado Mechanical EndStop V1.2 de RepRap.

Se trata de un *driver* simple, repetible y confiable que permite detectar cuando un eje X, Y o Z ha alcanzado su mínimo o máximo. Su funcionamiento es bastante sencillo, el final de carrera mecánico utiliza un interruptor de palanca para detectar cuando se activa. El interruptor está conectado de modo que cuando el eje que ha llegado al límite de su recorrido tiene contacto con él es activado y lanza una señal *LOW* para detener el movimiento del motor a pasos.

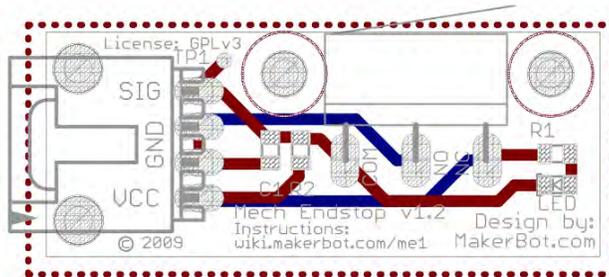


Figura 3.15 Diagrama esquemático del Mechanical EndStop V1.2.

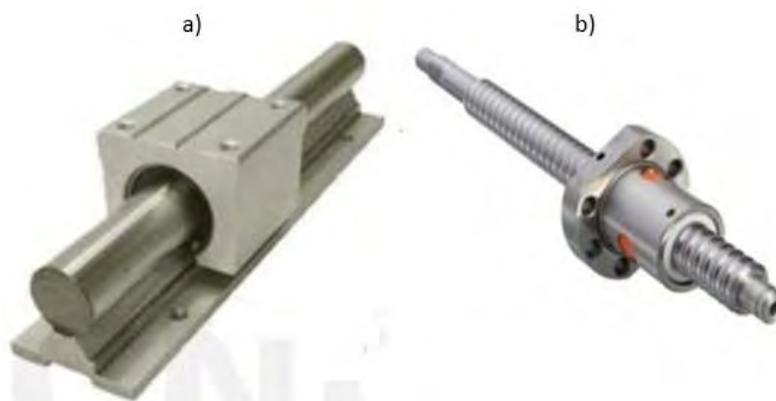
En la figura 3.15 se pueden observar los pines de conexión del final de carrera donde:

- *SIG*: Señal de salida proveniente del *driver*: *Low* = fin de carrera activado, *High* = final de carrera sin activar.
- *GND*: Pin para conectar a tierra el *driver*
- *VCC*: Entrada de alimentación de tensión 5 V.

### 3.2.4 Sistema de desplazamiento

Se trata de la estructura de la máquina, así como los dispositivos de deslizamiento utilizados en ella. Para la estructura se utilizó perfilería de aluminio de 60x60, ver **Anexo 7**, esto en vista a lo sencillo que es trabajarlo y los excelentes resultados que ofrece en cuanto a precisión, resistencia y durabilidad.

Para los dispositivos de deslizamiento, su función principal es la de poder realizar los movimientos en los tres ejes coordenados de los cuales se requiere trasladar al cortador láser. Para ello se utilizó guías lineales deslizables y rodamientos de bola tipo husillo como se puede observar en la figura 3.16. El primero funciona como deslizador en una sola dirección lineal, ya que tiene restringido los movimientos de rotación gracias al perfil del eje de la guía y, el segundo tiene como función principal convertir movimientos rotacionales en movimientos lineales. Sus características los hacen idóneos para aplicaciones de precisión.



*Figura 3.16 Componentes de deslizamiento: a) guía lineal deslizable, b) rodamiento de bola tipo husillo, figuras obtenidas de [24].*



## CAPÍTULO 4. PRENSADO DE LA MEA

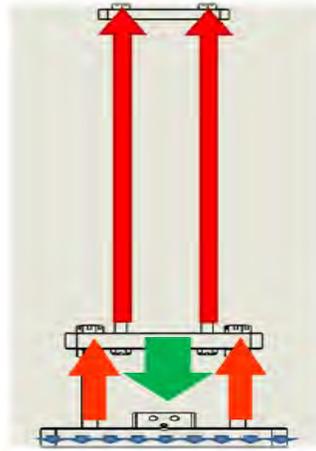
En este capítulo se describirán los avances logrados por el ingeniero Luciano Belin durante su trabajo de investigación en la elaboración de una prensa termo-neumática para la manufactura de electrodos porosos. La finalidad de este capítulo consiste en describir a detalle la prensa, ya que actualmente se encuentra en el 80% de su construcción, así mismo, con los datos obtenidos de la referencia [19] se pretende modificar e implementar algunos aspectos al sistema de prensado para lograr una mayor eficiencia.

### 4.1 Estado actual de la prensa termo-neumática

Para el diseño de la prensa, el prototipo se basó en el diseño de una prensa troqueladora neumática, con su elemento de fuerza (cilindro neumático Festo ADNH-100-150) dispuesto de manera vertical y con un avance descendente del vástago, con lo cual, se pretende disminuir el margen de error al momento del prensado.

De igual forma se diseñó una armadura de soporte para el equipo con el fin de disminuir los riesgos de accidentes por pivoteo y caída del equipo, logrando así, aumentar las capacidades máximas del actuador de fuerza. Este consta de 3 placas de acero negro A36, placas: inferior, intermedia y superior; las placas superior e intermedia sirven para sujetar al cilindro neumático, mientras que la inferior funciona como punto base del sistema de prensado y del módulo térmico.

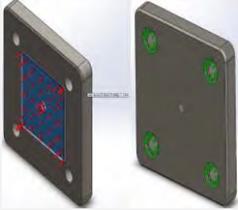
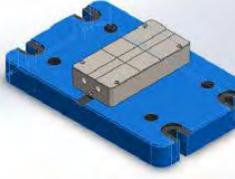
Se realizaron simulaciones de esfuerzos mecánicos mediante el software SolidWorks Simulations, con el propósito de corroborar que en el sistema no existan fallas relacionadas con la fatiga de los materiales durante el ciclo de fuerza. Las condiciones de frontera establecidas para este análisis fueron, que la base de la prensa (la placa inferior) sea fija sin presentar movimiento en ninguno de los tres ejes y el resto de las piezas solo mostrarán movimiento en el eje vertical, aunado a esto, en el módulo térmico existirá una carga aplicada sobre su superficie de igual forma en el eje vertical, figura 4.1.



*Figura 4.1 Diagrama de los vectores de fuerza sufridos por la armadura de soporte durante el ciclo de fuerza [19].*

Los análisis realizados corresponden a los componentes que conforman la prensa, los resultados obtenidos se observan resumidos en la tabla 12, en donde resaltan valores como el esfuerzo máximo absorbido por el material, el esfuerzo aplicado y el límite de tracción. Si se desea observar el análisis de una manera más minuciosa se recomienda ver la referencia [19].

*Tabla 12 Resultado del estudio de análisis de esfuerzos.*

Componente	Imagen	Propiedades	
<b>Placa superior</b>		Material	Acero ASTM A36
		Criterio de falla	Von Mises
		Esfuerzo aplicado al componente	4.92 MPa
		Límite de tracción de material	250 MPa
		Esfuerzo máximo presentado en la simulación	36.07 MPa
<b>Placa intermedia</b>		Material	Acero ASTM A36
		Criterio de falla	Von Mises
		Esfuerzo aplicado al componente	4,750.25 N
		Límite de tracción de material	250 MPa
		Esfuerzo máximo presentado en la simulación	52.88 MPa
<b>Placa inferior y módulo térmico</b>		Material	Acero inoxidable T304
		Criterio de falla	Von Mises
		Esfuerzo aplicado al componente	18.28 MPa
		Límite de tracción de material	450 MPa
		Esfuerzo máximo presentado en la simulación	18.78 MPa

### 4.1.1 Componentes actuales de la prensa

Actualmente la prensa cuenta con el 80% de sus componentes los cuales se distribuyen en tres grupos, el grupo mecánico, el ciclo neumático y el ciclo eléctrico; en el grupo mecánico se encuentran aquellos que conforman la armadura de soporte, así como el elemento de fuerza (pistón) como se mencionó en el apartado anterior. En el ciclo neumático se encuentran principalmente los elementos que controlan la presión mecánica que es ejercida sobre el módulo térmico mediante el control de la presión neumática suministrada, la cual llega al pistón gracias a una válvula proporcional, que es controlada por un controlador lógico programable (PLC). En el ciclo eléctrico se encuentran aquellos elementos que suministran energía eléctrica en CD para la unidad de control, para los sensores y actuadores. A continuación, se describirán de manera general los componentes principales de los dos últimos grupos, si se desea conocer más a detalle los elementos se recomienda ver la referencia [19].

#### *Ciclo neumático*

El circuito neumático consta de una combinación de componentes tanto electroneumáticos y neumáticos. La figura 4.2 describe el diagrama del circuito neumático y sus tres etapas: suministro, control y actuación.

La etapa de suministro se encarga de proveer del fluido de trabajo de manera paralela a las dos etapas restantes del ciclo, control y actuación, esto debido a que ambas necesitan de una presión neumática independiente para su funcionamiento.

La etapa de control, análogamente con la de actuación son subsistemas “esclavos” seriadas entre sí, su funcionamiento se basa en el aumento y decremento proporcional de la presión neumática, controlado por una señal de entrada-salida de corriente eléctrica (4-20 mA CD) y el control del avance y retroceso del vástago del pistón, respectivamente.

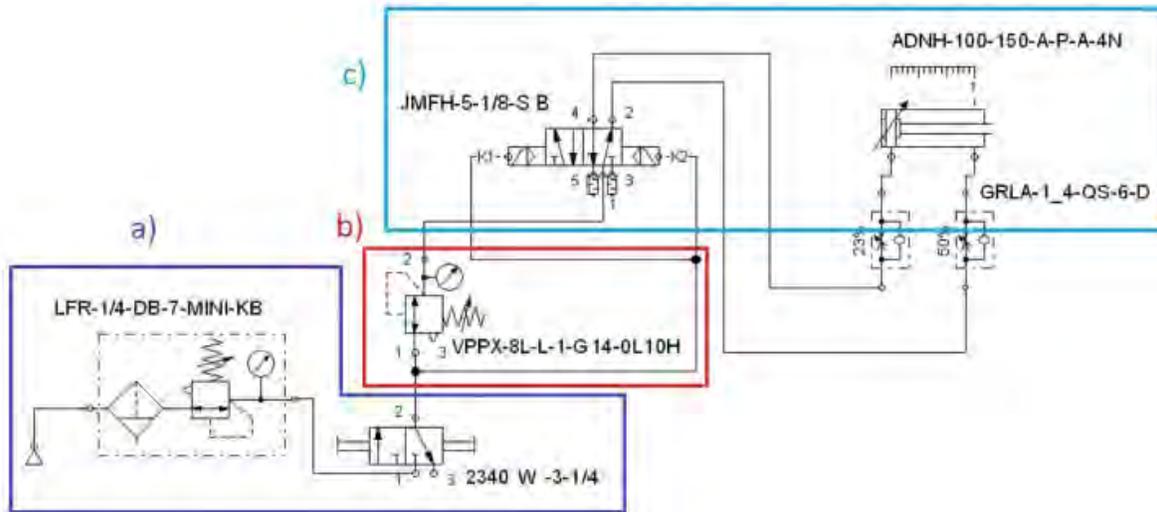


Figura 4.2 Etapas que componen el ciclo neumático: a) suministro, b) control y c) actuación [19].

La tabla 13 describe los componentes del ciclo neumático utilizados en este trabajo, así como su funcionamiento y su modelo. Cada uno de estos componentes fueron elegidos cuidadosamente para el correcto funcionamiento del sistema de prensado.

Tabla 13 Componentes del ciclo neumático.

Etapa del ciclo neumático		Componentes	Marca y modelo utilizado	Funcionamiento
<b>Suministro de fluido de trabajo</b>		Fuente de fluido de trabajo a presión	Indistinto	Suministrar al ciclo el fluido de trabajo
		Unidad de mantenimiento	Festo (LFR-1/4DB-4-MINI-KB)	Regular la presión de entrada, atrapar la humedad generada por la condensación de los cambios de presión e impurezas provenientes de la compresora.
		válvula de paso	Festo (W-3-1/4 normalmente cerrado)	Bloqueo intermedio entre la unidad de mantenimiento y la etapa de control.
<b>Control</b>		Válvula de presión proporcional	Festo (VPPX-8L-L-1-G14-0L10H-S1)	Monitorear el valor de la presión de salida en todo momento, comparándola con el

				valor de entrada que se ingrese.
		Componente de presión	Festo (CPX)	Controlar a la válvula proporcional
Actuación		Válvula piloto bidireccional	Festo (JMFH-5-1/8-SB)	Controlada por el elemento de control CPX y la válvula VPPX, activa el retroceso y el avance del vástago purgando la vía de avance/retroceso del pistón y permitiendo el paso de presión regulada a la vía de retroceso/avance del mismo, respectivamente.
		Cilindro de fuerza	Festo (ADNH-100-150-I-PA-4N)	Cilindro de fuerza tándem de doble acción (avance, retroceso) con una fuerza máxima de 18,281 N nominales, a 6-8 bares de presión neumática.

### *Ciclo eléctrico*

El circuito eléctrico puede considerarse como la etapa principal de todo el sistema de prensado ya que, excluyendo a la unidad de mantenimiento, todos los demás componentes necesitan potencia eléctrica de cierta magnitud para operar correctamente. Análogamente, el circuito eléctrico se compone de 3 etapas: 1) suministro, 2) control y 3) actuación, en la figura 4.3 se muestra el diagrama y los componentes del ciclo eléctrico.

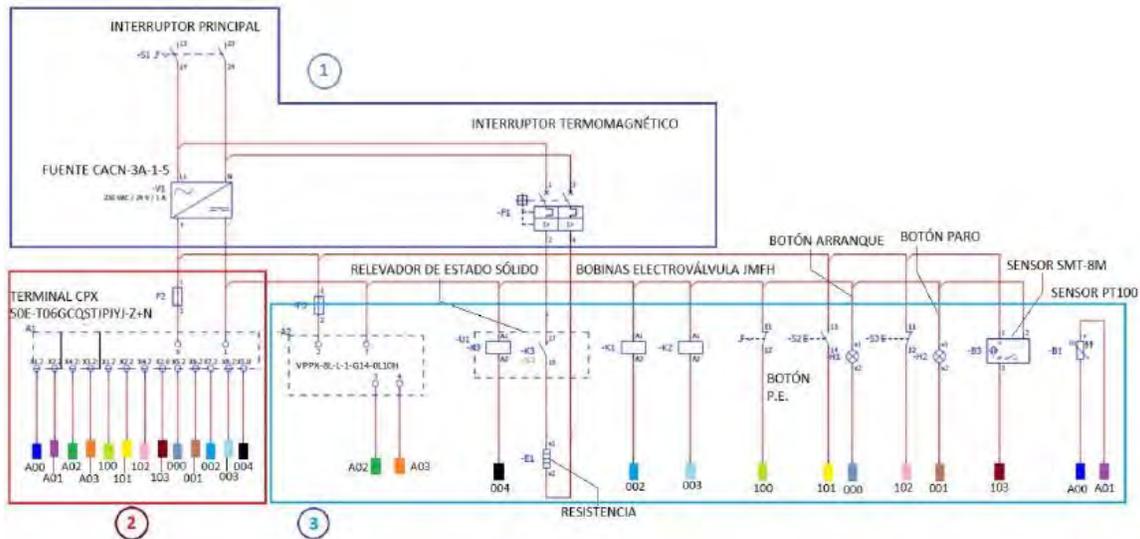


Figura 4.3 Etapas que componen el ciclo eléctrico: 1) suministro, 2) control y 3) actuación [19].

La etapa de suministro es la que se encarga de rectificar la tensión de entrada CA/CD y de alimentar a todos los componentes electrónicos del sistema para su funcionamiento. La etapa de control logra interconectar todos los componentes eléctricos y neumáticos para su correcto trabajo. La etapa de actuación consta de nueve componentes esenciales que influyen en el óptimo funcionamiento final del prototipo. En la tabla 14 se describe el funcionamiento de los componentes principales de cada etapa del ciclo eléctrico.

Tabla 14 Componentes del ciclo eléctrico.

Etapa del ciclo eléctrico		Componentes	Marca y modelo utilizado	Funcionamiento
Suministro		Interruptor principal	Eaton (P1-32/EA/SVB)	Conectar el sistema de prensado a la línea monofásica de 125 VCA
		Fuente rectificadora CA/CD	Festo (CACN-3A1-5)	Rectifica la señal de entrada CA a una tensión nominal de 24 VCD y 5 A
		Interruptor termomagnético	Eaton	Protección de la fuente rectificadora
Control		Unidad de control	Festo (CPX-CEC 50E-T06GCQSTJPJYJU J-Z+N)	Trabaja con una tensión de 24 VCD, controlador modular con un límite de entradas y salidas. Interconecta todos los

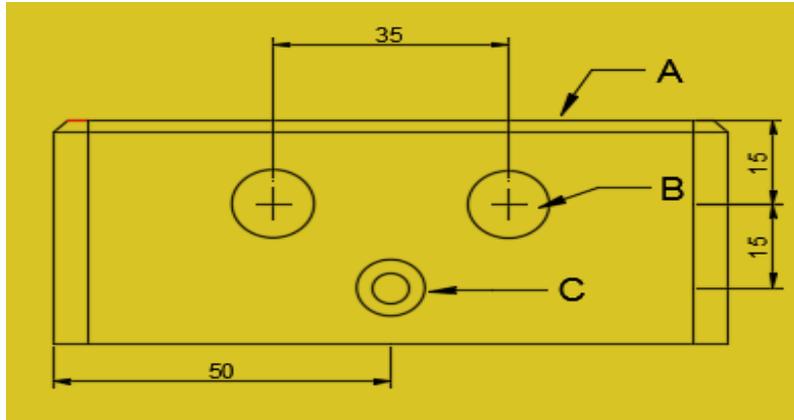
				componentes del prototipo para su correcto funcionamiento
<b>Actuación</b>		Relevador de estado solido	Allen-Bradley (700-SH25WA25)	Funge como interruptor de potencia para el paso de tensión proporcional para los cartuchos térmicos
		Botones de inicio, paro y paro de emergencia	Indistinto	Interruptores que envían señales de pulso digital a la unidad de control, esta las interpreta y responde enviando señales a los diferentes componentes del sistema, las cuales son: inicio del ciclo de prensado, paro del ciclo, paro de emergencia del ciclo y una serie de combinaciones entre ellas
		Bobinas para electroválvula	Festo (MSFG-24-42-50_60-OD)	Mover el selector de vías de la válvula piloto cargándose electromagnéticamente, utilizando este principio para atraer o repeler los vástagos del selector de vías.
		Sensores de proximidad	Festo (SMT-8M-ANS-24V-E-0,3-M8D)	Determinar el punto muerto inferior y superior del cilindro para determinar si se puede iniciar con un ciclo de fuerza o de retroceso
		Sensor de temperatura	Efecter 600 (PT100-TT0291)	Censar la temperatura del sistema, siguiendo la propiedad de los metales de variar su resistencia eléctrica respecto a la temperatura (-40 a 150 °C)

#### 4.1.2 Módulo térmico

Actualmente el sistema de prensado consta del 80% de su construcción, quedando pendiente la manufactura e instalación del módulo térmico y el diseño e implementación del punzón (el cuál es uno de los objetivos a alcanzar en este trabajo).

El ingeniero Luciano Belin [19] logro diseñar en CAD la placa térmica (**Anexo 8**), así mismo simulo los esfuerzos térmicos y mecánicos que se presentan en el módulo térmico durante un ciclo de trabajo.

El módulo térmico consta de 4 componentes los cuales son: 1 placa de acero inoxidable T304 de 100 mm de ancho por 200 mm de largo por 40 mm de espesor, barrenada para albergar; 2 termo resistencias eléctricas tipo cartucho las cuales funcionaran con un voltaje de 120 VCA, estas suministrarán calor de manera uniforme hacia la placa térmica con lo cual se alcanzará la temperatura deseada durante el proceso de manufactura; 1 sensor de temperatura Efector PT-100 él cual censará la temperatura. Por último, la placa final (ver tabla 12) la cual servirá de soporte para los demás componentes. La figura 4.4 muestra una vista lateral del diagrama de la placa térmica y sus dimensiones.



*Figura 4.4* Diagrama del módulo térmico, donde: A superficie superior de la placa, B barrenado para la posición de las termorresistencias y C superficie lateral del sensor PT-100.

Los estudios correspondientes a los análisis de esfuerzo y temperatura del módulo térmico se realizaron en conjunto entre la placa final y la placa térmica, ya que es esta última quien recibirá la compresión del cilindro neumático y transmitirá el esfuerzo generado hacia la placa inferior, se recomienda leer el capítulo 2, apartado 2.3 y 2.4 de la referencia [19] si se desea abordar más sobre los resultados correspondientes a cada estudio.



## CAPÍTULO 5. RESULTADOS

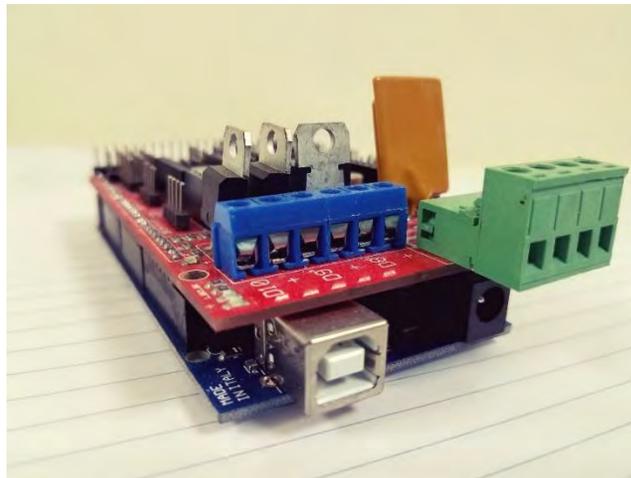
En este capítulo se describen los resultados de los experimentos realizados a lo largo de este trabajo de investigación, los cuales se dividen en dos grupos: el primero se centra en el objetivo de la manufactura de un sistema CNC, donde se incluyen diagramas de conexiones, limitantes de velocidad y área de trabajo, creación del código-G utilizado en las trayectorias de trabajo y parámetros de corte para cada material. Mientras que el segundo se enfoca en el diseño y análisis del componente final del sistema térmico de la prensa termo-neumática “el punzón”

### 5.1 Posicionamiento de muestras

#### 5.1.1 Configuración de los componentes electrónicos

Al contar con cada uno de los componentes mencionados en el **Capítulo 3** se procede a la configuración y conexión de estos, con el fin de realizar pruebas pertinentes del CNC (las cuales se mostrarán más adelante en este apartado) que avalen su justificación y utilización.

Para poder implementar a nivel de hardware la correcta conexión entre los drivers y el controlador, es primordial adaptar al Arduino Mega con la shield óptima para trabajar con el firmware de Marlin, como se mencionó anteriormente, la mejor opción fue trabajar con la RAMPS 1.4 (figura 5.1) la cuál esta especialmente diseñada para trabajar con ambos, lo que se traduce en un dispositivo más compacto y facilita el conexionado.



*Figura 5.1 RAMPS 1.4 montada sobre el Arduino Mega 2560.*

Marlin al ser un firmware diseñado principalmente para su uso en impresoras 3D, no nos permite trabajar sin conectar un extrusor a los pines de salida E0/E1 de la RAMPS; sin embargo, este trabaja mediante un motor a pasos, por lo que se optó en utilizarse como un segundo motor del eje Y, logrando así que no exista ningún error al cargar el firmware al Arduino.

En el **Anexo 9** se muestra el diagrama esquemático de la RAMPS 1.4 donde se puede observar todos los pines que esta dispone. Teóricamente la placa está diseñada para trabajar hasta con 35 VCD, sin embargo, hay que tener en consideración a los drivers que son conectados en ella, ya que si estos no estan diseñados para soportar esta tensión de alimentación serán destruidos. Por lo que se opto por alimentar a la RAMPS directamente del Arduino lo que le otorga 12 VCD.

La forma de configurar el conexionado del hardware es mediante jumpers, en la figura 5.2 se muestra de manera detallada el esquema de conexión entre los drivers y el controlador dejando a un lado la alimentación de los mismos.

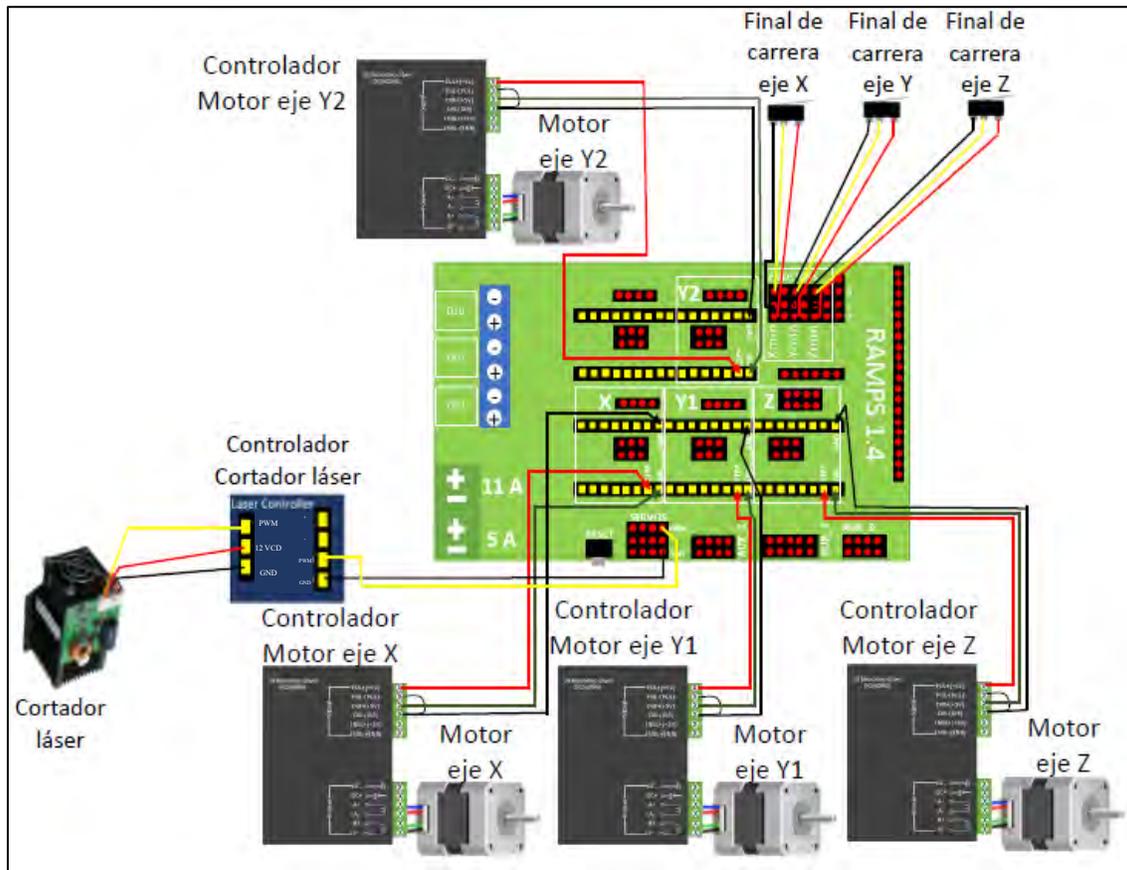


Figura 5.2 Diagrama de conexiones de los componentes electrónicos del CNC.

Como se aprecia todos los componentes electrónicos se conectan a la RAMPS lo que facilita su cableado y permite reducir espacio. A continuación, se detallará más a fondo las conexiones mostradas anteriormente.

Para el caso del cortador láser, la fuente de poder ATX de 12 VCD es conectada directamente a los pines “-“ y “+” del HUB (*Laser controller board* o placa controladora del cortador láser), para enviarle la señal PWM al HUB se debe conectar a los pines de la RAMPS en la sección AUX\_1 (PWM y GND) que fueron previamente configurados para esta tarea, posteriormente a esto, los tres pines de salida del HUB (PWM, 12 VCD y GND) se conectan al láser, dichas conexiones se aprecian en la figura 5.2.

### *Finales de carrera*

El firmware Marlin está configurado de tal modo que recibe una alerta cuando la entrada de los finales de carrera se referencia a tierra, de igual manera la RAMPS está diseñada para soportar hasta 2 de estos drivers en los recorridos de cada uno de los ejes de la máquina posicionándolos en el extremo máximo y el extremo mínimo de estos. Lo que podría considerarse una desventaja suponiendo que el cable de la señal de salida del final de carrera se rompe o esta averiado lo que ocasionará que el carro nunca se pare provocando así daños en la estructura, pues esta configuración de contacto normalmente abierto va a seguir indicando que todo funciona correctamente.

Para solucionar este posible problema y otorgarle al sistema una protección adicional se configuro, mediante la interfaz de Arduino un área virtual, la cual funcionará como un límite de trabajo preestablecido para el movimiento del CNC. La ruta (figura 5.3) para realizar esta configuración es la siguiente: *Marlin > Configuration.h > Z Probe Opions > Section Machine > #Define X\_BED\_SIZE y #Define Y\_BED\_SIZE*. Para este trabajo se utilizó una cama virtual de 400 mm ancho x 450 mm de largo, sin embargo, es posible reducir o ampliar esta área de trabajo introduciendo los valores en la ruta anteriormente descrita.

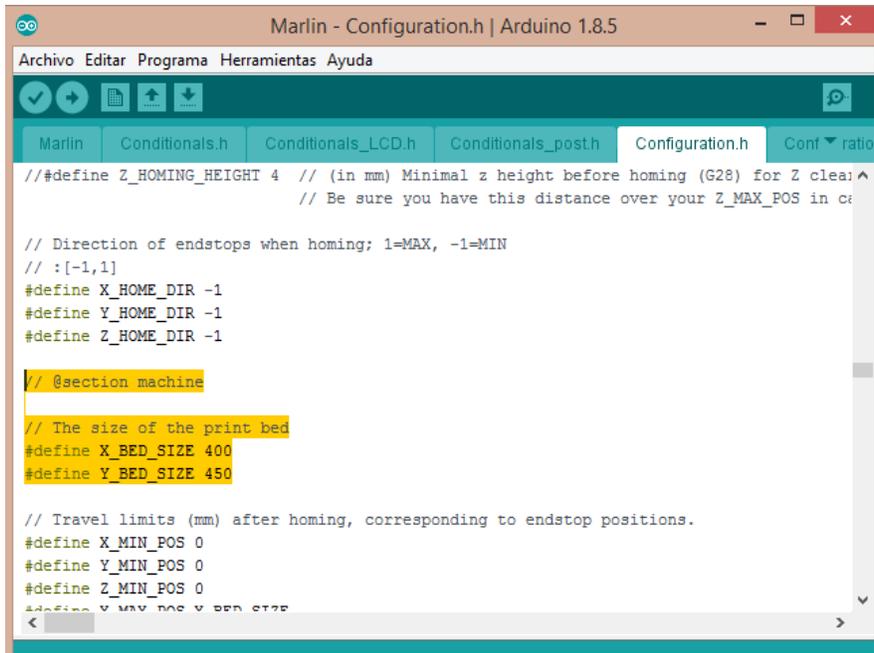


Figura 5.3 Ruta para personalizar el área virtual del CNC, donde 400 y 450 son las dimensiones expresadas en milímetros.

El conexionado detallado de los finales de carrera puede observarse en la figura 5.4, en concreto se han utilizado tres finales de carrera (uno para cada eje), suficientes para asegurar el funcionamiento correcto y seguro de la máquina.

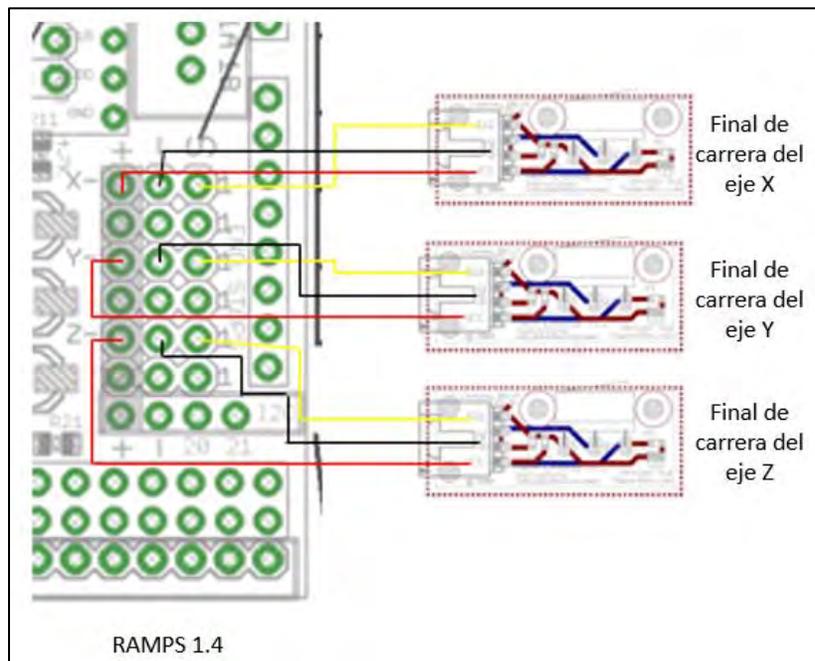


Figura 5.4 Diagrama de conexiones de los finales de carrera.

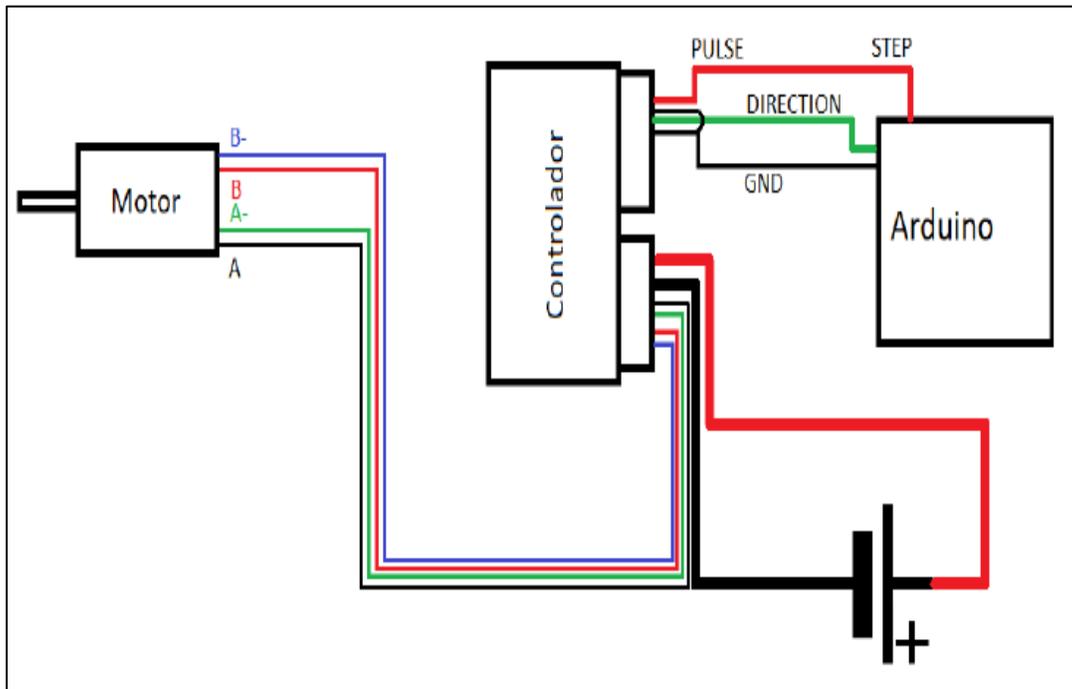
De la figura 5.4 se puede observar que:

- La salida SIG del final de carrera está conectado al pin “S” de la RAMPS 1.4
- La terminal GND del final de carrera está conectado al pin “-“ de la RAMPS 1.4
- La terminal VCC del final de carrera está conectado al pin “+” de la RAMPS 1.4

### *Motores*

Antes de siquiera pensar en dar marcha a los motores a pasos es necesario configurar correctamente los *drivers*. Para este caso los DQ542MA cuentan con una electrónica de potencia, en la parte de potencia se realizan las conexiones pertinentes a su alimentación la cual debe ser de 36 VDC y a las señales de salida de corriente de las fases A y B que controlan a los motores.

En la sección de electrónica se configuran los pines que son conectados a la RAMPS, los cuales envían las señales que hacen funcionar correctamente al *driver*. En la figura 5.5 se muestra un diagrama esquemático con las conexiones mencionadas.



*Figura 5.5 Diagrama esquemático para la conexión de los drivers y motores.*

Aunado a las conexiones eléctricas, es necesario configurar los *dip switches* del DQ542MA. Como la corriente por fase del motor es de 4.2 A se utiliza la tabla A5.1 del **Anexo 5** para la configuración de la corriente del controlador, en ella se observa que entrega un pico de corriente de 4.2 A cuando los SW del 1 al 3 se encuentran en “OFF” logrando así suministrarle a los motores la corriente necesaria para su funcionamiento.

De esta manera se tiene listo la parte de alimentación y suministro de energía, por lo que procedemos a configurar la resolución y los micropasos, para ello se utiliza la herramienta “calculadora de micropasos” del **Anexo 10** y la tabla A6.1 del **Anexo 6** para la configuración de la resolución de los micropasos del.

Los pasos por unidad se calculan con respecto a la configuración de micropasos de los controladores, los grados por pasos y los hilos por giro. En este estudio se desea que por cada 1 unidad de desplazamiento del software el motor avance 1 mm, la configuración idónea que se utiliza se muestra en la figura 5.6.

<b>Metric Required inputs</b>		
<b>Stepper Motor</b>	Deg/step -	1.8
	Steps/rev -	200
<b>Micro Stepping</b>	Pulse/step -	2
	Pulse/rev -	400
<b>Gear Reduction</b> (Enter zeros for direct drive)	Stepper teeth -	0
	Lead screw teeth -	0
	Multiplier -	1
<b>Leadscrew</b>	Pitch (mm) -	5
	Thread starts -	1
	Lead (mm/rev) -	5
<b>Result</b>	*Steps per mm -	80
	Resolution (mm/step) -	0.0125

*Figura 5.6 Configuración de los micropasos mediante el uso de la calculadora de micropasos.*

Donde:

- Grados por paso (Deg/Step) inalterable - 1.8°
- Pulsos por paso (Pulse/Step) de acuerdo con la tabla de los controladores - 2, esto se convierte en 400 Pulsos por revolución (1/2 de paso).

- Reducción del engranaje (no se usa esta casilla debido a que la unión es acople directo)
- Hilo (Pitch) - 5mm

Lo anterior da la configuración de 80 pasos por milímetro con una resolución de 0.0125 milímetros por paso, lo que permite que 1 unidad sea igual a 1 mm, de esta manera es posible configurar los SW del 5 al 8 del DQ542MA de la siguiente manera “ON”, “OFF”, “ON”, “ON” respectivamente, logrando así la correcta configuración de los drivers para su utilización en los motores a pasos.

### 5.1.2 Trayectorias de trabajo

La máquina puede operar de dos maneras diferentes, la primera consiste en realizar grabados sobre superficies lisas como madera, cartón y plástico. La segunda forma, la cuál es la necesaria para cubrir los objetivos de este trabajo, consiste en realizar cortes exactos sobre diferentes materiales los cuales se mostrarán más adelante en este apartado.

Como se mencionó en el **Capítulo 3** el CNC de corte láser funciona mediante el código-G y para poder generar este lenguaje es necesario el programa Inkscape y el plugin desarrollado por Jthec Photonics. En esta sección se describirá la manera de cómo utilizarlos para la creación del lenguaje. Una vez generado se explicará la manera de como cargarlo al Arduino mediante el software Pronterface para que de esta manera se pueda realizar el corte o grabado en el material seleccionado.

#### *Generación de código-G para texto*

El uso del software Inkscape es muy fácil y sencillo. Para poder generar el código-G de algún texto basta con ejecutar el software, una vez abierto seleccionar la herramienta de texto y escribir lo que se desea plasmar, gracias al software es posible modificar los parámetros preestablecidos del texto como el tamaño, tipo de letra, espaciado, entre otras cosas como se observa en la figura 5.7.

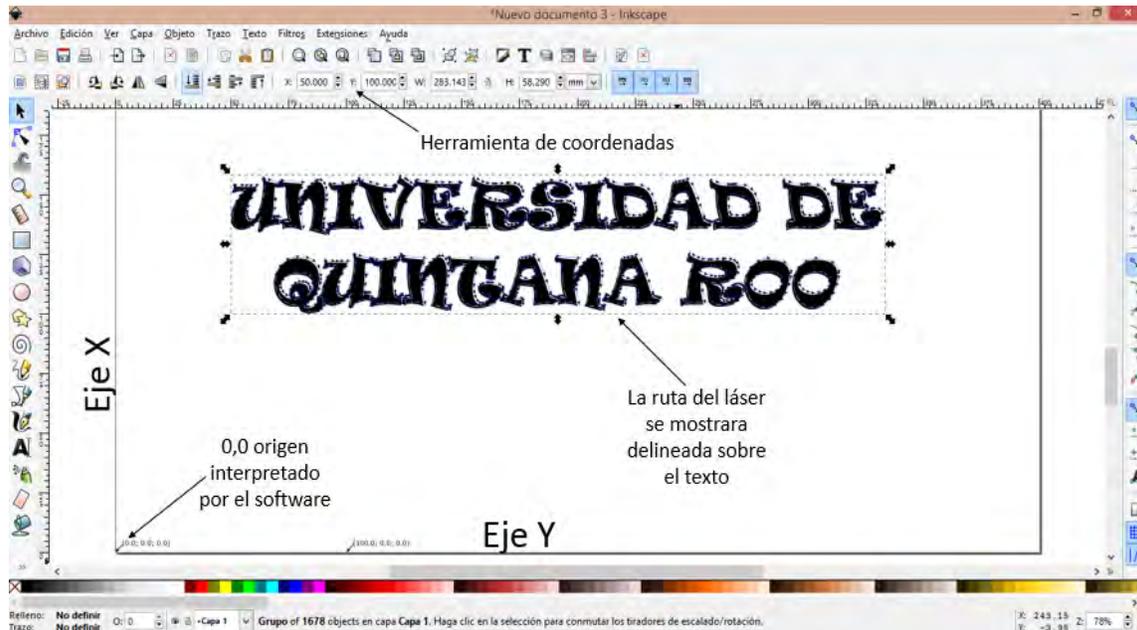


Figura 5.7 Herramienta de dibujo del software Inkscape.

Una vez escrito el texto deseado, es necesario convertir el objeto en un trazo, siguiendo la siguiente ruta dentro del software: *Trazo > Objeto a Trazo*. Todos los objetos que sean dibujados en este software son objetos vectoriales que pueden ser convertidos en un trazo o camino que será dibujado por el láser. La extensión utilizará esta ruta para generar el código-G, también es posible posicionar el texto en cualquier región de la mesa de trabajo mediante las herramientas de coordenadas.

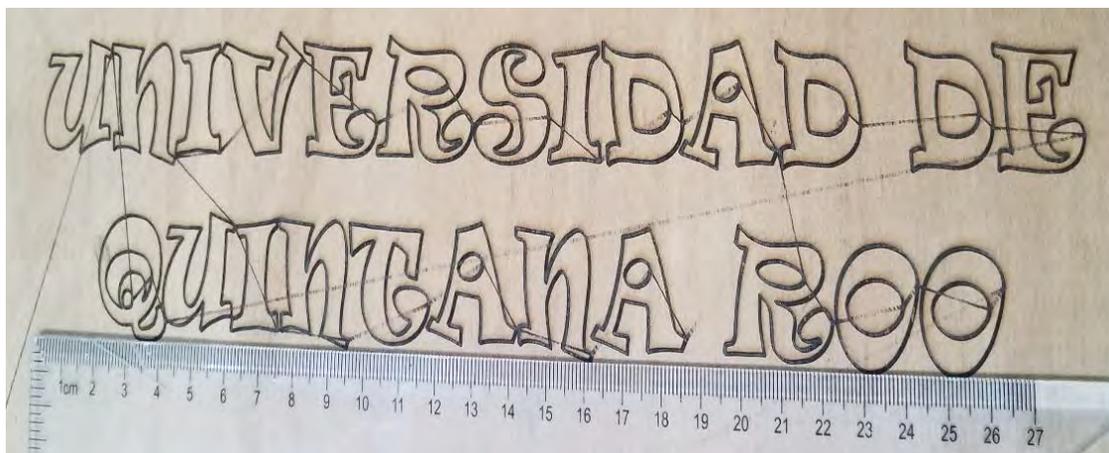
Con el trazo generado para poder obtener el lenguaje de programación el siguiente paso consiste en crear el código-G para esto basta con ir a la ruta: *Extensiones > Generar código-G > J Tech Photonics Laser Tool*. Al seleccionar la extensión aparecerá un cuadro de dialogo como en la figura 3.9 dentro de este cuadro se debe completar todos los valores necesarios (según el usuario) y aplicarlo para que se comience a generar el código-G. Una vez obtenido, la ruta del láser se describirá y el código se generará en la ubicación provista en la extensión, la figura 5.8 muestra la imagen preliminar típica de la ruta generada por la extensión para este ejemplo.





*Figura 5.8 Ruta de láser generada por la extensión.*

Al obtener el Código-G el siguiente paso consiste en cargarlo en el Pronterface e imprimirlo, de esta manera el CNC comenzará a plasmar las letras ya sea para cortar o grabar en el material establecido, el código-G generado para este ejemplo (grabado) puede observarse en el **Anexo 11**, mientras que el resultado final se muestra en la figura 5.9.

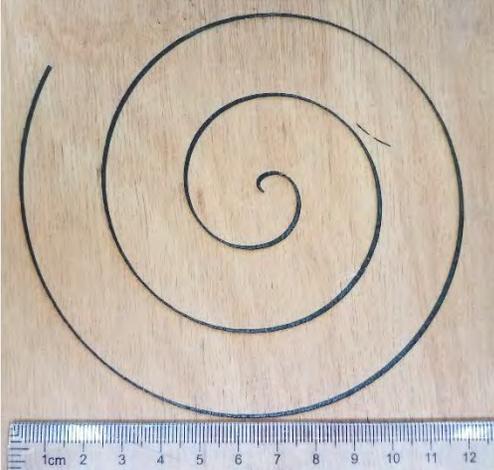


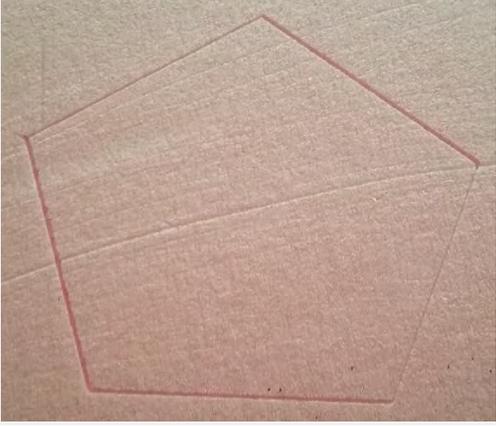
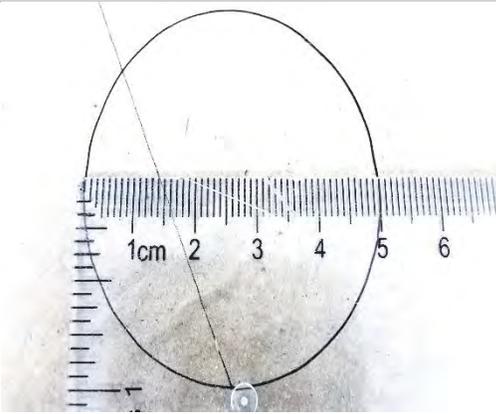
*Figura 5.9 Ejemplo N°1 de grabado mediante CNC de corte láser sobre triplay.*

### *Generación de código-G para dibujo*

Es posible generar el código-G para diferentes objetos como dibujos en 2D además del texto, para ello se pueden utilizar las diferentes herramientas de dibujo del software y basta con seguir los mismos pasos descritos anteriormente (volver el dibujo a un trazo y generar el lenguaje mediante la extensión de JTech Photonics) sobre el dibujo que se desea plasmar, en la tabla 13 se pueden observar los diferentes grabados obtenidos, así como su respectivo código.

*Tabla 15 Ejemplos de grabado de dibujos en 2D.*

Nombre	Resultado	Material	Código-G generado
<b>Espiral</b>		Triplay	<b>Anexo 12</b>
<b>Estrella</b>		Caucho	<b><u>Anexo 13</u></b>

<p><b>Pentágono</b></p>		<p>Foamular 250 ®</p>	<p><b>Anexo 14</b></p>
<p><b>Circulo</b></p>		<p>Cartón</p>	<p><b>Anexo 15</b></p>

### *Generación de código-G para imágenes*

Una de las aplicaciones más destacadas que se pueden realizar con el CNC de corte láser es el grabado y/o corte de imágenes, específicamente en blanco y negro de alto contraste. Para poder realizarlo es necesario contar con una imagen en extensión JPEG en blanco y negro, acceder al software e importarlo con la ruta: *archivo > importar*, una vez dentro es necesario ajustar los parámetros de coordenadas y dimensiones de la imagen como se muestra en la figura 5.10.

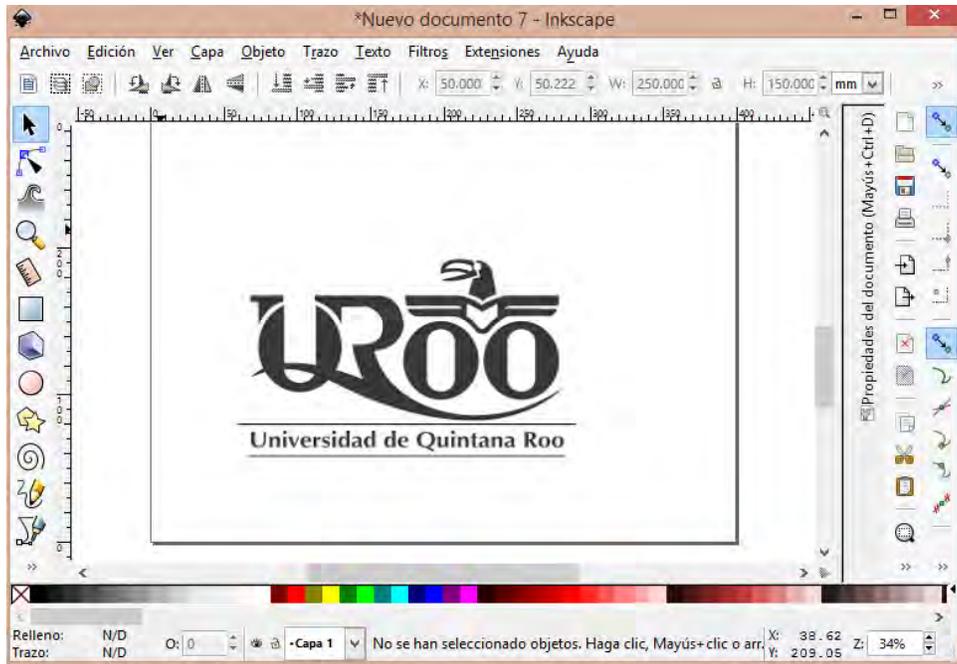


Figura 5.10 Imagen en blanco y negro importada al Inkscape para su transformación en código-G.

Lo siguiente es trazar el contorno de la imagen para así obtener la ruta del láser, para ello hay que acceder a la ruta: *Trazo > Vectorizar mapa de Bits*, se abrirá un cuadro de texto donde se utiliza el modo “detección de bordes” actualizamos la imagen y aceptamos para aplicar los cambios, posteriormente se elimina la imagen original que se encontrará debajo de la nueva capa detectada en el borde, el resultado de realizar los pasos antes mencionados se puede apreciar en la figura 5.11.

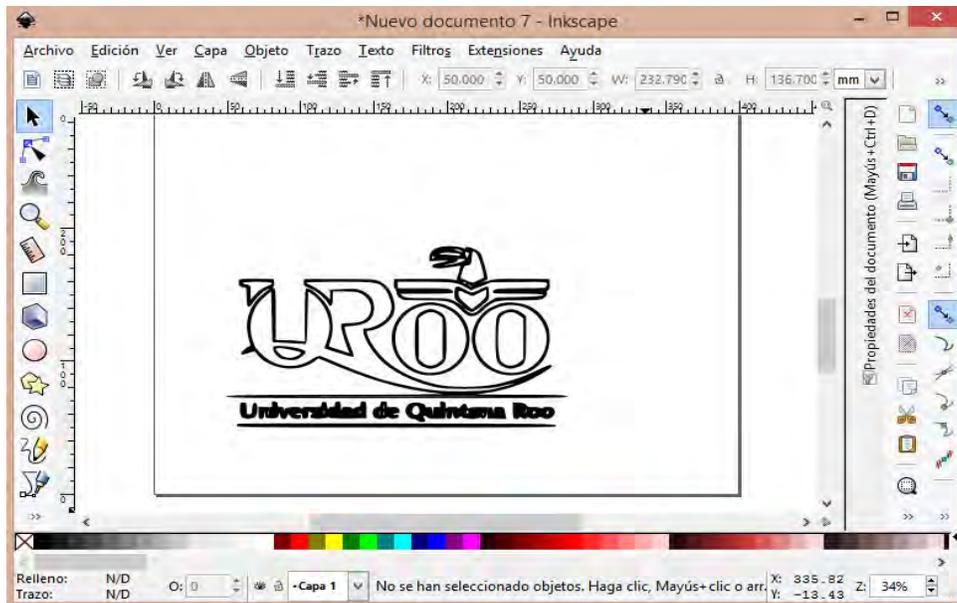


Figura 5.11 Generación de bordes de una imagen para su conversión a código-G.

Convertimos el nuevo objeto a una ruta y seleccionamos la extensión de JTech Photonics para generar el código-G, el resultado final (grabado) se muestra en la figura 5.12 mientras que el código generado se encontrara en el **Anexo 16**.



*Figura 5.12 Ejemplo N°6 de grabado mediante CNC de corte láser sobre triplay.*

### 5.1.3 Corte de los materiales

La realización de corte de un material mediante láser resulta un tanto más compleja que el grabado, aunque en ambas, las propiedades físicas, térmicas, ópticas y mecánicas de los materiales juegan un papel importante, en la primera, las características del láser tales como: frecuencia, distancia focal, potencia y velocidad de corte se acentúan más, teniendo que modificar estos valores para encontrar los parámetros de corte adecuados.

En el **Capítulo 3** se mencionó que los materiales que conforman a los componentes internos de una FC son variados, en la UQROO en particular se utilizan materiales económicos y de fácil acceso, entre los cuales se encuentran el Mylar, la tela de carbón, un polímero elaborado dentro de la universidad y Gore-TX® (o teflón). Dichos material representan el objetivo de este estudio debido a que se pretende hallar sus parámetros de corte mediante láser para la manufactura de los componentes de la FC.

Para lograr obtener los parámetros de corte adecuados para cada material el primer paso consistió en calcular la velocidad a la cual se desplazará el láser. Para ello fue necesario conocer el espesor de cada uno de los materiales y el tiempo que tarda el haz de luz en atravesarlos en una condición estática (sin desplazamiento), con estos dos valores y

utilizando la ecuación (3) es posible calcular la primera velocidad de corte que servirá como un parámetro base, el cuál de ser necesario se aumentará (por un múltiplo) o se mantendrá según sea conveniente.

$$V_C = \frac{\varepsilon}{t} \quad (3)$$

Donde  $V_C$  es la velocidad de corte (mm/min),  $\varepsilon$  es el espesor del material en milímetros y  $t$  es el tiempo que tarda el láser en atravesar al material en minutos. El siguiente paso consistió en obtener la potencia correcta a la cuál trabajará el láser para evitar quemar accidentalmente el material, para ello se tomó como parámetro inicial al 100% de la potencia del láser, modificándolo cada 25% de ser necesario hasta encontrar la potencia de corte adecuada.

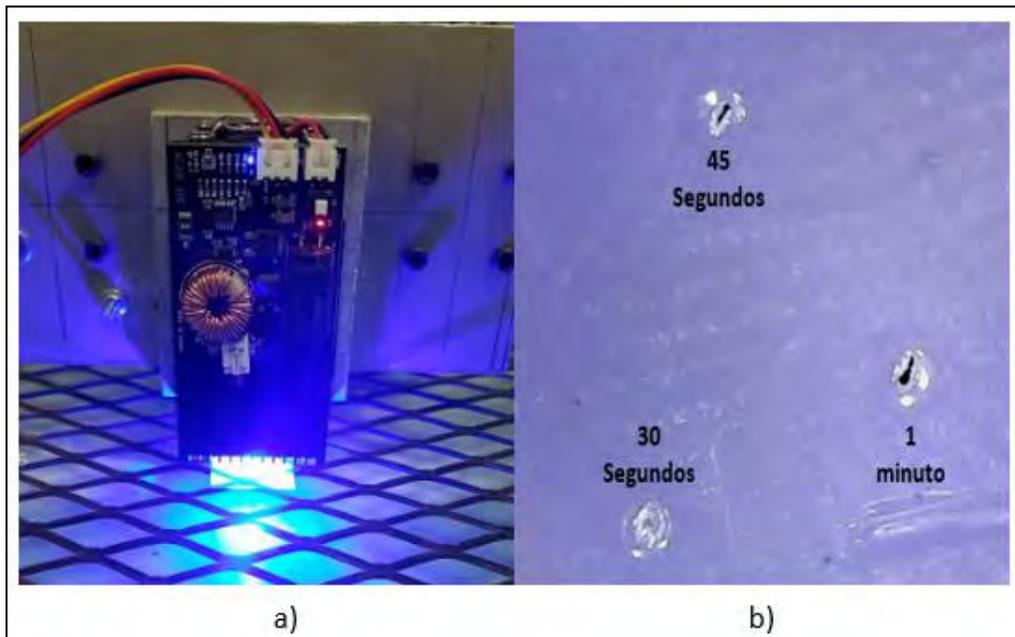
Los resultados por material se mostrarán a continuación.

### *Mylar*

El Mylar es una película de poliéster fabricada con la resina Tereftalato de Polietileno (PET) patentada por Dupont, que ofrece una amplia gama de usos como: embalaje, impresión, electrónica, recubrimiento protector y otras aplicaciones industriales.

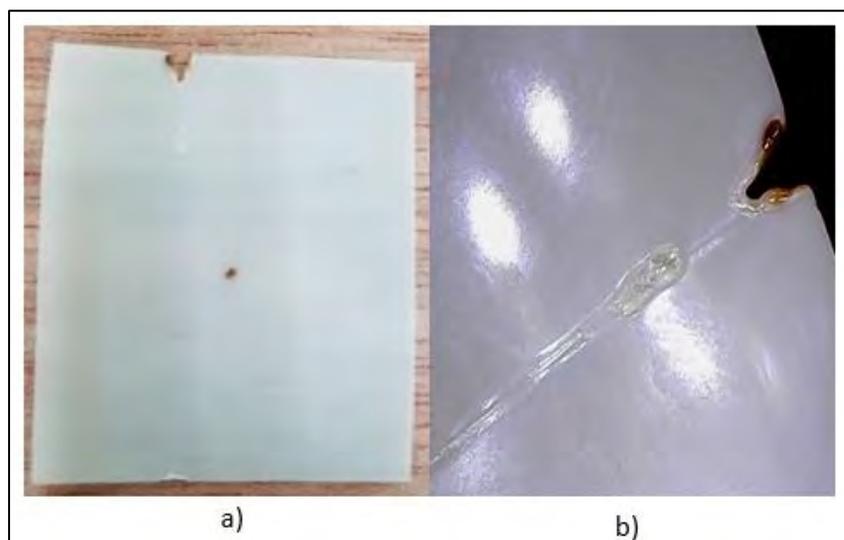
Debido a sus propiedades física inherentes **Anexo 17** el uso del Mylar dentro de una PEMFC es alentador, las aplicaciones que se le otorgan son de placa bipolar y canal de flujo, componentes relativamente pequeños para ser elaborados manualmente, haciendo necesario el uso de una cortadora láser para su manufactura, con lo que se pretende lograr cortes más uniformes y con una gran exactitud.

Para comenzar con las pruebas de corte se posicionó una muestra de Mylar de 30 mm de largo por 30 mm de ancho por 0.2 mm de espesor (dimensiones utilizadas durante todo el estudio) debajo del láser sin presentar ningún desplazamiento (figura 5.13 a) y se midió el tiempo que tardaba el material en perforarse, se realizaron 3 medición a 30 segundos, 45 segundos y 1 minuto observando que el mejor resultado se obtenía a los 45 segundos (figura 5.13 b).



*Figura 5.13 Prueba de traspaso del láser sobre el Mylar donde: a) muestra el posicionamiento de la muestra y b) muestra los resultados de perforación a 30 segundos, 45 segundos y 1 minuto.*

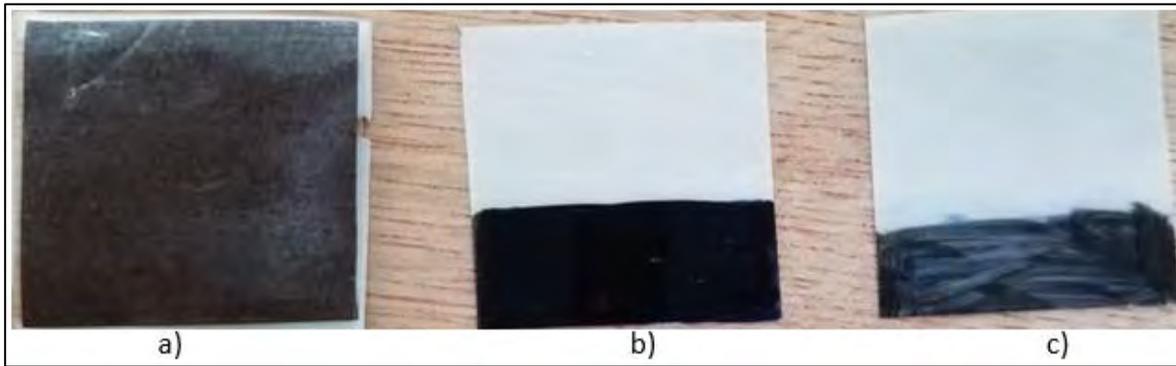
Con los resultados obtenidos se procedió a calcular la velocidad de corte, la cual fue de 0.26 mm/min, sin embargo, debido a que la velocidad más lenta admitida por el software es de 1 mm/min tuvo que realizarse una conversión, pero, al tratarse de una velocidad más rápida el número de pasos de corte aumento de igual manera de 1 a 5 pasos, los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.14.



*Figura 5.14 Resultados del primer corte a 1mm/min y 5 pasos de corte, donde: a) Vista completa del material y b) vista desde microscopio.*

A pesar de realizar el corte con los primeros parámetros calculados, se obtuvo un mal resultado, se observó que el Mylar no pudo ser cortado por el láser y que simplemente se consiguió marcar al material, se observa también una sección calcinada y separada esto es debido a la mesa de trabajo, sin embargo, el problema principal por el cual no se logró cortar el material se debe a sus propiedades físicas.

Debido a las propiedades ópticas del Mylar; este absorbe menos del 20% de la luz emitida por el láser [27], debido a esto es necesario realizar un recubrimiento para oscurecer la superficie del material, en concreto se realizaron 3 recubrimientos diferentes: el primero consistió en uno tipo sándwich utilizando papel contact y un papel oscuro en los extremos (figura 5.15 a); en el segundo y tercero se logró al pintar la superficie del Mylar con plumón permanente (figura 5.15 b) y a base de agua (figura 5.15 c) respectivamente.



*Figura 5.15 Mylars con recubrimiento en su superficie a) papel contact y papel oscuro, b) plumón permanente y c) plumón a base de agua.*

Al tener recubierto al material se procedió a realizar la primera prueba de corte nuevamente, posicionando cada una de las muestras debajo del láser con una condición estática, los resultados obtenidos pueden observarse en la tabla 16.

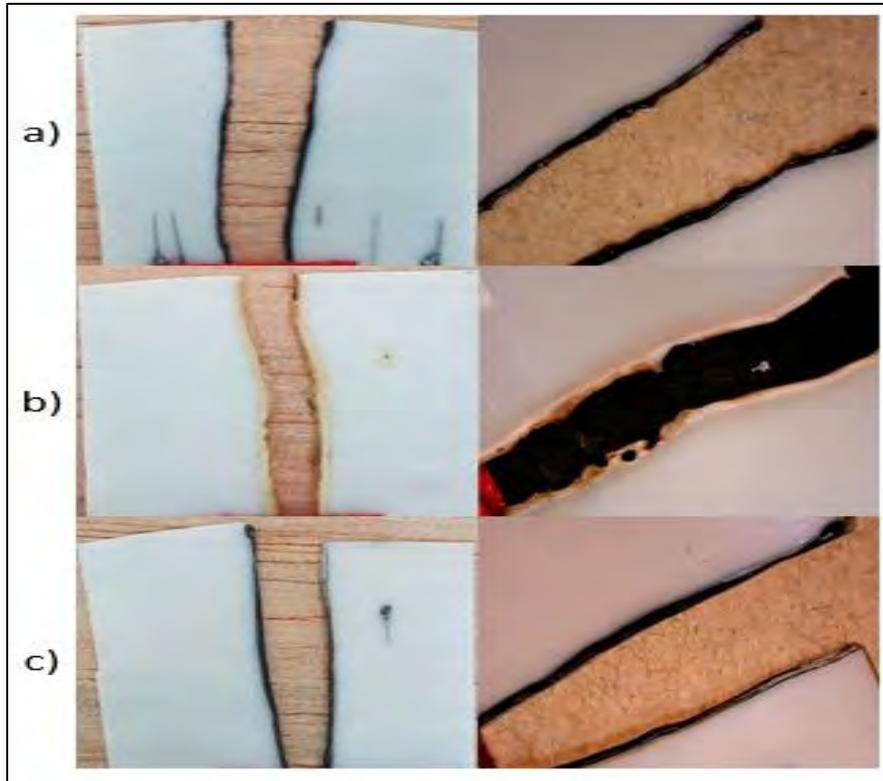
*Tabla 16 Calculo de velocidades para cada condición de recubrimiento.*

Tipo de recubrimiento	Espesor (mm)	Tiempo de traspaso		Velocidad (mm/min)
		Segundos	Minutos	
Sándwich (papel contact y papel oscuro)	0.66	1.89	0.0315	20
Pintado (plumón permanente)	0.2	2	0.0333	6
Pintado (plumón a base de agua)	0.2	0.89	0.0148	13



Como se puede observar, el recubrimiento que presentó una mayor resistencia al traspaso del láser se trató del que estaba pintado con plumón permanente en su superficie, mientras que, por otro lado, el que presentó menor resistencia fue el ensamble tipo sándwich.

Con las velocidades calculadas, se procedió a realizar los respectivos cortes para observar cuál de los tres tipos de recubrimiento presentaba un mejor comportamiento al ser sometido al corte láser, los resultados pueden observarse en la figura 5.16.



*Figura 5.16 Resultados de los cortes utilizando diferentes recubrimientos (derecha vista a través de microscopio, izquierda vista completa) a) plumón permanente, b) ensamble tipo sándwich y c) plumón a base de agua.*

Dentro de los tres posibles candidatos el que mostro un mejor desempeño resulto ser el recubrimiento con plumón a base de agua, como se observa en la figura 5.16 c), este presentó un corte mucho más recto y limpio en comparación con el sándwich y el plumón permanente, aunque los tres mostraron una tendencia de oscurecerse justo en la sección transversal del corte por consecuencia de la fusión del material y el recubrimiento, se decidió probar con diferentes condiciones de velocidad y potencia del láser para encontrar si es posible reducir este resultado.

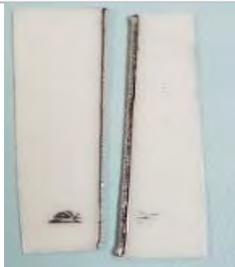
Antes de comenzar a modificar los parámetros de corte, fue necesario ajustar la mesa de trabajo, como se observa en la figura 5.17 se posicionaron dos placas de acero inoxidable separadas entre sí con la finalidad de que el láser y el área de corte queden dentro de dicha separación para así lograr cortes más uniformes.

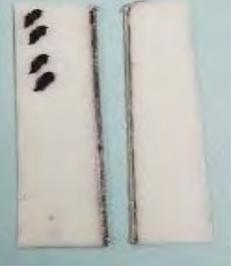
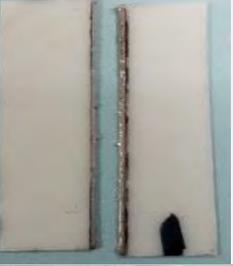


*Figura 5.17* Modificación de la mesa de trabajo con muestra de Mylar recubierta con pintura de plumón a base de agua para su corte.

Los parámetros que se modificaron en los resultados que se mostrarán a continuación fueron, como se mencionó al inicio de este apartado, los de velocidad de desplazamiento, potencia del láser y el número de pasos de corte, en la tabla 17 se pueden observar los cortes y las condiciones necesarias para lograrlos, así como la vista microscópica que avala cuál de todos los parámetros es el indicado para un corte limpio y preciso.

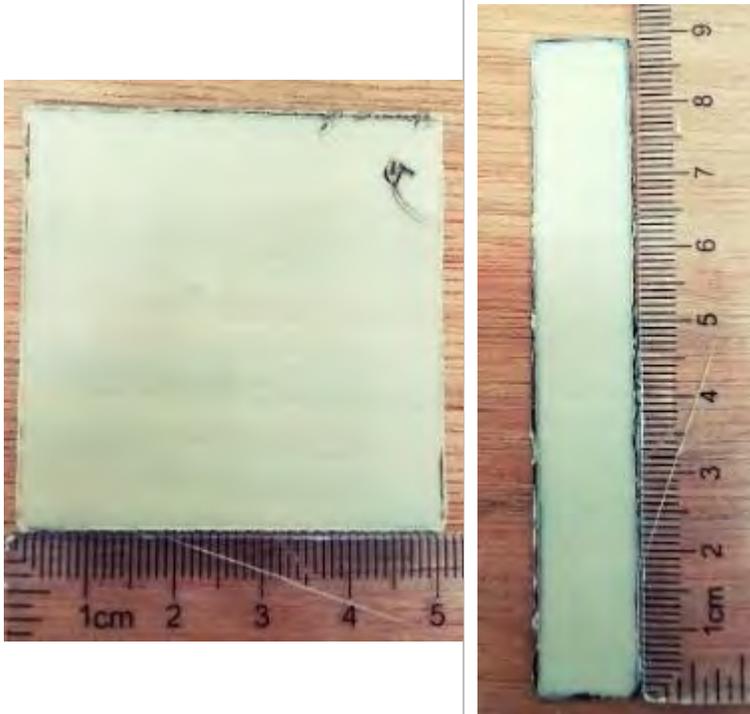
*Tabla 17 Resultados del estudio modificando los parámetros de corte.*

Velocidad mm/min	Número de pasos	potencia laser	Resultado	Vista microscopio
13	1	100%	<b>Figura 5.17 c)</b>	
26	1	100%		
52	1	100%		
78	1	100%		
78	1	75%		
78	1	50%		

85	2	100%		
85	1	75%		
85	1	50%		
104	2	100%		
143	3	100%		
182	3	75%		

Como se observa, los mejores resultados se obtienen con una velocidad que ronde entre los 75 y los 104 mm/min y entre el 100 y 75 % de potencia del láser, con estos resultados es posible realizar cortes siguiendo geometrías un poco más complicadas. Debido al uso del Mylar dentro de la FC y al poco material sobrante para el estudio, se procedió a realizar dos cortes rectangulares de diferentes medidas utilizando los dos parámetros que presentaron mejores resultados en el estudio anterior, en la tabla 18 puede observarse los cortes realizados.

*Tabla 18 Parámetros y cortes de 2 rectángulos de Mylar.*

Parámetros de corte	Rectángulo 1	Rectángulo 2
Dimensiones (largo x ancho en mm)	50 x 50	15 x 90
Velocidad (mm/min)	78	85
Potencia (%)	100	75
Pasos de corte	1	2
Duración del corte (minutos)	02:39	05:34
Resultado		

### *Tela de carbón*

La tela de carbón es uno de los componentes más importantes dentro de una PEMFC ya que es esta la que actuará (junto con la tinta catalítica y la membrana polimérica) como electrodo, por lo que es importante cuidar su corte y posicionamiento dentro de la FC.

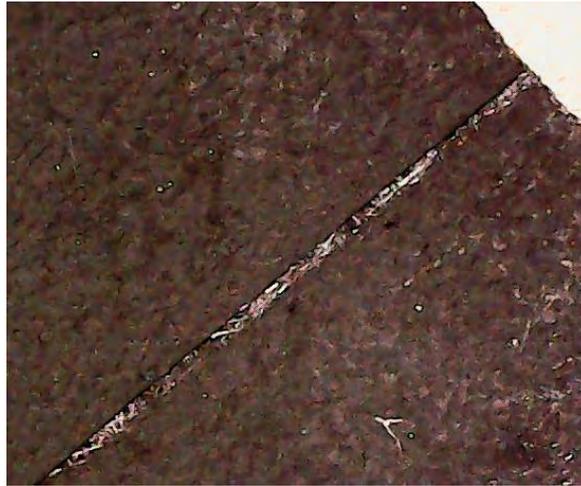
Para el corte de este material se siguieron los pasos descritos anteriormente, primero se posiciono al material y al láser de manera estática para medir el tiempo que a este le tomaría atravesarlo, hay que tener en cuenta que el espesor del material es de apenas 0.30 mm sin embargo, presenta dos caras, una de ellas tiene un recubrimiento de carbono en su superficie mientras que la otra no. Para el caso particular de este material se realizaron las mediciones en ambas caras para poder determinar cuál de las dos presenta un mejor comportamiento al contacto con el láser.

A priori se optó por cortar la cara que no contenía carbón en su superficie, pero al posicionar el láser sobre ella y realizar las mediciones pertinentes (figura 5.18) se obtuvo que de 1 a 2 minutos el láser no pudo atravesar al material, de 2:30 a 3:00 minutos podía observarse en la superficie de la mesa de trabajo una ligera aparición de la reflectancia del haz de luz del láser y a partir del minuto 3:30 el láser atravesaba por completo al material, lo que provocó que se decidiera probar con la cara que contiene carbón en su superficie, la cual arrojó mejores resultados.



*Figura 5.18 Prueba para calcular la velocidad de corte del material.*

Al posicionar la cara con carbono por debajo del láser, a este le tomo apenas 1.5 segundos en atravesarla por completo, teniendo el tiempo y el espesor del material se pudo calcular su velocidad la cual fue de 12 mm/min por lo que se procedió a realizar el corte del material con esta velocidad, los resultados de este corte pueden observarse en la figura 5.19.



*Figura 5.19* Resultado del corte a 12 mm/min sobre la cara recubierta con carbón.

Como se observa en la figura 5.19, a la velocidad calculada y aplicándole 1 paso el material sufrió un corte superficial sin conseguir atravesar por completo al material, sin embargo, al aplicarle presión se logró separar ambos extremos, pero, como se observa en la vista microscópica de la figura 5.20 no se obtuvo un corte limpio, presentándose pequeños hilos de la tela a lo largo de la sección transversal del corte.



*Figura 5.20* Vista microscópica del corte, donde se aprecian los hilos de la tela a lo largo de la sección transversal.

Debido a lo anterior se optó por mantener la misma velocidad (12 mm/min) e intensidad del láser (100%) y aumentar el número de pasos de corte, en concreto fueron necesarios 7 pasos para lograr cortar por completo al material, para una longitud de 10 cm, el corte total tuvo una duración de 32 minutos aproximadamente, los resultados pueden observarse a continuación en la tabla 19.

**Tabla 19** Comparación entre el número de pasos y el resultado obtenido para el corte de la tela de carbón.

Pasos de corte	Duración del corte (minutos)	Resultados
3	13:30	
5	22:30	
7	32:00	



## Sellos

Para evitar cualquier tipo de cruce o fuga de los reactantes (combustible y oxidante) dentro y fuera de la PEMFC, se utilizan dos opciones de materiales que sirven de sello: el elastómero SILASTIC® J y el politetrafluoroetileno (PTFE) GORE-TEX®. Ambos son adecuados para el diseño estructural multidireccional de prototipos debido a su alta resistencia térmica, química y mecánica. Además, son materiales con una alta adaptabilidad dimensional y de uso seguro y fácil [28].

Con el objetivo de lograr un sistema de manufactura automatizada de todos los componentes que conforman a la PEMFC se procedió a encontrar los parámetros de corte adecuados para los sellos, siguiendo la misma metodología descrita, a continuación se describirán los resultados obtenidos.

### Elastómero - SILASTIC® J

Este elastómero es un material que consiste en dos componentes: una base y un agente de curado. Ambos elementos son mezclados (lo que provoca que mediante una reacción de adición se sequen y endurezcan) y colocados sobre moldes prefabricados especialmente para la formación del sello deseado, dando lugar a diferentes geometrías y dimensiones. Para este estudio se trabajó con el polímero que se muestra en la figura 5.21, el cual tiene las siguientes dimensiones: 139.62 mm de largo por 79.88 mm de ancho por 0.25 mm de espesor.

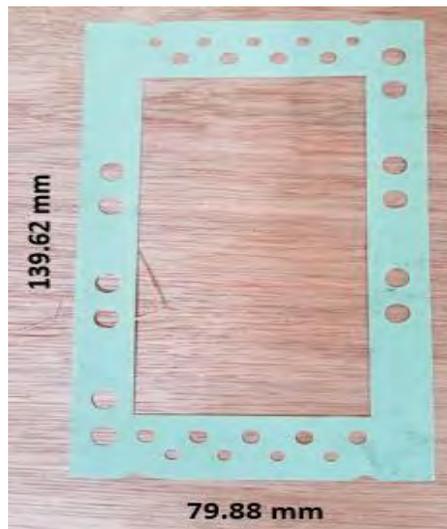


Figura 5.21 Elastómero SILASTIC® J.

Siguiendo los pasos descritos anteriormente con el objetivo de encontrar los parámetros de corte adecuados para este material, primero se posiciono la muestra del polímero por debajo del láser (100% de potencia) y se midió el tiempo que tardaba en atravesarlo, se realizaron cuatro mediciones diferentes a: 10, 25, 45 y 60 segundo donde se obtuvo el mejor resultado de corte, figura 5.22.



*Figura 5.22 Mediciones realizadas para encontrar el tiempo que tarda el láser en atravesar al material.*

Debido a que 1 minuto se considera un tiempo muy largo para atravesar al material (lo que se traduce en un velocidad menor a 1 mm/min), se optó por recubrir la superficie del material con un plumón a base de agua como se realizó en las pruebas para el Mylar. Con esta nueva condición se procedió nuevamente a medir los tiempos de traspaso realizando cuatro mediciones diferentes a: 1, 4, 8 y 10 segundos. En la figura 5.23 se observan los resultados obtenidos.



*Figura 5.23 Mediciones de traspaso del láser con el material recubierto mediante plumón.*

Con esta condición se obtiene un corte más rápido, al láser solo le toma 10 segundos atravesar por completo al polímero en comparación del minuto que tarda sin ningún recubrimiento. Con estos datos fue posible calcular la velocidad de corte, es aproximadamente de 2 mm/min. Una vez obtenido este parámetro se procedió a realizar el seccionamiento del material, el resultado obtenido se muestra en la figura 5.24



*Figura 5.24 Primer corte realizado al elastómero.*

Al realizar el corte con los parámetros calculados no fue posible cortar al material por completo, por lo que se optó por modificar la velocidad de corte y los pasos, dejando la potencia del láser al 100%. En la tabla 20 se enlistan los nuevos parámetros de corte y sus respectivos resultados.

Para el caso en particular de este material se decidió utilizar un submúltiplo de la velocidad calculada y observar cual era el comportamiento del corte, esperando así lograr un mejor resultado, sin embargo, como se observa durante todos los cortes realizados para este material, el láser no lograba atravesarlo por completo.

Para la condición de 2 mm/min y 8 pasos de corte se observa al elastómero cortado, sin embargo, al finalizar dicha prueba no se obtuvo ese resultado, de hecho, el láser no logro atravesar al material, lo que ocasiono su ruptura y separación fue la limpieza posterior al estudio para poder remover la tinta del plumón.

*Tabla 20 Resultados de los cortes del elastómero al modificarle los parámetros de corte.*

<b>Velocidad (mm/min)</b>	<b>Pasos de corte</b>	<b>tiempo de corte (minutos)</b>	<b>resultado</b>
1	1	00:40	
2	1	00:20	Figura 5.25
2	2	00:40	
2	4	01:20	
2	8	02:41	

A pesar de que durante todas las pruebas se logra un corte parcial del material, se observó que la parte posterior del elastómero presentaba una pequeña deformación correspondiente al calentamiento de la superficie del material por la constante incidencia del láser sobre ella, por lo que se optó por pintar la superficie posterior (la cual no se logró cortar) y realizar un corte siguiendo los mismos parámetros que en la cara frontal (la cual se cortó anteriormente), obteniendo los resultados que se observan en la tabla 21.

*Tabla 21 Resultados de los cortes al pintar y cortar ambas caras del elastómero.*

Parámetros de corte	Resultados	
<b>Velocidad (mm/min)</b>	2	2
<b>Pasos de corte por cara</b>	2	4
<b>Duración del corte (minutos)</b>	01:20	02:40
<b>Vista microscópica del corte</b>		

### PTFE

Para sellar la celda, también se utilizó PTFE de la marca Gore-TEX GR®. Este material es 100% PTFE expandido, el cual es un polímero similar al polietileno con la única diferencia en el que los átomos de hidrógeno han sido sustituidos por átomos de flúor. Comercialmente se le conoce con el nombre de teflón y está diseñado exclusivamente para la fabricación de juntas de sellado contra agentes corrosivos, hidrocarburos, oxígeno, gases, etc [28].

Debido a la escasez del material en el laboratorio, se utilizó Teflón expandido comercial (figura 5.25) para realizar las pruebas pertinentes de corte. Las pruebas realizadas y los resultados obtenidos se detallarán a continuación.



*Figura 5.25 Cinta de teflón utilizada en este estudio.*

Al posicionar el material debajo del láser para medir el tiempo que le toma atravesarlo (figura 5.26), durante más de 10 minutos trabajando al 100% de la potencia no se observó ningún cambio en su superficie, esto puede deberse al color blancuzco del teflón el cual refleja la luz del láser impidiendo que se caliente, por ello se optó por pintarlo con plumón a base de agua (ya que este es el que ha mostrado mejor resultados a lo largo del estudio) y realizar la prueba nuevamente logrando así un mejor resultado.



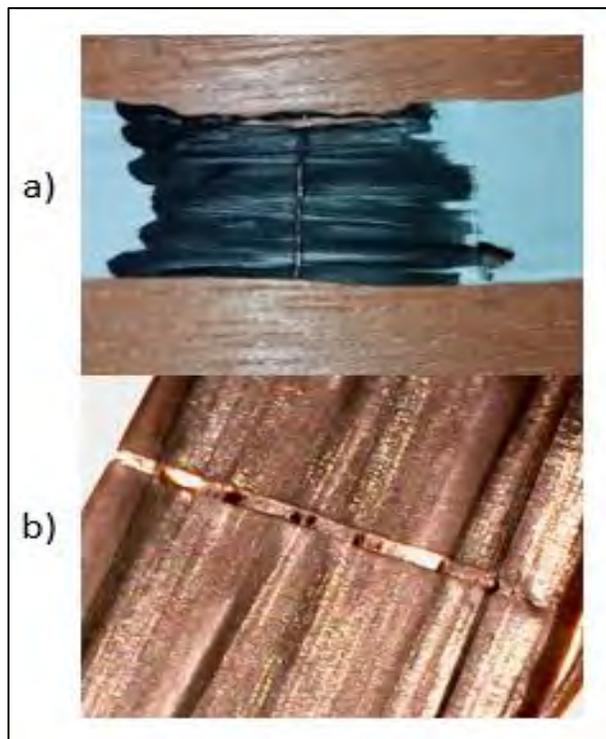
*Figura 5.26 Primera prueba de corte del teflón.*

Al posicionar el PTFE para ser cortado se observó un corte instantáneo. Es importante hacer notar que es imposible remover el recubrimiento (pintura negra) de la superficie del teflón, en la figura 5.27 se muestra la imagen en detalle del corte láser del PTFE con recubrimiento.



*Figura 5.27 Resultado de corte del teflón después de pintar su superficie con plumón negro a base de agua, sin embargo, la pintura no puede ser removida una vez aplicada.*

Por consiguiente para este material, se decidió encontrar la velocidad máxima de corte comenzando con una velocidad de 1 mm/min, la cual se fue aumentando gradualmente hasta alcanzar los 1500 mm/min, donde se comenzó a observar que el láser no lograba cortar completamente al material, en la figura 5.28 a) se observa el resultado del corte, mientras que en la figura 5.28 b) se muestra la imagen a más detalle del PTFE después del corte láser.



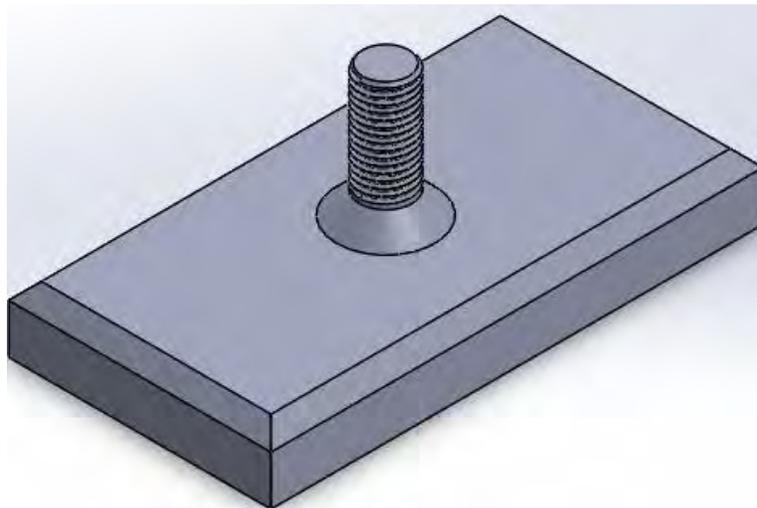
*Figura 5.28 Resultados del corte a 1500 mm/min, donde: a) vista completa del material y b) vista a través del microscopio.*

## 5.2 Control térmico

### 5.2.1 Punzón

El ultimo componente necesario para finalizar la construcción de la prensa termo-neumática es el punzón (figura 5.29), este se encargará de transferir de manera uniforme la presión ejercida por el elemento de fuerza hacia el área de trabajo (la placa térmica). Además, la literatura nos indica que para que exista una correcta unión entre los materiales que conforman la MEA esta debe ser prensada en caliente de manera uniforme, esto quiere decir que tanto la presión como la temperatura deberán ser iguales en ambos extremos, sin embargo, el diseño actual de la prensa solo nos permite generar calor en el extremo inferior (modulo térmico) del área de trabajo.

Como se mencionó el punzón deberá realizar 2 funciones: la primera consiste en ser lo suficientemente resistente para poder transferir la presión del pistón hacia el módulo térmico sin sufrir ninguna deformación o ruptura debido al constante uso; y la segunda, deberá poder calentarse lo suficientemente rápido para alcanzar la temperatura del módulo térmico. En esta sección se analizarán los esfuerzos mecánicos y el análisis térmico que validen el material y diseño que se usará en la manufactura del punzón, el cual consiste en una placa de acero inoxidable AISI 4340 con dimensiones de 150 mm de largo por 80 mm de ancho por 20 mm de espesor, la cual consta de una rosca métrica M16x2 con una altura de 40 mm ubicada exactamente en el centro de la placa lo que le proporciona una simetría que favoreció a los estudios que se presentarán a continuación, los planos para su construcción pueden observarse en el **Anexo 18**.



*Figura 5.29 Punzón propuesto para su implementación en la prensa termo-neumática.*



### 5.2.2 Estudio de esfuerzos mecánicos

Este estudio se realizó en su totalidad con la extensión *Simulations* de SolidWorks, se analizó el acero inoxidable AISI 4340, con el objetivo de asegurar que el componente no presentara fallas relacionadas a la fatiga del material durante el ciclo de trabajo. Se estableció como condición de frontera que la base del punzón es fija, además existe una carga aplicada a la superficie superior de la rosca del punzón sobre el eje vertical.

Para iniciar el estudio se definieron las condiciones a las cuales estará sometido el punzón, las cuales son: fuerza máxima aplicada, la cual es de 18,281 N (1.8 Ton aproximadamente) [19]; el material y sus propiedades físicas, tabla 22; el criterio de fallo aplicado y las condiciones de frontera.

*Tabla 22 Propiedades físicas del acero 4340.*

Material	Propiedades	
<b>Acero AISI 4340 Normalizado</b>	Coefficiente de expansión térmica:	1.23x10 <sup>-5</sup> K
	Módulo cortante:	80,000 MPa
	Límite elástico:	710 MPa
	Conductividad térmica:	44.5 W/(mK)
	Calor específico:	475 J/(kgK)
	Densidad:	7850 kg/m <sup>3</sup>

El criterio de fallo utilizado para este estudio fue el teorema de tensión de Von Mises (VON), este se basa en la teoría de Von Mises-Hencky conocida como teoría de la energía de cortadura. La teoría expone que un material dúctil comienza a ceder en un punto cuando la tensión VON es igual al límite de tensión. En la mayoría de los casos, el límite elástico [29].

La tensión de Von Mises se calcula a partir de las seis componentes de tensión como puede observarse en la ecuación 4.

$$VON = \left\{ 0.5 \left[ (\sigma_x + \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 \right] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

Donde  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  son los esfuerzos normales de cada componente,  $\tau_{xy}$  es el esfuerzo cortante en el plano X, en la dirección Y,  $\tau_{xz}$  es el esfuerzo cortante en el plano X, en la dirección Z y  $\tau_{yz}$  es el esfuerzo cortante en el plano Y en dirección Z. Sin embargo, en su forma equivalente ésta solo considera las tres tensiones principales presentes en el material, la tensión VON se expresa de la siguiente manera:

$$VON = \{0.5[(P_1 - P_2)^2 + (P_1 - P_3)^2 + (P_2 - P_3)^2]\}^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Donde P1 es la primera tensión principal (la mayor), P2 es la segunda tensión principal y P3 es la tercera. La diferencia entre la primera tensión y la tercera (P1-P3), se le llama también intensidad de tensión. A diferencia de los componentes de la tensión, la tensión de VON no tiene dirección. Esta completamente definida por la magnitud con unidades de tensión.

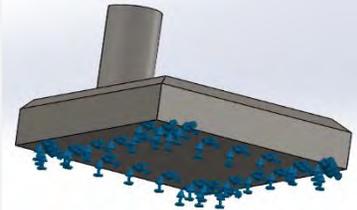
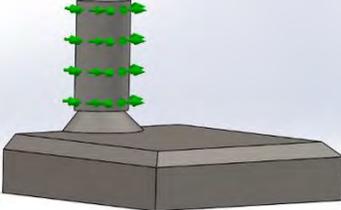
Aunque una tensión de VON en un nodo no define exclusivamente el estado de tensión en ese nodo, proporciona información adecuada para evaluar la seguridad del diseño para múltiples materiales dúctiles.

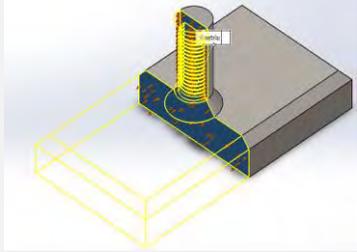
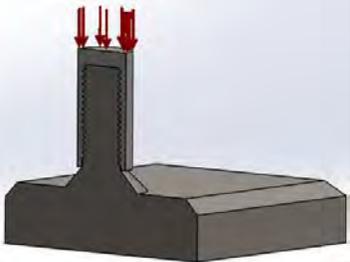
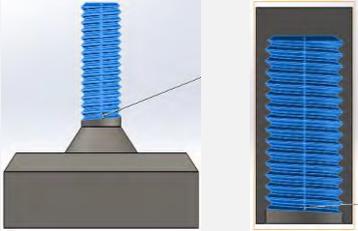
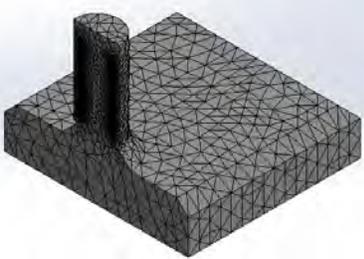
### *Resultados del estudio*

Para el análisis de este modelo se realizó un ensamble entre los dos componentes que conforman el funcionamiento del sistema de compresión, el primero se trata del pistón de la prensa y el segundo es el punzón. Esto es debido a que el objetivo principal de este estudio es conocer el comportamiento entre la rosca del punzón y la cuerda del pistón ya que estos dos componentes se encuentran en contacto, además la rosca es el elemento más pequeño de todo el punzón por lo que es primordial corroborar si el material seleccionado soportará el esfuerzo de compresión en este punto.

Antes de comenzar con las simulaciones del estudio se definieron varias condiciones de frontera, las cuales se mostrarán a continuación en la tabla 23.

*Tabla 23 Condiciones de frontera para el análisis de esfuerzos.*

Condición	Tipo	Descripción	Figura ilustrativa
Sujeciones	Fijo	Base del punzón; con restricción de desplazamiento en cualquiera de los tres ejes.	
	Sobre caras cilíndricas	Pistón; con restricción de desplazamiento radial y circunferencial.	

	Simetría	Al ensamblar los componentes se decidió realizar un corte simétrico para así facilitar el análisis en el software.	
<b>Cargas externas</b>	Fuerza	Se aplico una fuerza de 9141 N (la cuál es la mitad de la fuerza total debido al corte simétrico) en la parte superior del pistón.	
<b>Malla</b>	Control de malla	Se aplicó un control de mallado en los elementos de interés (rosca y cuerda) con el fin de poder crear una malla mucho más fina en estos puntos sin la necesidad de que se presentará en todo en ensamble y así facilita el análisis.	
	Malla	Mallado que presentará el resto del ensamble.	

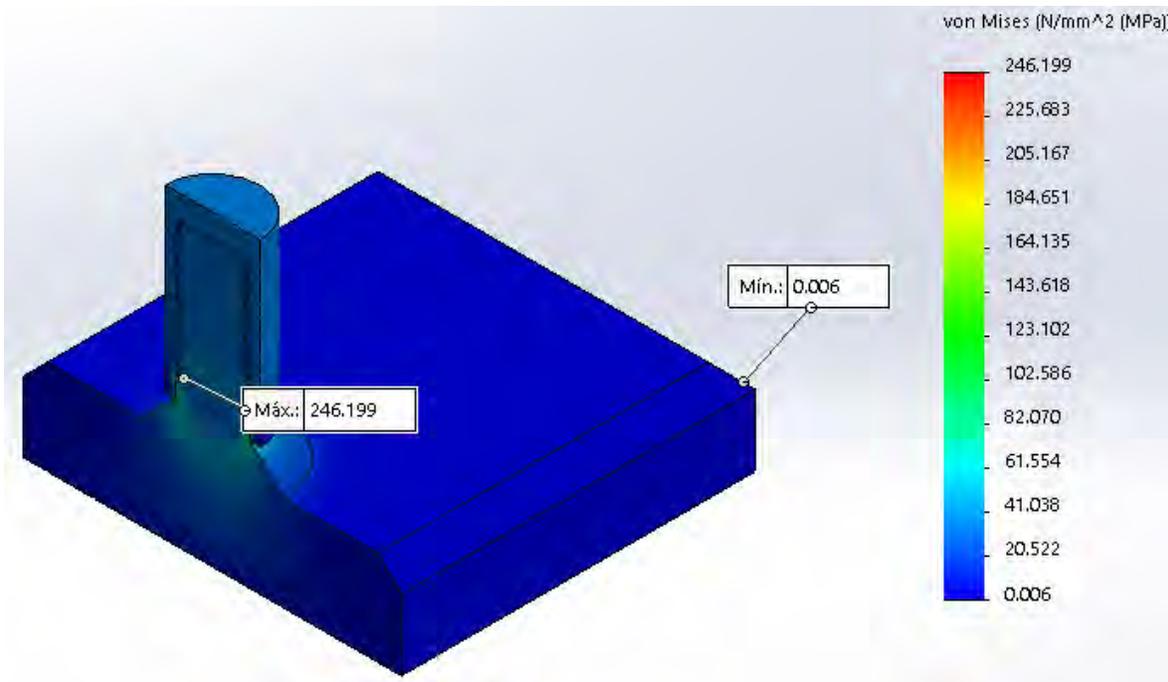
Con las condiciones de frontera correctamente definidas es posible dar comienzo a las simulaciones del análisis de esfuerzos mecánicos, es importante realizar más de una simulación para obtener un resultado confiable ya que se considera que un buen resultado se consigue al comparar dos análisis donde al segundo se le reduzca el tamaño de la malla y que entre ambos exista un margen de error  $\leq 5\%$ .

En este estudio en concreto se realizaron 4 simulaciones en las se aplicó un control de malla fino (en la rosca) reduciendo su tamaño en un 20% entre simulaciones y se mantuvo el mismo tamaño de malla durante todos los análisis, los resultados pueden observarse en la tabla 24.

*Tabla 24 Resultados del análisis de esfuerzos mecánicos sufridos por el punzón.*

Tamaño de la malla	Tamaño control de malla	No. De nodos	No. De elementos	Tiempo de solución	Resultado	Margen de error
6 mm	1 mm	367,322	245,092	21'55''	232.349 MPa	100%
	0.8 mm	360,206	240,086	23'46''	214.289 MPa	7.77%
	0.6 mm	382,477	255,324	22'11''	236.337 MPa	10.28%
	0.5 mm	423,724	282,580	31'09''	246.199 MPa	4.17%

Como se observa en la figura 5.30 la mayor concentración de esfuerzos se ubica en la parte inferior de la rosca del punzón, alcanzando valores de esfuerzo máximo de 246.199 MPa, este resultado es coherente debido a que la rosca del punzón y la cuerda del pistón funcionan como un mismo componente que transmite el esfuerzo de manera uniforme hacia la placa del punzón. Sin embargo, el esfuerzo máximo fue relativamente bajo respecto al límite elástico del material Acero inoxidable AISI 4340 que es de 710 MPa.



*Figura 5.30 Estudio de esfuerzos mecánicos del punzón (Tensiones de Von Mises).*

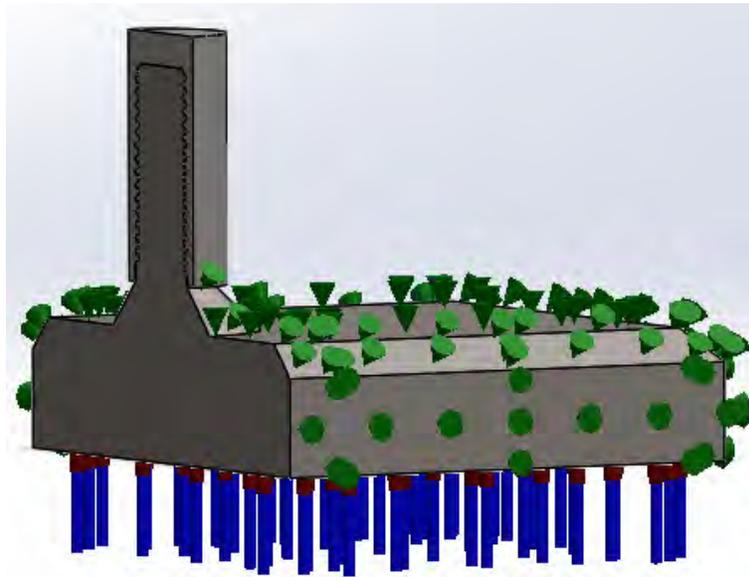
### 5.2.3 Análisis térmico

Como se mencionó al inicio de esta sección, en el proceso de formación microestructural de los electrodos porosos, es necesario aumentar la temperatura durante el proceso de compresión. Los elementos encargados de controlar y aumentar la temperatura del módulo

térmico son las dos termo resistencias Backer y el PT100, estos incrementarán la temperatura de la placa térmica hasta el valor adecuado para iniciar el prensado de la MEA, el cuál ronda entre los 100 y los 130 °C.

Durante el ciclo de prensado el punzón y la placa térmica entran en contacto y debido a esta unión entre ambos metales el primero se calentará a una razón determinada por su coeficiente de transferencia de calor. Como se sabe cuándo un metal es sometido a una temperatura relativamente alta sufre pérdidas y/o cambios en sus propiedades físicas como podrían ser: dilatación, cambios de brillo y color, fundición, entre otros. Debido a esto es fundamental conocer el comportamiento del acero AISI 4340 bajo estas condiciones y corroborar que el punzón no presentará fallas de ruptura.

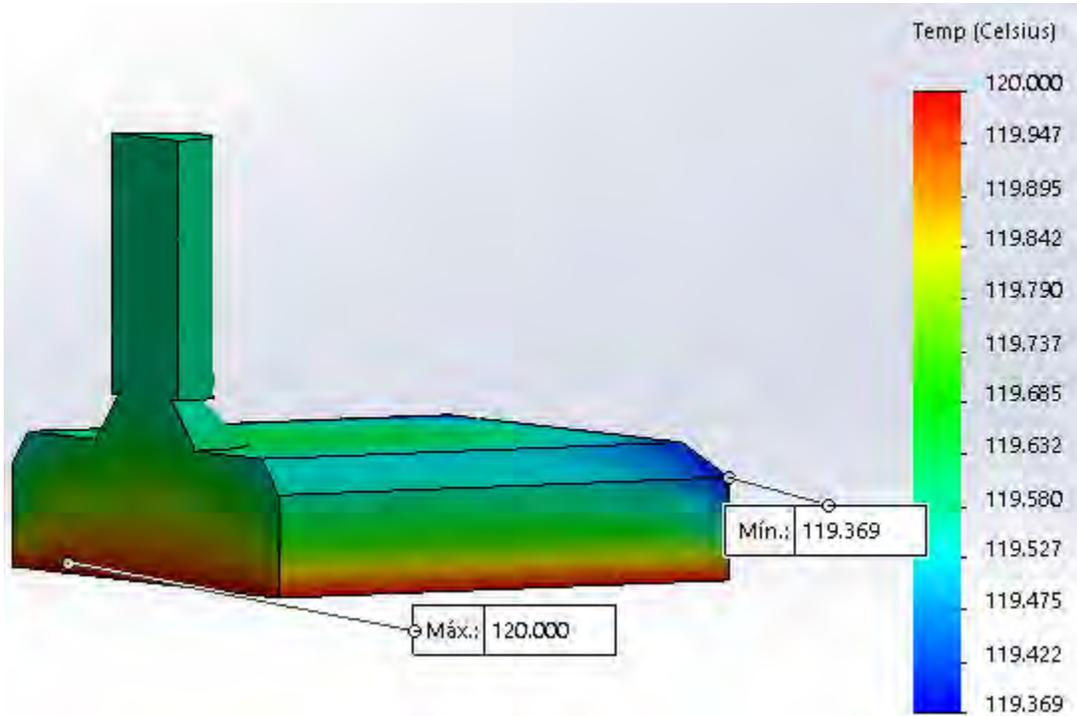
Como condición inicial en el software se modeló el efecto que tendrá la temperatura sobre el material. Para llevar a cabo este estudio se deben obtener los valores de las propiedades térmicas del material del que está compuesto el punzón, estos pueden observarse de igual manera en la tabla 22, así mismo se debe de conocer los valores de temperatura ambiente y coeficientes de convección de la envolvente.



*Figura 5.31 Condiciones iniciales para el análisis térmico.*

Como se observa en la figura 5.31 para este estudio se consideró una temperatura ambiente constante a 25 °C (298.15 K), se optó por utilizar un coeficiente de convección entre los 5 y los 25 W/m<sup>2</sup>K, el cual es el valor máximo para una envolvente de aire estático a temperatura ambiente [30] representado por pirámides verdes ubicadas en las ocho caras expuestas del punzón. De igual forma la placa térmica le suministrará calor constante a la parte inferior del

punzón a una temperatura de 120 °C, el resultado de este modelo puede observarse en la figura 5.32.

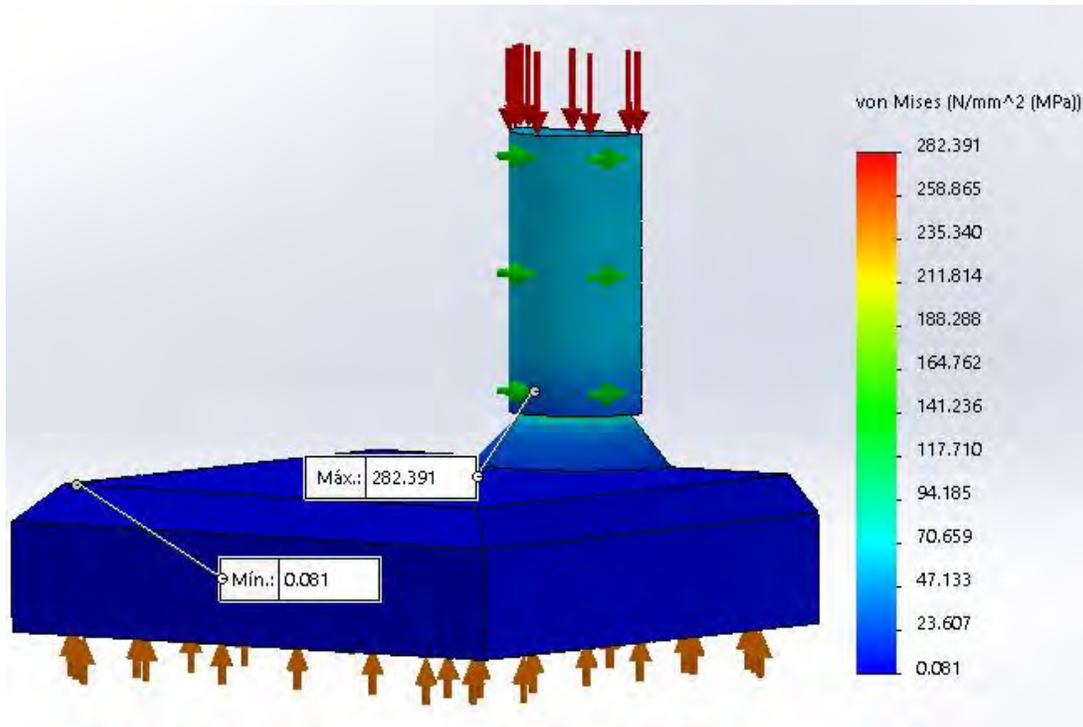


*Figura 5.32 Resultados de las condiciones iniciales del análisis térmico.*

Como puede observarse en la figura 5.32 el punzón presenta una temperatura constante y uniforme de 120 °C  $\pm$ 0.631°C por lo que es posible continuar con el análisis de esfuerzos bajo esta condición.

### *Resultados del estudio*

Para el correcto análisis de este estudio fue necesario modificar únicamente las condiciones de frontera de las sujeciones debido a que el material presenta una dilatación al ser sometido a una temperatura de 120 °C, los cambios realizados se basan principalmente en las restricciones de movimiento, en la cara inferior del punzón (la cual está en contacto con la placa térmica) se restringió el movimiento vertical permitiéndole al material expandirse en cualquier dirección restante. Al pistón se le impidió el movimiento circunferencial otorgándole grados de libertad en los movimientos axial y radial. El resultado de este estudio, así como las restricciones anteriormente descritas pueden observarse en la figura 5.33.



*Figura 5.33 Resultados del análisis térmico y ubicación de las condiciones de frontera donde: flechas verdes representan la restricción circunferencial aplicada al pistón y las flechas marrones representan a la restricción en el eje vertical aplicada a la cara inferior del punzón.*

Los resultados arrojaron que efectivamente el material pierde parte de sus propiedades físicas por lo que la concentración de esfuerzos aumento un 14.7% de los 246.199 MPa obtenidos en el primer estudio (sin calor transferido) a unos 282.391 MPa derivados de este nuevo estudio, sin embargo, el esfuerzo máximo fue de igual manera relativamente bajo respecto al límite elástico del material.

Los estudios confirman el diseño y permiten proceder con la manufactura del punzón para su implementación en la prensa, asegurando durabilidad y seguridad para el usuario. Es importante mencionar que debido al tiempo y a que no se logró encontrar un proveedor que torne la pieza, está se quedó en diseño y simulación.

## CONCLUSIONES

En esta tesis, se ha realizado el estudio para la obtención de los parámetros de corte (mediante el uso de un sistema CNC de corte láser) en los diferentes materiales que conforman a los componentes internos de una PEMFC, para determinar una metodología óptima de preparación en su manufactura que permita obtener cortes limpios y precisos para un mejor desempeño de la FC. Así mismo, se contempló la conceptualización para el diseño del último componente (punzón) del sistema de control térmico de la prensa termo-neumática (sin lograr fabricarlo). Todo ello, con el objetivo de comenzar el ensamble de un sistema automatizado para la manufactura de electrodos porosos y celdas de combustible.

Se encontró que cada material presentaba condiciones diferentes de corte debido a sus propiedades físicas, sin embargo, los parámetros ópticos y el color del mismo material provocaron las mayores complicaciones. Esto debido principalmente al haz de luz del láser utilizado en este trabajo de investigación, lo que ocasionó que sea necesario utilizar un recubrimiento sobre la superficie del Mylar, SILASTIC® J y el teflón.

Para el caso del Mylar se encontró que las mejores condiciones de corte se presentaban cuando la potencia del láser rondaba entre el 100 y el 75 %, y la velocidad del carrito se encontraba entre los 75 y los 104 mm/min. Sin embargo, estos parámetros por si solos no consiguieron cortar al material, debido a sus propiedades ópticas y el hecho de reflejar el 80 % de la luz del láser, fue necesario pintar su superficie con un plumón a base de agua.

La tela de carbón presentó el mayor tiempo de corte de todos los materiales, para conseguir un corte dentro de la muestra utilizada fueron necesarios 32 minutos y 7 pasos a 12 mm/min, que si lo comparamos con el tiempo que tardaría un usuario en cortarlo con un bisturí o tijeras no sería redituable utilizar la máquina para realizar el corte.

En el elastómero SILASTIC® J fue necesario recubrir y cortar ambos lados de la superficie del material que esta en contacto con el láser, esto con el fin de obtener el mejor resultado en corte. Los mejores parámetros para lograrlo se consiguen cuando la potencia del laser es del 100 % y se realizan 2 cortes a 2 mm/min.

El teflón, el cuál sustituyo al Gore-TEX®, fue el material que al pintar su superficie con plumón negro a base de agua presentó las velocidades más rápidas de corte teniendo como limitante 1500 mm/min, sin embargo, debido a sus propiedades físicas, no es posible eliminar la tinta una vez depositada sobre ella. Aunado a esto, su estructura presentaba dificultades de maniobrabilidad, por lo que en ocasiones era tedioso posicionar la muestra sobre la mesa de trabajo.



El diseño del punzón contempló la simulación de la distribución de los esfuerzos mecánicos y térmicos que sufre el componente durante un ciclo de fuerza. Se utilizó el complemento Simulations del software SolidWorks con el fin de determinar de manera numérica los esfuerzos mecánicos máximos del punzón, para prevenir posibles fallas en el material según su límite elástico, lo que valida su correcto funcionamiento de acuerdo con los rangos de operación preestablecidos en el sistema de termo-prensado.

## PERSPECTIVAS

El diseño del CNC propuesto en este trabajo puede considerarse aun en prototipo, esto es debido a que durante las pruebas experimentales la máquina arrojó diversos problemas tanto mecánicos como electrónicos, pudiendo ser posible solucionar la mayoría de ellos, sin embargo, los más significativos deberán ser planificados y trabajados para llegar a obtener un mejor sistema de posicionamiento de muestras.

En el caso de los problemas mecánicos se considera el rediseño de la estructura del sistema CNC, con el fin de lograr una mayor área de trabajo con las mismas dimensiones. Esto implica de igual forma el cambio de la tornillería, debido a las condiciones climatológicas de Chetumal, el uso del acero inoxidable es necesario. Aunado a esto, la implementación de juntas o amortiguadores que separen a la estructura de los motores representaría una reducción en el sonido al momento de realizar los cortes.

Para los problemas ocasionados por la electrónica es de suma importancia cambiar los drivers de los motores DQ542MA por los DQ860MA, esto en vista al mal dimensionamiento de ellos, ya que los motores trabajan a una corriente de 4.2 A y la corriente RMS de los drivers utilizados actualmente es de apenas 3 A, sin embargo, la corriente RMS de los drivers propuestos pueden alcanzar los 4.6 A con un pico de corriente de 7.8 A, lo que los hace idóneos. Así mismo, es importante corroborar la programación de los finales de carrera de la máquina con el fin de hacerlos funcionar cuando la máquina está en movimiento y no solo al llevar el carrito a home.

Finalmente, es de suma importancia manufacturar el punzón e implementarlo en la prensa termo-neumática, para proceder con el desarrollo de las MEAs para su validación microestructural utilizando Microscopía Electrónica de Barrido (SEM).

## ANEXOS

- Anexo 1.** [Localización, capacidad instalada, y generada por energía eólica en México.](#)
- Anexo 2.** [Localización, capacidad instalada y generación de energía eléctrica a base de biomasa en México.](#)
- Anexo 3.** [Electrospray.](#)
- Anexo 4.** [Paquetería de programación.](#)
- Anexo 5.** [Tabla para la configuración de la corriente del controlador.](#)
- Anexo 6.** [Tabla para la configuración de la resolución de los micropasos del controlador.](#)
- Anexo 7.** [Sistema de deslizamiento del CNC de corte láser.](#)
- Anexo 8.** [Planos para la construcción de la placa térmica \[19\].](#)
- Anexo 9.** [Diagrama esquemático RAMPS 1.4.](#)
- Anexo 10.** [Calculadora de micropasos.](#)
- Anexo 11.** [Código-G\\_Ejemplo-1\\_LetrasUniversidad.](#)
- Anexo 12.** [Código-G Ejemplo-2 Espiral.](#)
- Anexo 13.** [Código-G Ejemplo-3 Estrella.](#)
- Anexo 14.** [Código-G Ejemplo-4 Pentágono.](#)
- Anexo 15.** [Código-G Ejemplo-5 Circulo.](#)
- Anexo 16.** [Código-G Ejemplo-6 Logotipo Universidad.](#)
- Anexo 17.** [Tabla de las propiedades del Mylar.](#)
- Anexo 18.** [Planos para la construcción del Punzón.](#)

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Apichai Therdthianwong, Phochan Manomayidthikarn and Supaporn Therdthianwong, "Investigation of membrane electrode assembly (MEA) hot-pressing parameters for proton exchange membrane fuel cell," *ENERGY*, vol. 32, pp. 2401 - 2411, 2007.
- [2] Babar Koraisly et al, «Manufacturing of membrane electrode assemblies for fuel cells,» *Science Direct*, vol. 1, pp. 1 - 13, 2017.
- [3] Gerda Gahleitner, «Hydrogen from renewable electricity: An international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 38, pp. 2039 - 2061, 2013.
- [4] Eduardo Pérez-Denicia et al, «Renewable energy sources for electricity generation in Mexico: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 597 - 613, 2017.
- [5] and A. López-Ortiz et al, "Hydrogen production research in Mexico: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 41, pp. 23363 - 23379, 2016.
- [6] Abdalla M. Abdallaa et al, «Nanomaterials for solid oxide fuel cells: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 353 - 368, 2018.
- [7] Gibrán S.Alemán-Nava et al, «Renewable energy research progress In Mexico: a review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, pp. 140 - 153, 2014.
- [8] Tatiane da Silva Veras et al, «Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, pp. 2018- 2033, 2017.
- [9] Alejandra Elizondo et al, «Futures,» 3 08 2017. [En línea]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.futures.2017.08.003>. [Último acceso: 24 10 2017].
- [10] Q. Hernández-Escobedo et al, «Solar resource assessment for rural electrification and industrial development in the Yucatan Peninsula (Mexico),» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 1550-1561, 2017.
- [11] O. TELLO, MEXICO ENERGY RVIEW, MEXICO: MEXICO BUSINESS PUBLICATION S.A. DE C.V. , 2018.
- [12] Rolando Soler-Bientz et al, «Wind characteristics on the Yucatán Peninsula based on short term data from meteorological stations,» *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 754 - 764, 2010.

- [13] Yoreley Cancino-Solórzano et al, "Current state of wind energy in Mexico, achievements and perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3552 - 3557, 2011.
- [14] Thamo Sutharssan et al, «A review on prognostics and health monitoring of proton exchange membrane fuel cell,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 440-450, 2017.
- [15] A Alaswad et al, «Fuel cell technologies, applications, and state of the art: A reference guide,» *El Sevier*, pp. 1 - 18, 2016.
- [16] Fellipe Sartori da Silva y Teofilo Miguel de Souza, «Novel materials for solid oxide fuel cell technologies: A literature review,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, pp. 26020-26036, 2017.
- [17] M. Paredes, «Análisis y diseño de un prototipo de celda de combustible de alcohol (DAFC) portátil,» de *Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico Superior Progreso*, Progreso, Yucatán, 2016.
- [18] Theo Elmer et al, «Fuel cell technology for domestic built environment applications: State of the art review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 913-931, 2015.
- [19] L. Belin, «Desarrollo de un prototipo de prensa termo-neumatica para fabricación de electrodos porosos,» de *Tesis de licenciatura, Universidad de Quintana Roo*, Chetumal, Quintana Roo, 2016.
- [20] A. Erosa, «Estandarización del metodo de fabricacion de ensambles membrana-electrodos para celdas de combustible tipo PEM,» de *Tesis de Posgrado, Centro de Investigación Científica de Yucatán*, Mérida, Yucatán, 2011.
- [21] Chao-Yang Liu y Chia-Chi Sung, «A review of the performance and analysis of proton exchange membrane fuel cell membrane electrode assemblies,» *Journal of Power Sources*, vol. 220, pp. 348 - 35, 2012.
- [22] Samaneh Shahgaldi et al, «Development of a low temperature decal transfer method for the fabrication of proton exchange membrane fuel cells,» *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, pp. 11813 - 11822, 2017.
- [23] L. H. Sanchez, «Construcción de una máquina fresadora de control numérico,» de *Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México*, Ciudad Universitaria, México, DF, 2011.

- [24] M. R. García, «Diseño y fabricación de una fresadora CNC de 3 ejes para el mecanizado de PCB con plataformas de desarrollo abiertas,» de *Tesis de licenciatura, Universidad Pólitecnica de Cartagena*, Cartagena, 2014.
- [25] H. A. Rios Morales, «Diseño mecánico para la estructura de un router CNC,» de *Tesis de Posgrado, Universidad Nacional Autónoma de México*, Ciudad Universitaria, México DF, 2012.
- [26] S. e. a. Millán Gomez, «Wikipedia "La enciclopedia libre",» 22 Marzo 2017. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Mecanizado\\_con\\_láser](https://es.wikipedia.org/wiki/Mecanizado_con_láser). [Último acceso: 14 Julio 2018].
- [27] Z. e. a. Seres, «Optical Transmission of Mylar and Teflon films,» *Optical Engineering*, vol. 33, nº 9, pp. 3031 - 3033, 1994.
- [28] K.-W. Kuo, «Diseño y validación experimental de una celda de combustible de alta densidad de potencia eléctrica,» de *Tesis de licenciatura, Universidad de Quintana Roo*, Chetumal, Quintana Roo, 2016.
- [29] J. D. Bethune, «Engineering Design and Graphics with SolidWorks,» de *Princice Hall*, Boston, 2010.
- [30] A. C. Yunus et al, *Transferencia de calor y masa 4 edición*, Ciudad de México: McGraw Hill, 2011.
- [31] Natthika Chingtamai et al, «Experimental investigation of electrspray coating technique for electrode fabrication in PEMFCs,» *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1806 - 1812, 2017.
- [32] A. Jaworek y A. Sobczyk, «Electrospraying route to nanotechnology: An overview,» *Journal of Electrostatics*, vol. 66, pp. 197-219, 2008.

PAGINA EN BLANCO