



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Efectos de la corriente sobre el cono de Taylor durante el electrohilado**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniera Mecatrónica**

**P R E S E N T A**

Daphne Carolina Meixueiro Alvarez

**DIRECTOR DE TESIS**

Dra. María del Pilar Corona Lira



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2016**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

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

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

# DEDICATORIA

# AGRADECIMIENTOS

A mi asesora de Tesis, la Dra. María Del Pilar Corona Lira, investigadora del Sistema Nacional de Investigadores. Gracias por el tiempo y el apoyo que me ha dado durante el desarrollo de este trabajo, sin usted no hubiese sido posible. Gracias por las múltiples correcciones y consejos, que sin duda me ayudaron y ayudarán a tener una mejor formación a nivel profesional y personal.

Un especial agradecimiento a mis sinodales de tesis: M.I Serafín Castañeda Cedeño, Dr. Vicente Borja Ramírez, M.I Hanna Leslye García Guerra y Dra. Alba Covelo Villar, por haberse tomado el tiempo de revisar y corregir este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente a la Facultad de Ingeniería, por brindarme las herramientas, el conocimiento y el apoyo desinteresado, durante mi carrera universitaria y el desarrollo de esta tesis.

También quiero agradecer a mi familia y amigos por siempre motivarme a dar lo mejor de mí y no rendirme.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), de título “Desarrollo y caracterización de nanofibras mediante la técnica de electrohilado aplicado en sistemas químico-biológicos” y clave IN114316.

# ÍNDICE GENERAL

Abstract .....	7
Resumen .....	8
Acrónimos y Nomenclaturas .....	9
Índice de Figuras .....	10
Índice de Tablas .....	14
Objetivos .....	15
Introducción .....	16

## CAPÍTULO I. SISTEMA DE ELECTROHILADO 18

1.1 Panorama histórico de los sistemas para electrohilado .....	18
1.2 Generalidades de los sistemas para electrohilado .....	20
1.3 Estado del arte .....	25
1.3.1 Análisis de patentes para sistemas de electrohilado .....	25
1.3.2 Benchmarking .....	28

## CAPÍTULO 2. DISEÑO CONCEPTUAL 30

### SOPORTE PARA MICROSCOPIO DIGITAL

2.1 Definición del problema .....	30
2.2 Identificación de las necesidades .....	31
2.3 Definición de los requerimientos .....	32
2.4 Definición de las especificaciones .....	33
2.5 Generar alternativas .....	35
2.5.1 Bocetos y análisis de las alternativas .....	35
2.6 Selección y análisis de la alternativa elegida .....	37
2.7 Modelo funcional .....	38

### BASE DEL SENSOR DE CORRIENTE

2.8 Definición del problema .....	42
2.9 Identificación de las necesidades .....	42
2.10 Definición de los requerimientos .....	43
2.11 Definición de las especificaciones .....	43
2.12 Generar alternativas .....	45

2.12.1	Bocetos y análisis de las alternativas .....	45
2.13	Selección y análisis de la alternativa elegida .....	46
2.14	Modelo funcional .....	47

### CAPÍTULO 3. DISEÑO MECÁNICO 51

#### SOPORTE PARA MICROSCOPIO DIGITAL

3.1	Diseño en CAD .....	51
3.2	Especificaciones finales .....	56
3.3	Presentación del prototipo final .....	59

#### BASE DEL SENSOR DE CORRIENTE

3.4	Diseño en CAD .....	60
3.5	Especificaciones finales .....	61
3.6	Presentación del prototipo final .....	63

### CAPÍTULO 4. DISEÑO ELECTRÓNICO 64

#### MICROSCOPIO DIGITAL

4.1	Descripción general .....	64
4.2	Pruebas de herramientas de visión .....	64
4.3	Selección de la herramienta de visión .....	71

#### SENSOR DE CORRIENTE

4.4	Descripción general .....	73
4.5	Selección del sensor .....	74
4.5.1	Matriz de selección .....	74

### CAPÍTULO 5. SECCIÓN EXPERIMENTAL 78

5.1	Configuración experimental .....	78
-----	----------------------------------	----

### CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 79

6.1	Descripción general .....	79
6.2	Resultados y análisis de resultados .....	82
6.2.1	Aumento de la corriente .....	82
6.2.2	Corriente constante .....	84
6.2.3	Disminución de la corriente .....	87

6.3 Andamios de fibras resultantes .....	91
--	----

<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES</b>	<b>94</b>
---------------------------------	-----------

7.1 Conclusiones .....	94
------------------------	----

7.2 Trabajo a futuro .....	96
----------------------------	----

<b>REFERENCIAS</b>	<b>97</b>
--------------------	-----------

<b>REFERENCIAS DE FIGURAS</b>	<b>98</b>
-------------------------------	-----------

<b>REFERENCIAS DE TABLAS</b>	<b>99</b>
------------------------------	-----------

<b>ANEXOS</b>	<b>100</b>
---------------	------------

Anexo A. QFD .....	100
--------------------	-----

Anexo B. Planos .....	102
-----------------------	-----

Anexo C. Planos explosivos .....	114
----------------------------------	-----

Anexo D. Código de Arduino .....	116
----------------------------------	-----

Anexo E. Programa de Vision Builder .....	118
---	-----

## ABSTRACT

This work presents the design of a vision system for the electrospinning process, which will allow to observe the formation of the Taylor cone and a bit of the jet. At the same time, it will be used a current measurement system to see the effects of the current in the Taylor cone.

At the beginning it will be introduced some basic terms to get to know the electrospinning process, from the operating principle, the different existent settings, which applications does it have, which stages does it have, among other things.

After all the mentioned above, it will continue with the conceptual design from the vision system and the current measurement system, where it will be explained the problem definition, the possibles requirements and specifications, the final choice of the designs, among others. Eventually it will be explained the mechanics of both systems, such as the CAD designs and the final requirements and specifications. Also, it will have sections for the electronics and the programming that were used for the currents sensor.

Finally it will have a section for the results, the results analysis, the conclusions and the annexes.

# RESUMEN

Este trabajo presenta el diseño de un sistema de visión para el proceso de electrohilado que permite observar la formación del cono de Taylor y una pequeña parte del jet. A la par del sistema de visión se utilizó un sistema de medición de corriente para ver los efectos que tiene directamente con el cono de Taylor.

Al inicio se presentan definiciones básicas para familiarizarse con el proceso del electrohilado desde el principio de funcionamiento, el tipo de configuraciones que existen, qué aplicaciones tiene, qué etapas lo conforman, entre otros.

Después de lo mencionado se continua con la parte de diseño conceptual del sistema de visión y el de medición de corriente en donde se explica la definición del problema, los posibles requerimientos y especificaciones, la elección final de los diseños, etc. Eventualmente se detalla la parte mecánica de los dos sistemas, como los diseños en CAD y la determinación de los requerimientos y las especificaciones finales. También se presentan apartados de la parte electrónica y de programación que se utilizaron para el sensor de corriente.

Posteriormente se presenta la sección de los resultados, el análisis de los mismos y finalmente, las conclusiones y los anexos.

# ACRÓNIMOS Y NOMENCLATURA

UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
FI	Facultad de Ingeniería
QFD	Despliegue de la función de calidad (del inglés <i>Quality Function Deployment</i> )
MDF	Tablero de fibra de densidad media (del inglés <i>Medium Density Fibreboard</i> )
CAD	Diseño asistido por computadora (del inglés <i>Computer-Aided Drafting</i> )
AWG	Galga americana para cables (del inglés <i>AWG – American Wire Gauge</i> )
USB	Bus Universal en Serie (del inglés <i>USB – Universal Serial Bus</i> )
SEM	Microscopio electrónico de barrido (del inglés <i>SEM – Scanning Electron Microscopy</i> )
NFES	Electrohilado de campo cercano (del inglés <i>NFES – Near Field Electrospinning</i> )
PVA	Acetato de polivinilo
PLA	Ácido Poliláctico
PGA	Ácido Poliglicólico
PLGA	Ácido Poliláctico-co-glicólico
PCL	Policaprolactona
kV	Kilovolts
OTFT	Transistores orgánicos de fibras finas (del inglés <i>OTFT – Organic Thin-Film Transistor</i> )
V	Volts
A	Amperes
Min	Minutos
LEDS	Diodo emisor de luz (del inglés <i>LED – Light Emitting Diode</i> )
PEO	Óxido de polietileno

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura [1.1]. Resultado del experimento realizado por Zeleny. ....	18
Figura [1.2]. Rango de operación del campo eléctrico aplicado y la distancia entre la aguja de la jeringa y el colector. ....	19
Figura [1.3]. SEM del canal fabricado. ....	20
Figura [1.4]. Observaciones experimentales del sistema propuesto de electrohilado. ....	20
Figura [1.5]. Representación de un sistema de electrohilado (Horizontal Type). ....	21
Figura [1.6]. Representación de un sistema de electrohilado (Shaft Type). ....	21
Figura [1.7]. Etapas fundamentales del proceso de electrohilado. ....	22
Figura [2.1]. Metodología de diseño VDI 2222. ....	30
Figura [2.2]. Resultados obtenidos del QFD. ....	34
Figura [2.3]. Primer boceto de la base del soporte para el microscopio. ....	35
Figura [2.4]. Fragmento de Tabla 2.1 de Necesidades. ....	35
Figura [2.5]. Fragmento de Tabla 2.1 de Necesidades. ....	36
Figura [2.6]. Segundo boceto de la base del soporte para el microscopio. ....	36
Figura [2.7]. Boceto del soporte del microscopio. ....	37
Figura [2.8]. Modelo funcional del soporte del microscopio. ....	38
Figura [2.9]. Modelo funcional del soporte del microscopio con el microscopio (Vista superior). ....	39
Figura [2.10]. Modelo funcional del soporte del microscopio con el microscopio (Vista frontal). ....	39
Figura [2.11]. Modelo funcional de las llaves. ....	40
Figura [2.12]. Modelo funcional de las llaves colocadas juntas. ....	40
Figura [2.13]. Modelo funcional de las llaves colocadas juntas en diferente perspectiva. ....	40
Figura [2.14]. Modelo funcional de la base del soporte. ....	41
Figura [2.15]. Modelo funcional de la base del soporte con patas triangulares. ....	41
Figura [2.16]. Resultados obtenidos del QFD. ....	44
Figura [2.17]. Primer boceto de la base del sensor de corriente. ....	45
Figura [2.18]. Fragmento de Tabla 2.5 de Necesidades. ....	45
Figura [2.19]. Segundo boceto de la base del sensor de corriente. ....	46
Figura [2.20]. Fragmento de Tabla 2.5 de Necesidades. ....	46
Figura [2.21]. Modelo funcional cilíndrico de la base del sensor de corriente. ....	47

Figura [2.22]. Modelo funcional cilíndrico: a) espacio disponible para los caimanes que medirán la corriente; b) espacio disponible para los cables que se conectarán al controlador. ....	47
Figura [2.23]. Modelo funcional cilíndrico en el interior. ....	48
Figura [2.24]. Modelo funcional cilíndrico con el sensor. ....	48
Figura [2.25]. Modelo funcional cúbico de la base del sensor de corriente. ....	49
Figura [2.26]. Modelo funcional cúbico: a) espacio disponible para los caimanes que medirán la corriente; b) espacio disponible para los cables que se conectarán al controlador. ....	49
Figura [2.27]. Modelo funcional cúbico con el sensor. ....	50
Figura [3.1]. CAD de las piezas del soporte para el microscopio (a-n). ....	51-53
Figura [3.2]. Indicadores de la posición de las piezas en el soporte para el microscopio. ....	54
Figura [3.3]. Soporte para el microscopio (Vista superior). ....	55
Figura [3.4]. Soporte para el microscopio (Vista frontal). ....	55
Figura [3.5]. Soporte para el microscopio (Isométrico). ....	55
Figura [3.6]. Altura del soporte para el microscopio. ....	56
Figura [3.7]. Largo del soporte para el microscopio. ....	56
Figura [3.8]. Ancho del soporte para el microscopio. ....	57
Figura [3.9]. Escala de contrastes. ....	58
Figura [3.10]. Prototipo final del soporte para el microscopio. ....	59
Figura [3.11]. Prototipo final del soporte para el microscopio dentro de la cabina para electrohilar. ....	59
Figura [3.12]. CAD de las piezas de la base del sensor de corriente (a-d). ....	60
Figura [3.13]. Indicadores de la posición de las piezas en la base del sensor de corriente. ....	60
Figura [3.14]. Base del sensor de corriente (a-c). ....	61
Figura [3.15]. Altura de la base del sensor de corriente. ....	62
Figura [3.16]. Largo de la base del sensor de corriente. ....	62
Figura [3.17]. Ancho de la base del sensor de corriente. ....	62
Figura [3.18]. Base del sensor de corriente. ....	63
Figura [4.1]. Microscopio digital GAM-100®. ....	65
Figura [4.2]. Cabello visto desde el microscopio GAM-100®. ....	65
Figura [4.3]. Cámara digital Nikon Coolpix P600®. ....	66
Figura [4.4]. Matriz de LEDS utilizada para las pruebas. ....	67
Figura [4.5]. Matriz de LEDS utilizada para las pruebas dentro de la cabina de pruebas. ....	67
Figura [4.6]. Imagen resultante utilizando la cámara Nikon® y LEDS. ....	68

Figura [4.7]. Lámpara de halógeno utilizada para las pruebas. ....	68
Figura [4.8]. Imagen resultante utilizando la cámara Nikon® y lámpara de halógeno. ....	69
Figura [4.9]. Microscopio digital USB 800x. ....	70
Figura [4.10]. Imagen resultante utilizando el microscopio digital de 800x. ....	70
Figura [4.11]. Imagen resultante utilizando el microscopio digital de 800x (Parte 2). ....	71
Figura [4.12]. Microscopio encima de la aguja de la jeringa. ....	71
Figura [4.13]. Microscopio encima de la aguja de la jeringa durante el proceso. ....	72
Figura [4.14]. Imagen obtenida del microscopio durante la prueba realizada con PVA. ....	72
Figura [4.15]. Visualización del cono de Taylor (Nylon 66) mediante el microscopio. ....	73
Figura [4.16]. Microcontrolador Arduino MEGA 2560®. ....	74
Figura [4.17]. Sensor de corriente ACS714. ....	75
Figura [4.18]. Conexión del sensor al Arduino. ....	76
Figura [5.1]. Dibujo de la configuración utilizada. ....	78
Figura [6.1]. Función Simulate Acquisition de Vision Builder®. ....	80
Figura [6.2]. Función Vision Assistant de Vision Builder®. ....	80
Figura [6.3]. Función Calibrate Images de Vision Builder®. ....	81
Figura [6.4]. Función Find Edges de Vision Builder®. ....	81
Figura [6.5]. Efectos del aumento de corriente en el cono de Taylor: a), b), c) (a). ....	82
Figura [6.6]. Gráfica de efectos del aumento de corriente en el cono de Taylor (a). ....	83
Figura [6.7]. Efectos del aumento de corriente en el cono de Taylor: a), b), c), d) (b). ....	83
Figura [6.8]. Gráfica de efectos del aumento de corriente en el cono de Taylor (b). ....	84
Figura [6.9]. Efectos de la corriente constante en el cono de Taylor: a), b), c) (a). ....	85
Figura [6.10]. Gráfica de efectos de corriente constante en el cono de Taylor (a). ....	85
Figura [6.11]. Efectos de la corriente constante en el cono de Taylor: a), b), c), d), e), f) (b). ....	86
Figura [6.12]. Gráfica de efectos de corriente constante en el cono de Taylor (b). ....	87
Figura [6.13]. Efectos de la disminución de corriente en el cono de Taylor: a), b), c) (a). ....	88
Figura [6.14]. Gráfica de efectos de la disminución de corriente en el cono de Taylor (a). ....	89
Figura [6.15]. Efectos de la disminución de corriente en el cono de Taylor: a), b), c) (b). ....	89
Figura [6.16]. Gráfica de efectos de la disminución de corriente en el cono de Taylor (b). ....	90
Figura [6.17]. Efectos de la disminución de corriente en el cono de Taylor: a), b), c) (c). ....	90
Figura [6.18]. Gráfica de efectos de la disminución de corriente en el cono de Taylor (c). ....	91
Figura [6.19]. Andamio de fibras durante el proceso de electrohilado. ....	92

Figura [6.20]. Andamios de fibras resultantes. ....	92
Figura [6.21]. Andamios de fibra siendo retirados del papel aluminio. ....	93
Figura [6.22]. Andamios de fibras siendo retirados con las pinzas. ....	93

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla [1]. Aplicaciones del proceso de electrohilado. ....	23
Tabla [2.1]. Identificación de las necesidades. ....	31
Tabla [2.2]. Definición de los requerimientos. ....	32
Tabla [2.3]. Definición de las especificaciones. ....	33
Tabla [2.4]. Importancia y tolerancias de las especificaciones. ....	33-34
Tabla [2.5]. Identificación de las necesidades. ....	42
Tabla [2.6]. Definición de los requerimientos. ....	43
Tabla [2.7]. Definición de las especificaciones. ....	43-44
Tabla [2.8]. Importancia y tolerancias de las especificaciones. ....	44
Tabla [3.1]. Especificaciones finales del soporte para el microscopio (Parte 1). ....	57
Tabla [3.2]. Especificaciones finales del soporte para el microscopio (Parte 2). ....	58
Tabla [3.3]. Especificaciones finales de la base del sensor de corriente. ....	63
Tabla [4.1]. Especificaciones microscopio digital GAM-100®. ....	64
Tabla [4.2]. Especificaciones cámara digital Nikon Coolpix P600®. ....	66
Tabla [4.3]. Especificaciones microscopio digital. ....	69
Tabla [4.4]. Especificaciones del Arduino MEGA®. ....	73
Tabla [4.5]. Matriz de selección. ....	75
Tabla [4.6]. Especificaciones del sensor de corriente ACS714®. ....	75-76
Tabla [5.1]. Datos que se utilizaron en las pruebas. ....	78
Tabla [6.1]. Datos de efectos de aumento de la corriente en el cono de Taylor (a). ....	82
Tabla [6.2]. Datos de efectos de aumento de la corriente en el cono de Taylor (b). ....	84
Tabla [6.3]. Datos de efectos de la corriente constante en el cono de Taylor (a). ....	85
Tabla [6.4]. Datos de efectos de la corriente constante en el cono de Taylor (b). ....	87
Tabla [6.5]. Datos de efectos de la disminución de la corriente en el cono de Taylor (a). ....	88
Tabla [6.6]. Datos de efectos de la disminución de la corriente en el cono de Taylor (b). ....	90
Tabla [6.7]. Datos de efectos de la disminución de la corriente en el cono de Taylor (c). ....	91

## OBJETIVOS

Diseñar un sistema de visión y de monitoreo de la variación de la corriente directa, con el fin de observar y evaluar los efectos que se tienen en el diámetro del cono de Taylor durante el proceso de electrohilado. Ambos sistemas deben ser capaces de trabajar bajo condiciones de un campo eléctrico de gran magnitud (5 – 20 kV).

# INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente trabajo surge por la necesidad de un desarrollo en el Área de Nanotecnología, lo que permitirá futuras mejoras a la actual necesidad de creación de tejidos, sistemas de administración de fármacos, sensores en escala nanométrica, entre otros.

La parte de los tejidos es una aplicación muy usada en el proceso de electrohilado y ya se han diseñado y utilizado para células endoteliales (células vasculares), injertos de piel y otros tejidos humanos. También se está teniendo mucha aplicación en los sistemas de administración de fármacos por vía oral y parenteral (inyecciones intramusculares e intravenosas) y la ventaja que se presenta con éstos es que el medicamento actuaría solamente en el sitio de acción (lugar necesitado), sin afectar a otros órganos o partes del cuerpo. Cabe mencionar que el electrohilado en estas aplicaciones utiliza polímeros biodegradables tales como PVA, PLA, PGA, PLGA, PCL, entre otros .

Debido a la escala en la que se trabaja (micro o nanométrica) la idea de visualizar el proceso resulta ambiciosa y cara de realizar. Los equipos que suelen utilizarse para observar el cono de Taylor y el jet son cámaras de alta velocidad o cámaras CCD o dispositivos de carga acoplada, que son equipos de gran costo pero que permiten observar el proceso. Para poder observar los andamios de las fibras que se crearon es necesario el uso de los SEM.

La problemática que se tiene con este proceso es que se tiene un campo eléctrico alto, en el rango de kilovolts, por lo que se tiene que lidiar con un campo de gran magnitud así que cualquier dispositivo que se desee utilizar debe de estar aislado.

El contar con un sistema de visión que permita observar desde la formación del cono de Taylor hasta la creación del jet, ayudará a determinar si el proceso del electrohilado se está realizando correctamente o si se presenta algún problema. Algunas dificultades que se pueden presentar son la presencia de múltiples jets, que no se forme el cono de Taylor o el jet, que existan gotas, esto debido al bloqueo de la aguja, entre otros.

Por su parte, con el sistema de medición de corriente se requiere poder determinar la existencia de cambios relevantes, disminución o aumento, en la corriente durante el proceso y cómo afectan al cono de Taylor.

La fuerza del campo eléctrico es uno de los parámetros de gran importancia para la realización del electrohilado y tiene un efecto directo en la formación del cono de Taylor, con base en esto, nació la idea de medir la corriente durante el proceso.

Actualmente existen múltiples investigaciones que se están realizando en cuanto al proceso de electrohilado, éstas traerán mejoras como que no sea necesaria la presencia de una persona durante las pruebas, y permitirán conocer y manipular el proceso de una mejor manera. El poder controlar los parámetros que intervienen en el electrohilado brinda mejores condiciones en las fibras.

En el futuro, la posibilidad de sólo determinar cómo se desea obtener el andamio de fibras y en automático se determinen los parámetros necesarios para obtenerla, será una realidad. Esto traerá muchas ventajas porque una prueba de electrohilado, dependiendo del polímero o del grosor de los andamios que se desee, puede durar hasta 2 ó 3 horas. Una interfaz que permitiera conocer el estado de la prueba sin tener que estar presente sería de gran utilidad.

En el primer capítulo se hablará de los diseños que se proponen para resolver los problemas de ambos sistemas y en los siguientes capítulos se explicarán los finales; el porqué de la elección de ellos y su funcionamiento, entre otros.

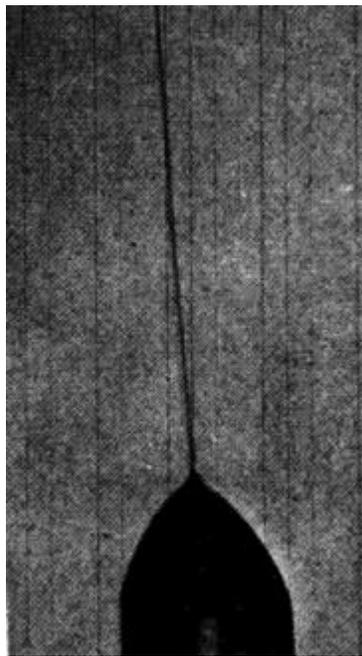
# CAPÍTULO 1. SISTEMA DE ELECTROHILADO

## 1.1 PANORAMA HISTÓRICO DE LOS SISTEMAS PARA ELECTROHILADO

Los inicios del proceso de electrohilado comienzan a principios de siglo XVI, donde William Gilbert descubrió que cuando acercaba ámbar frotado cargado eléctricamente a una gota de agua, se formaba un cono y después caían gotas [1].

En 1902 J. F Cooley presentó en una patente la manera de crear hilos mediante el uso de grandes fuentes de alimentación [1].

En 1914 John Zeleny realizó un experimento con glicerina en tubos capilares metálicos a un voltaje muy alto, el cual permitió medir el potencial al cual se formaba una gota en el extremo del tubo que era seguida por un hilo [1].



*Figura [1.1]. Resultado del experimento realizado por Zeleny.*

En 1925 Wilson y Taylor descubrieron que un fenómeno similar ocurría cuando una burbuja de un jabón sin carga se somete a un campo eléctrico uniforme [1].

Macky y Nolan en 1931 descubrieron que sucedía la misma desintegración cuando una gota de agua cae entre platos paralelos que tienen un campo eléctrico entre ellos [1].

Fue hasta 1964 que Sir Geoffrey Ingram Taylor brindó el modelo matemático de la forma cónica que se crea en una gota de un fluido bajo el efecto de un campo eléctrico de gran magnitud. Es por ello que el cono que se forma recibió el nombre “Cono de Taylor”[1].

En 1995 J. Doshi y D. H. Reneker se encontraban trabajando con la técnica cuando descubrieron que se podían fabricar fibras a escala nanométrica.

Ying Yang en 2006, propuso dos métodos para la obtención de fibras uniformes. El primero involucra el uso de un anillo de hierro colocado a la altura de las boquillas de las 7 jeringas. En el segundo método se utilizan diferentes alturas para las boquillas. Con ambos métodos se logró la obtención eficiente de fibras uniformes, pero fue el segundo método el que resultó más estable [2].

En 2008, Ho-Wang Tong realizó experimentos con las propiedades (la concentración y la cantidad de sal) de las soluciones poliméricas, con el fin de demostrar la importancia de la alineación, del diámetro y de las propiedades mecánicas de la fibra, para la aplicación en ingeniería de tejidos (del inglés *Tissue Engineering*)[3].

Mediante la modificación del campo eléctrico entre el colector y la aguja de la jeringa, en 2010, C.J. Angamma logro determinar para el óxido de polietileno, la zona de Electrohilado estable dependiendo de la distancia entre el colector y el inyector y el campo eléctrico generado [4].

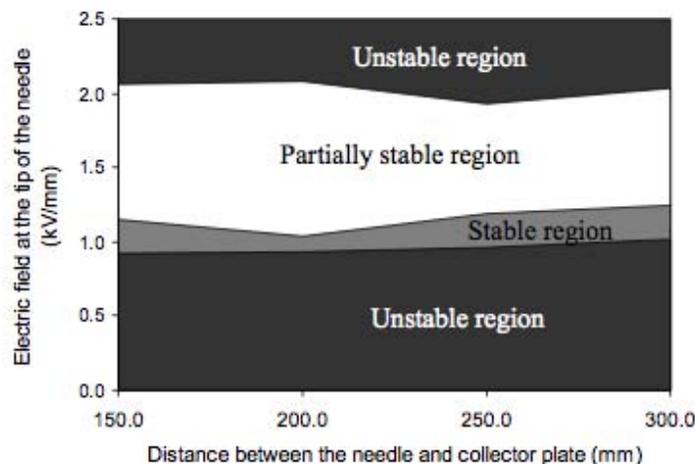


Figura [1.2]. Rango de operación del campo eléctrico aplicado y la distancia entre la aguja de la jeringa y el colector.

En 2011, Yongfang Huang se enfocó en la aplicación a los transistores orgánicos OTFT mediante el uso de Electrohilado de configuración de Near-Field (NFES), logró realizar un canal uniforme en escala nanométrica con aplicación en los OTFT [5].

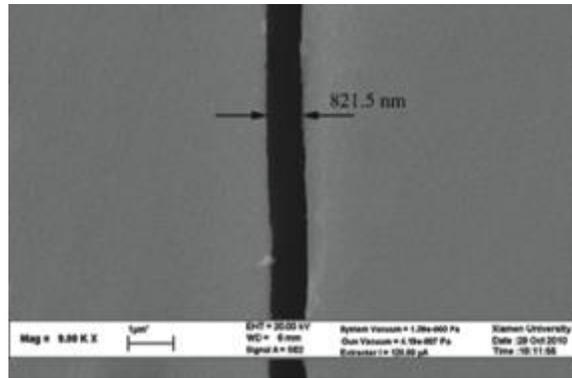


Figura [1.3]. SEM del canal fabricado.

En el 2011, O. Karatay demostró que el uso de un campo eléctrico secundario generado mediante el cilindro hueco de longitud finita, amortigua la inestabilidad del jet [6].

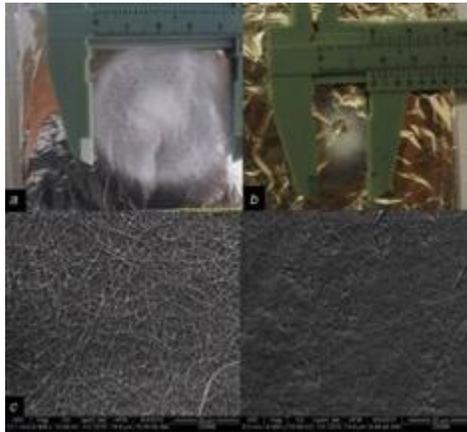


Figura [1.4]. Observaciones experimentales del sistema propuesto de Electrohilado.

Juan A. González Sánchez en 2013 demostró que la aplicación de un campo electromagnético (mediante el uso de embobinados de Helmholtz) durante el proceso de electrohilado, brinda un flujo del polímero más orientado hacia el colector. El tener una mejor orientación del flujo también permitió obtener fibras más delgadas, en el rango de 100 a 70 nm [7].

## 1.2 GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS PARA ELECTROHILADO

El electrohilado es un proceso utilizado para la creación de nanofibras y microfibras mediante un estiramiento de una solución polimérica debido a la existencia de un campo eléctrico de gran magnitud. Para llevarlo a cabo se requieren los siguientes elementos fundamentales: una bomba inyectora, una jeringa con una solución polimérica, una fuente de alto voltaje y un colector.

La parte positiva de la fuente de voltaje se coloca en la aguja de la jeringa y la parte negativa en el colector, entre el colector y la aguja existe una distancia  $d$ , la cual depende de factores como el polímero que se está

utilizando, el voltaje, la corriente, la velocidad de la bomba, entre otros. Los elementos son colocados como se muestra en la siguiente imagen.

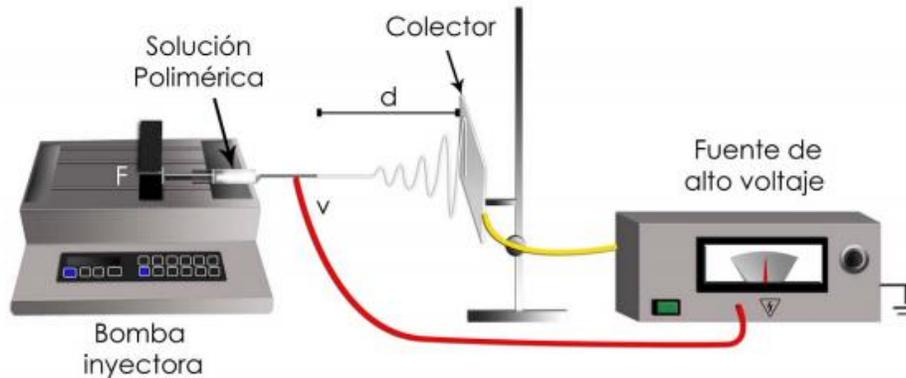


Figura [1.5]. Representación de un sistema de electrohilado (Horizontal Type).

A esta configuración se le conoce como de tipo horizontal (Horizontal Type) donde tanto la jeringa como el colector se encuentran en posición horizontal.

Otra que es ampliamente usada, es la configuración de tipo vertical (Shaft Type), en la cual el colector se encuentra en la parte de abajo y la jeringa en la parte superior. La ventaja que presenta esta configuración es la obtención de fibras más delgadas, debido a que la gravedad fortalece el efecto del campo eléctrico provocando el estiramiento de la fibra. La desventaja es que no hay uniformidad en los diámetros de las fibras.

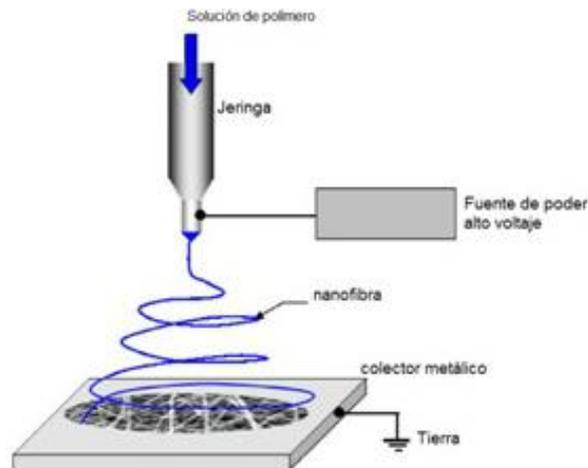


Figura [1.6]. Representación de un sistema de electrohilado (Shaft Type).

Existe también otra configuración del sistema, aunque no es muy usada ya que se obtienen fibras gruesas, aunque presenta la ventaja de que los diámetros de las fibras suelen ser uniformes. A esta configuración se le

conoce como de tipo converso (Converse Shaft) y en ella el colector se encuentra en la parte superior y la jeringa en la parte inferior.

La elección de la configuración depende de la aplicación que se le desee dar a los andamios de las nanofibras.

El principio de funcionamiento del electrohilado consiste en que se aplica alto voltaje a una solución polimérica, lo que provoca la salida de una gota en la punta de la aguja. El campo eléctrico llega a un valor crítico y vence la fuerza de tensión superficial de la solución polimérica, por lo que la gota comienza a alargarse formando el conocido Cono de Taylor.

Seguido del Cono de Taylor se crea un hilo muy delgado, el cual se conoce como jet. Este jet cargado consta de dos etapas: una etapa estable y una inestable. La estable es la que se forma seguida del cono de Taylor debido a un proceso de estiramiento y suele ser la que se observa mediante algún sistema de visión.

En cuanto a la etapa inestable, conocida como zona de latigazo (del inglés *Whipping Region*) es donde el jet se desestabiliza debido a que la solución se comienza a evaporar, lo que provoca que se reduzca el diámetro de los hilos que se depositarán en el colector.

Al final, después de la zona inestable los hilos comienzan a caer en el colector de manera “desordenada” provocando la creación de andamios de nanofibras.

En este proceso se tienen tres etapas fundamentales que son la formación del cono de Taylor, la expulsión del jet que es la zona estable y la región de inestabilidad del jet (*whipping region*).

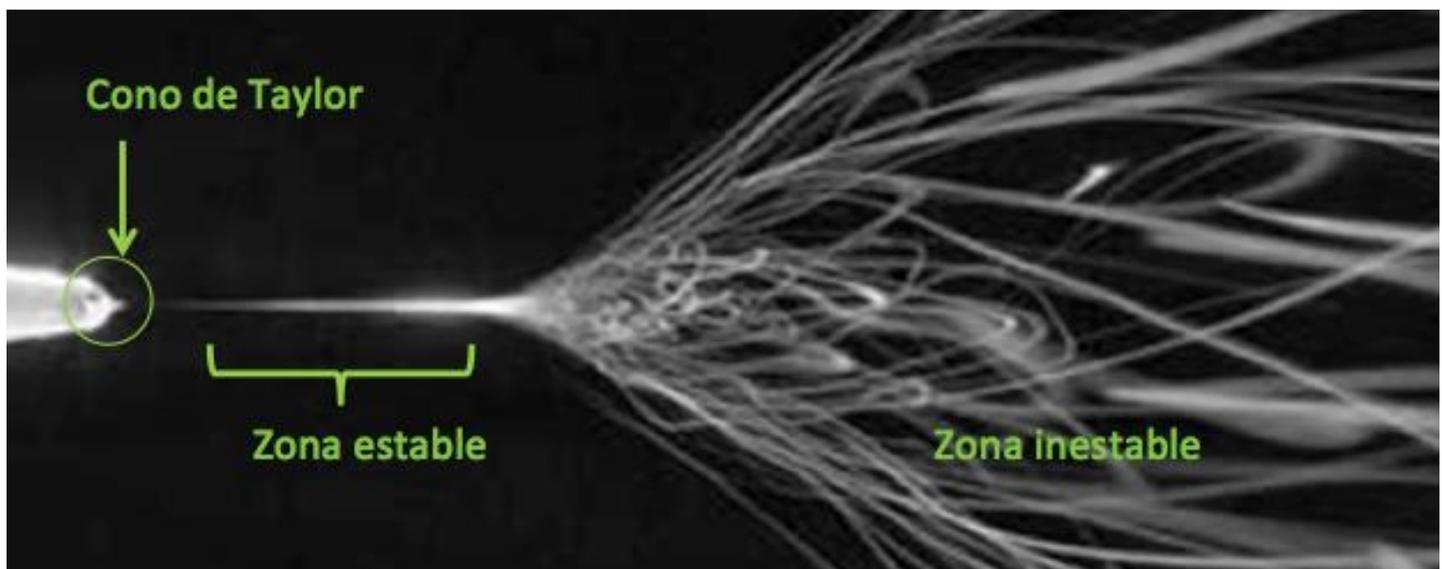


Figura [1.7]. Etapas fundamentales del proceso de electrohilado.

Las variables que intervienen en el proceso de electrohilado son las siguientes: la concentración y las propiedades de la solución polimérica, la variación del voltaje, la distancia entre el colector y la aguja, la

temperatura y humedad, las condiciones ambientales, el tiempo de duración del proceso, la velocidad de flujo, el diámetro de la jeringa y las condiciones de procesamiento. Éstas al ser modificadas afectan considerablemente los andamios resultantes, esos cambios se pueden clasificar por forma, tamaño, alineación, entre otros.

Se sabe que las fuerzas que intervienen en el proceso de electrohilado son la dinámica del fluido, la fuerza eléctrica, la fuerza de repulsión de Coulomb, la tensión superficial y la gravedad.

Existen diferentes maneras de realizar el proceso, una de ellas es el Near Field Electrospinning (NFES) el cual consiste en mantener una distancia de entre 500  $\mu\text{m}$  y 3 mm entre la aguja y el colector y un voltaje mínimo de 600 V. Este método proporciona andamios de fibras muy delgadas, pero se requiere de condiciones de humedad y temperatura controladas.

También existe el melt-electrospinning, el cual consiste en calentar con un láser la solución polimérica, lo que provoca una rápida solidificación. Este método ayuda a que se disuelvan mejor algunos polímeros, produciendo fibras de menor diámetro, comparadas con las que se producen en el electrohilado convencional. También tiene como ventaja que no presenta una zona inestable de electrohilado, por lo que resulta en un mejor control.

En cuanto a las aplicaciones en la siguiente tabla se presentan los materiales que se han usado y las aplicaciones que se les puede dar a las micro o nanofibras.

*Tabla [1]. Aplicaciones del proceso de electrohilado.*

Polímeros utilizados	Aplicaciones
<b>Nylon</b>	Fibras uniformes ultra finas
<b>Poli (estireno-co-anhídrico maleico (SMA))</b>	Nanofibras de hidrogel
<b>Polietilen tereftalato (PET)</b>	Encapsulación
<b>Poli (2-acrilamido-2-metil-1-acido propanol sulfónico) (PAMPS)</b>	Nanofibras helicoidales
<b>Poli (dimetilsiloxano) (PDMS)</b>	Encapsulación de organismos vivos
<b>Poli (ácido amico) (PAA)</b>	Microfibras
<b>Poli (butileno succinato) (PBS)</b>	Fibras ultrafinas biodegradables
<b>Policarbonato</b>	Nanofibras
<b>Fluoruro de polivinilfenildeno (PVDF)</b>	Sensor de glucosa
<b>Dióxido de titanio</b>	Nanofibras fotocatalizadoras

Continuación Tabla [1]. Aplicaciones del proceso de electrohilado.

<b>Citrato de hierro</b>	Materiales catalíticos
<b>Polietileno (PE)</b>	Ingeniería de tejidos, materiales biomédicos, cicatrización de heridas, células musculares lisas y fibroblastos
<b>Seda</b>	Biomedicina, ingeniería de tejidos
<b>Carbón</b>	Catalizadores, absorbentes de gases y liberación controlada de compuestos activos
<b>Poli (metilmetacrilato) (PMMA)</b>	Nanofibras electroconductoras
<b>Poliacrilonitrilo (PAN)</b>	Micro-nanotubos con empleo potencial para el almacenaje de hidrógeno, adherencia de plaquetas, baterías de litio
<b>Celulosa</b>	Biomateriales, membranas para la purificación de anticuerpos
<b>Poli (vinil pirrolidona) (PVP)</b>	Nanofibras, microencapsulación, sensor químico y biológico, liberación controlada de medicamentos
<b>Poli (vinil alcohol) (PVA)</b>	Ingeniería de tejidos, materiales biomédicos, bactericidas, estudio del efecto de polaridad, dispositivos electrónicos y sensores de gas
<b>Polianilina (PANI)</b>	Nanofibras electroconductoras, sensores de gas, ingeniería de tejidos
<b>Óxido de polietileno (PEO)</b>	Fibras micrométricas, biosensores, microsensores, microelectrónica, óptica, biomedicina, biomateriales, filtros, membranas regeneradoras de seda de gusano
<b>Acetato de celulosa (AC)</b>	Fibras nanométricas y micrométricas, ingeniería de tejidos biológicos, liberación controlada de medicamentos y bactericidas

## Continuación Tabla [1]. Aplicaciones del proceso de electrohilado.

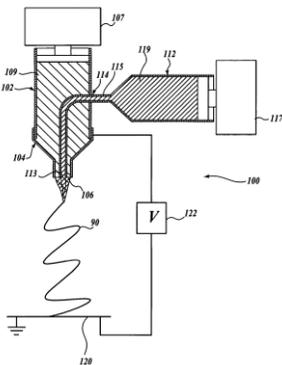
<b>Poli (desamino tirosil tirosina-ester etílico carbonato), poli (DTE carbonato), poli (3-hidroxi butirato-co-3hidroxivalerato) (PHBV), poli (1-lactida-co-caprolactona) (PLLC), colágeno, poli (ε-caprolactona) (PCL), poli (D, L-lactida)(PLA), poli (lactida-co-glicolida) (PLGA), poli (ácido L-láctico) (PLLA)</b>	Obtención de fibras nanométricas y micrométricas, biomateriales, ingeniería de tejidos: injertos, articulaciones, cultivo de células vasculares, aditivos para proteínas, tejidos de piel, etc.
--	---

## 1.3 ESTADO DEL ARTE

Se realizó una búsqueda de las patentes existentes relacionadas a los sistemas de electrohilado y en las siguientes figuras se presentan con los datos de identificación necesarios, con el fin de ver qué es lo que está patentado o se encuentra bajo solicitud de patente.

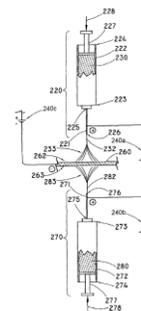
También se buscó información de las cabinas comerciales existentes para poder realizar un estudio de mercado (Benchmarking) y observar qué es lo que identifica a cada una.

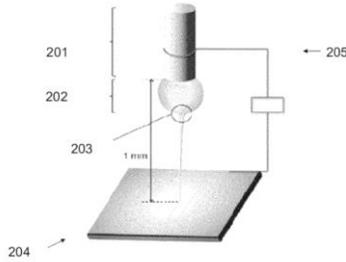
## 1.3.1 ANÁLISIS DE PATENTES PARA SISTEMAS DE ELECTROHILADO



- \* Nombre de la patente: "Electrohilado de fibras huecas finas".
- \* Número de publicación: US7575707 B2
- \* Fecha de publicación: 18 / Agosto / 2009
- \* Es un método de Electrohilado que a parte de la solución polimérica, contiene un aceite mineral. Cualquiera de los dos se puede eliminar para conseguir resultados diferentes.
- \* Referencia:  
<https://www.google.com.mx/patents/US7575707?dq=electrospinning&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjXxLyKuKbMAhVqu4MKHSGhCpMQ6AEIGjAA>

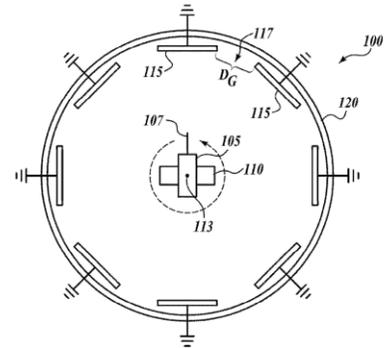
- \* Nombre de la patente: "Aguja-Aguja Electrohilado".
- \* Número de publicación: US8795577 B2
- \* Fecha de publicación: 5 / Agosto / 2014
- \* Es un método de Electrohilado que puede contener uno o dos inyectores.
- \* Referencia:  
<https://www.google.com.mx/patents/US8795577?dq=electrospinning&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjtn9-w-qXMAhWds4MKHU7rDy4Q6AEIzAB>





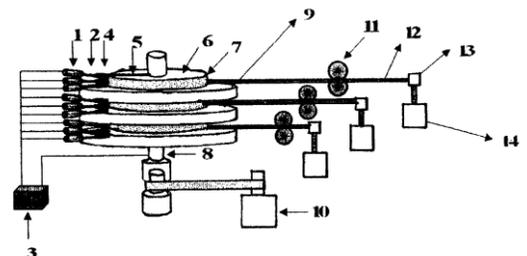
\* Nombre de la patente: "Método y dispositivo de Electrohilado de bajo voltaje y campo cercano".  
 \* Número de publicación: US8586148 B2  
 \* Fecha de publicación: 19 / Noviembre / 2013  
 \* Es un método de Electrohilado para la obtención de fibras delgadas con el uso de un voltaje bajo y poca distancia entre el colector y la aguja.  
 \* Referencia:  
<https://www.google.com.mx/patents/US8586148?dq=electrospinning&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjtn9-w-qXMAhWDs4MKHU7rDy4Q6AEILDAC>

\* Nombre de la patente: "Aparatos y métodos centrífugos de electrohilado y estructuras fibrosas creadas a partir de".  
 \* Número de publicación: US20140051316 A1  
 \* Fecha de publicación: 20 / Febrero / 2014  
 \* Es un equipo que permite el electrohilado centrífugo para la creación de estructuras fibrosas.  
 \* Referencia:  
<https://www.google.com.mx/patents/US20140051316?dq=electrospinning&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjtn9-w-qXMAhWDs4MKHU7rDy4Q6AEIPjAE>

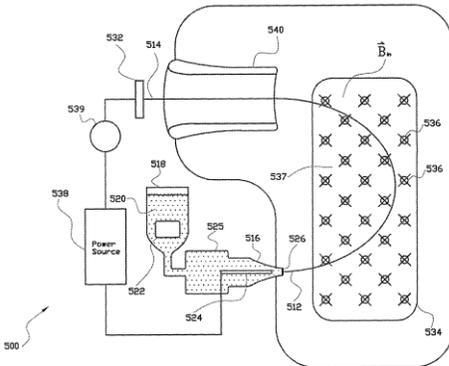


\* Nombre de la patente: "Aparato y método de electrohilado para la continua producción de fibras".  
 \* Número de publicación: WO2015034431 A1  
 \* Fecha de publicación: 12 / Marzo / 2015  
 \* Es un método y una configuración que emplea la técnica del electrohilado, para la producción continua de andamios de fibras.  
 \* Referencia:  
<https://www.google.com.mx/patents/WO2015034431A1?cl=en&dq=electrospinning&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjtn9-w-qXMAhWDs4MKHU7rDy4Q6AEIazAJ>

\* Nombre de la patente: "Método de manufactura continua de filamentos mediante electrohilado".  
 \* Número de publicación: US7799262 B1  
 \* Fecha de publicación: 21 / Septiembre / 2010  
 \* Es un método para la creación continua de filamentos mediante electrohilado, en donde las fibras son recolectadas en un colector multicapas.  
 \* Referencia:  
<https://www.google.com.mx/patents/US7799262?dq=electrospinning&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjtn9-w-qXMAhWDs4MKHU7rDy4Q6AEIYjAI>



\* Nombre de la patente: "Dispositivo portátil de electrohilado".  
\* Número de publicación: EP1377420 A2  
\* Fecha de publicación: 7 / Enero / 2004  
\* Es un dispositivo de electrohilado para la generación de una capa de un polímero licuado.  
\* Referencia:  
<https://www.google.com.mx/patents/EP1377420A2?cl=en&dq=electrospinning&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwIU9MfR-qXMAhWKm4MKHXndANY4ChDoAQgiMAE>



\* Nombre de la patente: "Electrohilado controlado de fibras".  
\* Número de publicación: US8282873 B2  
\* Fecha de publicación: 9 / Octubre / 2012  
\* Descripción de métodos para un electrohilado de polímeros controlado.  
\* Referencia:  
<https://www.google.com.mx/patents/US8282873?dq=electrospinning&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjB2OWRyqbMAhWjr4MKHa0KCqY4HhDoAQgrMAI>

\* Nombre de la patente: "Manufactura de andamios 3D con electrohilado a bajas temperaturas".  
\* Número de publicación: US9011754 B2  
\* Fecha de publicación: 21 / Abril / 2015  
\* Es un dispositivo y un método para la manufactura de andamios 3D con electrohilado a bajas temperaturas.  
\* Referencia:  
<https://www.google.com.mx/patents/US9011754?dq=electrospinning&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiGy8zbyabMAhVquYMKHXcDACw4ChDoAQhqMAK>

\* Nombre de la patente: "Método para dispositivos de revestimiento utilizando electrospinning y soplado por fusión".  
\* Número de publicación: US8965531 B2  
\* Fecha de publicación: 24 / Febrero / 2015  
\* Es un método para dispositivos de revestimiento, usando el método de electrohilado y soplado por fusión.  
\* Referencia:  
<https://www.google.com.mx/patents/US8965531?dq=electrospinning&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiGy8zbyabMAhVquYMKHXcDACw4ChDoAQhhMAg>



### Professional Electrospinning Lab Device V2.0 <sup>1</sup>

- Empresa: Yflow®
- Optimizada para trabajar con electrohilado coaxial
- Puede trabajar con cualquier polímero
- [http://www.yflow.com/electrospinning\\_equipment/startup-electrospinning-equipment/](http://www.yflow.com/electrospinning_equipment/startup-electrospinning-equipment/)



### MSK - NFES - 3 <sup>2</sup>

- Empresa: MTI Corporation®
- Contiene accesorios como luces brillantes de halógeno, extractor y colectores de diferentes tamaños
- <http://www.mtixtl.com/MSK-NFES-3.aspx>



### SprayBase Climatic Controlled Cabinet <sup>3</sup>

- Empresa: SprayBase®
- Cabina que mantiene humedad y temperatura elegidas
- <http://www.spraybase.com/electrospinning/>



### SprayBase Platform

- Empresa: SprayBase®
- Cuenta con una base anti vibraciones
- <http://www.spraybase.com/electrospinning/>



### EC-DIG

- Empresa: IME Technologies®
- Inyector multifuncional y sistema de seguridad integrado
- [http://www.imetechnologies.nl/file/970/IME\\_Electrospinning\\_equipment\\_2015.pdf](http://www.imetechnologies.nl/file/970/IME_Electrospinning_equipment_2015.pdf)



### NE-300 Electrospinning Machine

- Empresa: INOVENSO®
- Tiene botón de paro de emergencia y un sistema de revestimiento homogéneo
- <http://www.inovenso.com/ne300.pdf>



### Electrospinning Basic Model

- Empresa: Royal Enterprises®
- Es de fácil uso
- <http://www.indiamart.com/royalenterprises-chennai/electrospinning-machines.html>



### Electrospinning Machine

- Empresa: Royal Enterprises®
- Puede brindar hasta 30 kV y tiene colectores seleccionables
- <http://www.indiamart.com/royalenterprises-chennai/electrospinning-machines.html>



### The Contipro 4SPIN C4S Lab 1

- Empresa: 4SPIN®
- Es un equipo para electrohilado de escritorio
- <https://www.4spin.info/portfolio/4spin-c4s-lab>



### ND-ES Lab Electrospinning Unit

- Empresa: Nadatech Innovations®
- Se controla la distancia del inyector y colector por medio de la computadora
- [http://www.nadatech.com/documents/Datasheet\\_ND-ES.pdf](http://www.nadatech.com/documents/Datasheet_ND-ES.pdf)



### E-Fiber

- Empresa: SKE Research Equipment®
- Sistema de movimiento complejo para colectores de formas complejas
- <http://www.ske.it/products/e-fiber-electrospinning-platform>

# CAPÍTULO 2. DISEÑO CONCEPTUAL

## SOPORTE PARA EL MICROSCOPIO DIGITAL

En este capítulo se describen los pasos que se siguieron para el diseño de los dispositivos. No se utilizó una sola metodología, sino se emplearon partes de diferentes como las de Karl T. Ulrich, Bruce Archer, VDI 2222 (del alemán *Verein Deutscher Ingenieure*) y U.T.F.S.M (Universidad Técnica Federico Santa María en Chile)[8].



Figura [2.1]. Metodología de diseño VDI 2222.

### 2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los sistemas de visión actuales representan costos muy elevados, por lo que se requiere contar con el diseño de sistemas más económicos, como el que se presenta en este proyecto de investigación, el cual consta de un soporte para un microscopio digital que se encontrará en un ambiente donde el campo eléctrico es muy grande, por lo que deberá que ser capaz de soportarlo. Para poder tolerarlo tendrá que ser de un material aislante.

También debe de encontrarse muy próximo a la aguja de la jeringa, por lo que el soporte tendrá que ser capaz de sostenerse en una posición definida, sin posibilidad de que altere el proceso. Además es importante la posición porque antes de que se inicie el proceso, se debe buscar el enfoque adecuado a la aguja y cualquier movimiento que se realice después podría provocar un total desenfoque que evitaría una buena visualización.

## 2.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES

Como se mencionó anteriormente, existen varias consideraciones a tomar en cuenta. Las dos más importantes son que sea capaz de mantenerse en una posición y que soporte el campo eléctrico de gran magnitud, teniendo en consideración tanto corriente como voltaje altos.

A parte de estas dos, existen otras que también deben considerarse, y que a continuación se muestran:

*Tabla [2.1]. Identificación de las necesidades.*

NECESIDADES
Que sea barato
Que sea pequeño
Que tenga una altura fija
Que mantenga una posición
Que soporte un voltaje de gran magnitud
Que soporte un amperaje de gran magnitud
Que no se vea afectado por la temperatura
Que no se vea afectado por la humedad
Que no interfiera entre la aguja y el colector
Que exista repetibilidad
Que tenga iluminación constante
Que tenga contraste constante
Que sea portátil
Que sea de rápida manufactura

Las necesidades de que sea pequeño y portátil, se deben a que en la cabina donde se realiza el proceso de electrohilado tiene el espacio limitado a cada uno de sus componentes. Por esto se debe visualizar el espacio que se tendrá disponible para este soporte, tomando en cuenta que debe estar cerca de la aguja y que no debe interferir entre ésta y el colector.

También debe de poseer una altura fija para tener repetibilidad en las pruebas de visión. Esta altura estará determinada por el modelo y la posición de la bomba y la aguja.

Se tomará en cuenta que el material no se vea afectado por la humedad o temperatura, porque son factores que intervienen constantemente en el proceso. Dependiendo del voltaje que se elija o las condiciones ambientales del lugar en donde se realice la prueba, la humedad y la temperatura provocan cambios notables.

Además de lo mencionado anteriormente, se deberá mantener durante la prueba una iluminación y contraste, de otra manera se presentarían alteraciones en la imagen.

El propósito de todas las necesidades que se mencionaron es el poder tener repetibilidad en el proceso, ya que se realizarán pruebas con diferentes polímeros y se deben tener esos parámetros controlados para así realizar comparaciones entre los diferentes polímeros.

### 2.3 DEFINICIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS

De acuerdo a las necesidades que se definieron, ahora se les otorgarán los requerimientos necesarios para cumplirlas.

*Tabla [2.2]. Definición de los requerimientos.*

NECESIDADES	REQUERIMIENTOS
Que sea barato	Tamaño adecuado*
Que sea pequeño	Tamaño adecuado
Que tenga una altura fija	Tamaño adecuado
Que mantenga una posición	Funcionalidad*
Que soporte un voltaje de gran magnitud	Funcionalidad
Que soporte un amperaje de gran magnitud	Funcionalidad
Que no se vea afectado por la temperatura	Funcionalidad
Que no se vea afectado por la humedad	Funcionalidad
Que no interfiera entre la aguja y el colector	Funcionalidad
Que exista repetibilidad	Funcionalidad
Que tenga iluminación constante	Funcionalidad
Que tenga contraste constante	Funcionalidad
Que sea portátil	Tamaño adecuado
Que sea de rápida manufactura	Tiempo*

\* La explicación del significado de los requerimientos

\*El requerimiento de que tenga un tamaño adecuado se refiere a que debe estar dentro de la cabina de electrohilado sin tener interferencia con ninguno de los demás elementos que se encuentren dentro. También debe ser un poco compacto por el poco espacio disponible.

El requerimiento de funcionalidad se refiere a que tendrá que cumplir con sus funciones sin que éstas se vean alteradas por los factores que intervienen en el proceso como: el voltaje, la corriente, la humedad, la temperatura, entre otros.

El requerimiento de tiempo se refiere a que se deberá manufacturar en un período corto, ya que esto le dará prioridad a las pruebas y no a la manufactura.

## 2.4 DEFINICIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES

De acuerdo a los requerimientos definidos, ahora se les brindarán las posibles especificaciones. Éstas, al final, se podrían ver modificadas debido a las pruebas que se realicen.

Tabla [2.3]. Definición de las especificaciones.

NECESIDADES	REQUERIMIENTOS	ESPECIFICACIONES
Que sea barato	Tamaño adecuado*	Costo del material
Que sea pequeño	Tamaño adecuado	Volumen total
Que tenga una altura fija	Tamaño adecuado	Altura máxima
Que mantenga una posición	Funcionalidad*	Volumen total
Que soporte un voltaje de gran magnitud	Funcionalidad	Rango de voltaje
Que soporte un amperaje de gran magnitud	Funcionalidad	Rango de amperaje
Que no se vea afectado por la temperatura	Funcionalidad	Temperatura máxima
Que no se vea afectado por la humedad	Funcionalidad	Humedad máxima
Que no interfiera entre la aguja y el colector	Funcionalidad	Volumen máximo
Que exista repetibilidad	Funcionalidad	Repetibilidad
Que tenga iluminación constante	Funcionalidad	Luminosidad
Que tenga contraste constante	Funcionalidad	Contraste
Que sea portátil	Tamaño adecuado	Peso máximo
Que sea de rápida manufactura	Tiempo	Tiempo máximo

En la siguiente tabla se presentará la importancia de cada una de las especificaciones y las tolerancias que se tendrán en cuenta. La mayor importancia está dada por el 1.

Tabla [2.4]. Importancia y tolerancias de las especificaciones.

ESPECIFICACIONES	UNIDADES	IMPORTANCIA	TOLERANCIA
< 500	[\$]	4	±50
< 2000	[cm <sup>3</sup> ]	1 (más importante)	± 200
< 20	[cm]	2	± 2
< 2000	[cm <sup>3</sup> ]	1 (más importante)	± 200
Entre 5 y 25	[kV]	5	± 5
Entre 0.5 y 2	[A]	6	± 0.1
< 40	[°C]	10	± 2
< 40	[%]	11	± 2
< 2000	[cm <sup>3</sup> ]	1 (más importante)	± 200

Continuación Tabla [2.4]. Importancia y tolerancias de las especificaciones.

Si o No	[NA]	-	[NA]
< 1000	[Lux]	9	± 2
NA	[%]	7	[NA]
< 1	[kg]	3	± 0.1
< 336	[Horas]	8	± 10

Para decidir la importancia de cada una de las especificaciones, se recurrió al uso del QFD, el cuál es un método de gestión de calidad para el diseño de algún producto que se basa en las demandas y expectativas de los clientes. Su origen radica de la matriz de calidad.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del QFD:

Costo del material [\$]	Volúmen total [cm <sup>3</sup> ]	Altura máxima [cm]	Rango de voltaje [kV]	Rango de amperaje [A]	Temperatura máxima [°C]	Humedad máxima [%]	Potencia [W]	Peso máximo [kg]	Tiempo máximo [hr]	Contraste [Si o No]
-------------------------	----------------------------------	--------------------	-----------------------	-----------------------	-------------------------	--------------------	--------------	------------------	--------------------	---------------------

Target or Limit Value	500	2000	20	25	2	40	40	10	1	336	1
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	10	9	5	6	9	10					
Max Relationship Value in Column	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
Weight / Importance	341.6	512.4	501.8	285.0	285.0	136.3	136.3	161.9	400.9	166.4	233.6
Relative Weight	10.8	16.2	15.9	9.0	9.0	4.3	4.3	5.1	12.7	5.3	7.4

Figura [2.2]. Resultados obtenidos del QFD.

En la sección de “Anexos”, en el Anexo A, se tendrá una copia del QFD completo.

## 2.5 GENERAR ALTERNATIVAS

Después de determinar los posibles requerimientos y especificaciones, se pensaron posibles soluciones al problema, tomando en cuenta la importancia que se decidió en el QFD.

Los requerimientos de mayor importancia resultaron estar relacionados con el volumen total y el peso del diseño.

### 2.5.1 BOCETOS Y ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS

Al analizar las funciones, necesidades, requerimientos y especificaciones que debe cumplir el soporte para el microscopio, se elaboraron los siguientes bocetos:

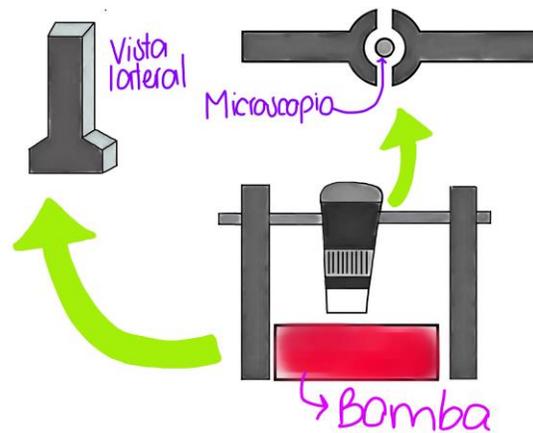


Figura [2.3]. Primer boceto de la base del soporte para el microscopio

El primer boceto salió de la idea de tener una base para el soporte fija por encima de la bomba para mantenerla en una sola posición, y por ello se decidió colocarle dos patas, una en cada lado. Para sostener el microscopio se diseñó una especie de llave doble, la cual embonaría en una muesca del microscopio.

Después de examinar las necesidades definidas en el diseño del primer boceto, se concluyó que no cumplía con las siguientes:

NECESIDADES
Que sea barato
Que sea pequeño
Que no interfiera entre la aguja y el colector
Que exista repetibilidad
Que sea portátil
Que sea de rápida manufactura

Figura [2.4]. Fragmento de Tabla 2.1 de Necesidades.

El diseño resultaría ser grande por lo que evitaría que fuese de rápida manufactura, portátil, barato y pequeño, así que son características que se pueden modificar en otra iteración. Por otro lado también sería invasivo lo que podría repercutir en las necesidades de que no interfiera entre la aguja y el colector y que existe repetibilidad.

En cuanto a las demás necesidades sí cumpliría con tener una altura fija, mantener una posición y poseer iluminación y contraste constantes. Para solucionar las necesidades de soportar voltaje y amperaje de gran magnitud y no verse afectado por la temperatura y la humedad, se decidió que se utilizaría MDF. El MDF es un aglomerado de fibras de madera, con el cuál se puede trabajar fácilmente, es de bajo costo y presenta una estructura homogénea.

NECESIDADES
Que tenga una altura fija
Que mantenga una posición
Que soporte un voltaje de gran magnitud
Que soporte un amperaje de gran magnitud
Que no se vea afectado por la temperatura
Que no se vea afectado por la humedad
Que tenga iluminación constante
Que tenga contraste constante

Figura [2.5]. Fragmento de Tabla 2.1 de Necesidades.

Para la segunda iteración se modificó el diseño como se muestra en la Figura 2.4, los cambios más notables son que se redujo el tamaño de la base a la mitad y se modificó el soporte del microscopio. Con este diseño se cumplen todas las necesidades propuestas.

El haberlo reducido a la mitad logra que el diseño sea portátil, de fácil manufactura, pequeño, barato y que no interfiera entre la aguja y el colector. En cuanto al soporte del microscopio, también se realizaron ciertos cambios, se pueden notar en la Figura 2.5.

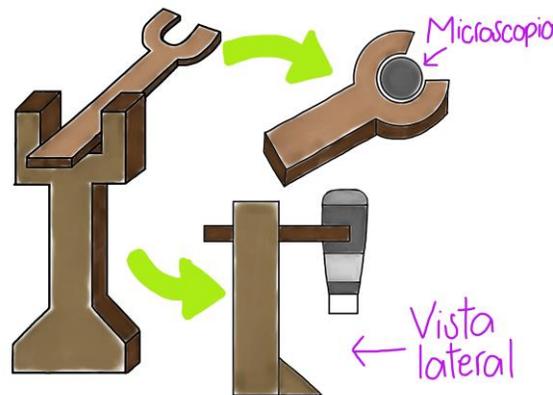


Figura [2.6]. Segundo boceto de la base del soporte para el microscopio.

Para el soporte del microscopio se mantuvo la idea de la llave, sólo que se alargó la parte circular para que pudiese sostener el microscopio y además para asegurar que no se salga se le colocará una pestaña que cierre la parte circular.

También se realizarán barrenos a lo largo de la longitud de la llave para poder tener diferentes posiciones del microscopio, ya que esto dependerá de cómo se coloque la bomba y la jeringa.

El material para el diseño se mantendrá en MDF por las razones antes mencionadas.

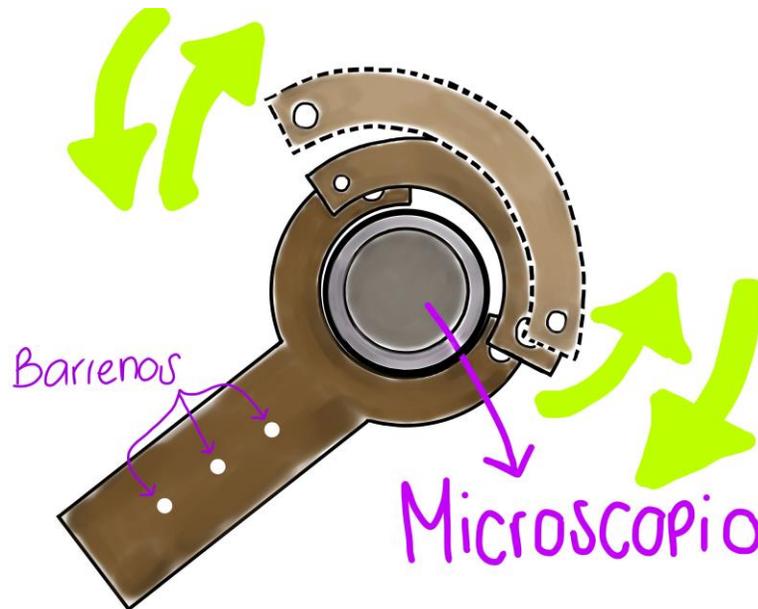


Figura [2.7]. Boceto del soporte del microscopio.

## 2.6 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA ALTERNATIVA ELEGIDA

La alternativa que se eligió fue la segunda iteración de los bocetos [Figura 2.4], después de hacer un análisis sobre el diseño asegurando que cumpliera con las necesidades y los requerimientos.

El diseño brinda dos de las características más importantes, de acuerdo al QFD, que son un volumen pequeño y un peso bajo, en comparación con el diseño de la primera iteración.

La base del soporte permite que el microscopio se mantenga en una posición fija, sin ser invasivo en el proceso, ya que será colocado en uno de los lados de la bomba y el microscopio quedará encima de la aguja de la jeringa. Esta posición tan cercana del microscopio a la aguja, podrá permitir que se tenga una buena visualización del cono de Taylor.

El problema de que el soporte se encuentre dentro de la cabina de electrohilado es que se encontrará bajo el campo eléctrico, por lo que el material del soporte debe ser aislante y cualquier material conductor del microscopio tendrá que ser aislado.

Para poder comprobar la funcionalidad del diseño y ver si es necesaria alguna modificación se realizará un modelo funcional.

## 2.7 MODELO FUNCIONAL

Un modelo funcional es una herramienta que sirve para saber qué es lo que sucede con nuestro diseño, esto ayuda a determinar las posibles necesidades o incluso saber la viabilidad de lo que se desea diseñar.

En este caso se quiere ver la viabilidad en específico del soporte del microscopio, saber si el uso de la muesca para sostener el microscopio será suficiente o si es necesario modificar el diseño. Aunque también es importante verlo junto con la base del soporte, por lo que se anexará esta parte al final de éste apartado.

A continuación se presentan y explican imágenes de cómo resultaron los modelos funcionales.

En la Figura 2.6 se puede observar el modelo funcional del soporte del microscopio, que se basó en la forma de una llave. En la parte de en medio irá el microscopio y será asegurado con la pestaña que se ve del lado derecho, que es una semicircunferencia.



*Figura [2.8]. Modelo funcional del soporte del microscopio.*

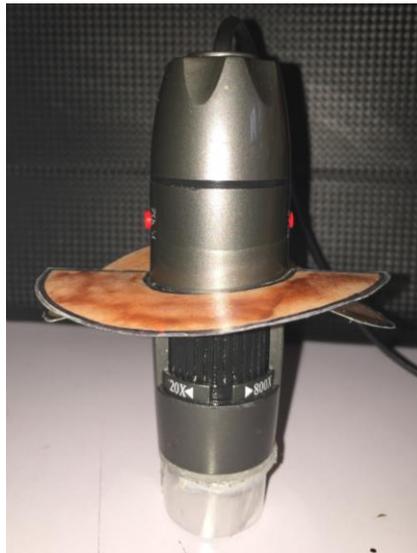
En las siguientes dos Figuras se muestra cómo se ve el soporte con el microscopio ya colocado en su posición y cómo sería sujetado, en una vista superior y frontal. Se pudo probar que el diseño sí funcionaba, lo único que faltó fue darle rigidez, pero esto se le dará con el MDF en el prototipo.

Otra cuestión que se observó es que el diámetro del soporte debe ser muy preciso, ya que si no lo es, no se ajustará o no entrará en la muesca del microscopio. Es por esto que se midió el diámetro de la muesca del microscopio y se realizó el modelo funcional de acuerdo a él. Cuando se elaboró la prueba, se efectuaron las adecuaciones necesarias para que se ajustará precisamente a la muesca.

La realización del modelo funcional para este soporte fue imprescindible, porque permitió determinar la precisión necesaria y el valor numérico para los diámetros del soporte.



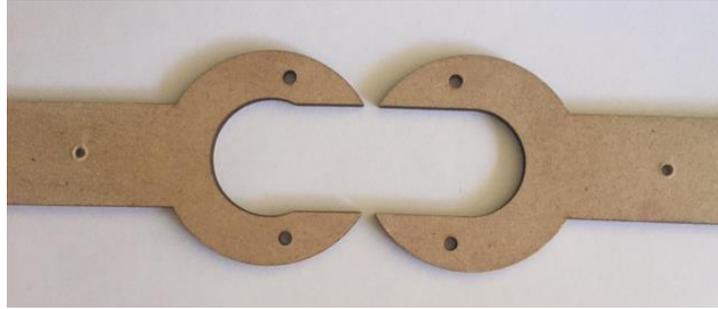
*Figura [2.9]. Modelo funcional del soporte del microscopio con el microscopio (Vista superior).*



*Figura [2.10]. Modelo funcional del soporte del microscopio con el microscopio (Vista frontal).*

Para permitir un mayor ajuste al microscopio se decidió que las llaves deben ser de dos diferentes diámetros, una para embonar en la muesca y la otra en el cuerpo del microscopio. La que se encontrará sujeta al cuerpo necesita tener un mayor grosor, para brindarle mayor soporte al cuerpo, por lo que será de 6 mm y debido al tamaño de la muesca el grosor del MDF debe ser estrictamente de 3mm.

En la siguiente imagen se percibe el diseño de ambas llaves, la que se encuentra del lado izquierdo es la que se acopló al cuerpo del microscopio y la del lado derecho a la muesca.



*Figura [2.11]. Modelo funcional de las llaves.*

En las siguientes imágenes se puede percibir la diferencia de los diámetros de ambas llaves, la cual, como se explicó anteriormente, permitió un ajuste al microscopio desde la muesca y el cuerpo.



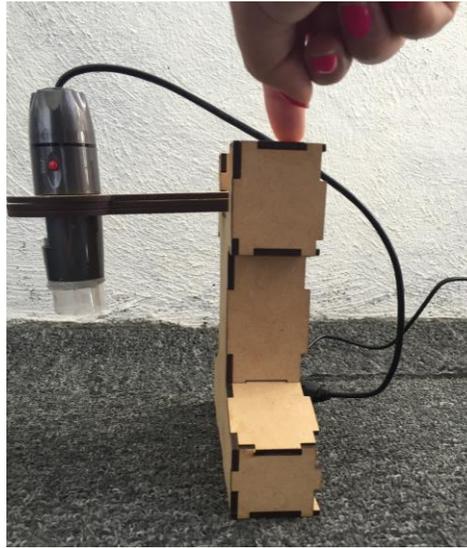
*Figura [2.12]. Modelo funcional de las llaves colocadas juntas.*



*Figura [2.13]. Modelo funcional de las llaves colocadas juntas en diferente perspectiva.*

En cuanto a la base del soporte para el microscopio, se puede observar el primer modelo funcional en la Figura 2.14. La problemática que se pensó con la base, es que por el peso del microscopio ésta no soportará

mantenerse fija y se caerá. Al realizar las pruebas con el microscopio colocado en su lugar se demostró que la base no se podría mantener fija, por lo que se tuvo que buscar una manera de brindarle ese soporte.



*Figura [2.14]. Modelo funcional de la base del soporte*

Para solucionar este problema se propuso agregar al modelo funcional, dos patas en forma triangular del lado del microscopio como se muestra en la Figura 2.15. De esta manera, aún con el microscopio colocado estos triángulos evitarían una posible caída de la base.



*Figura [2.15]. Modelo funcional de la base del soporte con patas triangulares.*

En la Figura 2.14 se puede apreciar que la llave que sostiene al microscopio no se encuentra completamente recta y esto se debe a que las piezas deben llevar tornillos y tuercas que permitan su fijación, cosa que no se realizó para este modelo funcional.

## BASE DEL SENSOR DE CORRIENTE

A parte del soporte para el microscopio fue necesario diseñar una para el sensor de corriente, que sirvió como protección ante el campo y como soporte.

Se siguieron los mismos pasos y metodologías que para el diseño conceptual del soporte del microscopio comenzando por la definición del problema, las necesidades, los requerimientos y las posibles especificaciones, etc.

### 2.8 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Debido a la existencia del campo eléctrico de gran magnitud, se requirió el diseño de una base que protegiera y soportara al sensor, el cual fue de un material aislante.

### 2.9 IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES

Este soporte también cumplió con ciertas necesidades, las cuales se muestran a continuación.

*Tabla [2.5]. Identificación de las necesidades.*

NECESIDADES
Que sea barato
Que sea pequeño
Que soporte un voltaje de gran magnitud
Que soporte un amperaje de gran magnitud
Que no se vea afectado por la temperatura
Que no se vea afectado por la humedad
Que sea portátil
Que sea de rápida manufactura

Se requirió que fuera de un tamaño pequeño, porque fue más fácil colocarlo en cualquier lugar. Todo esto se debió a que el sensor se encontraba en la zona exterior de la cabina, por lo que se desconocía en dónde se colocaría. Su posición dependió de los cables que se conectaron a la cabina, de la conexión a la computadora y del espacio disponible alrededor de la cabina. Y por lo mismo de las conexiones, fue necesario buscar la manera de aislarlo del campo, para así protegerlo.

Con base en lo mencionado anteriormente, la base debe tener espacio para meter los cables que irán conectados a la cabina y al controlador.

La temperatura y la humedad no tuvieron tanto efecto en él, pero para evitar posibles problemas también se buscó protegerlo.

Al final, por cuestiones de tiempo, también se buscó que fuera barato y rápido de manufacturar.

## 2.10 DEFINICIÓN DE LOS REQUERIMIENTOS

De acuerdo a las necesidades definidas anteriormente, se plantearon los requerimientos necesarios para que se cumplieran.

*Tabla [2.6]. Definición de los requerimientos.*

NECESIDADES	REQUERIMIENTOS
Que sea barato	Tamaño adecuado*
Que sea pequeño	Tamaño adecuado
Que soporte un voltaje de gran magnitud	Protección
Que soporte un amperaje de gran magnitud	Protección
Que no se vea afectado por la temperatura	Protección
Que no se vea afectado por la humedad	Protección
Que sea portátil	Tamaño adecuado
Que sea de rápida manufactura	Tiempo*

\* La explicación del significado de los requerimientos

\*Debe ser de un tamaño adecuado para brindarle portabilidad al sensor, como se mencionó anteriormente; durante las pruebas no habrá un lugar específico para él, porque depende de las condiciones del lugar y del espacio disponible.

En cuanto al tiempo, se busca que el tiempo de manufactura sea corto, para enfocarse a la realización de las pruebas y no a la manufactura.

La protección es indispensable para el correcto funcionamiento del sensor y aunque la humedad y temperatura que se tienen en el proceso no le afectan tanto, debido al rango que se ve en la hoja de datos (del inglés *Datasheet*), el campo sí podría provocar problemas de funcionamiento, por lo que se buscará que su base lo pueda aislar

## 2.11 DEFINICIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES

Ya teniendo las necesidades y los requerimientos definidos, ahora se definirán las posibles especificaciones.

*Tabla [2.7]. Definición de las especificaciones.*

NECESIDADES	REQUERIMIENTOS	ESPECIFICACIONES
Que sea barato	Tamaño adecuado*	Costo del material
Que sea pequeño	Tamaño adecuado	Volumen total
Que soporte un voltaje de gran magnitud	Funcionalidad	Rango de voltaje
Que soporte un amperaje de gran magnitud	Funcionalidad	Rango de amperaje
Que no se vea afectado por la temperatura	Funcionalidad	Temperatura máxima
Que no se vea afectado por la humedad	Funcionalidad	Humedad máxima

Continuación Tabla [2.7]. Definición de las especificaciones.

Que sea portátil	Tamaño adecuado	Peso máximo
Que sea de rápida manufactura	Tiempo	Tiempo máximo

En la siguiente tabla se muestran la importancia y las tolerancias de las posibles especificaciones.

Tabla [2.8]. Importancia y tolerancias de las especificaciones.

ESPECIFICACIONES	UNIDADES	IMPORTANCIA	TOLERANCIA
< 200	[\$]	2	±25
< 125	[cm <sup>3</sup> ]	1 (más importante)	± 200
Entre 5 y 25	[kV]	4	± 5
Entre 0.5 y 2	[A]	4	± 0.1
< 40	[°C]	5	± 2
< 40	[%]	5	± 2
< 500	[g]	3	± 25
< 250	[Horas]	6	± 10

Para poder decidir la importancia de cada una de las especificaciones, se recurrió al uso del QFD. A continuación, se muestran los resultados obtenidos del QFD:

	▼	▼	▼	▲	▲	▲	▲	▼
	Costo del material [\$]	Volumen total [cm <sup>3</sup> ]	Peso máximo [g]	Rango de voltaje [kV]	Rango de amperaje [A]	Temperatura máxima [°C]	Humedad máxima [%]	Tiempo máximo [hr]
Target or Limit Value	200	125	500	25	2	40	40	250
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	10	9	5	6	9	10		
Max Relationship Value in Column	9	9	9	9	9	9	9	9
Weight / Importance	454.3	462.9	394.3	254.3	254.3	231.4	231.4	222.9
Relative Weight	18.1	18.5	15.7	10.1	10.1	9.2	9.2	8.9

Figura [2.16]. Resultados obtenidos del QFD.

En la sección de "Anexos", en el Anexo A, se tendrá una copia del QFD completo.

## 2.12 GENERAR ALTERNATIVAS

De acuerdo a las necesidades, los requerimientos y las posibles especificaciones mencionadas anteriormente, se propusieron posibles diseños para la base del sensor.

De igual manera se buscó cumplir con la importancia, de las posibles especificaciones, que se obtuvieron mediante el QFD.

### 2.12.1 BOCETOS Y ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS

Después de analizar la importancia de las posibles especificaciones se realizaron los siguientes bocetos:

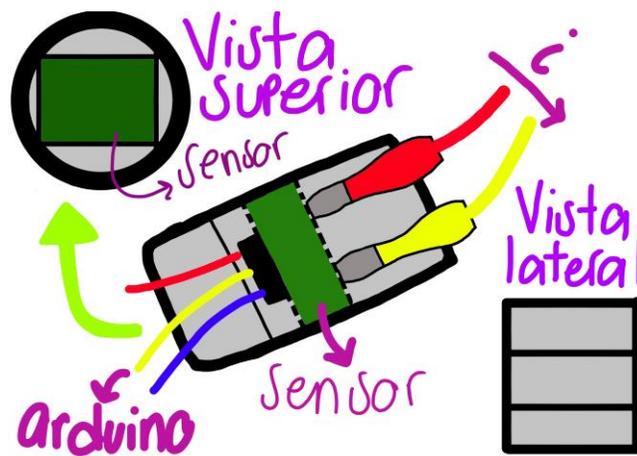


Figura [2.17]. Primer boceto de la base del sensor de corriente.

El primero se diseñó de una forma cilíndrica, debido a que para la realización de un modelo funcional resultaba ser la opción más fácil y barata. Pero después de analizar el diseño, se decidió que no era el más conveniente, porque el manufacturar piezas con alguna forma circular, suele ser muy costoso y difícil.

Es por esto que el diseño no cumple con las siguientes necesidades.

NECESIDADES
Que sea barato
Que sea de rápida manufactura

Figura [2.18]. Fragmento de Tabla 2.5 de Necesidades.

Para poder cumplir todas las necesidades antes definidas se realizó el cambio en la geometría de la base, de un cilindro a un cubo. Esto nos permitió cumplir las necesidades de que sea más barato y de rápida manufactura. A continuación se muestra el nuevo boceto:

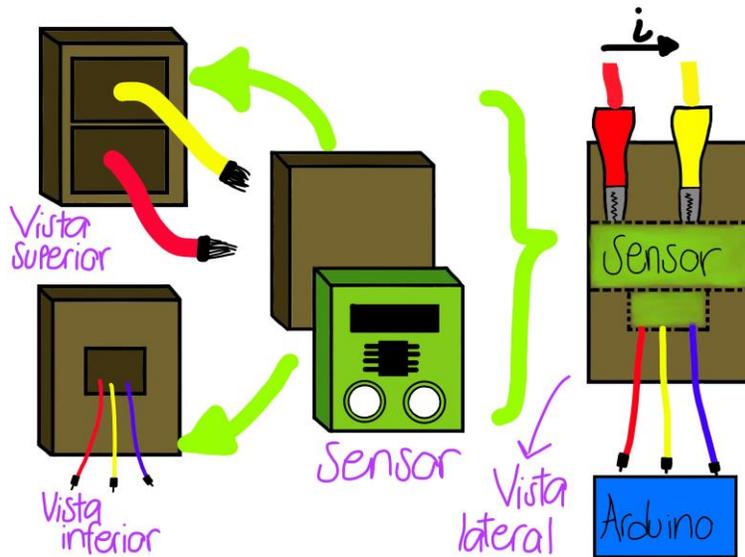


Figura [2.19]. Segundo boceto de la base del sensor de corriente.

Este nuevo diseño cumple con las necesidades dado que es pequeño, barato, portátil y de rápida manufactura, en comparación con el propuesto anteriormente. Para cumplir con las necesidades de que soporte voltaje y amperaje de gran magnitud y que no se vea afectado por la temperatura y la humedad, se decidió utilizar MDF.

NECESIDADES
Que sea barato
Que sea pequeño
Que soporte un voltaje de gran magnitud
Que soporte un amperaje de gran magnitud
Que no se vea afectado por la temperatura
Que no se vea afectado por la humedad
Que sea portátil
Que sea de rápida manufactura

Figura [2.20]. Fragmento de Tabla 2.5 de Necesidades.

### 2.13 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE LA ALTERNATIVA ELEGIDA

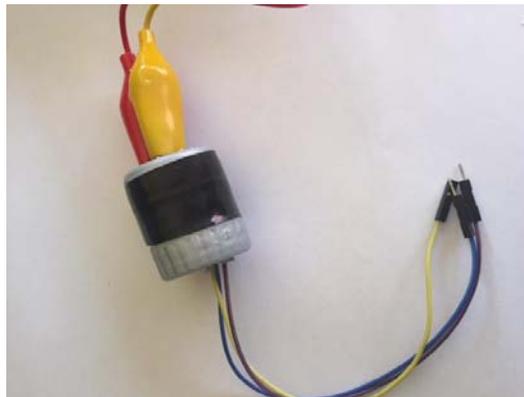
Ambos diseños cumplen con el requerimiento más importante, obtenido con el QFD, de ser pequeños, pero el segundo también nos brinda el ser más barato y un tiempo de manufactura menor.

El diseño cilíndrico y el cúbico son iguales, exceptuando la forma geométrica, y tienen los respectivos espacios para la conexión al controlador y la salida de los caimanes que medirán la corriente.

Se realizaron ambos modelos funcionales, la forma cilíndrica y la cúbica, para poder determinar cuál nos brindaba un mejor funcionamiento con base en las necesidades.

## 2.14 MODELO FUNCIONAL

El primer modelo funcional que se realizó, fue el de forma cilíndrica. A continuación se muestra una imagen de cómo quedó:



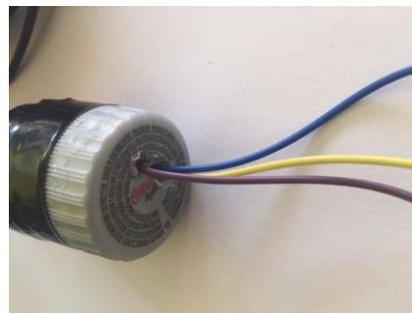
*Figura [2.21]. Modelo funcional cilíndrico de la base del sensor de corriente.*

En las siguientes imágenes, Figura 2.22, se muestra a detalle el diseño del modelo funcional junto con una explicación de lo que se hizo.

En estas dos primeras imágenes se pueden apreciar los espacios disponibles para los caimanes que midieron la corriente y para los cables que se conectaron al controlador del sensor. Uno de los primeros problemas que se vio con este diseño fue que se necesitó un espacio mayor para que ambos caimanes pudieran conectarse adecuadamente sin la posibilidad de que se tocaran entre ellos y pudieran crear algún fallo en el sensor. En cuanto al espacio necesario para los cables que se conectarán al controlador, no fue necesario mucho ya que estos cables son bastante delgados, calibre 24 de la galga americana para cables (del inglés AWG – *American Wire Gauge*).



*a)*

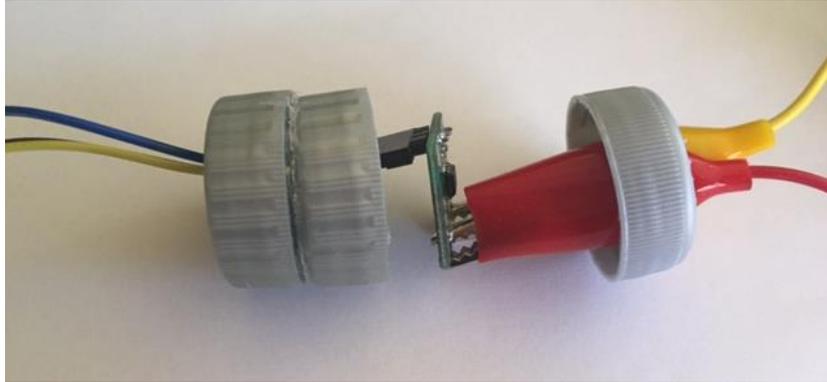


*b)*

*Figura [2.22]. Modelo funcional cilíndrico: a) espacio disponible para los caimanes que medirán la corriente; b) espacio disponible para los cables que se conectarán al controlador.*

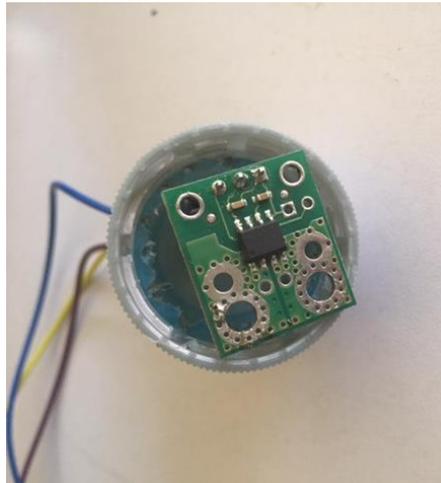
Ya que se observó la parte exterior del modelo funcional, se continuo a mostrar la parte interior en las siguientes imágenes.

En la Figura 2.23 se puede observar cómo están colocados los elementos en el interior, en uno de los lados del sensor se encuentran los cables para el controlador y del otro lado los caimanes.



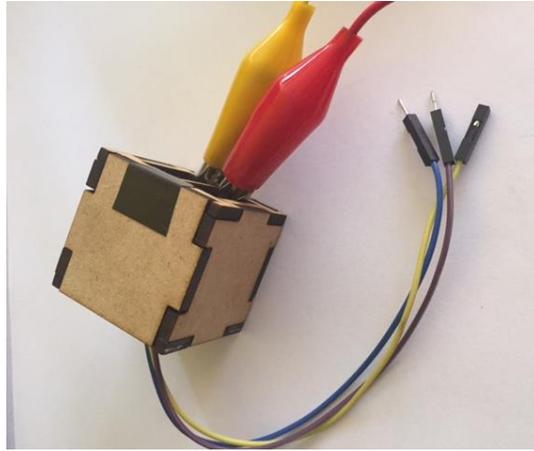
*Figura [2.23]. Modelo funcional cilíndrico en el interior.*

Para la siguiente Figura se retiraron los caimanes para permitir una mejor visualización de la posición del sensor. Aquí surgió otro problema, dado que la forma geométrica del sensor es cuadrangular y la del modelo funcional es cilíndrica, el sensor no puede embonar de una manera adecuada, por lo que al realizar el modelo funcional se tuvieron muchos problemas para colocar el sensor dentro. Esto se complicó aún más, al agregarle las conexiones al sensor, porque tendían a jalar el sensor en otra posición y esto evitaba más que se pudiese cerrar.



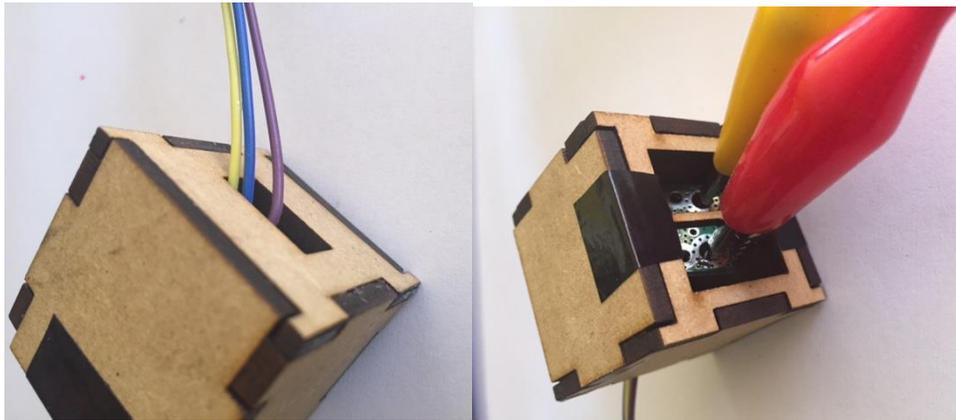
*Figura [2.24]. Modelo funcional cilíndrico con el sensor.*

En las siguientes imágenes se muestra cómo fue que se realizó el modelo funcional con forma cúbica. En esta primera imagen, Figura 2.25, se puede observar su apariencia final.



*Figura [2.25]. Modelo funcional cúbico de la base del sensor de corriente.*

En las siguientes imágenes se observan los espacios para las conexiones y como se mejoraron los del modelo funcional cilíndrico. Para el caso de los cables que iban al controlador, se les dejó un espacio amplio para poder meterlos o sacarlos de manera fácil y rápida. Para corregir el problema de que se puedan tocar los caimanes entre sí, se decidió hacerles un recuadro y una división entre estos, esto permitió que realizaran su función sin poner en riesgo el sensor o cualquier otro componente.



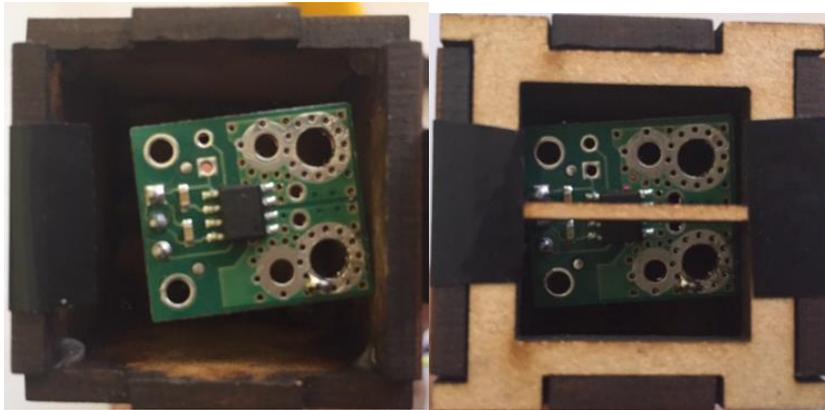
*a)*

*b)*

*Figura [2.26]. Modelo funcional cúbico: a) espacio disponible para los caimanes que medirán la corriente; b) espacio disponible para los cables que se conectarán al controlador.*

Finalmente, en la siguiente imagen se puede observar cómo se vería por dentro con el sensor. Se nota que existe bastante espacio disponible entre las paredes del cubo y el sensor, esto se hizo para permitir que se pudieran conectar los cables o los caimanes sin que ninguno de los dos tuviese que ser forzado para mantener la conexión.

Se pueden observar con mayor detalle los espacios que fueron utilizados para los caimanes y la división entre estos. También se ve la portabilidad del diseño, lo que logró que se cumplieran las necesidades de ser pequeño, barato, de rápida manufactura y portátil.



*Figura [2.27]. Modelo funcional cúbico con el sensor.*

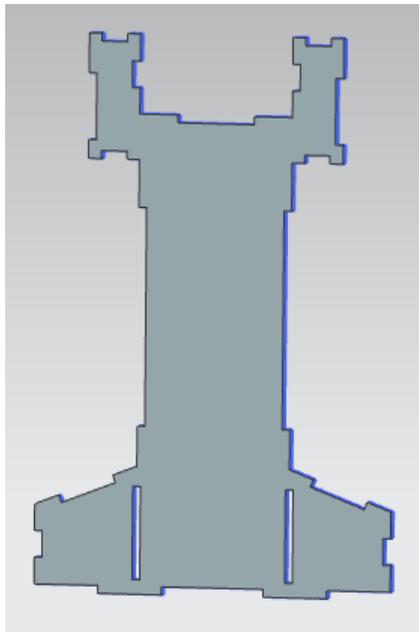
# CAPÍTULO 3. DISEÑO MECÁNICO

## SOPORTE PARA MICROSCOPIO DIGITAL

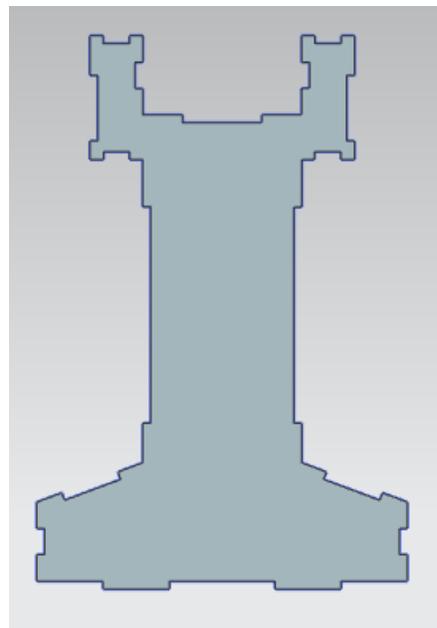
### 3.1 DISEÑO EN CAD

Después de realizar los análisis necesarios con la fabricación del modelo funcional, se prosigió a realizarlos digitalmente con una herramienta de diseño por computadora, Siemens NX 10.

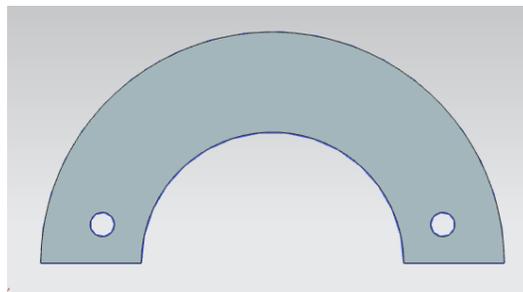
En las siguientes imágenes se muestran las piezas en CAD, las cuales fueron utilizadas para ser manufacturadas en MDF mediante la técnica de corte láser.



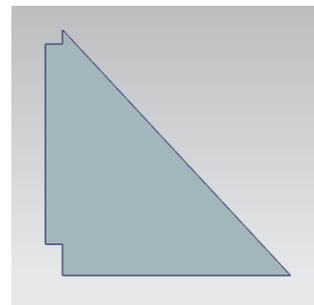
a)



b)

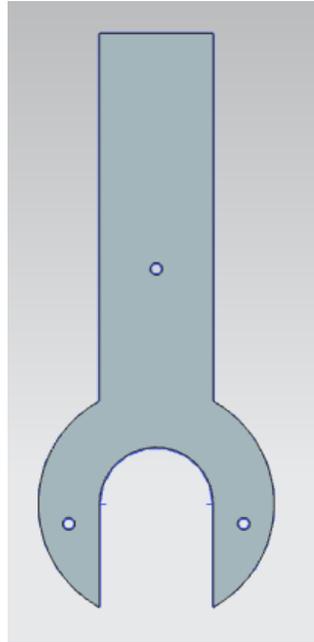


c)

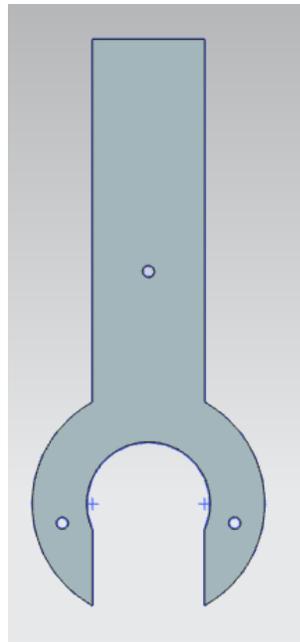


d)

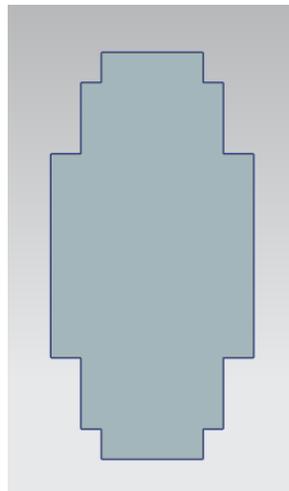




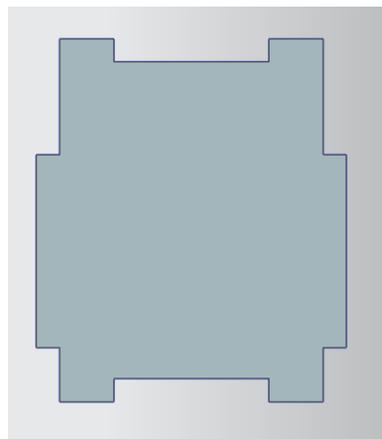
e)



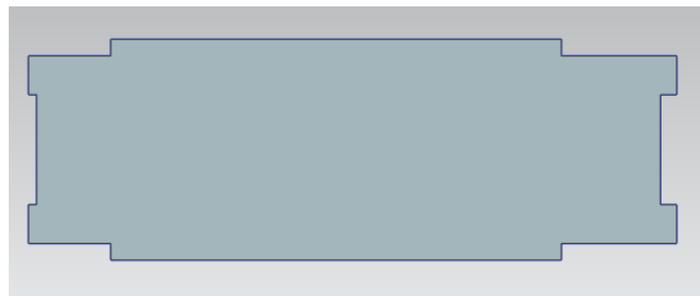
f)



g)



h)



i)

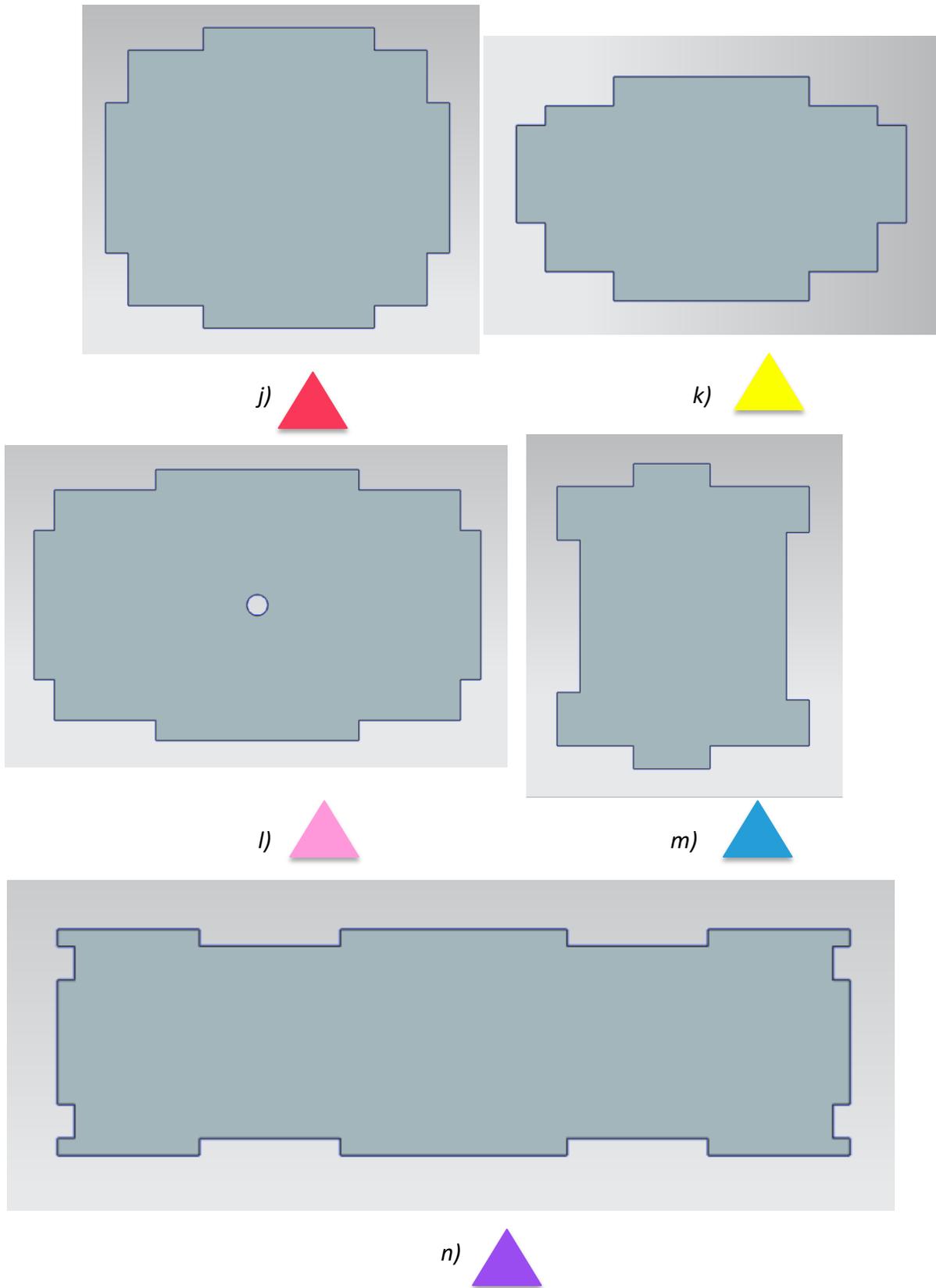
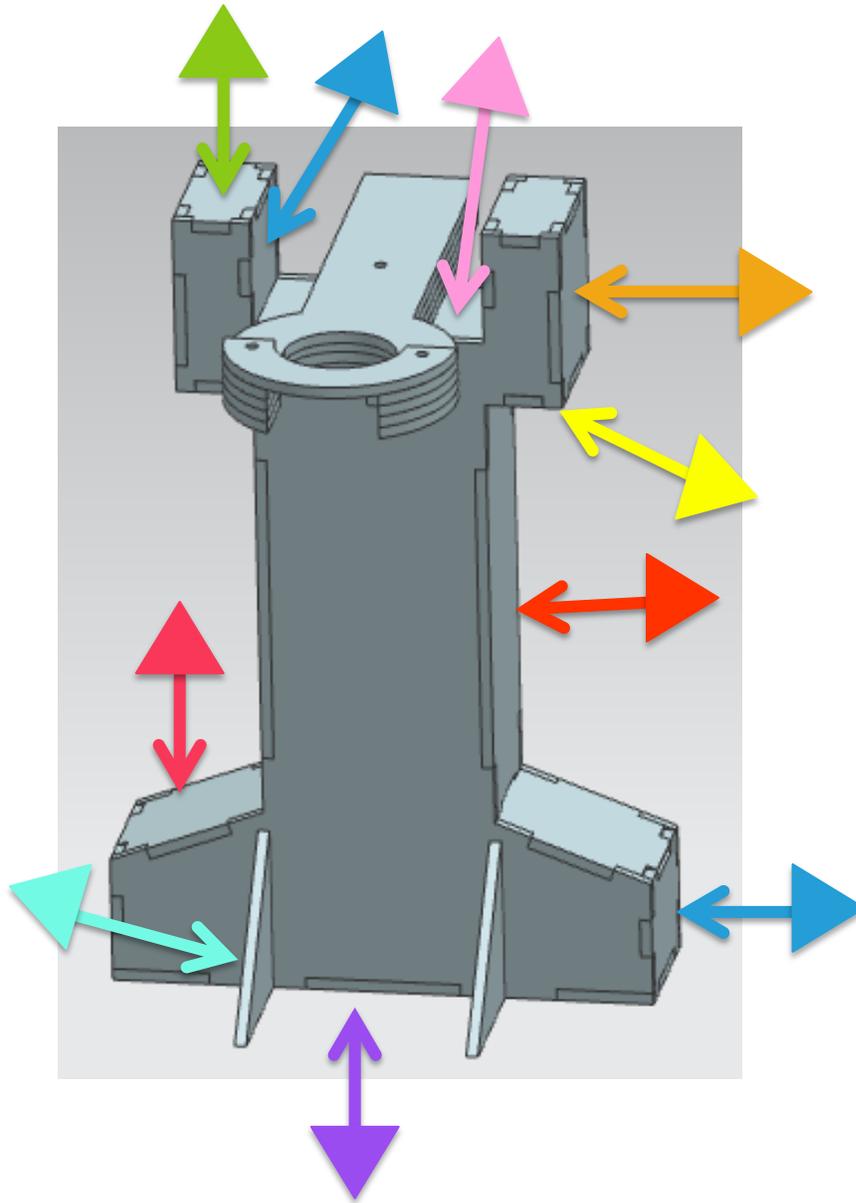


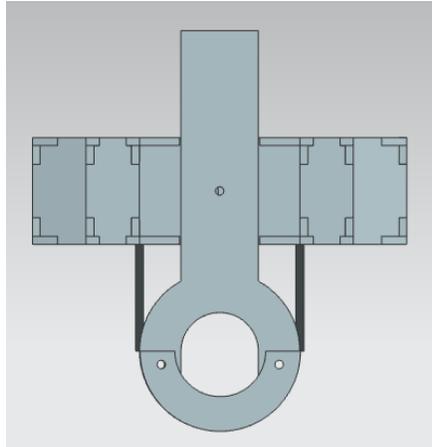
Figura [3.1]. CAD de las piezas del soporte para el microscopio (a-n).

En la siguiente imagen se muestra por medio de flechas y triángulos de colores en dónde van colocadas cada una de las piezas.

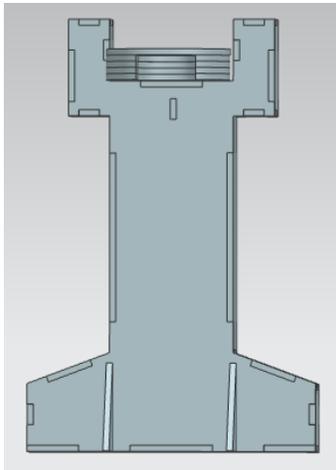


*Figura [3.2]. Indicadores de la posición de las piezas en el soporte para el microscopio.*

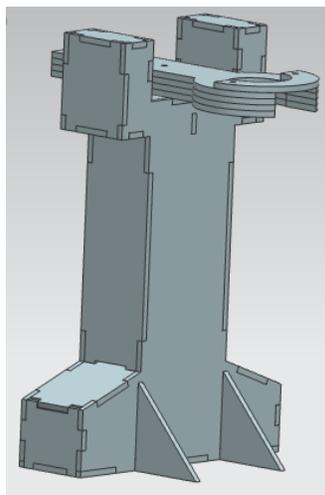
En las siguientes imágenes se observa como quedó el ensamble final del soporte para el microscopio en diferentes vistas. Esto permitirá que se pueda ver con mayor detalle el diseño del soporte y cómo es que se ensamblaron las piezas.



*Figura [3.3]. Soporte para el microscopio (Vista superior).*



*Figura [3.4]. Soporte para el microscopio (Vista frontal).*



*Figura [3.5]. Soporte para el microscopio (Isométrico).*

## 3.2 ESPECIFICACIONES FINALES

En este apartado se muestran las especificaciones y cómo es que se llegó a ellas. El volumen, la altura y el peso se tuvieron que medir. Los primeros dos se hicieron con ayuda de Siemens NX y del prototipo final, mientras que el peso, se utilizó una báscula para saberlo.

En las siguientes imágenes se presentan las dimensiones obtenidas mediante NX, de la altura, el largo y el ancho del soporte.

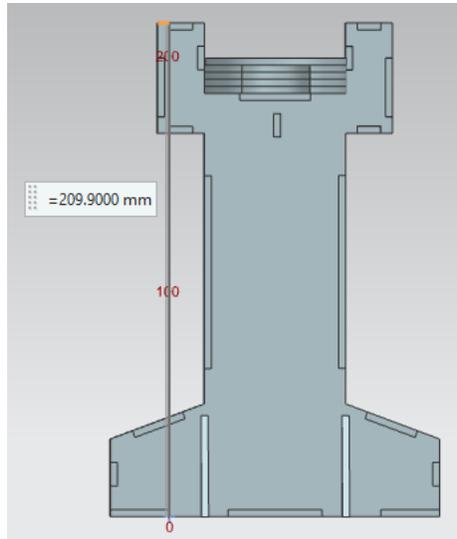


Figura [3.6]. Altura del soporte para el microscopio.

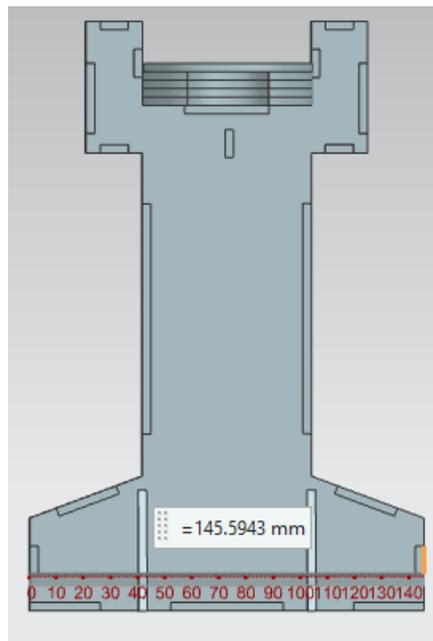


Figura [3.7]. Largo del soporte para el microscopio.

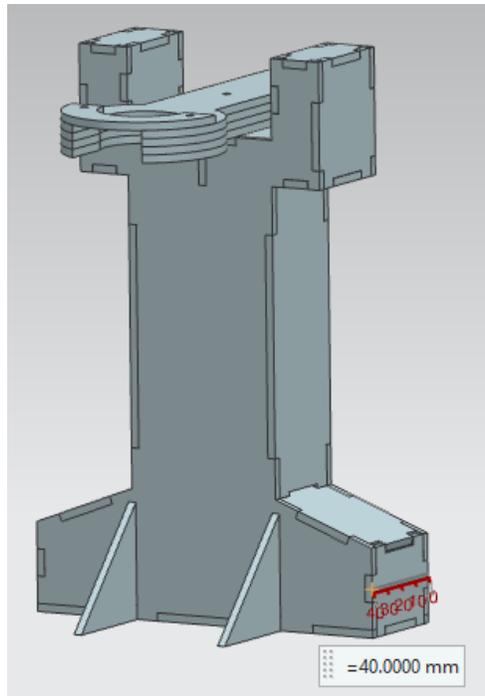


Figura [3.8]. Ancho del soporte para el microscopio.

De las imágenes se tiene que la altura es de 21 cm, el largo de 14.6 cm y el ancho de 4 cm, por lo que se tiene que la altura máxima es de 21 cm y el volumen total es de 1226.4 cm<sup>3</sup>.

Las especificaciones finales del soporte para el microscopio se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla [3.1]. Especificaciones finales del soporte para el microscopio (Parte 1).

ESPECIFICACIONES	VALOR	UNIDADES
Costo del material	250	[\$]
Volumen total	1226.4	[cm <sup>3</sup> ]
Altura máxima	21	[cm]
Peso máximo		[kg]
Tiempo máximo	250	[hr]

En cuanto a las especificaciones de que no se vea afectado por la temperatura y la humedad, se investigó que el MDF es un material que no soporta altas temperaturas y humedad. Las soluciones que se utilizaron, trabajan en un rango de temperatura 20 - 30 °C y de humedad 30 – 45%, tomando en cuenta que el lugar donde se realizan las pruebas es el mismo y las condiciones ambientales suelen estar en el mismo rango. Con ésta información se puede concluir que el rango de temperatura y humedad con el que se trabaja no afectará el material.

El rango de voltaje y amperaje es amplio, pero esto es debido a que se realizaron pruebas con diferentes soluciones y cada una tiene parámetros definidos y diferentes.

Para obtener la repetibilidad del proceso, el tener un soporte que mantuviese fijo al microscopio, ayudó a tener repetibilidad. Aunque, debido a las condiciones ambientales, esto no se puede obtener en un 100%.

La luminosidad está dada por el microscopio digital, ya que cuenta con 8 LEDs de luz blanca y se decidió utilizarlos. En el Capítulo 4 se describen las características del microscopio. El contraste se dio por el ambiente de la misma cabina y se utilizó una escala de contrastes, Figura 3.6, para identificar el % correspondiente. En la siguiente Tabla se muestran las especificaciones faltantes:

Tabla [3.2]. Especificaciones finales del soporte para el microscopio (Parte 2).

ESPECIFICACIONES	VALOR	UNIDADES
Rango de voltaje	5 - 20	[kV]
Rango de amperaje	0.3 – 0.9	[A]
Temperatura máxima	30	[°C]
Humedad máxima	45	[%]
Repetibilidad	Si	[NA]
Luminosidad	600	[Lux]
Contraste	60	[%]

En la siguiente imagen se muestra un ejemplo de la escala de contraste, la cual nos permitió comparar con el que se utilizó en la cabina y definir el porcentaje.

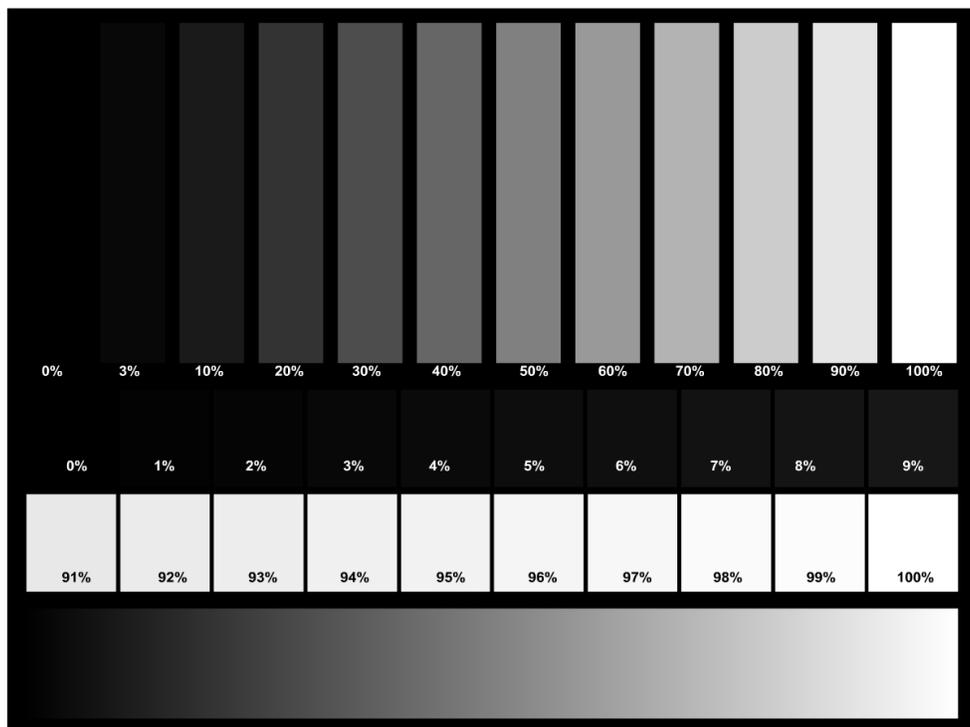
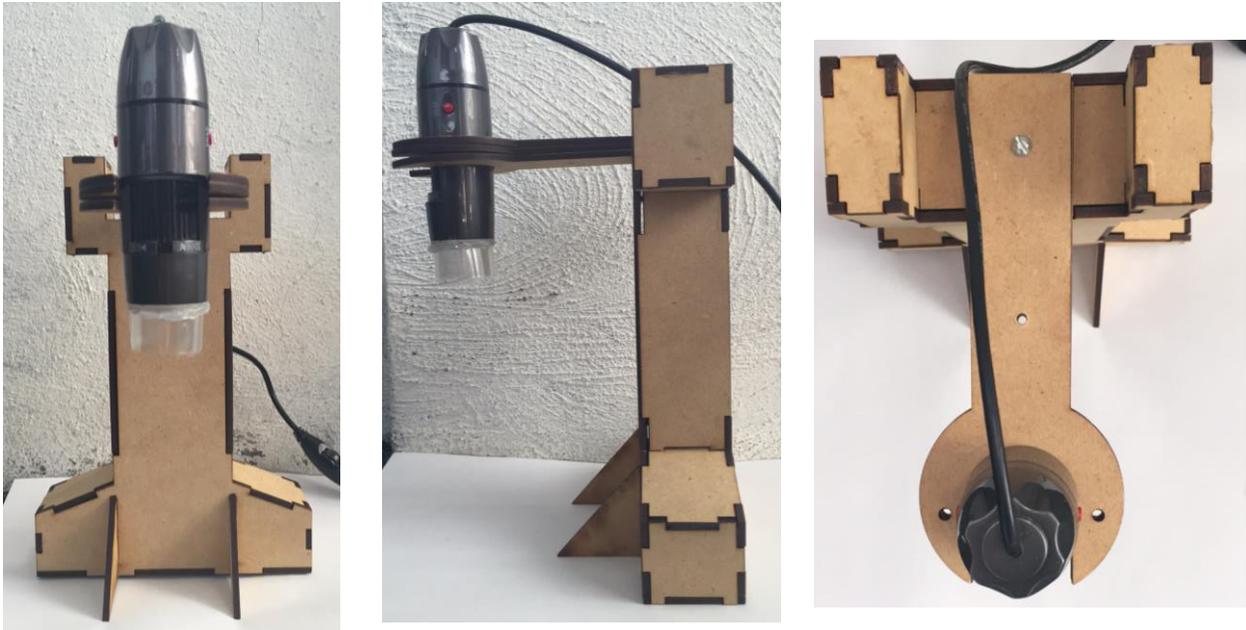


Figura [3.9]. Escala de contrastes.

### 3.3 PRESENTACIÓN DEL PROTOTIPO FINAL

En las siguientes imágenes se muestra el prototipo final y cómo es que se veía dentro de la cabina para electrohilar, con el microscopio colocado y con los demás elementos necesarios para el proceso.



*Figura [3.10]. Prototipo final del soporte para el microscopio.*



*Figura [3.11]. Prototipo final del soporte para el microscopio dentro de la cabina para electrohilar.*

## 3.4 DISEÑO EN CAD

Al igual que con el soporte para el microscopio, se realizaron las piezas en CAD para la base del sensor de corriente. En las siguientes imágenes se muestran las piezas:

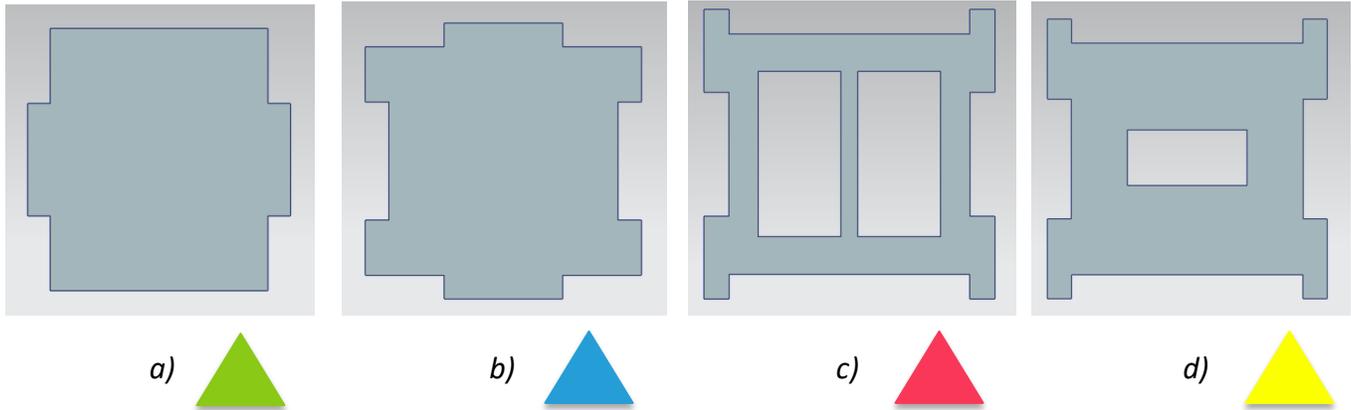


Figura [3.12]. CAD de las piezas de la base del sensor de corriente (a-d).

En la siguiente imagen se muestra por medio de flechas y triángulos de colores en dónde van colocadas cada una de las piezas.

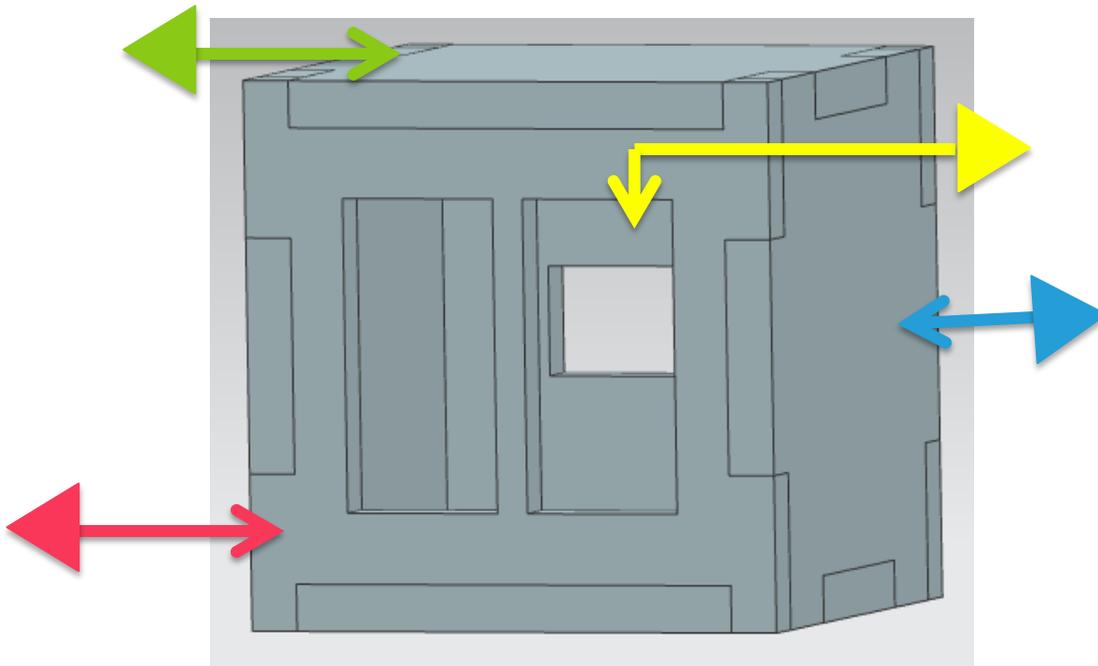


Figura [3.13]. Indicadores de la posición de las piezas en la base del sensor de corriente.

En las siguientes imágenes se observa cómo quedó el ensamble final de la base del sensor de corriente.

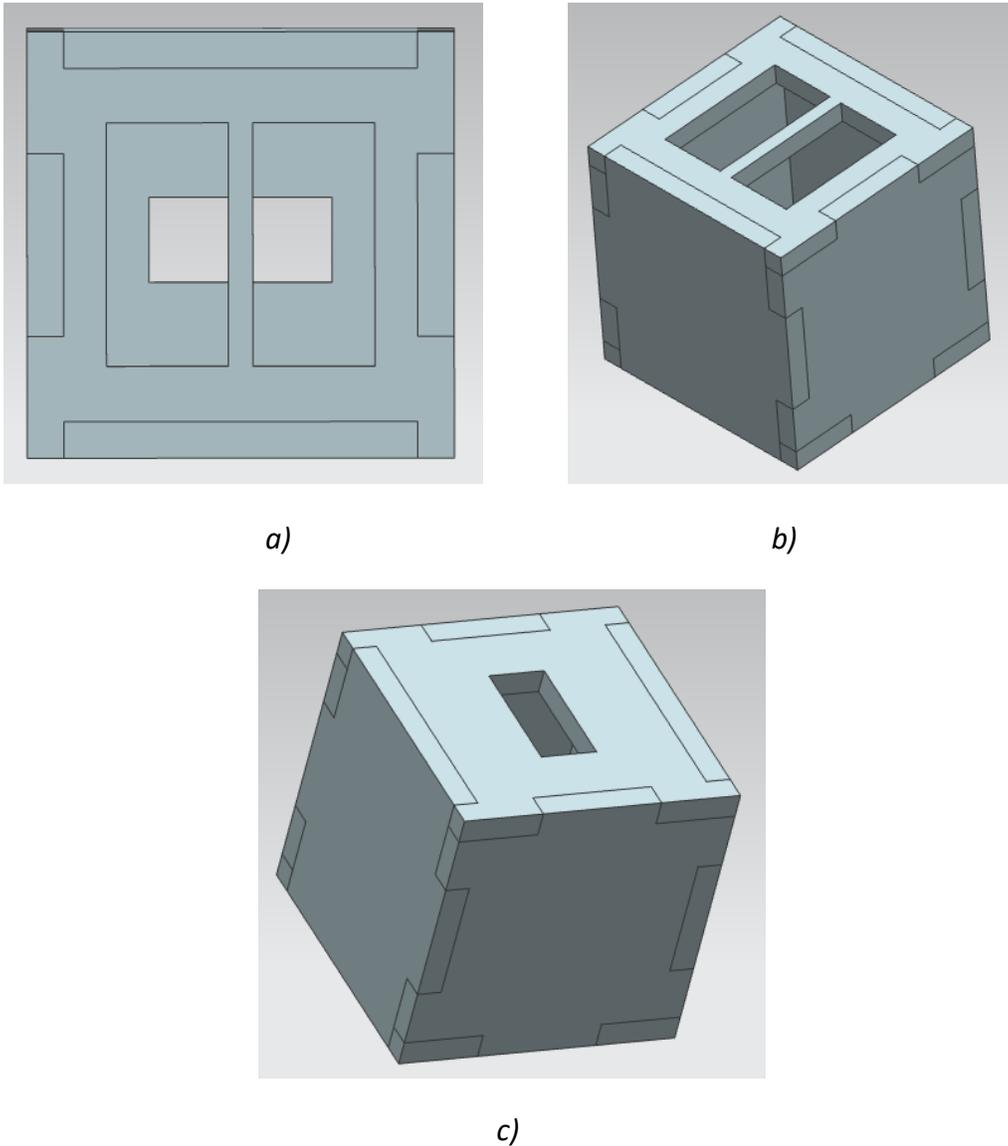


Figura [3.14]. Base del sensor de corriente (a-c).

### 3.5 ESPECIFICACIONES FINALES

A continuación se describen las especificaciones finales, de las cuales, el volumen total se obtuvo mediante la herramienta de Siemens NX y el peso mediante el uso de una báscula.

El programa de NX nos permitió obtener los datos de la altura, el largo y el ancho de la base.

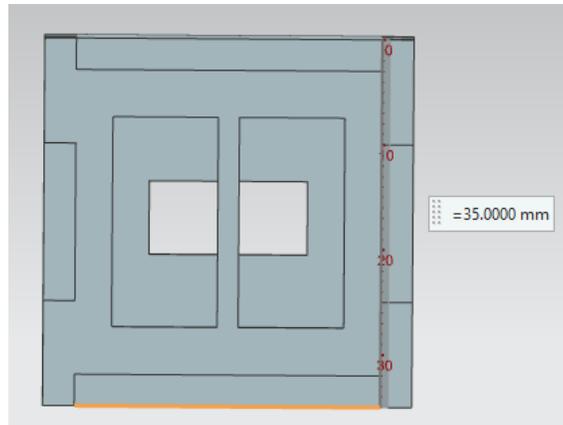


Figura [3.15]. Altura de la base del sensor de corriente.

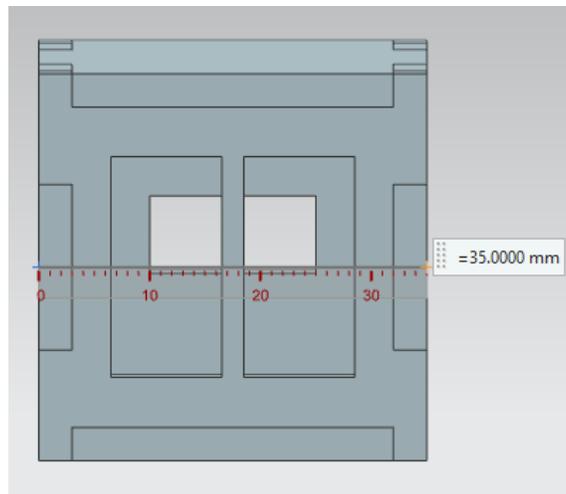


Figura [3.16]. Largo de la base del sensor de corriente.

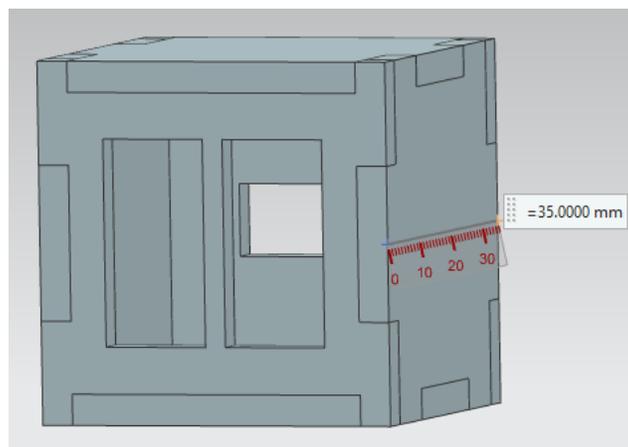


Figura [3.17]. Ancho de la base del sensor de corriente.

De las imágenes, se tiene que la altura es de 3.5 cm, el largo de 3.5 cm y el ancho de 3.5 cm, por lo que se tiene que el volumen total es de 42.875 cm<sup>3</sup>.

Los valores del rango de voltaje y amperaje, así como de la temperatura y la humedad máxima se mantuvieron igual que para el soporte del microscopio, dado que ambos se encuentran en el mismo ambiente y bajo las mismas condiciones.

Tabla [3.3]. Especificaciones finales de la base del sensor de corriente.

ESPECIFICACIONES	VALOR	UNIDADES
Costo del material	100	[\$]
Volumen total	42.875	[cm <sup>3</sup> ]
Rango de voltaje	5 - 20	[kV]
Rango de amperaje	0.3 – 0.9	[A]
Temperatura máxima	30	[°C]
Humedad máxima	45	[%]
Peso máximo		[g]
Tiempo máximo	100	[Horas]

### 3.6 PRESENTACIÓN DEL PROTOTIPO FINAL

En la siguiente imagen se muestra el prototipo final:

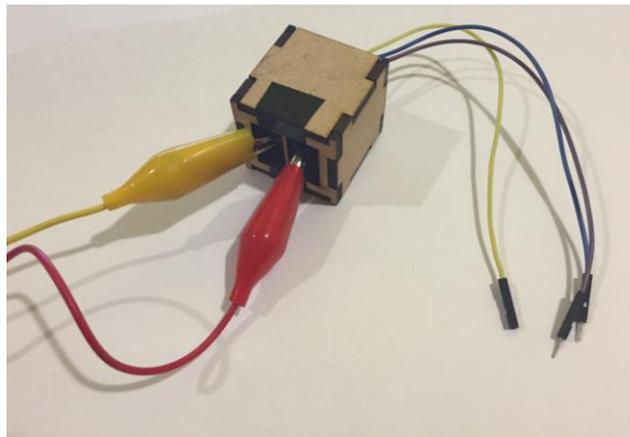


Figura [3.18]. Base del sensor de corriente.

# CAPÍTULO 4. DISEÑO ELECTRÓNICO

## MICROSCOPIO DIGITAL

### 4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

En este apartado se explicará cómo es que se llegó a la elección final de la herramienta de visión y qué pruebas se realizaron para llegar a ella.

Para la realización del sistema de visión se requiere una herramienta que sea de un material resistente al campo eléctrico de gran magnitud, es decir, debe ser de un material aislante o en caso contrario, se tendrá que buscar la manera de aislarlo. También debe tener un zoom óptico grande debido a que el cono de Taylor y el jet no suelen ser perceptibles al ojo humano, esto ejemplifica lo difícil de poder observarlos. Debe ser de un tamaño pequeño, menor a 30cm, porque tiene un espacio limitado dentro de la cabina. A parte de estas características, debe ser posible que tenga conexión a la computadora, preferiblemente mediante Bus Universal en Serie (del inglés *USB – Universal Serial Bus*).

En el proceso de electrohilado se necesitan de diferentes herramientas de visión para observar el cono de Taylor y los andamios de las fibras. Para observar el cono se suelen utilizar cámaras de alta velocidad y para los andamios se requiere del uso del microscopio electrónico de barrido (del inglés *SEM – Scanning Electron Microscopy*).

### 4.2 PRUEBAS DE HERRAMIENTAS DE VISIÓN

Para decidir que herramienta serviría se realizaron ciertas pruebas, comenzando con el microscopio digital GAM-100 de Steren. Este microscopio tiene las siguientes especificaciones:

*Tabla [4.1]. Especificaciones microscopio digital GAM-100®.*

ESPECIFICACIONES	VALOR	UNIDADES
Cable incorporado	1.3	[m]
Zoom óptico	25 - 60	[X]
Resolución	1.3	[megapixeles]
Alimentación (USB)	5	[Vcc]
Peso	90	[g]



Figura [4.1]. Microscopio digital GAM-100®.

Para un mejor funcionamiento de las herramientas de visión es necesario crear una relación entre el contraste y la iluminación, es por esto que se realizaron pruebas con diferentes tipos de luz y contraste. Cabe mencionar que estos dispositivos son muy sensibles a cambios pequeños en la iluminación dada por el ambiente, es por ello que en algunos lugares el contraste de un nivel 0 % funciona y en otros no.

Para las primeras pruebas se utilizó la luz del propio microscopio, que son LEDS que al mover una rosca modifican su intensidad, y debido a que el lugar donde se realizaron tenía niveles de luxes elevados, más de 1000 lux, se tuvo que usar un fondo blanco y casi al mínimo la luz del microscopio. Para esta prueba se utilizó cabello y el resultado que se obtuvo fue el siguiente:

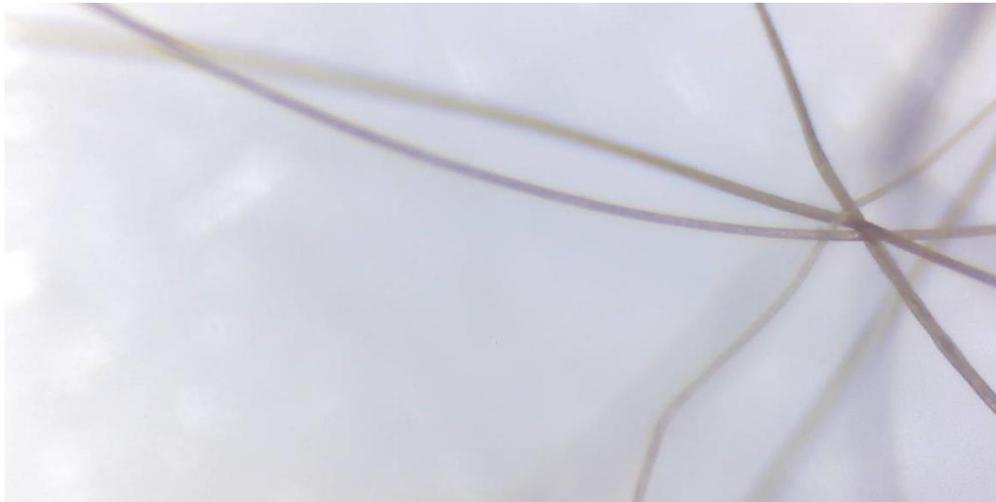


Figura [4.2]. Cabello visto desde el microscopio GAM-100®.

Se obtuvo la imagen clara del cabello humano, sin embargo considerando que el proceso de electrohilado se lleva en la escala de Micro y Nano, se obtendría una mejor visualización con un elemento que tuviese un mayor zoom óptico. Cabe mencionar que este microscopio cumple con la mayoría de las características que se

mencionaron en un principio porque es pequeño y de plástico, lo que le podría permitir soportar el campo eléctrico y ocupar el espacio que se tiene disponible.

La siguiente herramienta de visión que se probó fue una cámara semiprofesional Coolpix P600 marca Nikon®, de la cuál se tienen las siguientes especificaciones:

*Tabla [4.2]. Especificaciones cámara digital Nikon Coolpix P600®.*

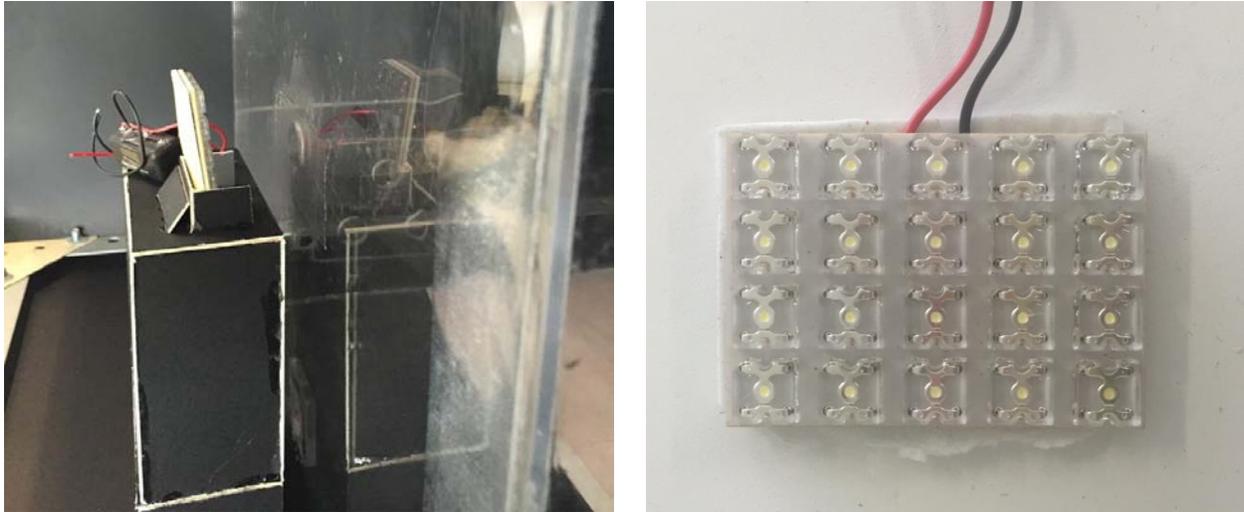
ESPECIFICACIONES	VALOR	UNIDADES
Dimensiones	125x85x106.5	[mm]
Zoom óptico	60	[X]
Resolución	16.1	[megapíxeles]
Alimentación	Batería recargable	[NA]
Peso	565	[g]
Zoom digital	4	[X]

Para ésta cámara se probaron dos tipos de luces; una matriz de LEDs y una lámpara con luz de halógeno. En cuanto al contraste, dependiendo del ambiente se usaba un fondo negro o papel milimétrico, para tener una referencia. En estas pruebas se utilizó la aguja de una jeringa, para tener una mayor aproximación a lo que se tendría que ver durante el proceso de electrohilado.

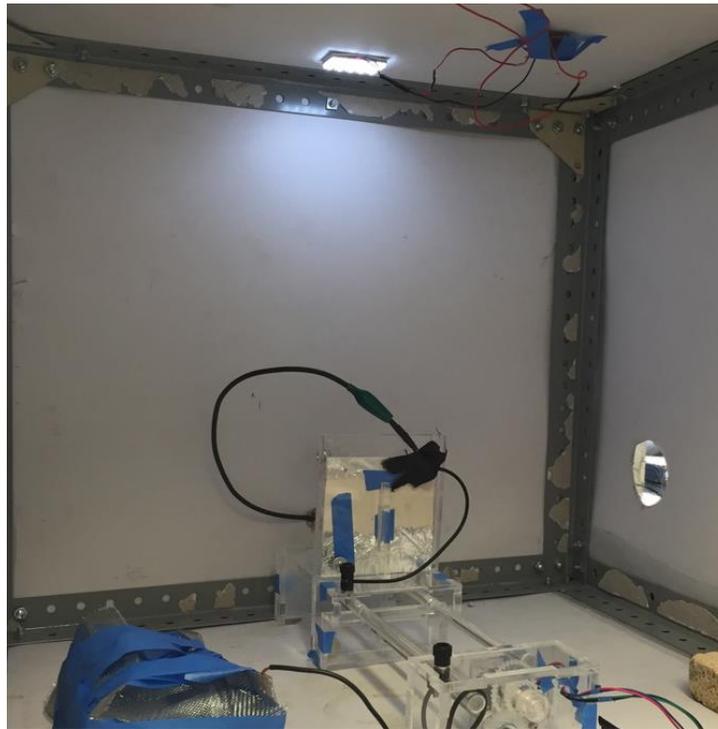


*Figura [4.3]. Cámara digital Nikon Coolpix P600®.*

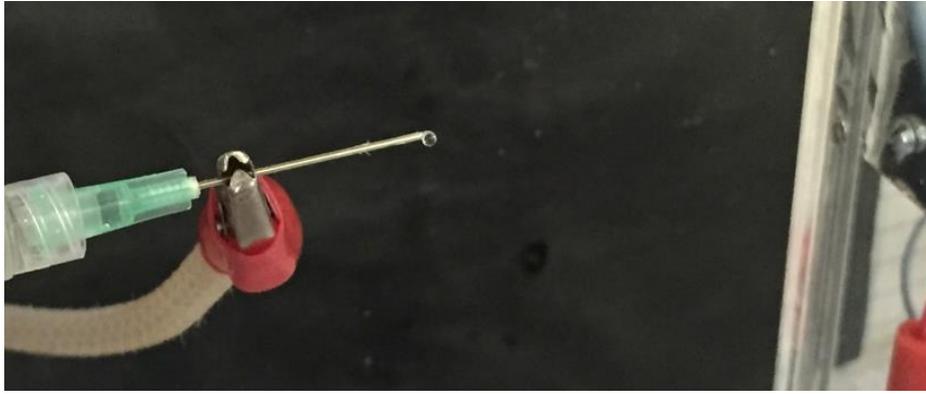
En las siguientes imágenes se muestran los resultados que se obtuvieron usando un fondo negro, la matriz de LEDs y la cámara Nikon® en la cabina de pruebas. Para los LEDs se probaron diferentes posiciones, en la parte superior de la cabina o en uno de los lados frente a la cámara, resultando ambos favorables. Para colocarlos frente a la cámara se fabricó una pequeña base para que quedase justo en frente de la lente y para la parte superior, estos LEDs tenían una parte con pegamento por lo que se pudieron pegar directamente.



*Figura [4.4]. Matriz de LEDs utilizada para las pruebas.*



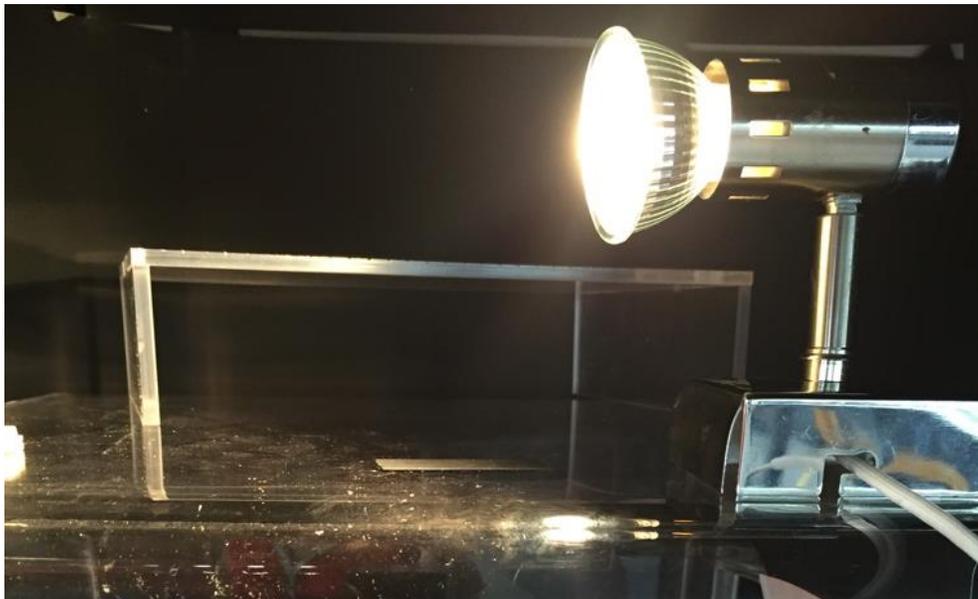
*Figura [4.5]. Matriz de LEDs utilizada para las pruebas dentro de la cabina de pruebas.*



*Figura [4.6]. Imagen resultante utilizando la cámara Nikon y LEDS.*

En las siguientes imágenes se utilizaron la lámpara de halógeno y para el fondo una hoja milimétrica. El problema de usar lámparas de halógeno es que su temperatura incrementa y dado que la cabina es de acrílico, la lámpara provocaría que ésta se derritiera y más considerando que el electrohilado suele tener una duración de mínimo 1 hora. Para las pruebas la lámpara se colocó en la parte exterior superior de la cabina de prueba, para evitar que se calentará mucho la cabina.

Las imágenes resultantes no tuvieron una buena resolución, incluso fueron peores que las que se obtuvieron con los LEDS.



*Figura [4.7]. Lámpara de halógeno utilizada para las pruebas.*

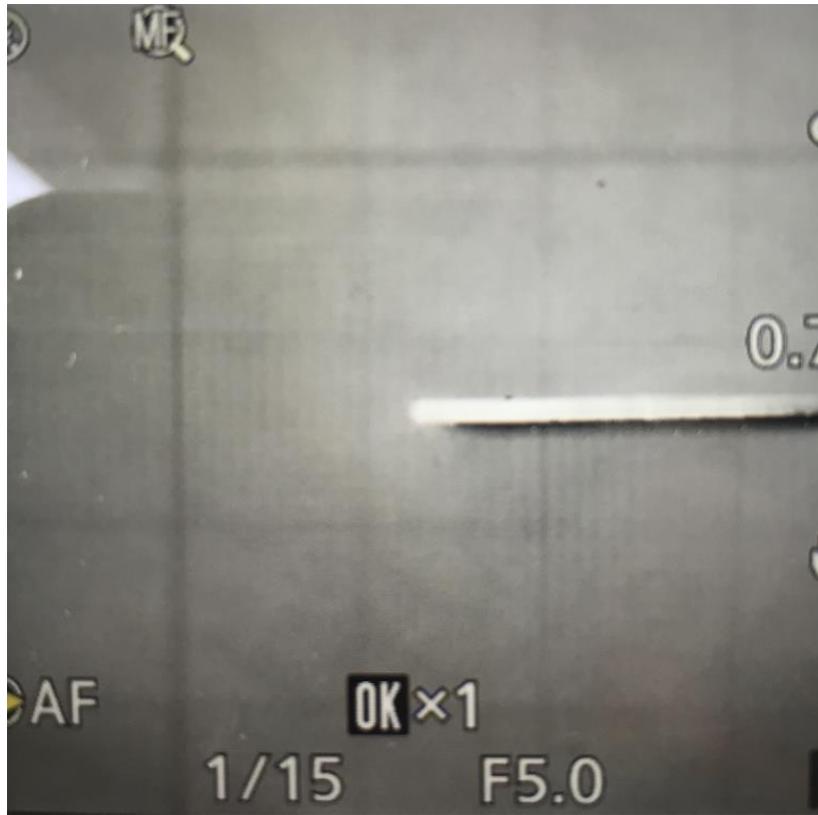


Figura [4.8]. Imagen resultante utilizando la cámara Nikon® y lámpara de halógeno.

Al final, el usar la cámara conlleva varios problemas que no cumplen con las características que se definieron. Una es que no se puede colocar dentro o muy cerca de la cabina para electrohilar porque contiene una gran cantidad de piezas metálicas y no es posible aislarlas. Por otra parte, para hacer uso del zoom saldría la lente lo que resultaría en la necesidad de mucho espacio y también se tiene un sin número de problemas para conseguir la iluminación adecuada. Al final, las imágenes que se obtuvieron tampoco tienen la resolución que se requiere para observar el cono de Taylor y/o el jet, por lo que se tuvo que buscar otra opción.

La siguiente herramienta de visión que se eligió fue un microscopio digital USB de 800x marca Red lemon, el cual tiene las siguientes especificaciones:

Tabla [4.3]. Especificaciones microscopio digital .

ESPECIFICACIONES	VALOR	UNIDADES
Iluminación 8 LEDs	600	[Lux]
Zoom óptico	800	[X]
Resolución	2	[megapíxeles]
Alimentación (USB)	5	[Vcc]
Peso	120	[g]

En principio se eligió este microscopio porque tiene mayor zoom que el GAM-100® pero sigue cumpliendo con las demás características. Para probarlo también se utilizaron la matriz de LEDs y la lámpara de halógeno, aunque los LEDs que vienen incluidos resultaron brindar mejor calidad en las imágenes, por lo que se decidió que se utilizarían estos.



*Figura [4.9]. Microscopio digital USB 800x.*

En las siguientes imágenes se muestran los resultados al utilizar este microscopio, en donde se empleó la aguja de una jeringa junto con un fondo negro. Las luces de los LEDs se fueron variando hasta que se observó que la calidad de la imagen fuese mejorando y como se mencionó anteriormente, estas luces dependían de la misma luz ambiental y del contraste.



*Figura [4.10]. Imagen resultante utilizando el microscopio digital de 800x.*

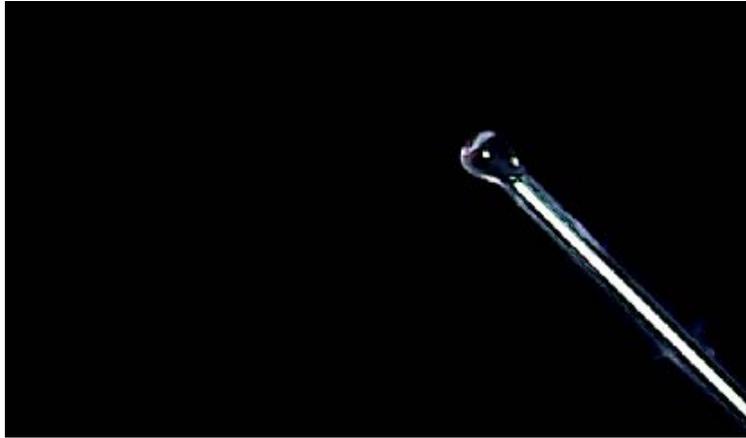


Figura [4.11]. Imagen resultante utilizando el microscopio digital de 800x (Parte 2).

La resolución de las imágenes resultantes demostró que éste microscopio tiene las características necesarias para cumplir con el objetivo.

### 4.3 SELECCIÓN DE LA HERRAMIENTA DE VISIÓN

Después de las pruebas realizadas se decidió que el microscopio digital de 800x sería la mejor opción para utilizarlo como parte del sistema de visión. Es una herramienta pequeña, de un material que puede soportar el campo eléctrico, tiene la resolución suficiente para poder observar el cono de Taylor y la iluminación que tiene incluida ayuda a mejorar la calidad de la imagen.

En las siguientes imágenes se muestran el microscopio incluido en el proceso de electrohilado y los resultados obtenidos durante una prueba:

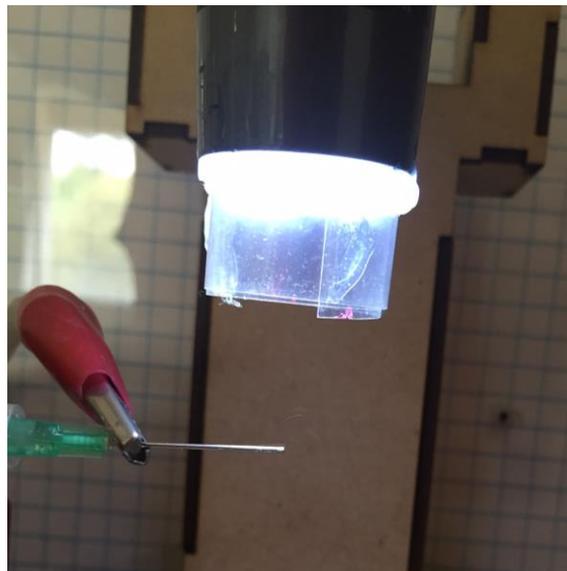
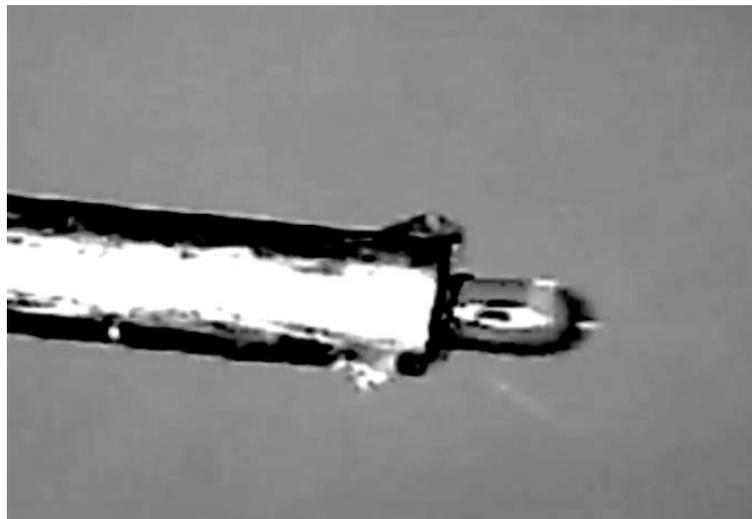


Figura [4.12]. Microscopio encima de la aguja de la jeringa.



*Figura [4.13]. Microscopio encima de la aguja de la jeringa durante el proceso.*



*Figura [4.14]. Imagen obtenida del microscopio durante la prueba realizada con PVA.*

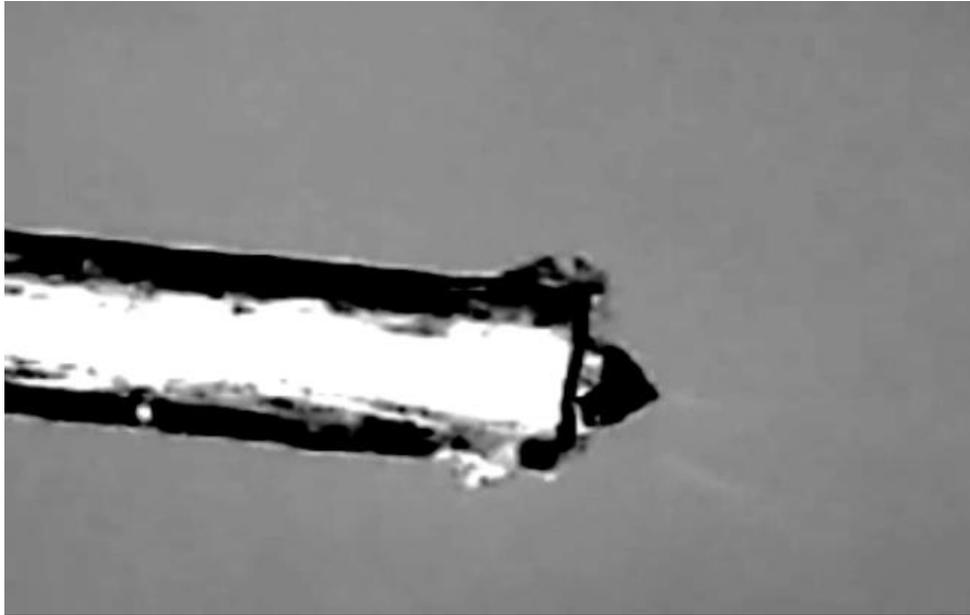


Figura [4.15]. Visualización del cono de Taylor (Nylon 66) mediante el microscopio.

## SENSOR DE CORRIENTE

### 4.4 DESCRIPCIÓN GENERAL

Para el sistema de medición de corriente se requiere de un dispositivo que sea capaz de medir la corriente, que soporte el campo eléctrico o que se pueda aislar y que se pueda utilizar en conjunto con un controlador.

Por facilidad se eligió como controlador un microcontrolador, específicamente un Arduino MEGA<sup>®</sup>, del cuál se muestran las especificaciones a continuación:

Tabla [4.4]. Especificaciones del Arduino MEGA<sup>®</sup>.

ESPECIFICACIONES	VALOR	UNIDADES
Microcontrolador	Atmega2560	[NA]
Voltaje operación	5	[V]
Voltaje entrada	7 - 12	[V]
Pines digitales I/O	54	[NA]
Pines analógicos entrada	16	[NA]
Velocidad reloj	16	[MHz]
Peso	37	[g]

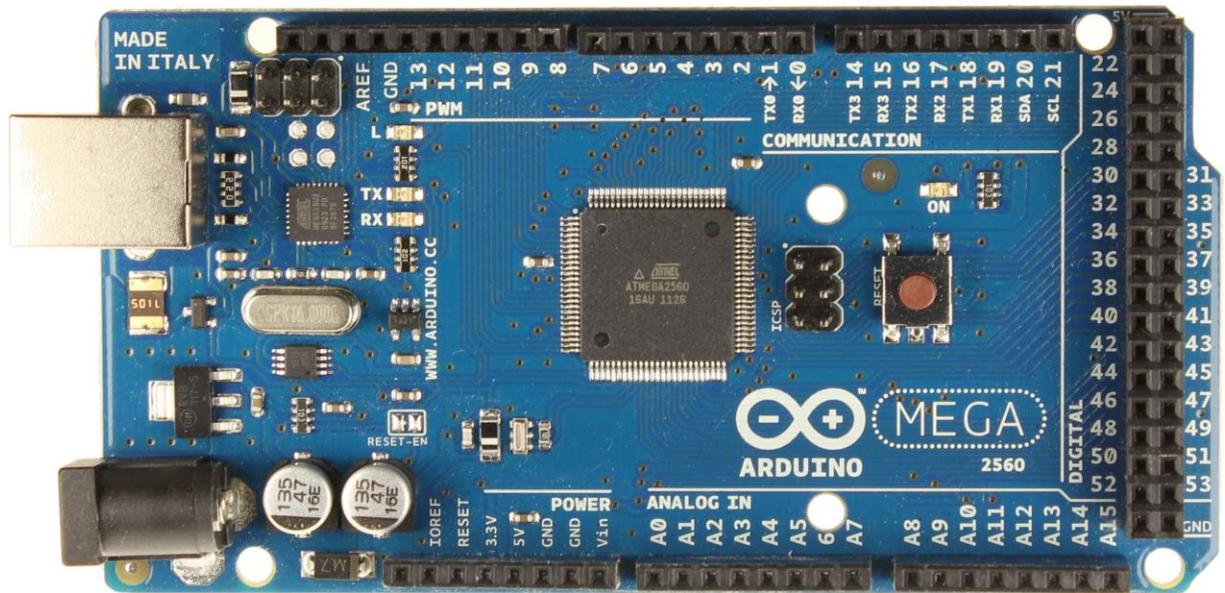


Figura [4.16]. Microcontrolador Arduino MEGA 2560®.

## 4.5 SELECCIÓN DEL SENSOR

Para elegir el sensor que más se adecuara a las necesidades de las pruebas, se realizó una búsqueda de los que se encuentran actualmente en el mercado. Al final, la decisión se quedó entre dos sensores debido a ciertos factores como el costo, la facilidad de uso, el tamaño, entre otros.

Se realizó una matriz de decisión, la cuál es una herramienta que permite analizar alternativas según ciertos factores, para poder determinar que sensor sería el más adecuado.

### 4.5.1 MATRIZ DE SELECCIÓN

Para tener un mejor entendimiento de la elección de los valores se darán breves definiciones de los factores [9].

- ✓ Sensibilidad: la mínima entrada de un parámetro físico, el cuál puede provocar un cambio detectable en la salida del sensor.
- ✓ Rango: el máximo y mínimo valor que puede ser medido por el sensor.
- ✓ Error: la diferencia entre el resultado de una medición y el valor verdadero de la cantidad que se mide.
- ✓ Precisión: grado de reproductibilidad de una medición.
- ✓ Exactitud: grado hasta el cuál un valor producido por un sistema de medición podría estar equivocado.
- ✓ Offset: el valor de salida, cuando la entrada al sensor es cero.
- ✓ Linealidad: la curva de un sensor difiere de una curva ideal.
- ✓ Tiempo de respuesta: tiempo en el que el sensor produce la salida.

Tabla [4.5]. Matriz de selección.

	Objetivo	Importancia (0-100)	Porcentaje	Sensor 1 ACS714	Sensor 2 SHT-111
Sensibilidad	+	70	11	-1	1
Rango	-	50	8	-1	1
Error	-	15	2	0	0
Precisión	+	80	13	0	1
Exactitud	+	80	13	1	1
Resolución	+	75	12	1	1
Offset	-	35	6	1	0
Linealidad	-	50	8	1	0
Tiempo de respuesta	+	85	14	1	1
Costo	+	85	14	2	-2
<b>TOTALES</b>		625	100	5	4

Después de realizar la matriz de selección, se llegó a elegir el sensor ACS714 marca Pololu®. Uno de los factores más influyentes fue el costo, ya que se buscaba un sensor que fuese accesible y pequeño, para que pudiese ser colocado en cualquier espacio.



Figura [4.17]. Sensor de corriente ACS714.

En la siguiente Tabla se presentarán las especificaciones del sensor:

Tabla [4.6]. Especificaciones del sensor de corriente ACS714.

ESPECIFICACIONES	VALOR	UNIDADES
Rango de operación	-5 a +5	[A]
Tiempo de respuesta	5	[ $\mu$ s]
Ancho de banda	80	[kHz]

Continuación Tabla [4.6]. Especificaciones del sensor de corriente ACS714.

Error de salida	1.5	[%]
Resistencia interna	1.2	[mΩ]
Alimentación	5	[V]
Sensibilidad salida	66 a 185	[mV/A]
Temperatura operación	-40 a 150	[°C]

A continuación se muestra la conexión que se realizó para conectar el microcontrolador con el sensor mediante el uso de la herramienta de diseño de circuitos, Fritzing.

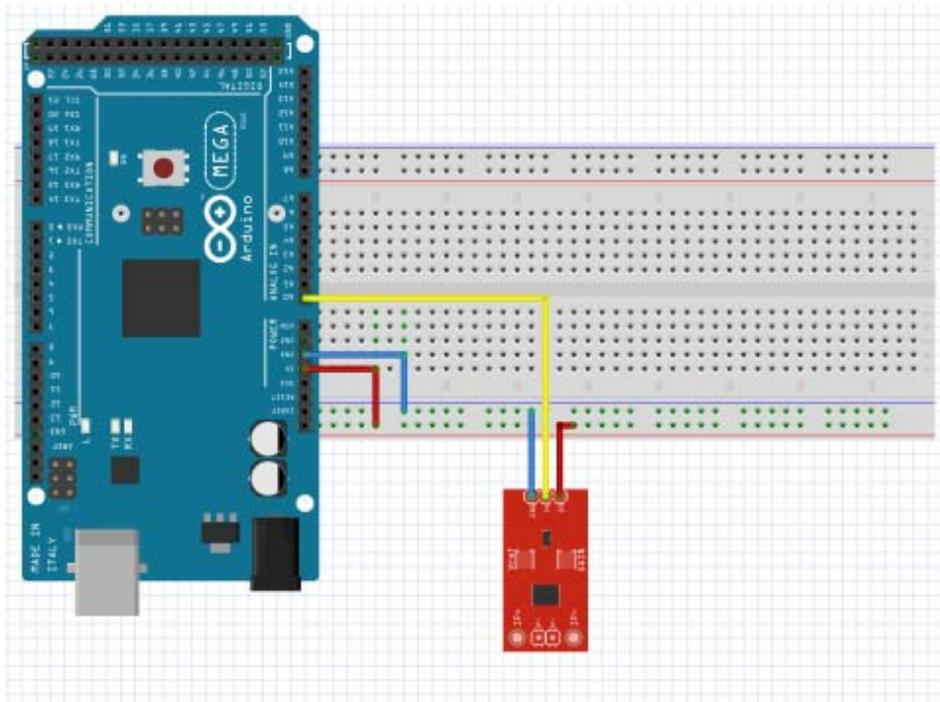


Figura [4.18]. Conexión del sensor al Arduino.

Ahora se presenta cómo es que funciona el sensor y cómo se representó esto con la ayuda de un algoritmo para la programación.

El sensor lee el valor de corriente y lo convierte a uno de voltaje; existe un valor que relaciona a los dos anteriores y es llamado sensibilidad. Este valor de sensibilidad, de entre 66 y 185 mV/A según el Datasheet, depende de que rango de corriente es el que se está midiendo y las condiciones ambientales, para estas pruebas resultó ser elegido el de 185 mV/A.

Para relacionar todos estos datos del sensor, se buscó algún algoritmo que al darle un valor de un pin analógico lo convirtiera a uno de corriente, el algoritmo es el siguiente:

$$A = \frac{(0.0049 * AnalogRead) - 2.5}{0.185}$$

La explicación del algoritmo es la siguiente: se tiene que la detección del voltaje es de 2.5 V cuando no hay corriente dado que el sensor mide corriente positiva y negativa, su alimentación es de 5V y mide un rango de entre 5 y -5. El sensor se conectará a un pin analógico del Arduino, el cuál da valores de salida de entre 0 y 1023, y para una entrada de 5 V se tiene que el incremento para llegar desde 0V a 5 V es de 0.0049 V.

En la sección de “Anexos”, en el Anexo D, se presentará el código que se utilizó para programar el sensor con Arduino.

# CAPÍTULO 5. SECCIÓN EXPERIMENTAL

## 5.1 CONFIGURACIÓN EXPERIMENTAL

Se realizaron varias pruebas con diferentes polímeros, entre ellos el alginato de sodio con PVA, PVA y con Nylon 66. Desafortunadamente como el voltaje requerido para electrohilar el alginato y el PVA es muy alto, mínimo 15 kV, y el campo resultante también no permite que el microscopio digital o el sensor funcionen. Es por ello que las pruebas se realizaron solamente con Nylon 66.

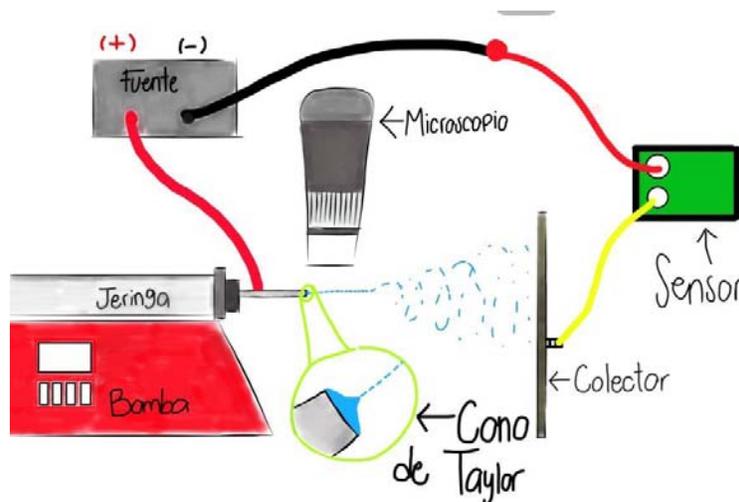
En cuanto a los equipos, se utilizó una bomba inyectora NE-1002x®, una fuente de alimentación Series EH Glassman High Voltage® y jeringas de Calibre 30G de 3 ml (0.30 mm de diámetro exterior).

En la siguiente tabla se presentan los datos de los parámetros que se utilizaron para las pruebas:

*Tabla [5.1]. Datos que se utilizaron en las pruebas.*

ESPECIFICACIONES	VALOR	UNIDADES
Concentración Nylon 66	10	[%]
Duración de la prueba	1	[hr]
Velocidad de la bomba	3.32	[ $\mu$ l/min]
Voltaje	15	[kV]
Corriente	0.03 – 0.04	[A]
Humedad	34 - 41	[%]
Temperatura	25 - 29	[°C]
Distancia aguja-colector	10	[cm]

La configuración utilizada fue la que se muestra en la siguiente imagen:



*Figura [5.1]. Dibujo de la configuración utilizada.*

# CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

## 6.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

En este apartado se presentan y analizan los resultados que se obtuvieron, buscando llegar a una conclusión sobre los efectos que tiene la corriente en el cono de Taylor. También se demuestran por medio de diferentes imágenes si la corriente es constante en el proceso y si no lo es, qué efectos tiene esto en el cono.

Antes de realizar las pruebas en la cabina del electrohilado, se utilizó el sensor como un amperímetro para un motor de corriente directa, el cual estaba conectado a una fuente de poder y la misma nos proporcionaba el valor de la corriente; éste se comparaba con el que se veía en el Serial del Arduino. Los resultados del sensor eran iguales a los que se presentaban en la fuente, sólo que el mínimo cambio de algún valor provocaba que el visto en el Arduino también se alejara.

Se trabajó con diferentes valores de corriente, se hicieron variaciones mientras el motor funcionaba y se modificó el valor de la sensibilidad del sensor; para todo esto la única sensibilidad del sensor que permitió un funcionamiento correcto, que no hubiese error en comparación con el valor de la fuente, fue de 185 mV/A.

Para poder almacenar los datos obtenidos por el microscopio y por el Serial del Arduino, se utilizó un grabador de pantalla llamado ActivePresenter. Debido al campo eléctrico que se tenía no fue posible conectar el microscopio y el Arduino en una sola computadora, por lo que se utilizaron dos y fue la única forma de lograrlo y por eso mismo se consiguieron dos videos individuales; uno para la imagen obtenida por el microscopio y otro con las lecturas del sensor de corriente. En ese mismo programa se tiene una función que permite visualizar los videos junto con una línea del tiempo que muestra las horas, minutos, segundos y milisegundos. Esta herramienta me permitió observar en qué momento sucedía algo en el microscopio y buscar ese mismo momento en los resultados del sensor de corriente y así poder encontrar una relación entre estos dos.

Dado que el objetivo de este trabajo es ver los efectos de la corriente en el cono de Taylor se vincularon mediante los valores de corriente obtenidos del sensor y el diámetro del cono de Taylor.

El proceso de análisis fue observar los videos obtenidos del microscopio, donde se visualiza el cono de Taylor, se eligieron los segmentos en los que sucedían cambios notables, se anotaba el tiempo en el que habían sucedido y se buscaba el valor de corriente correspondiente. Fue así como se crearon lapsos de eventos importantes, tales como: la formación y desaparición del jet, la formación del cono de Taylor, entre otros. Al mismo tiempo se analizaba qué cambios se presentaban en los valores de corriente, ya que éste podía aumentar, disminuir o mantenerse constante.

Al final se realizaron las medidas de los diámetros en los diferentes lapsos de eventos importantes elegidos. Para poder obtenerlos se utilizó la herramienta de visión de Labview, Vision Builder®.

Los pasos que se siguieron para medir los diámetros mediante Vision Builder se describen a continuación:

Primero se deben importar las imágenes que se obtuvieron mediante los videos, por lo que se usó la herramienta de *Simulate Acquisition*® (*Simular adquisición*), en la que sólo es necesario brindar la ubicación del archivo que se desea y seleccionarlo.

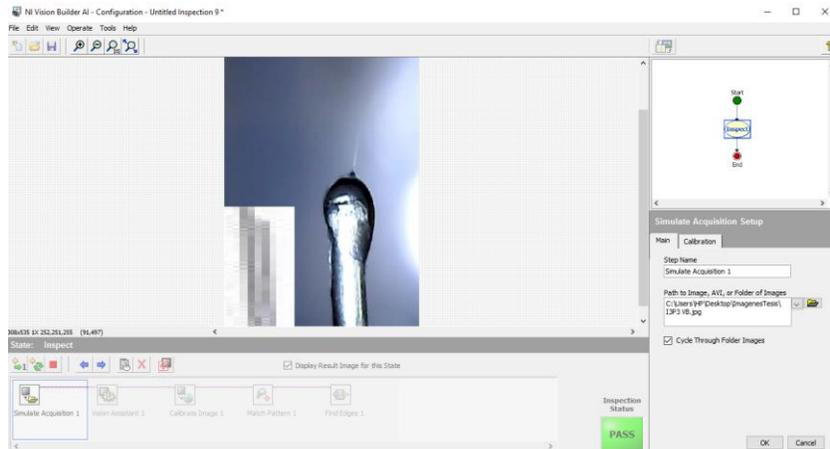


Figura [6.1]. Función *Simulate Acquisition* de Vision Builder®.

Lo siguiente es utilizar *Vision Assistant*® (*Asistente de visión*) con el fin de extraer los planos de RGB y así poder trabajar con las imágenes. Ésta es una condición que se pide para usar las siguientes herramientas.

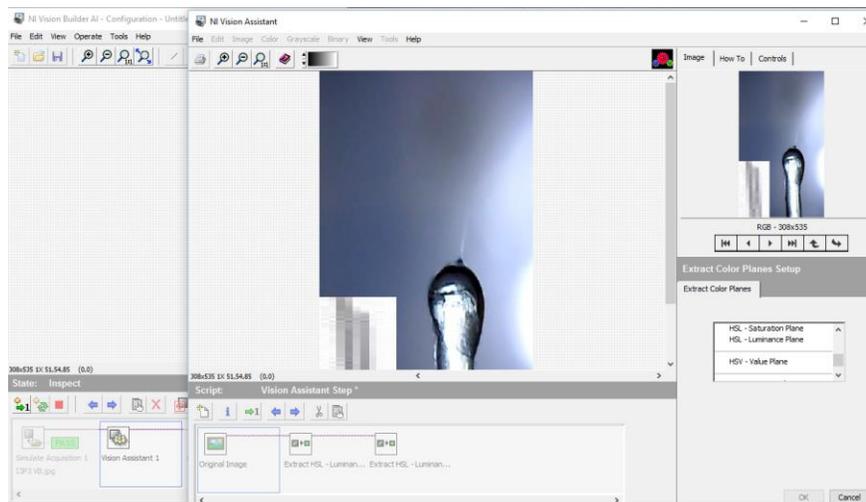


Figura [6.2]. Función *Vision Assistant* de Vision Builder®.

A continuación se estableció una referencia para tomar las medidas y para ello se utilizó la herramienta *Calibrate Image*® (*Calibrador de imagen*), en la que se calibra una imagen para que se realice medidas en

unidades del mundo real. Para calibrarlo se buscó una imagen de la misma aguja y se colocó junto con la obtenida del microscopio y del mismo tamaño. Dado que se sabe que el diámetro de la aguja de calibre 30G es de 0.30mm, se usó como referencia para medir el diámetro del cono de Taylor.

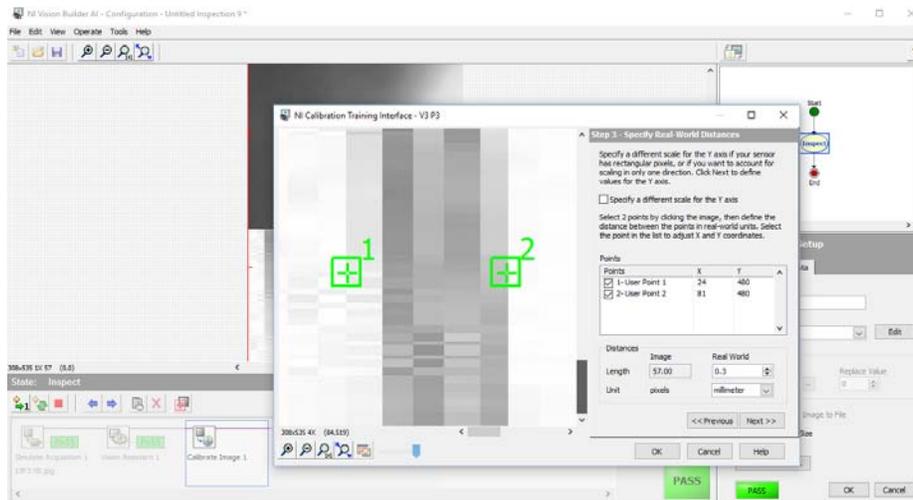


Figura [6.3]. Función Calibrate Images de Vision Builder®.

Al final se creó una sección específica para ser P3 analizada, mediante un *Match Pattern*® (*Perfil de compatibilidad*). Para determinar los diámetros se utilizó la función de *Find Edges*® (*Encontrar bordes*) y se ubicaron el primero y el último para que solo quedara seleccionado el diámetro del cono de Taylor tal y como se muestra en la Figura 6.4. Finalmente, para saber qué valor tenía esa distancia se emplearon las coordenadas calibradas del punto primero y el último, en el eje x.

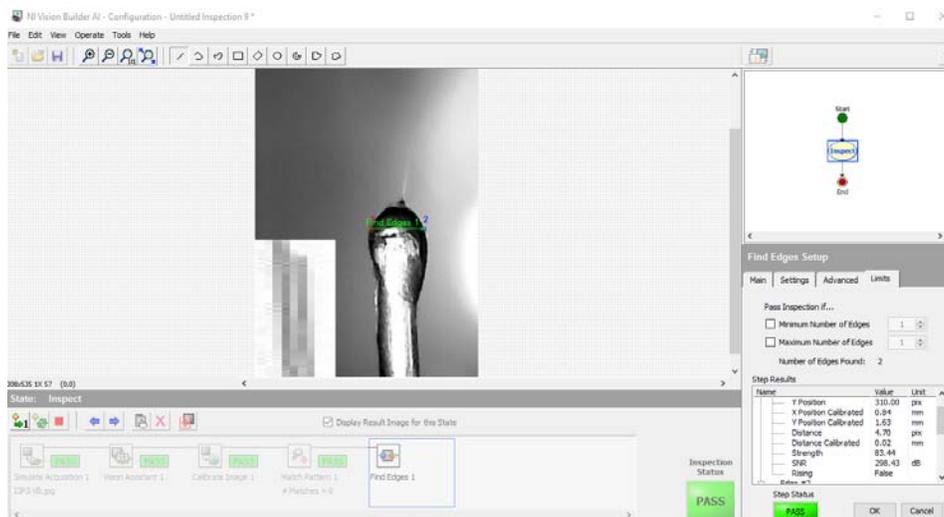


Figura [6.4]. Función Find Edges de Vision Builder®.

En la sección de “Anexos”, en el Anexo E, se mostrarán imágenes del programa de Vision Builder.

## 6.2 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se debe considerar que debido a la rapidez del proceso y a la gran cantidad de cambios, las muestras que se tomaron para ser analizadas son muy pequeñas en tiempo; es por ello que se realizaron en diferentes etapas del proceso pero con las mismas características para poder comprobar los efectos.

### 6.2.1 AUMENTO DE LA CORRIENTE

En el primer análisis se presentó un aumento en la corriente y cambios en la forma del cono de Taylor. Esos cambios se muestran en las siguientes imágenes:

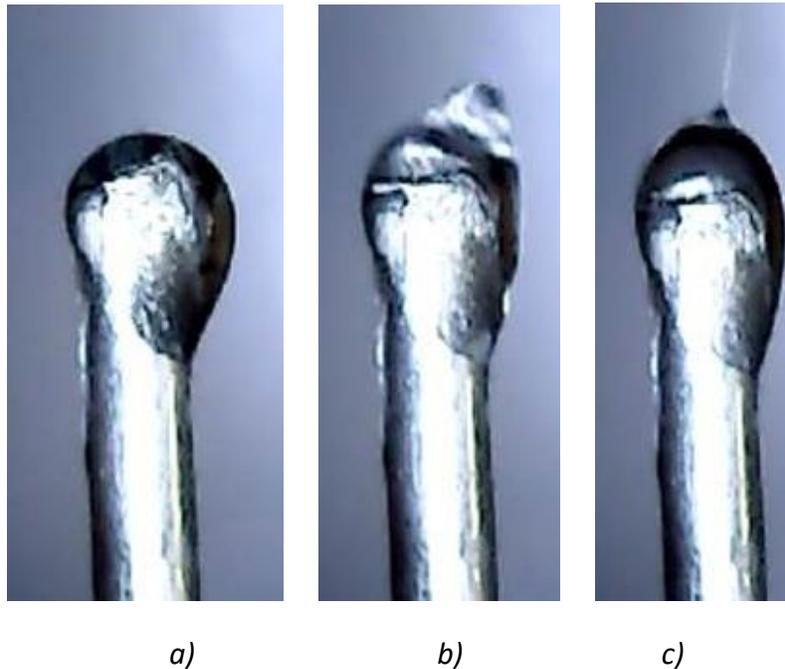


Figura [6.5]. Efectos del aumento de corriente en el cono de Taylor: a), b), c) (a).

En las imágenes se puede observar el cambio que se va presentando en la forma del cono de Taylor. Inicia pequeño, circular, termina siendo más grande y con el cono muy notorio seguido del jet. Para poder comprobar el efecto del aumento de la corriente en el cono, se midieron los diámetros, obteniéndose la siguiente tabla y para relacionarlos se graficaron como se muestra en la Figura 6.6.

Tabla [6.1]. Datos de efectos de aumento de la corriente en el cono de Taylor (a).

Corriente lectura sensor	Corriente [A]	Diámetro [mm]	Duración
510	0.046	0.47	
513	0.0332	0.41	680 ms
508	0.0988	0.38	

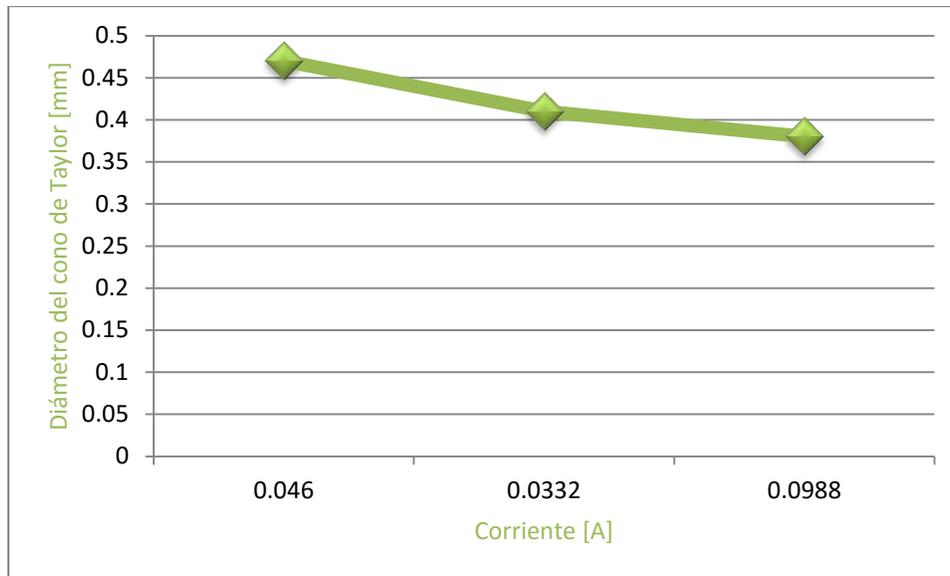


Figura [6.6]. Gráfica de efectos del aumento de corriente en el cono de Taylor (a).

Se puede observar en la gráfica como el aumento de la corriente lleva a la disminución del diámetro del cono de Taylor. Este resultado es el esperado, ya que mientras más alto es el campo eléctrico mayor es la elongación y por ello, las fibras son más delgadas.

Para poder comprobar ese resultado, se buscó otro caso en el que sucediera un aumento de corriente y se obtuvo lo siguiente:

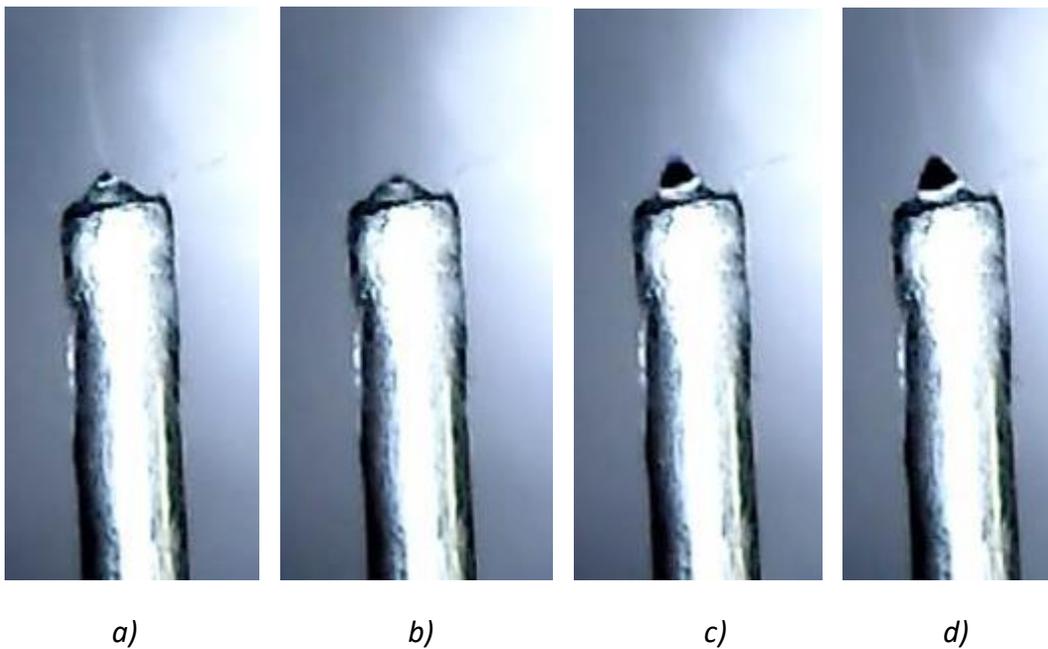


Figura [6.7]. Efectos del aumento de corriente en el cono de Taylor: a), b), c), d) (b).

Como se puede observar en las imágenes, se presentan los mismos cambios en la forma del cono de Taylor que en la Figura 6.5. Para comprobarlo se elaboró la gráfica de los diámetros que se midieron contra la corriente medida en cada cambio.

Tabla [6.2]. Datos de efectos de aumento de la corriente en el cono de Taylor (b).

Corriente lectura sensor	Corriente [A]	Diámetro [mm]	Duración
511	0.0196	0.21	
509	0.0724	0.19	1 s
509	0.0724	0.14	480 ms
508	0.0988	0.15	

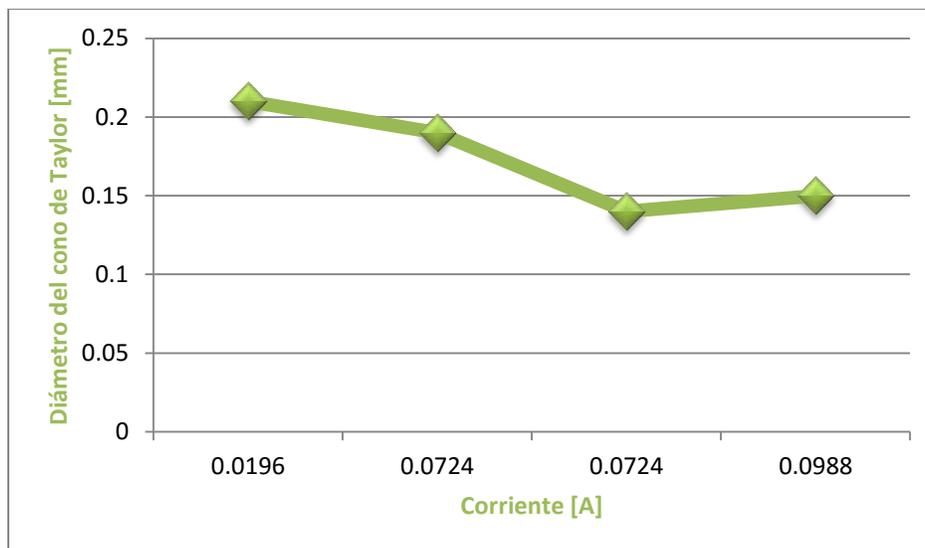


Figura [6.8]. Gráfica de efectos del aumento de corriente en el cono de Taylor (b).

Se puede observar en la gráfica que el diámetro del cono de Taylor disminuye conforme se va aumentando la corriente. Por lo tanto se puede comprobar que un aumento en la corriente lleva a una disminución del diámetro, debido a la mayor elongación que se lleva a cabo como consecuencia del incremento del campo eléctrico.

### 6.2.2 CORRIENTE CONSTANTE

Para esta sección se buscaron los eventos en donde se tuvieran valores de corriente constantes y se esperaba que no hubiese cambios en la forma del cono de Taylor. A continuación se muestran las imágenes de los resultados que se obtuvieron:

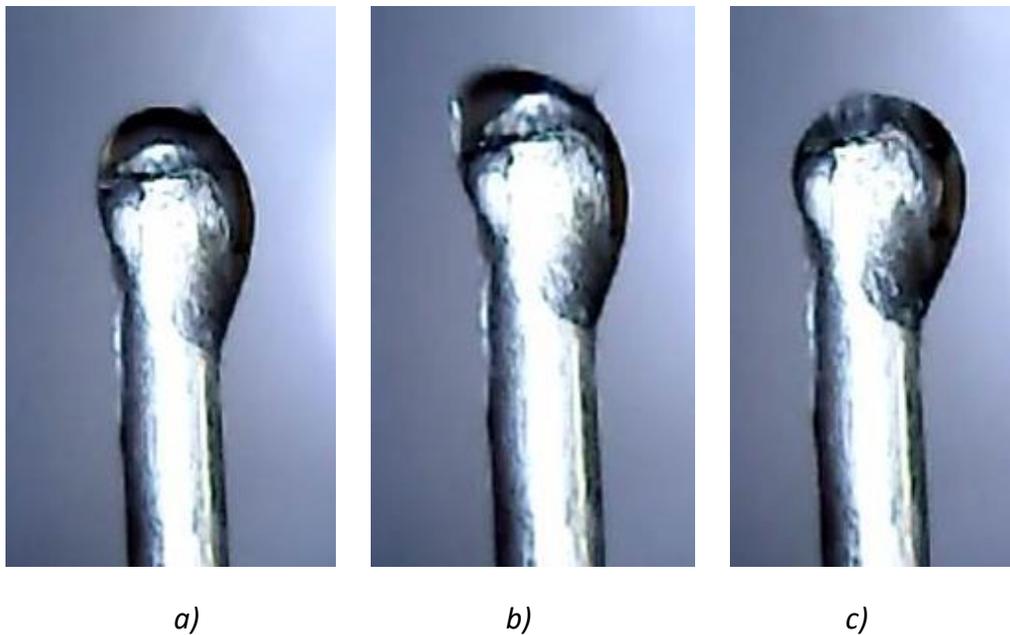


Figura [6.9]. Efectos de la corriente constante en el cono de Taylor: a), b), c) (a).

Como se puede observar en la Figura 6.9, el cono de Taylor mantiene casi la misma forma en las tres imágenes. Ahora se comprobará este comportamiento mediante la medición de los diámetros y la realización de la gráfica de éstos con respecto a los valores de corriente obtenidos.

Tabla [6.3]. Datos de efectos de la corriente constante en el cono de Taylor (a).

Corriente lectura sensor	Corriente [A]	Diámetro [mm]	Duración
510	0.046	0.43	
510	0.046	0.42	1 s
510	0.046	0.43	80 ms

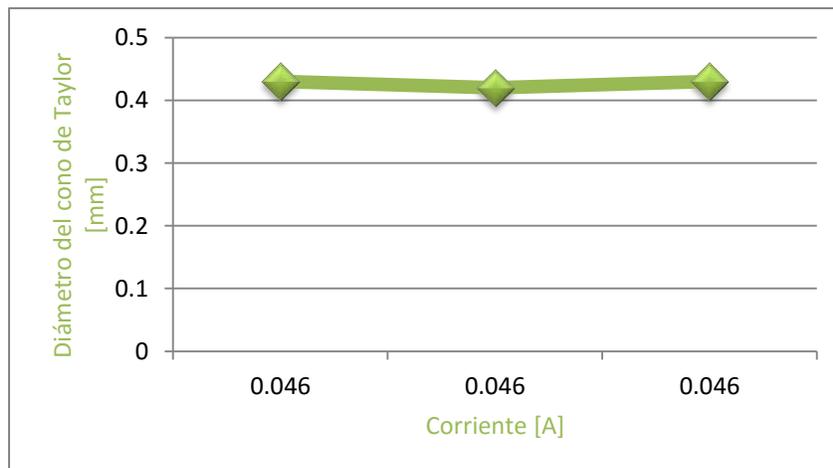


Figura [6.10]. Gráfica de efectos de corriente constante en el cono de Taylor (a).

Al observar la Gráfica, en efecto, los diámetros del cono de Taylor se mantienen casi constantes al igual que la corriente. Para poder comprobar este comportamiento se realizó la búsqueda de otro que tenga las mismas condiciones.

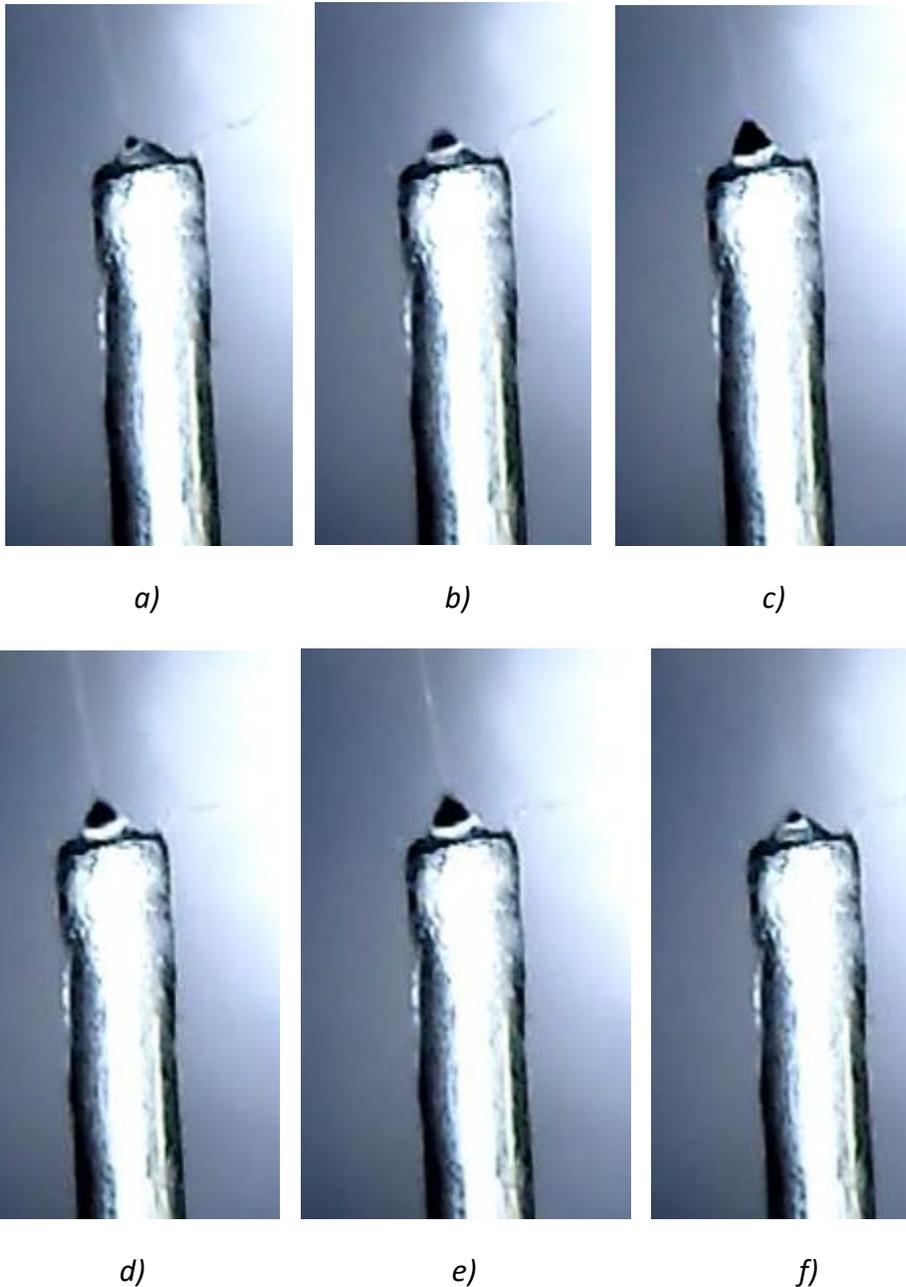


Figura [6.11]. Efectos de la corriente constante en el cono de Taylor: a), b), c), d), e), f) (b).

En la Figura 6.11 se pueden observar las imágenes de otro caso en el que la corriente es constante. No se percibe mucho que los diámetros de cono de Taylor sean tan constantes, por lo que se proseguirá a medirlos y graficarlos para observar si son constantes o no.

Tabla [6.4]. Datos de efectos de la corriente constante en el cono de Taylor (b).

Corriente lectura sensor	Corriente [A]	Diámetro [mm]	Duración
509	0.0724	0.19	
509	0.0724	0.18	
509	0.0724	0.16	2 s
510	0.046	0.17	540 ms
510	0.046	0.17	
510	0.046	0.18	

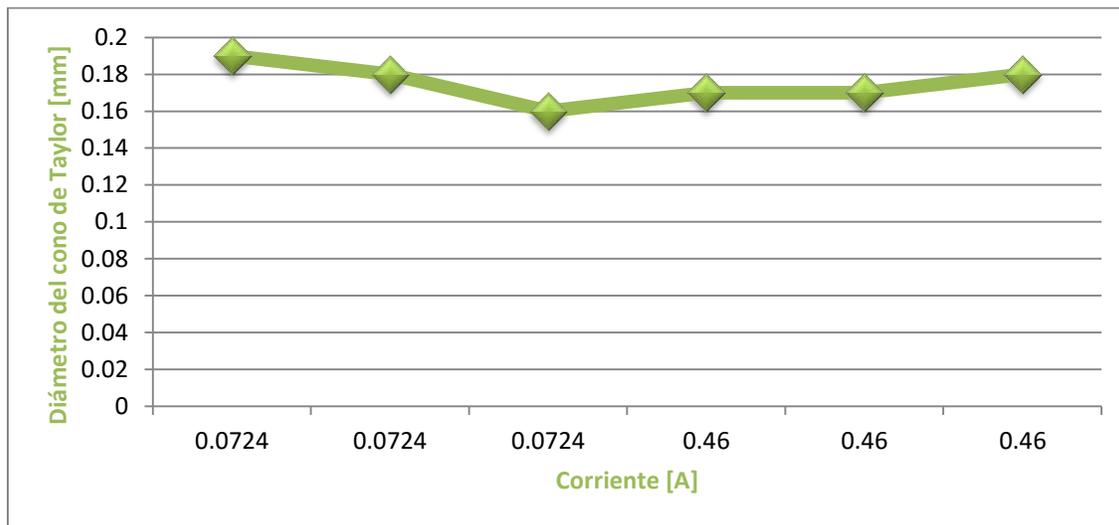


Figura [6.12]. Gráfica de efectos de corriente constante en el cono de Taylor (b).

En esta gráfica se observa que se tienen dos valores de corriente diferentes, pero resulta que se presentaron dos casos de mediciones de corriente constantes juntas. Cuando el valor de corriente es de 0.0724 [A], se puede percibir como los valores de los diámetros casi no cambian, y sucede lo mismo para el valor de 0.046 [A]. Con base en esto, se demuestra que al tener un valor constante de corriente, los diámetros del cono de Taylor también se mantienen constantes y con cambios poco notables.

### 6.2.3 DISMINUCIÓN DE LA CORRIENTE

En esta sección se buscó otro posible caso que es la disminución de la corriente, en dónde el comportamiento no es tan predecible como cuando aumenta o se mantiene constante la corriente.

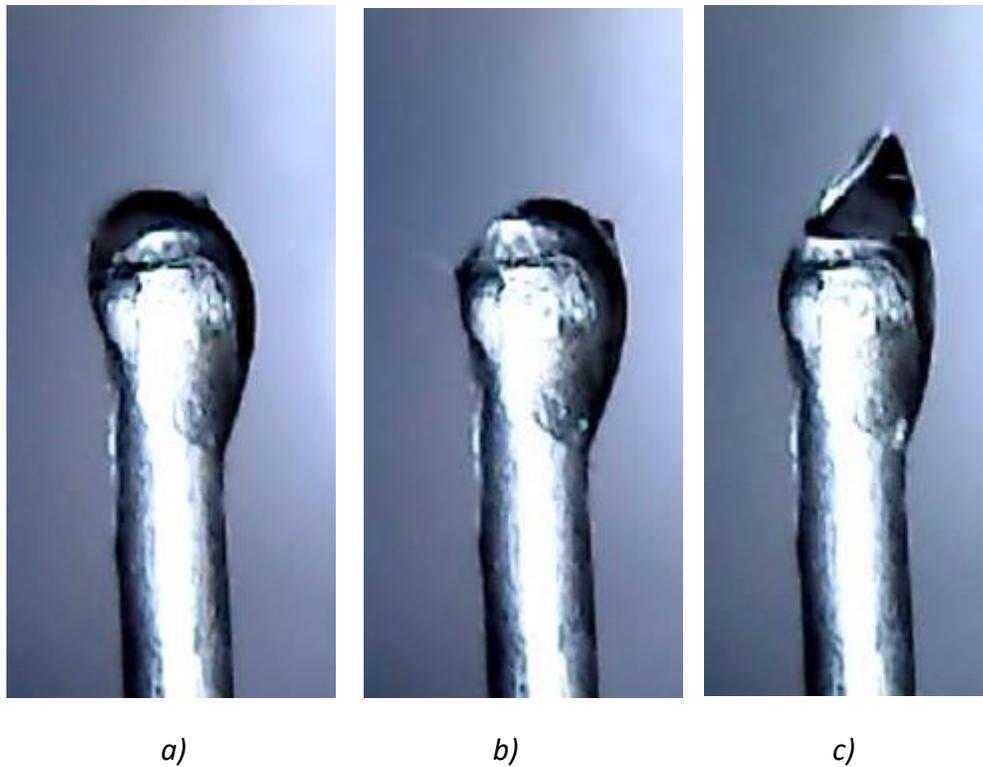


Figura [6.13]. Efectos de la disminución de corriente en el cono de Taylor: a), b), c) (a).

En las imágenes se puede observar que al principio se mantiene una forma circular pero al final termina con una que se asemeja a un cono. Esta situación lleva a pensar que el cono de Taylor se mantiene constante hasta que llega un cambio notable. Para poder ver lo que sucede en este caso, se prosiguió a obtener los diámetros y graficarlos con respecto a los valores de corriente.

Tabla [6.5]. Datos de efectos de la disminución de la corriente en el cono de Taylor (a).

Corriente lectura sensor	Corriente [A]	Diámetro [mm]	Duración
508	0.0988	0.51	1 s
509	0.0724	0.52	
510	0.046	0.34	

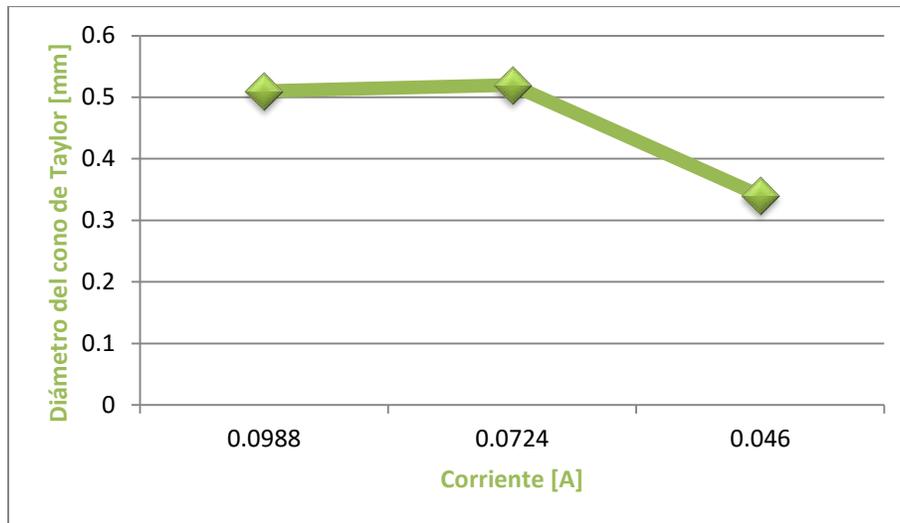


Figura [6.14]. Gráfica de efectos de la disminución de corriente en el cono de Taylor (a).

En la Figura 6.14, los diámetros presentan un comportamiento en el que empiezan siendo constantes y después disminuyen un 64%. Esto lleva a pensar que cuando la corriente presenta decrementos, su comportamiento depende de los valores de corriente anteriores y posteriores. En este caso, se buscó que valor de corriente le procedía a el de 0.046 A, y en efecto, resultó un cambio relevante porque el valor siguiente es de 0.1252 A.

Para verificar si lo mencionado anteriormente es correcto, se decidió buscar otros casos de disminución de corriente y analizar cómo es que se comportaba el cono de Taylor.

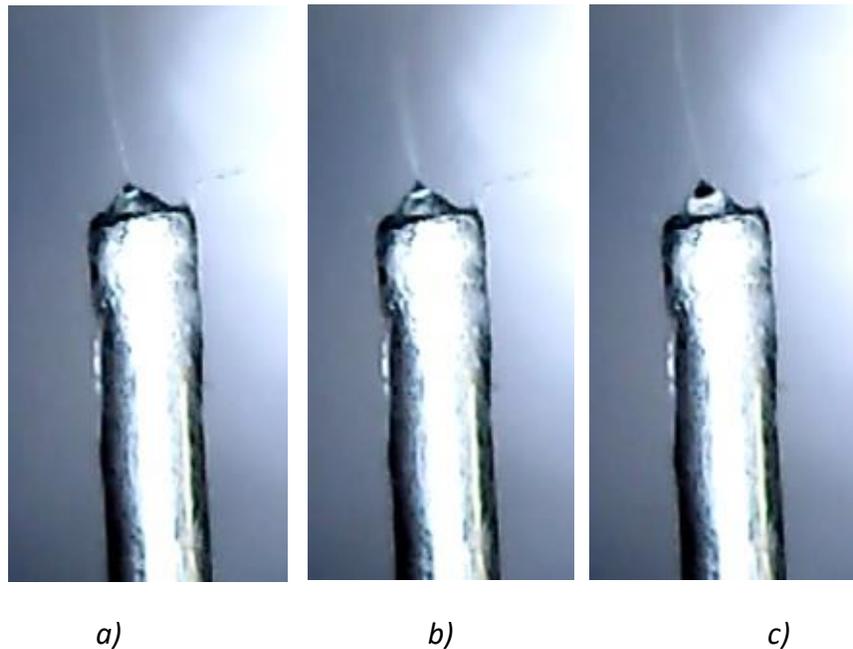


Figura [6.15]. Efectos de la disminución de corriente en el cono de Taylor: a), b), c) (b).

En la Figura 6.15 se puede ver cómo se mantienen casi iguales las formas del cono de Taylor y para poder observarlo mejor, se obtuvieron los diámetros y se graficaron.

Tabla [6.6]. Datos de efectos de la disminución de la corriente en el cono de Taylor (b).

Corriente lectura sensor	Corriente [A]	Diámetro [mm]	Duración
508	0.0988	0.20	
509	0.0724	0.16	940 ms
510	0.046	0.16	

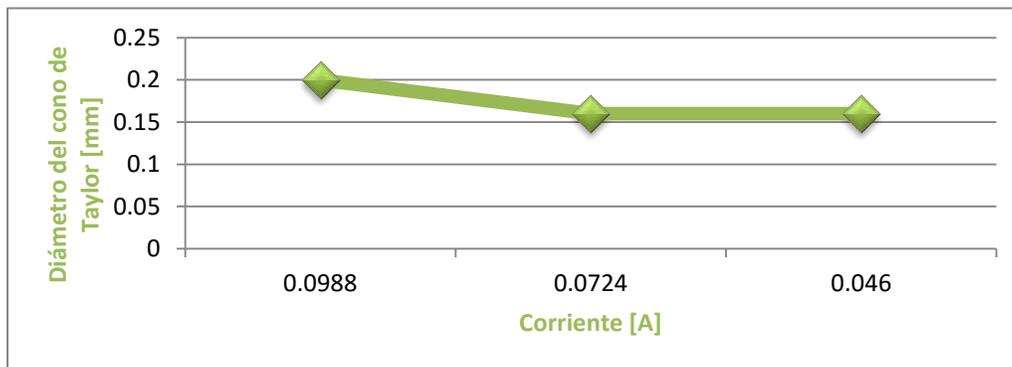


Figura [6.16]. Gráfica de efectos de la disminución de corriente en el cono de Taylor (b).

Se puede ver un comportamiento muy parecido al anterior, en dónde empieza con un valor más alto en el diámetro pero después se mantiene constante. Para poder determinar, finalmente, si sí es correcto el análisis se buscó un último caso que presentará disminución en los valores de corriente.

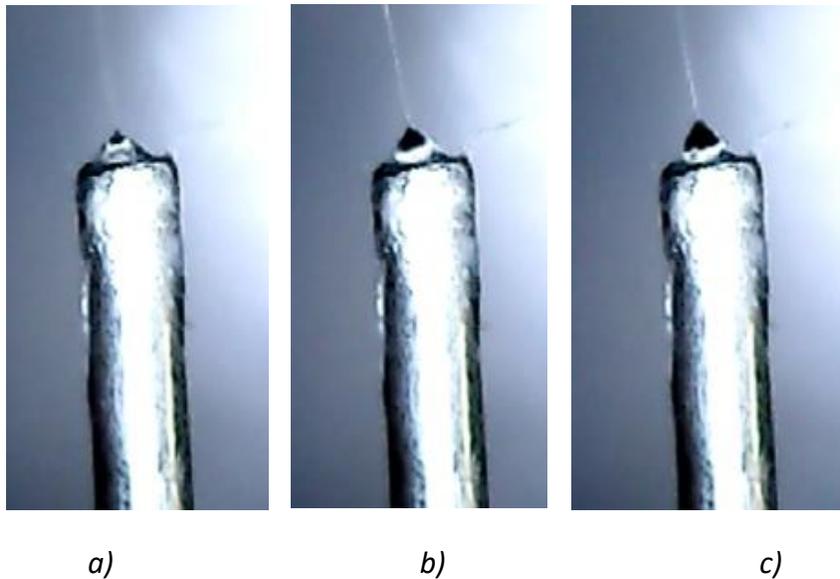


Figura [6.17]. Efectos de la disminución de corriente en el cono de Taylor: a), b), c) (c).

Al final, se puede observar el mismo comportamiento, en la Figura 6.17, en dónde las formas del cono de Taylor son muy parecidas entre sí. A continuación se muestra la gráfica obtenida:

Tabla [6.7]. Datos de efectos de la disminución de la corriente en el cono de Taylor (c).

Corriente lectura sensor	Corriente [A]	Diámetro [mm]	Duración
509	0.0724	0.20	
510	0.046	0.17	1 s
511	0.0196	0.15	20 ms

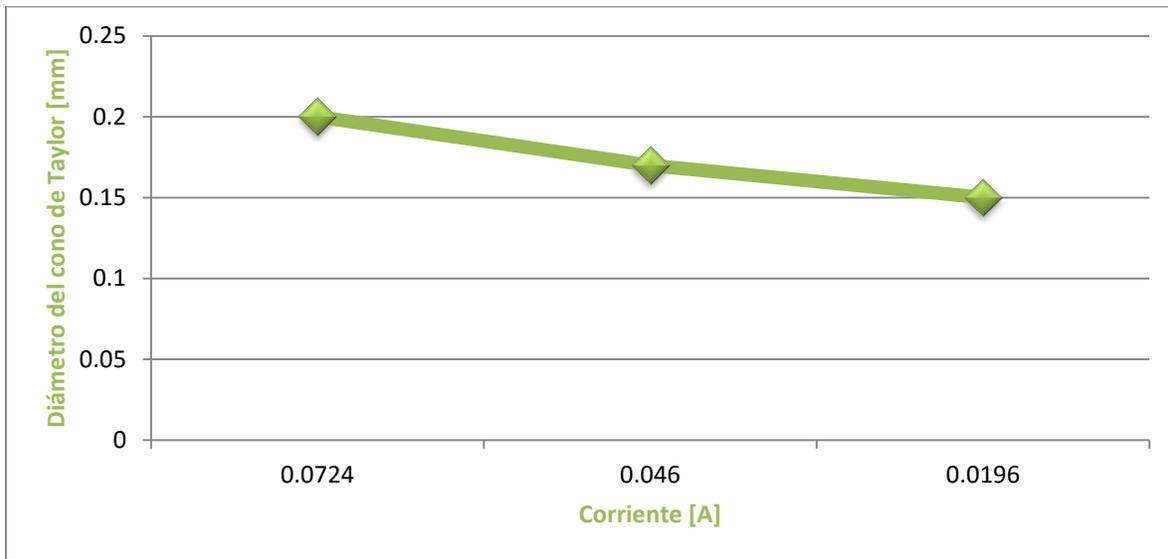


Figura [6.18]. Gráfica de efectos de la disminución de corriente en el cono de Taylor (c).

Al observar la gráfica, se puede confirmar que al presentarse la disminución en la corriente, el diámetro suele permanecer constante hasta que exista un valor menor o mayor, anterior o posterior, que lo altere. En el caso de la Figura 6.18, se vio alterado antes del intervalo de análisis, ya que el valor de corriente antes de 0.0724 A fue de 0.0196 A.

Otra forma de describir este comportamiento es que se mantendrá constante hasta que no llegue a un valor crítico. Un valor crítico bajo, en este caso, produciría que el electrohilado no se pudiese llevar a cabo; un valor crítico alto, como se demostró en la sección 6.2.1, llevaría a una mayor elongación del jet.

### 6.3 ANDAMIOS DE FIBRAS RESULTANTES

Al final los andamios de fibras que se obtuvieron se muestran en las siguientes imágenes:



Figura [6.19]. Andamio de fibras durante el proceso de electrohilado.

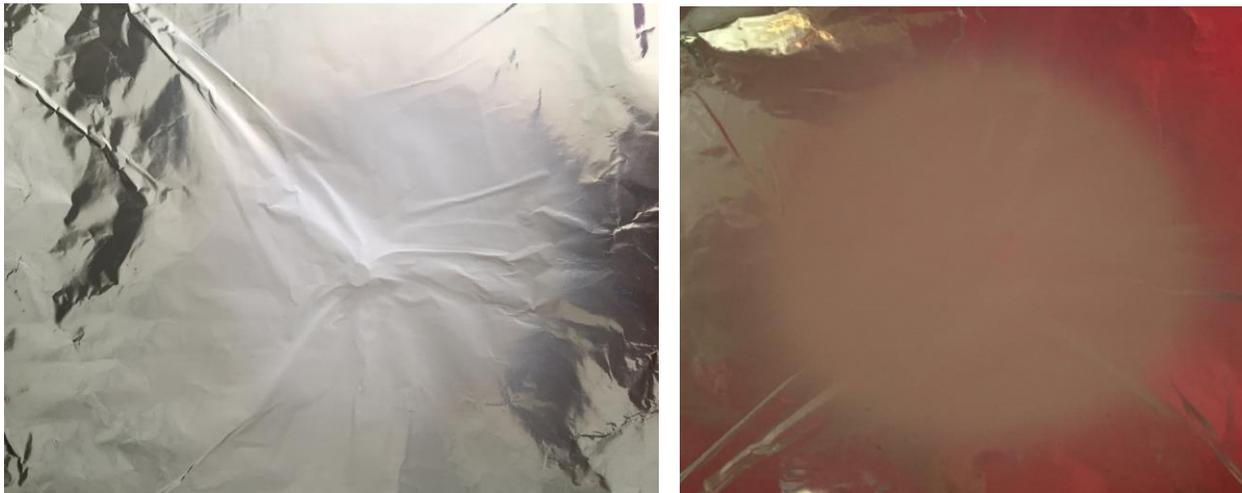


Figura [6.20]. Andamios de fibras resultantes.

Después de tener los andamios en el papel aluminio y para poder darles aplicación se deben retirar del aluminio. Fue posible que yo presenciara como se realizaba esta parte y requería de dedicación y paciencia, ya que se trabaja con capas muy finas de material, por lo que cualquier movimiento brusco termina por romper los andamios. Estos andamios se retiraban con ayuda de un objeto que tenía filo pero que no cortaba (como se observa en la Figura 6.22), una especie de pinzas, y la manera de hacerlo era ir empujando el andamio hasta que tuviese una pestaña de la que se pudiera jalar el material. Lamentablemente no es posible conseguir los andamios completos, por lo que se van recabando pequeños pedazos.

Eventualmente, cuando ya se tienen completamente retirados, viene la hora de utilizarlos para la aplicación que sea requerida. En algunos casos, de ciertos polímeros, antes de que puedan ser utilizados para las aplicaciones, deben ser sometidos a ciertos tratamientos químicos. En las siguientes imágenes se muestran imágenes de esta parte del proceso:



*Figura [6.21]. Andamios de fibra siendo retirados del papel aluminio.*



*Figura [6.22]. Andamios de fibra siendo retirados con las pinzas.*

# CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES

## 7.1 CONCLUSIONES

En la presente tesis se diseñaron dos sistemas, uno de visión y otro de monitoreo de corriente, con el fin de demostrar la relación entre el cambio de la forma del cono de Taylor, específicamente el diámetro y la corriente directa medida.

El diseño del sistema de visión fue capaz de soportar un campo eléctrico de gran magnitud, mínimo 5 kV. Se logró obtener una imagen del cono de Taylor e incluso de la parte estable del jet, después de ajustar los niveles de iluminación y contraste dentro de la cabina para electrohilar, mismos que permitieron obtener una imagen nítida.

Las imágenes que se analizaron para los resultados se eligieron en el rango de los primeros 30 min de la prueba, la cual tuvo una duración total de 1 hora.

Debido a la acumulación del polímero en las orillas de la aguja se tuvo como resultado la existencia de múltiples hilos, los cuáles provocaron múltiples jets. Éstos ocasionaron que la calidad de las imágenes no fuese adecuada porque no se podía distinguir correctamente el diámetro del cono de Taylor y eso resultaría en un porcentaje de error bastante alto, probablemente mayor a un 10%.

Debido a las condiciones ambientales (humedad, temperatura e iluminación ambiental) del salón en donde se encontraban, se vio afectada la resolución de las imágenes. En un apartado anterior se mencionó que los problemas de la resolución de las mismas afectaron en un pequeño porcentaje, menor al 5%, la medición de los diámetros.

En [11] Ying Yang utilizó una cámara de alta velocidad, pero a pesar de ello las imágenes resultaron con poca nitidez, la ventaja es que se pudo observar la parte inestable del jet; con esto se puede demostrar que la elección del microscopio fue la correcta. En mi caso, utilicé un microscopio que contaba con 2 megapíxeles, por lo que la solución sería tener, a parte de las condiciones controladas (humedad, temperatura e iluminación ambiental), un microscopio con mayor resolución. Se conoce que existe un pequeño porcentaje de error pero no se pudo calcular porque no hay referencias de la obtención del diámetro del cono de Taylor, cuando la solución polimérica es el Nylon.

Se diseñó el sistema de monitoreo de corriente, el cual también tenía que cumplir con la característica de soportar el campo eléctrico y al mismo tiempo medir la variación de la corriente. Antes de realizar las pruebas dentro de la cabina de electrohilado, se probó el funcionamiento del sensor mediante un algoritmo de programación.

El sensor en la prueba de electrohilado soportó un voltaje máximo de 15kV. Si el voltaje resultaba más alto el sensor dejó de funcionar, lo mismo sucedió con el microscopio. Para solucionar el problema se utilizaron dos computadoras, se alejaron de la cabina y se aislaron correctamente.

Posterior a este análisis se puede concluir que a pesar de que el sensor utilizado presenta una sensibilidad limitada, fue posible obtener una tendencia en el comportamiento del cono de Taylor relacionada con la variación de la corriente.

Al analizar la relación entre el diámetro del cono de Taylor y la variación de la corriente se puede concluir que el valor de la corriente no es constante durante el proceso de electrohilado como se pensaba, ya que se presentan rangos en donde la corriente aumenta, disminuye o se mantiene constante.

La corriente afecta directamente la forma y el diámetro del cono de Taylor y dependiendo de cómo varía es cómo se modifica. Si se presenta un aumento en la corriente, provoca que exista una mayor elongación por lo que el diámetro del cono de Taylor disminuye y la forma cónica se reduce.

Cuando la corriente disminuye, el diámetro y forma del cono de Taylor se mantienen constantes hasta que no exista un valor crítico que lo modifique, sea un aumento o disminución.

Si se tiene un valor constante de corriente, tanto el diámetro como la forma del cono de Taylor se mantienen constantes.

Debido a que los valores de corriente no son constantes durante todo el proceso, las fibras que se obtienen pueden presentar diversos problemas, puede haber presencia de gotas, que existan fibras con poca alineación y que sean de diferentes diámetros. Angamma menciona en [4], muchas veces la creación de gotas durante el electrohilado se debe a que el voltaje está por debajo de la parte estable del campo eléctrico.

También de [4], se sabe que el proceso de electrohilado tiene un rango de valores del campo eléctrico que resulta en un electrohilado estable, y que es una región muy pequeña (para PEO: 1.2 – 2.1 kV/mm). Aunque en el artículo utilizaron como solución polimérica el PEO sin duda es conocimiento que aplica para cualquier polímero, la diferencia puede radicar en qué tan pequeña o grande es la región de estabilidad, sólo que actualmente no hay ningún estudio en cuanto a la estabilidad del campo eléctrico del Nylon.

Un problema que también puede provocar cambios en la forma del cono o en la estructura de las fibras, es que las condiciones ambientales del sistema de electrohilado no estén controladas, por lo que esto podría haber afectado los resultados. Se sabe que la temperatura y la humedad son parámetros que afectan directamente el proceso y es por eso que es necesario tenerlos controlados. En este caso, la cabina que se utiliza para las pruebas se encuentra abierta a la intemperie, por lo que está expuesta a cambios de humedad y temperatura e incluso posibles entradas de corriente de aire o suciedad. Lo primero que se debería hacer es sellarla durante las pruebas, lo que serviría también como un método de seguridad hacia el usuario.

Esta relación entre el diámetro y forma del cono de Taylor y la variación de la corriente fue probada con el Nylon 66, por lo que no se puede asegurar que se tenga el mismo comportamiento con otro polímero.

## 7.2 TRABAJO A FUTURO

El trabajo a futuro es muy amplio, pero la principal mejora podría ser en el sistema de medición de la corriente, ya que como se ha mencionado, el sensor que se utilizó no brindó el mejor desempeño, que por cuestiones de costo, fue el utilizado. Un sistema que pueda brindar una mejor sensibilidad, y al mismo tiempo saber por qué se presentan las variaciones en la corriente y corregir ese problema para acercarse a un electrohilado estable y poder obtener andamios de fibras con un mayor ordenamiento.

Además se podría investigar porqué la corriente durante el proceso no es constante, saber qué tipo de pérdidas se están llevando y porqué, así como investigar maneras de solucionar este problema y se buscaría la manera de probar esta relación con otros polímeros, aunque primero se debería buscar la manera de medir la corriente para voltajes mayores a 15 kV y un sistema de visión que soporte dicho voltaje.

El sistema de visión resultó ser funcional, pero sin duda, diseñar un sistema que tuviese mayor resolución en la calidad de la imagen sería de utilidad. Como ya se dijo, algunas de las mediciones de los diámetros del cono de Taylor presentaron un porcentaje de error, y la manera de corregirlo es tener mayor resolución en las imágenes, específicamente con un microscopio, dado que ya se probó el correcto funcionamiento de éste.

Existe la posibilidad de tener una interfaz que permita controlar, en un futuro, todos los parámetros que intervienen en el proceso, sin la necesidad de estar presente durante las pruebas. Para la parte de visión se podría recibir algún mensaje o notificación al celular en dónde se explique si la forma del cono de Taylor es la adecuada para el polímero que se esté utilizando o si se presentan problemas durante el proceso (cambios en la forma del cono o múltiples jets), entre otros.

Debido a que no se tienen condiciones ambientales controladas, una gran mejora sería realizar una instrumentación que permita controlarlas (la humedad, la temperatura, la iluminación y el contraste). Se podría realizar un control para la humedad y temperatura que los mantuviera en los valores deseados (dependiendo del polímero) durante las pruebas, para evitar efectos negativos en las fibras como presencia de gotas.

Finalmente se podría otorgar una aplicación para las fibras que se obtienen como la creación de tejidos o recubrimiento de componentes electrónicos como nano sensores, entre otras.

# REFERENCIAS

## CAPÍTULO 1

- [1] Sir Geoffrey Taylor, *Desintegration of water drops in an electric field*, Royal Society Publishing, 1964.
- [2] Ying Yang, Zhidong Jia, Qiang Li, Lei Hou, Haifeng Gao, Liming Wang, Zhicheng Guan, *Multiple Jets in Electrospinning*, IEEE, 2006, pp. 940-943.
- [3] Ho-Wang Tong, Min Wang, *Electrospinning of Fibrous PHBV Tissue Engineering Scaffolds: Fiber Diameter Control, Fiber Alignment and Mechanical Properties*, IEEE, 2008, pp. 535-538.
- [4] C.J. Angamma, S.H. Jayaram, *Investigation of the Optimum Electric Field for a Stable Electrospinning Process*, IEEE, 2010.
- [5] Yongfanf Huang, Gaofeng Zheng, Xiang Wang, Daoheng Sun, *Fabrication of Micro/Nanometer-Channel by Near-Field ElectroSpinning*, IEEE, 2011, pp. 877-880.
- [6] O. Karatay, M. Dogan, *Modelling of electrospinning process at various electric fields*, Mico & Nano Letters, 2011, Vol. 6, Iss. 10, pp. 858-862
- [7] Juan A. González Sánchez, Rogerio Furlan, Raymond López Valle, Paul Valle, Ana Neilde Rodrigues da Silva, *Influence of a Magnetic Field in the Electrospinning of Nanofibers Using Solutions with PVDF, DMF, Acetone and  $FE_3O_4$  Nanoparticles*, IEEE, 2013.
- [8] Julián Camilo Gutiérrez R. (2009). *Aplicabilidad de las metodologías de diseño de producto en el desarrollo y creación de páginas web y diseños gráficos*. Universidad Eafit Escuela de Ingeniería, Medellín.

## CAPÍTULO 3

- [9] Castañeda, Serafín (2015). *Diseño Mecatrónico [diapositivas de PowerPoint]*.

## CAPÍTULO 7

- [10] Cuiru Yang, Zhidong Jia, Zhihai Xu, Ke Wang, Zhicheng Guan, Liming Wang . *Comparisons of fibers properties between vertical and horizontal type electrospinning systems*, IEEE, 2009.
- [11] Ying Yang, Zhidong Jia, Qiang Li, Jianan Liu, Zhicheng Guan. *Effect of "Stagnation Plane" in the electric field during the electrospinning process*, IEEE, 2009.

# REFERENCIAS DE FIGURAS

## CAPÍTULO 1

Figura [1.1] Sir Geoffrey Taylor. *Desintegration of water drops in an electric field*. (1964). Royal Society Publishing, 280(22), 383-397.

Figura [1.2] C.J. Angamma, S.H. Jayaram, *Investigation of the Optimum Electric Field for a Stable Electrospinning Process*, IEEE, 2010.

Figura [1.3] Yongfanf Huang, Gaofeng Zheng, Xiang Wang, Daoheng Sun, *Fabrication of Micro/Nanometer-Channel by Near-Field ElectroSpinning*, IEEE, 2011, pp. 877-880.

Figura [1.4] O. Karatay, M. Dogan, *Modelling of electrospinning process at various electric fields*, Mico & Nano Letters, 2011, Vol. 6, Iss. 10, pp. 858-862.

Figura [1.5] Alma Leticia Nájera Luna (2010). *Preparación y caracterización de fibras poliméricas de acetatos de celulosa y poli (vinil pirrolindona) por distintos sistemas de electrohilado*. Universidad de Sonora, División de Ingeniería, Departamento de Investigación en Polímeros y Materiales. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/20837/Antecedentes.pdf>

Figura [1.6] Jorge Romero. *El electrohilado de fibras poliméricas en aplicaciones médicas*, 26 de noviembre del 2013. [http://blogs.eluniversal.com.mx/weblogs\\_detalle19491.html](http://blogs.eluniversal.com.mx/weblogs_detalle19491.html)

Figura [1.7] Bioinicia and Fluidnatek. eSTRETCHING. <http://www.bioinicia.com/technology-2/>

## CAPÍTULO 3

Figura [3.6] Armando 1967. *Proyectores de bajo coste*, 21 de mayo del 2015. [http://www.elotrolado.net/hilo\\_proyectores-de-bajo-coste\\_1344041\\_s5190](http://www.elotrolado.net/hilo_proyectores-de-bajo-coste_1344041_s5190)

Figura [3.19] *Microscopio digital USB de hasta 60X de aumento GAM-100*, 19 de Julio del2014. [http://tech.mequedouno.com.mx/product.php?id\\_product=17361](http://tech.mequedouno.com.mx/product.php?id_product=17361)

Figura [3.21] Nikon. *Coolpix P600*. <http://www.nikon.com.mx/nikon-products/product/compact-digital-cameras/coolpix-p600.html>

Figura [3.27] *Microscopio digital USB 800X Zoom óptico HD 8 potentes LEDS*. [http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-550951222-microscopio-digital-usb-800x-zoom-optico-hd-8-potentes-leds-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-550951222-microscopio-digital-usb-800x-zoom-optico-hd-8-potentes-leds-_JM)

Figura [3.34] *Arduino MEGA 2560 Rev 3*. <https://paruro.pe/productos/tarjetas-de-desarrollo/tarjetas-de-microcontroladores/arduino-mega-2560-rev-3>

Figura [3.35] *Sensor de consumo eléctrico AC/DC ACS714 Efecto Hall -30A a +30A*. <http://www.electan.com/sensor-consumo-electrico-acdc-acs714-efecto-hall-30a-p-3231.html>

## REFERENCIAS DE TABLAS

### CAPÍTULO 1

Tabla [1] Francisco Rodríguez Félix. *Membranas de acetato de celulosa preparadas por el método de inversión de fases o por electrohilado, su caracterización y propiedades de intercambio iónico*. Universidad de Sonora.

### CAPÍTULO 4

Tabla [3.4] *Microscopio digital USB de hasta 60X de aumento GAM-100*, 19 de Julio del2014. [http://tech.mequedouno.com.mx/product.php?id\\_product=17361](http://tech.mequedouno.com.mx/product.php?id_product=17361)

Tabla [3.5] Nikon. *Coolpix P600*. <http://www.nikon.com.mx/nikon-products/product/compact-digital-cameras/coolpix-p600.html>

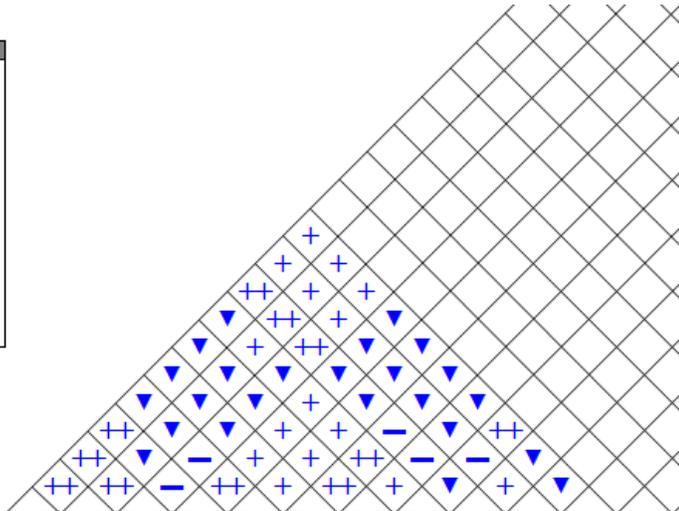
Tabla [3.6] *Microscopio digital USB 800X Zoom óptico HD 8 potentes LEDS*. [http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-550951222-microscopio-digital-usb-800x-zoom-optico-hd-8-potentes-leds-\\_JM](http://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-550951222-microscopio-digital-usb-800x-zoom-optico-hd-8-potentes-leds-_JM)

Tabla [3.7] *Arduino MEGA 2560*. <https://www.arduino.cc/en/Main/arduinoBoardMega2560>

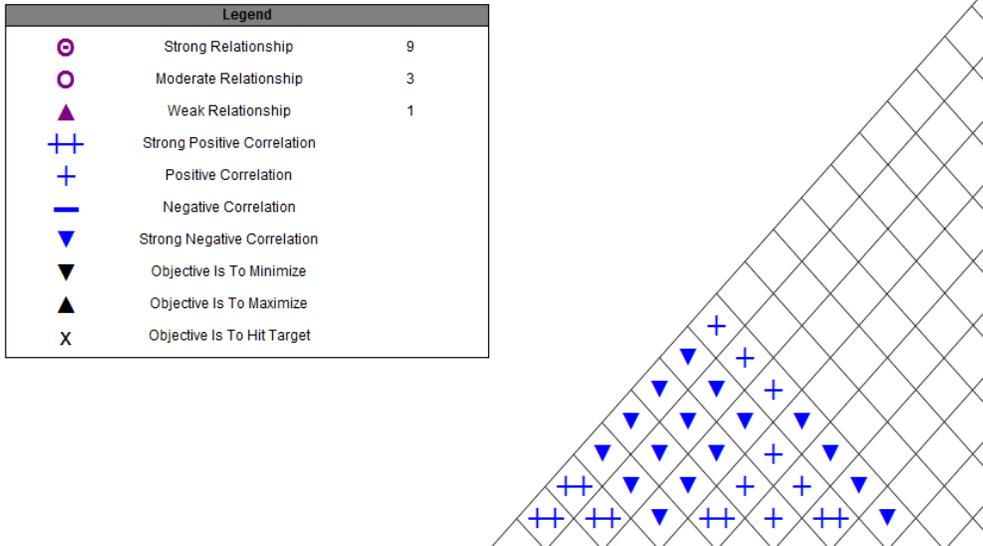
Tabla [3.9] *Datasheet ACS714*. [https://www.pololu.com/file/download/ACS714.pdf?file\\_id=0J196](https://www.pololu.com/file/download/ACS714.pdf?file_id=0J196)

# ANEXO A. QFD

Legend		
⊙	Strong Relationship	9
○	Moderate Relationship	3
△	Weak Relationship	1
++	Strong Positive Correlation	
+	Positive Correlation	
-	Negative Correlation	
▼	Strong Negative Correlation	
▽	Objective Is To Minimize	
▲	Objective Is To Maximize	
X	Objective Is To Hit Target	

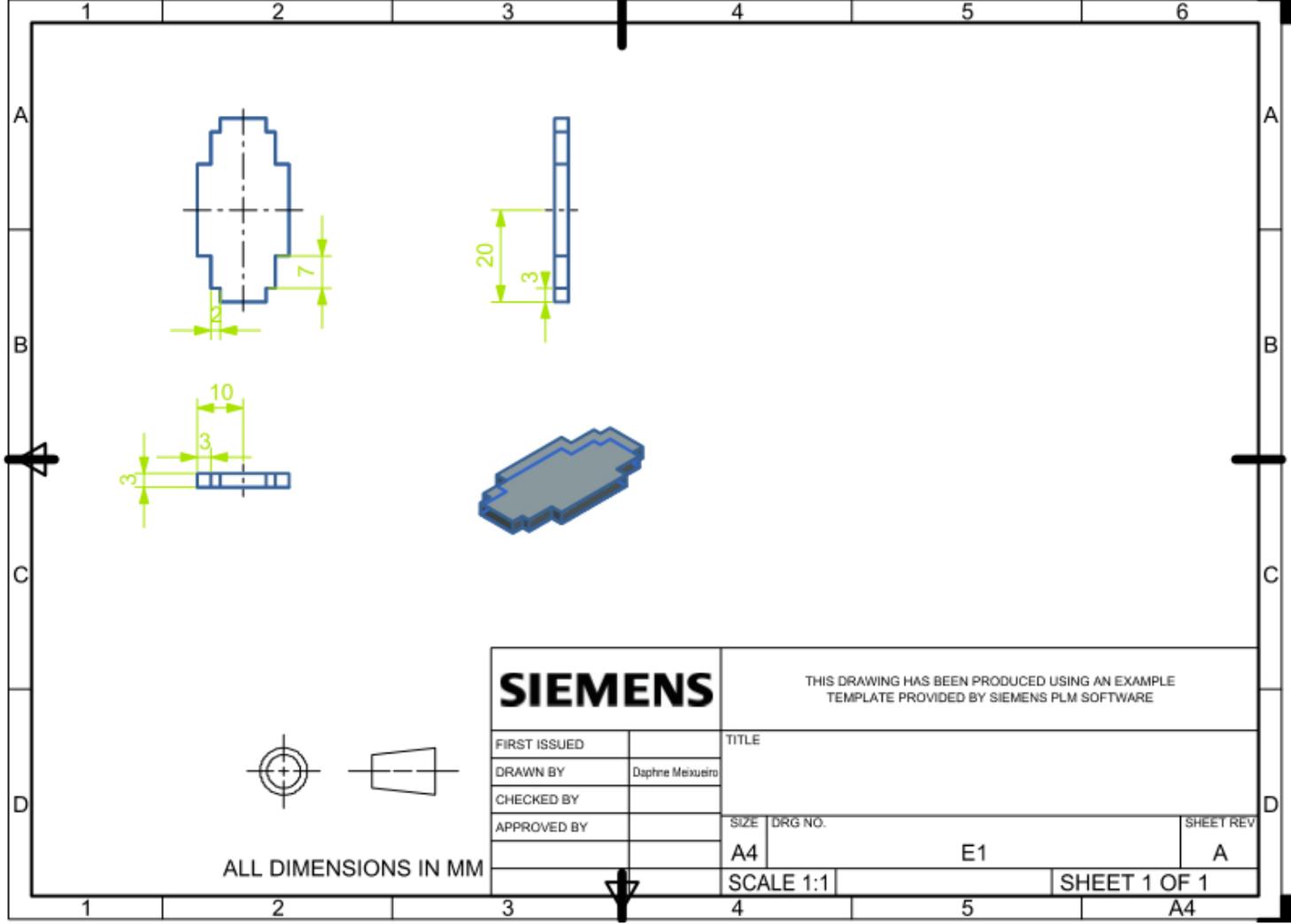


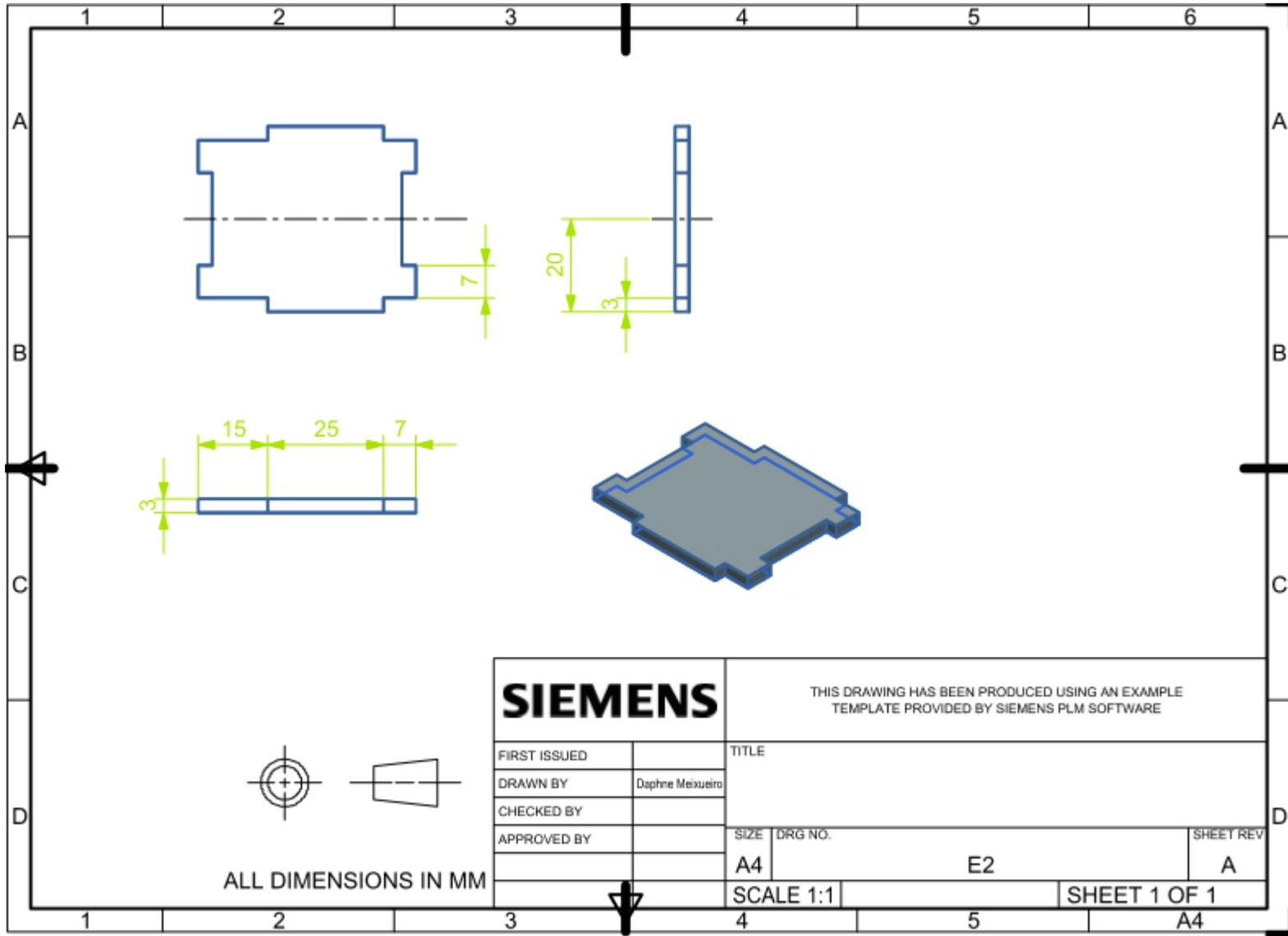
Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")	Column #											
						1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
						Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (x)											
						Costo del material [\$]	Volumen total [cm <sup>3</sup> ]	Altura máxima [cm]	Rango de voltaje [kV]	Rango de amperaje [A]	Temperatura máxima [°C]	Humedad máxima [%]	Potencia [W]	Peso máximo [kg]	Tiempo máximo [hr]	Contraste (Si/No)	
1	9	7.1	8.0	Barato		⊙	⊙	○						⊙			
2	9	7.1	8.0	Pequeño		▲	○	○						⊙	▲		
3	9	8.0	9.0	Altura fija			○	○						▲			
4	9	8.8	10.0	Mantener posición			○	○	▲	▲				○		○	
5	9	8.8	10.0	Soportar voltaje de gran magnitud		○			○	○			▲				
6	9	8.8	10.0	Soportar amperaje de gran magnitud		○			○	○			▲				
7	9	8.0	9.0	Soportar temperatura		○	▲		○	○	○	○	○	○	○		
8	9	8.0	9.0	Soportar humedad		○	▲		○	○	○	○	○	○	○		
9	9	8.8	10.0	Repetibilidad			○	○	○	○	○	○	○	○		○	
10	9	7.1	8.0	Tener iluminación constante			○	○	○	○	▲	▲	○			○	
11	9	7.1	8.0	Tener contraste constante			○	○	○	○	▲	▲				○	
12	9	6.2	7.0	Portátil		○	○	○					▲	○	○		
13	9	6.2	7.0	Rápida manufactura		○	○	○						○	○		
<b>Target or Limit Value</b>						500	2000	20	25	2	40	40	10	1	336	1	
<b>Difficulty</b> (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely)						10	9	5	6	9	10						
<b>Max Relationship Value in Column</b>						9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
<b>Weight / Importance</b>						341.6	512.4	501.8	285.0	285.0	136.3	136.3	161.9	400.9	166.4	233.6	
<b>Relative Weight</b>						10.8	16.2	15.9	9.0	9.0	4.3	4.3	5.1	12.7	5.3	7.4	

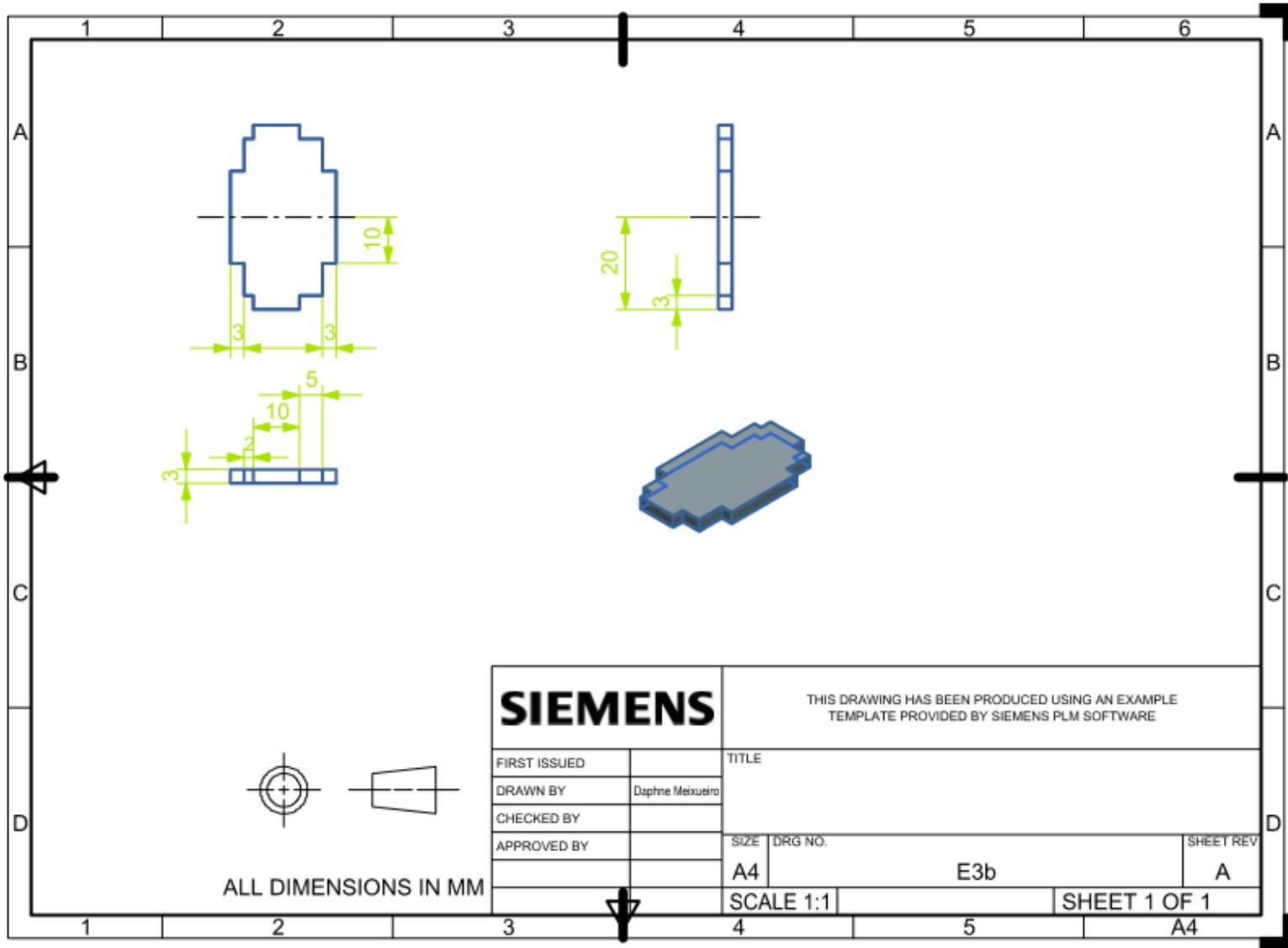


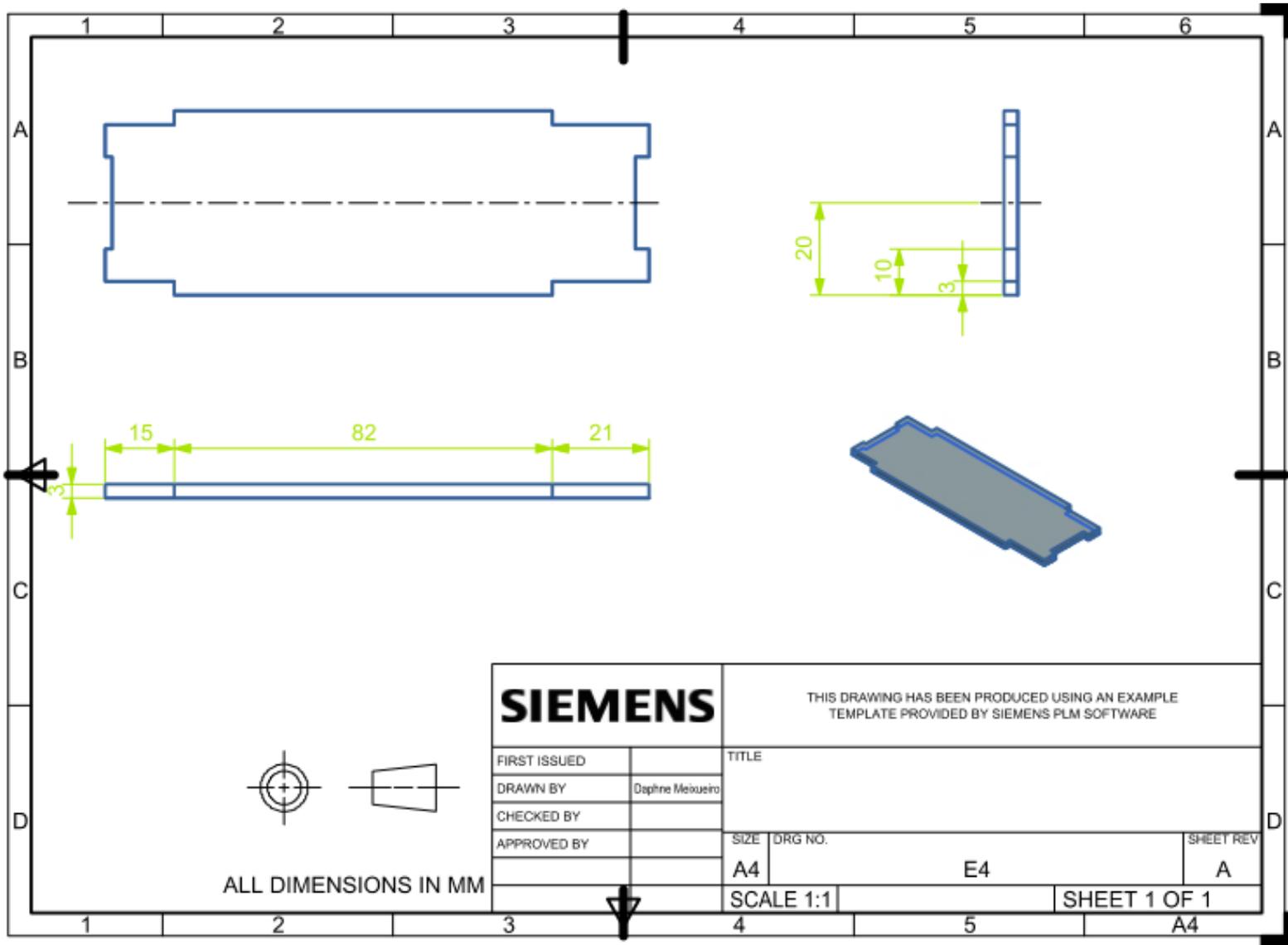
Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Direction of Improvement: Minimize (▼), Maximize (▲), or Target (X)									
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	
				<b>Quality Characteristics</b> (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows")	Costo del material (\$)	Volumen total [cm <sup>3</sup> ]	Peso máximo [g]	Rango de voltaje [kV]	Rango de amperaje [A]	Temperatura máxima [°C]	Humedad máxima [%]	Tiempo máximo [hr]		
1	9	11.4	8.0	Barato	⊕	⊕	⊕					○		
2	9	14.3	10.0	Pequeño	○	○	○					○		
3	9	12.9	9.0	Soportar voltaje de gran magnitud	○			⊕	⊕	▲	▲			
4	9	12.9	9.0	Soportar amperaje de gran magnitud	○			⊕	⊕	▲	▲			
5	9	11.4	8.0	Soportar temperatura	○			▲	▲	⊕	⊕			
6	9	11.4	8.0	Soportar humedad	○			▲	▲	⊕	⊕			
7	9	14.3	10.0	Portátil	⊕	⊕	⊕					○		
8	9	11.4	8.0	Rápida manufactura	○	○	○					○		
				<b>Target or Limit Value</b>	200	125	500	25	2	40	40	250		
				<b>Difficulty</b> (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	10	9	5	6	9	10				
				<b>Max Relationship Value in Column</b>	9	9	9	9	9	9	9	9		
				<b>Weight / Importance</b>	454.3	462.9	394.3	254.3	254.3	231.4	231.4	222.9		
				<b>Relative Weight</b>	18.1	18.5	15.7	10.1	10.1	9.2	9.2	8.9		

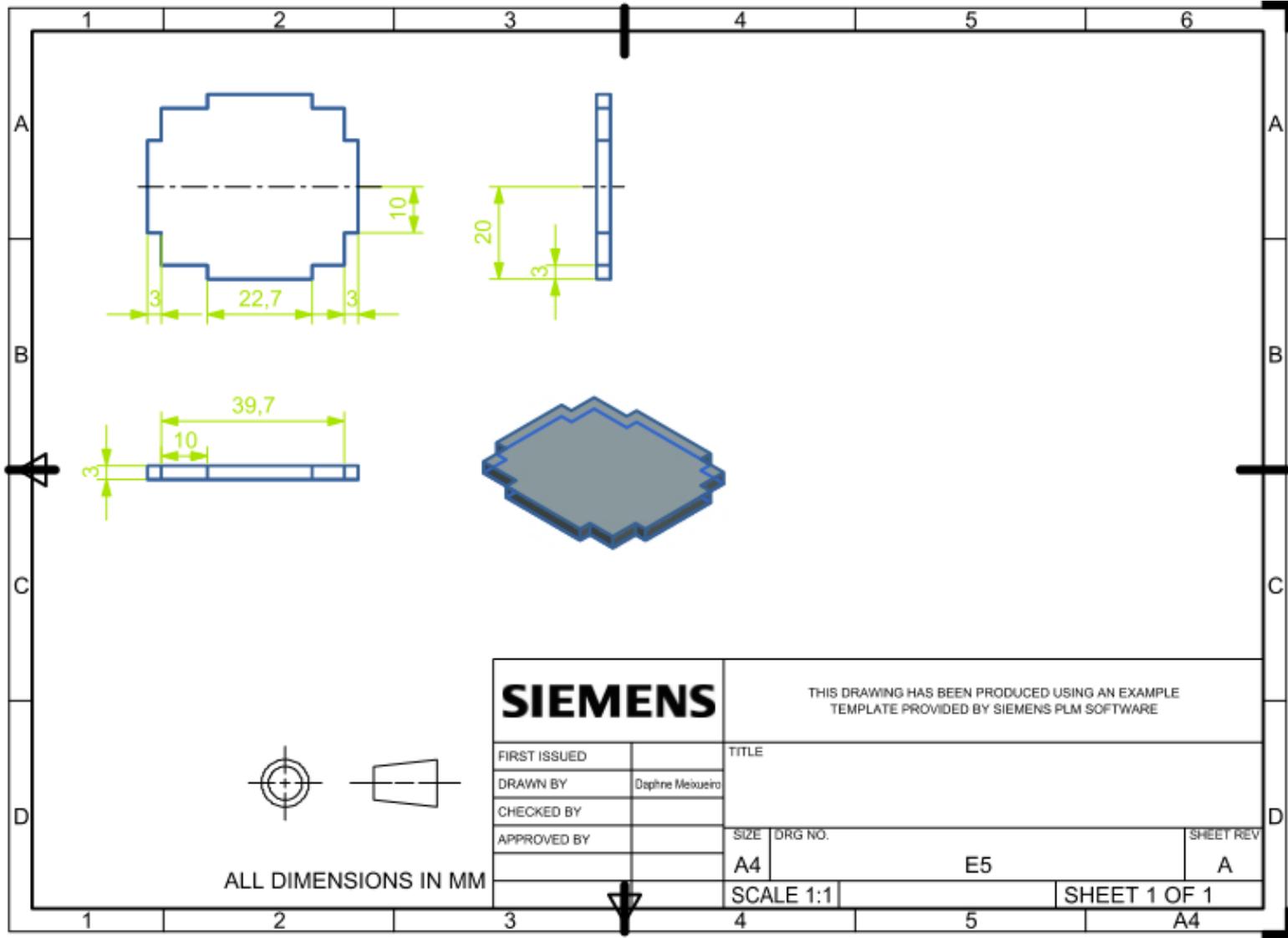
# ANEXO B. PLANOS

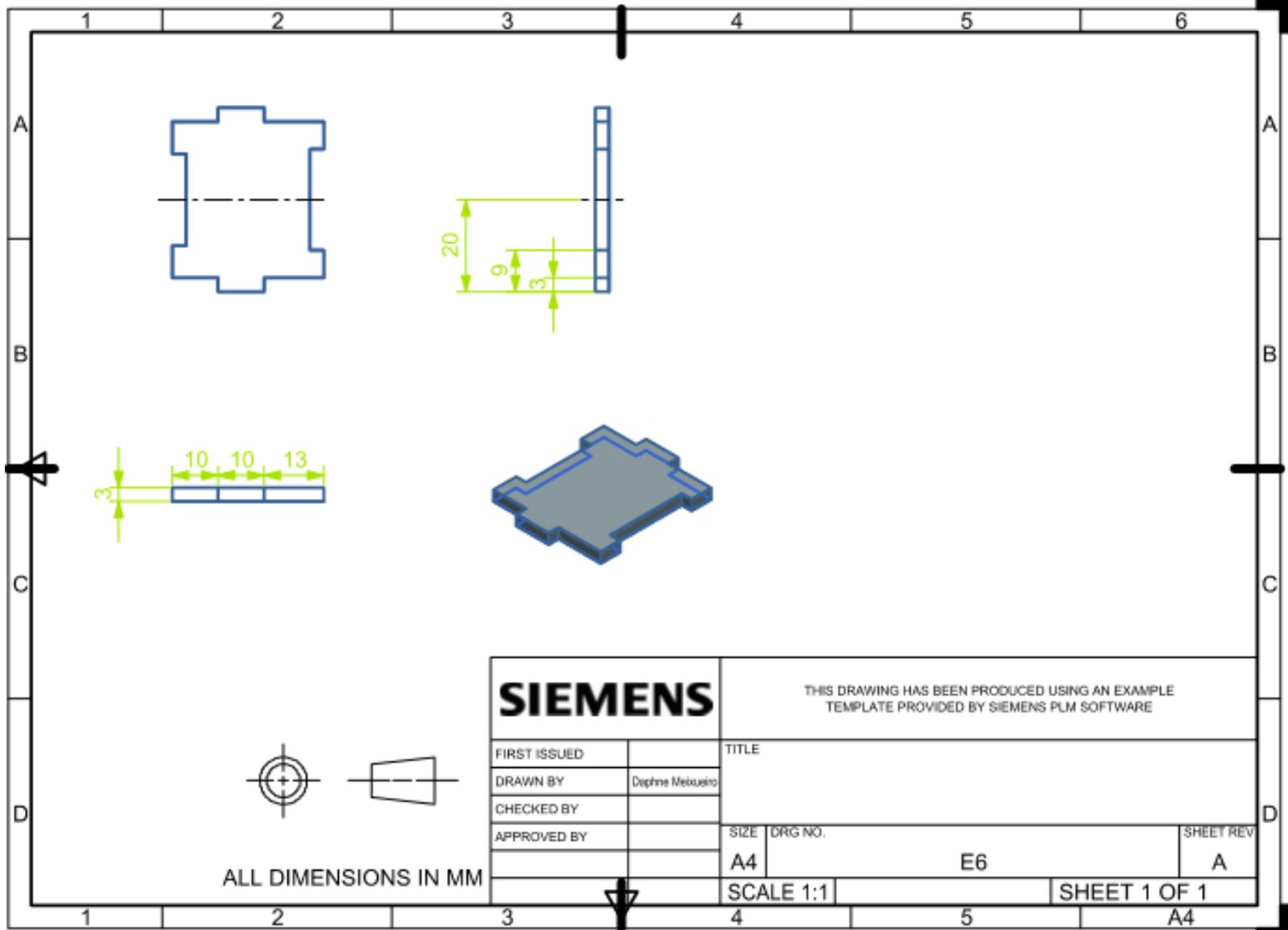


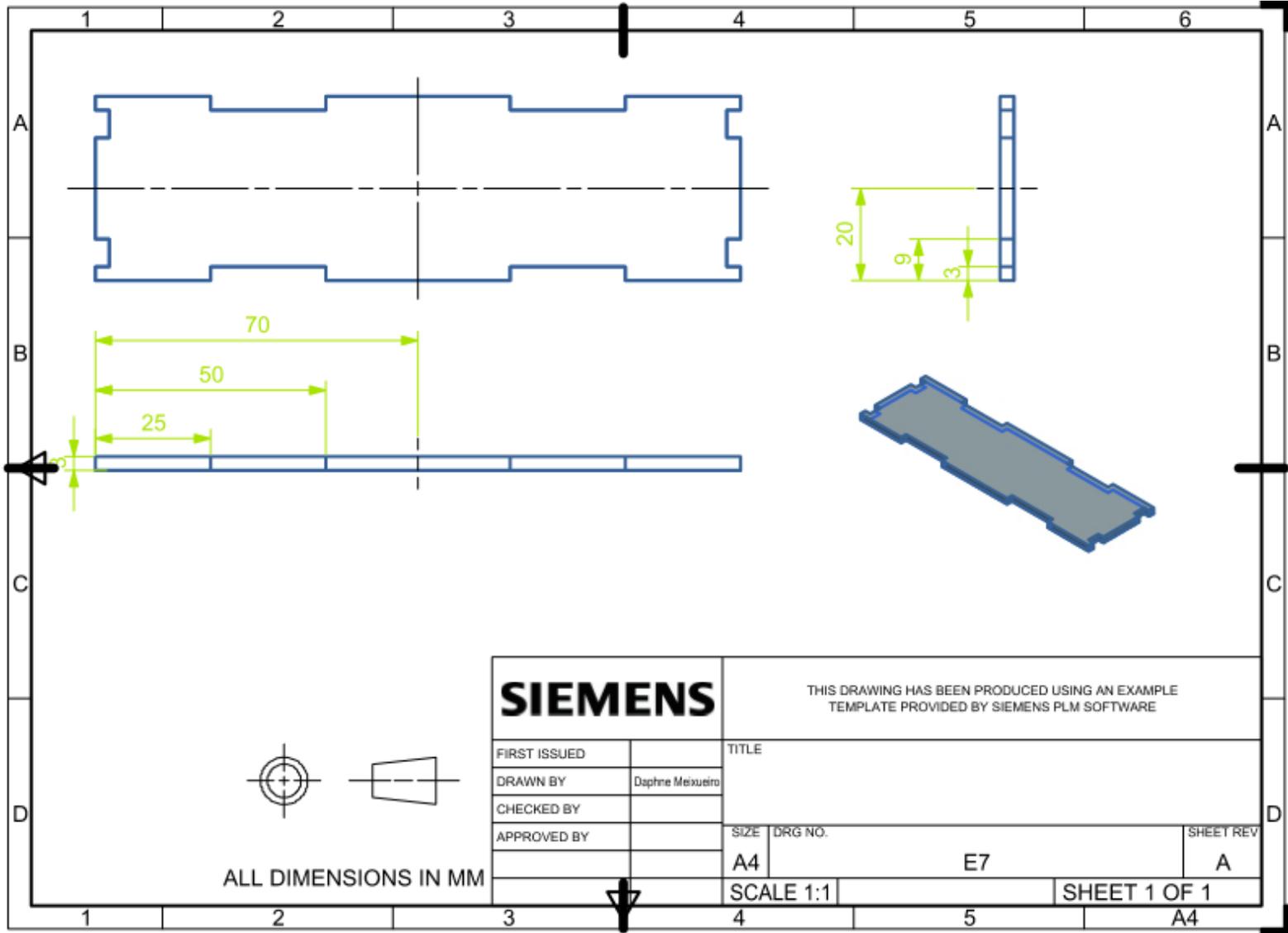


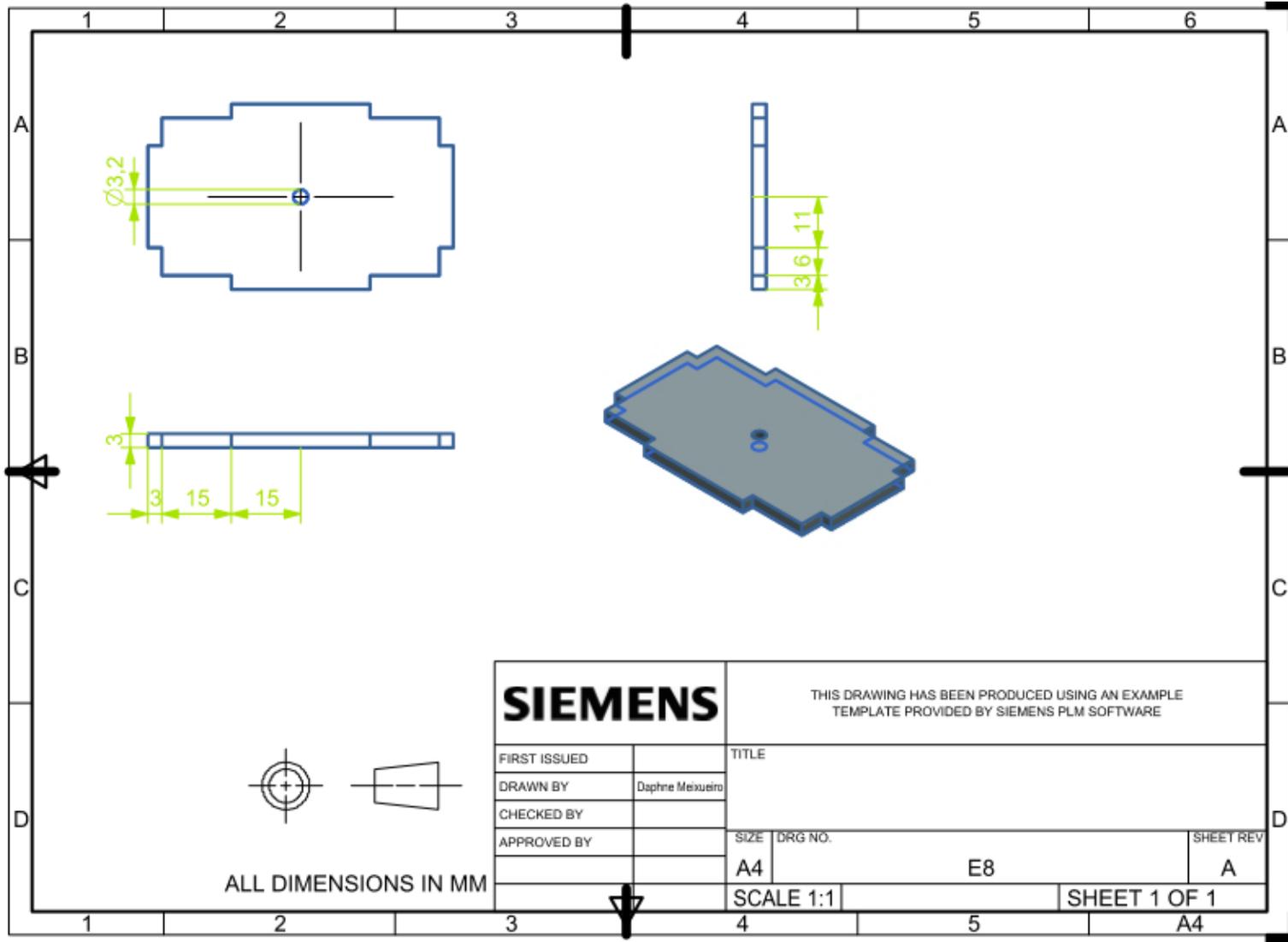


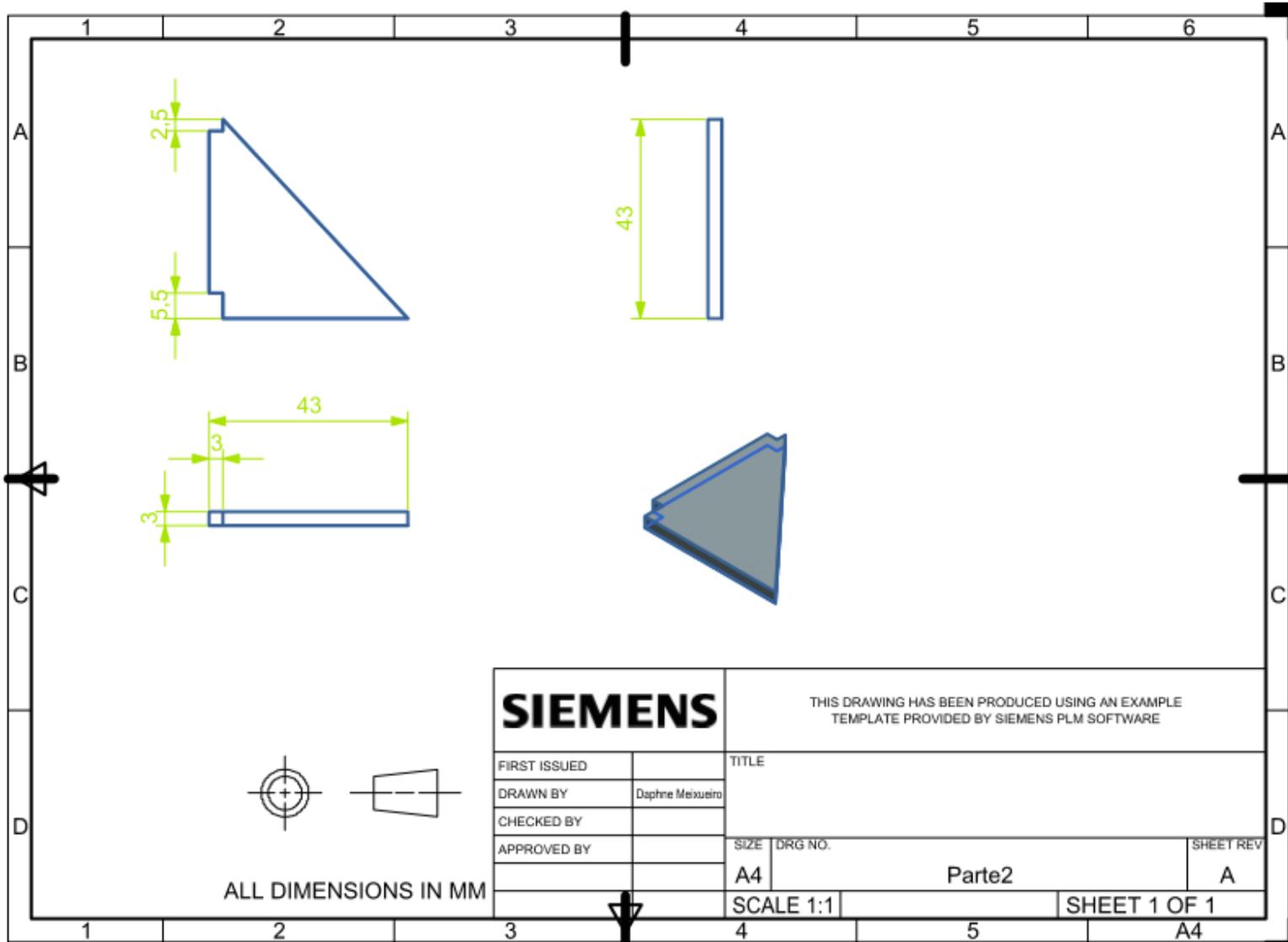


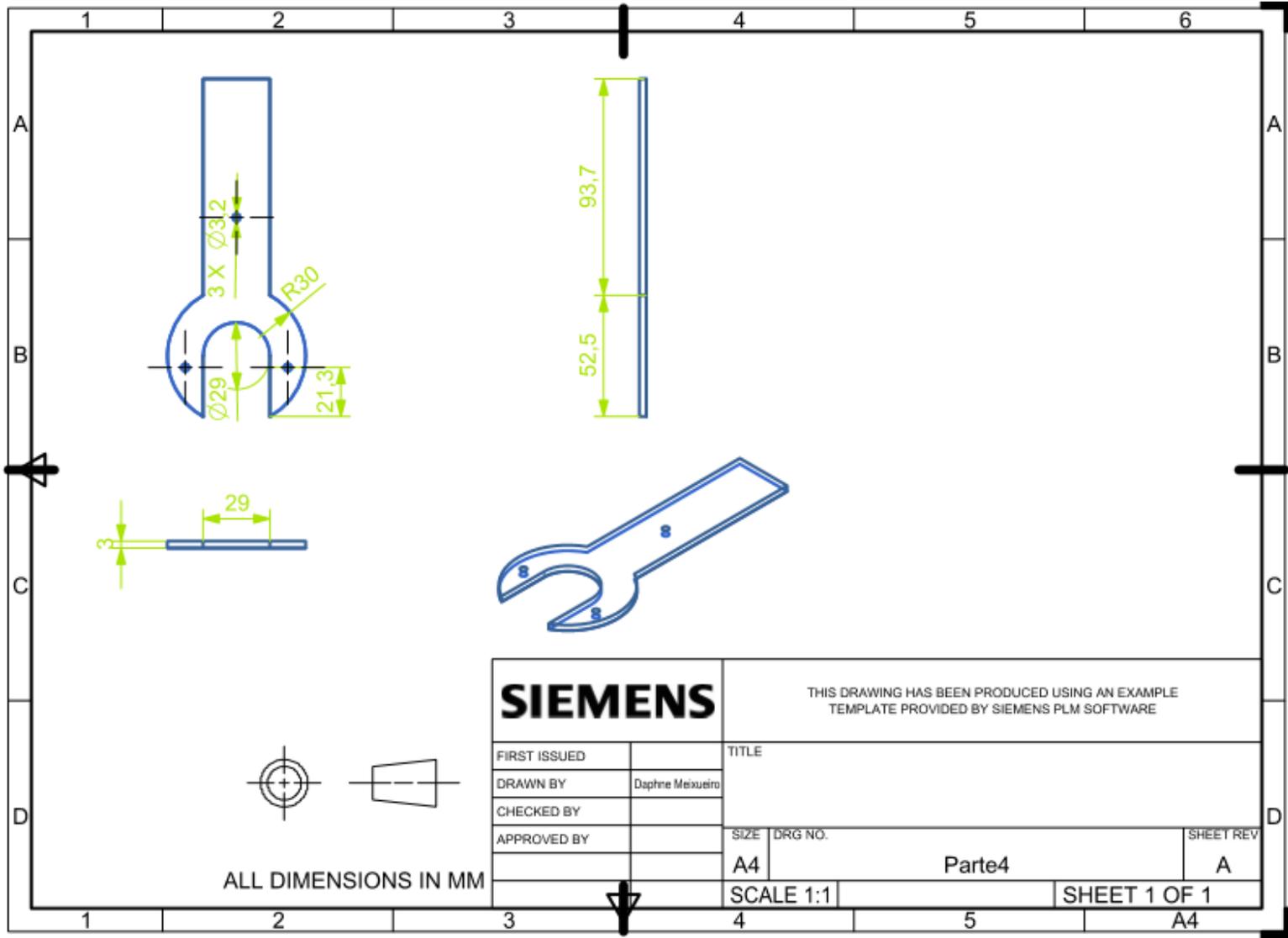


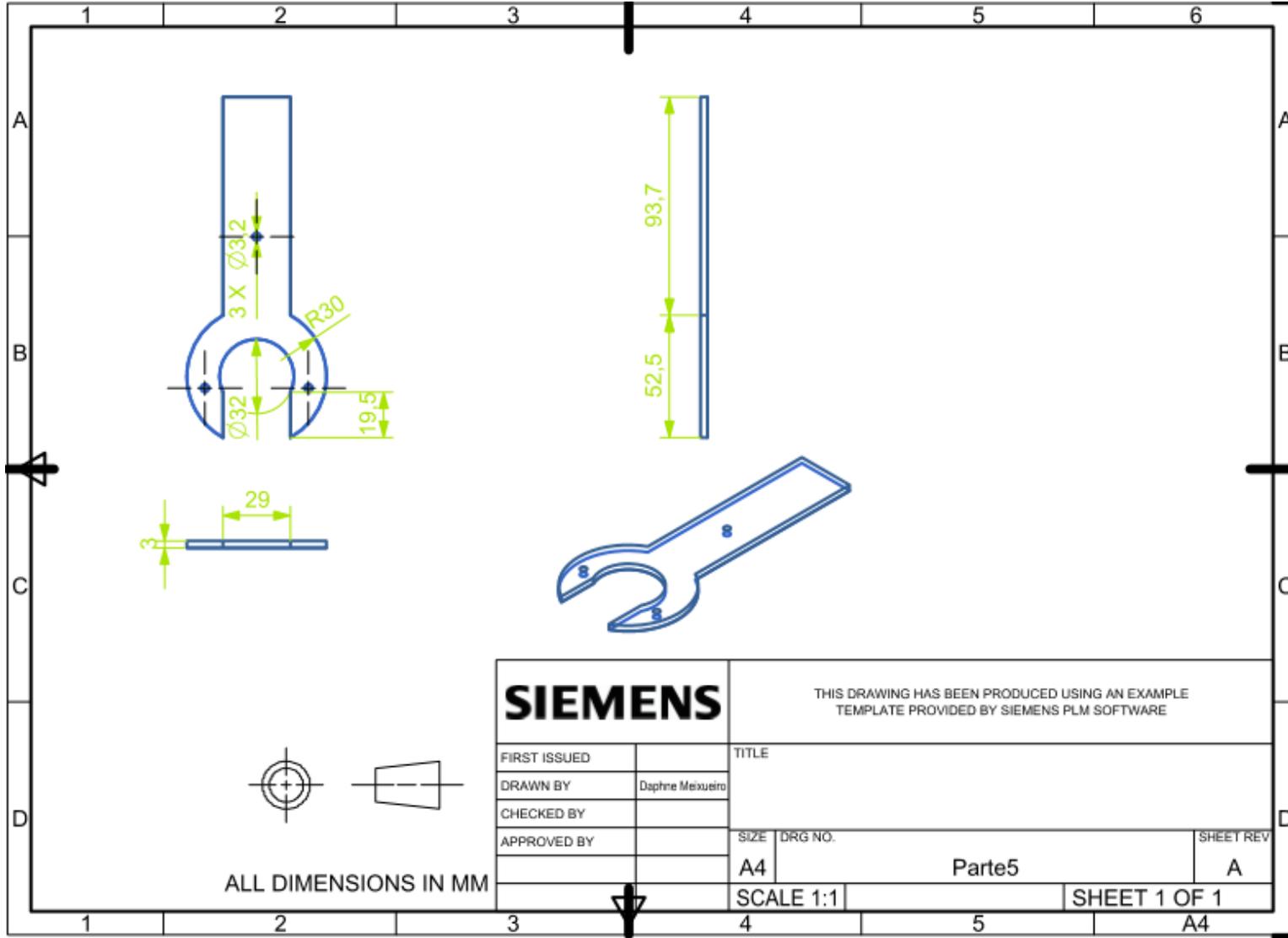


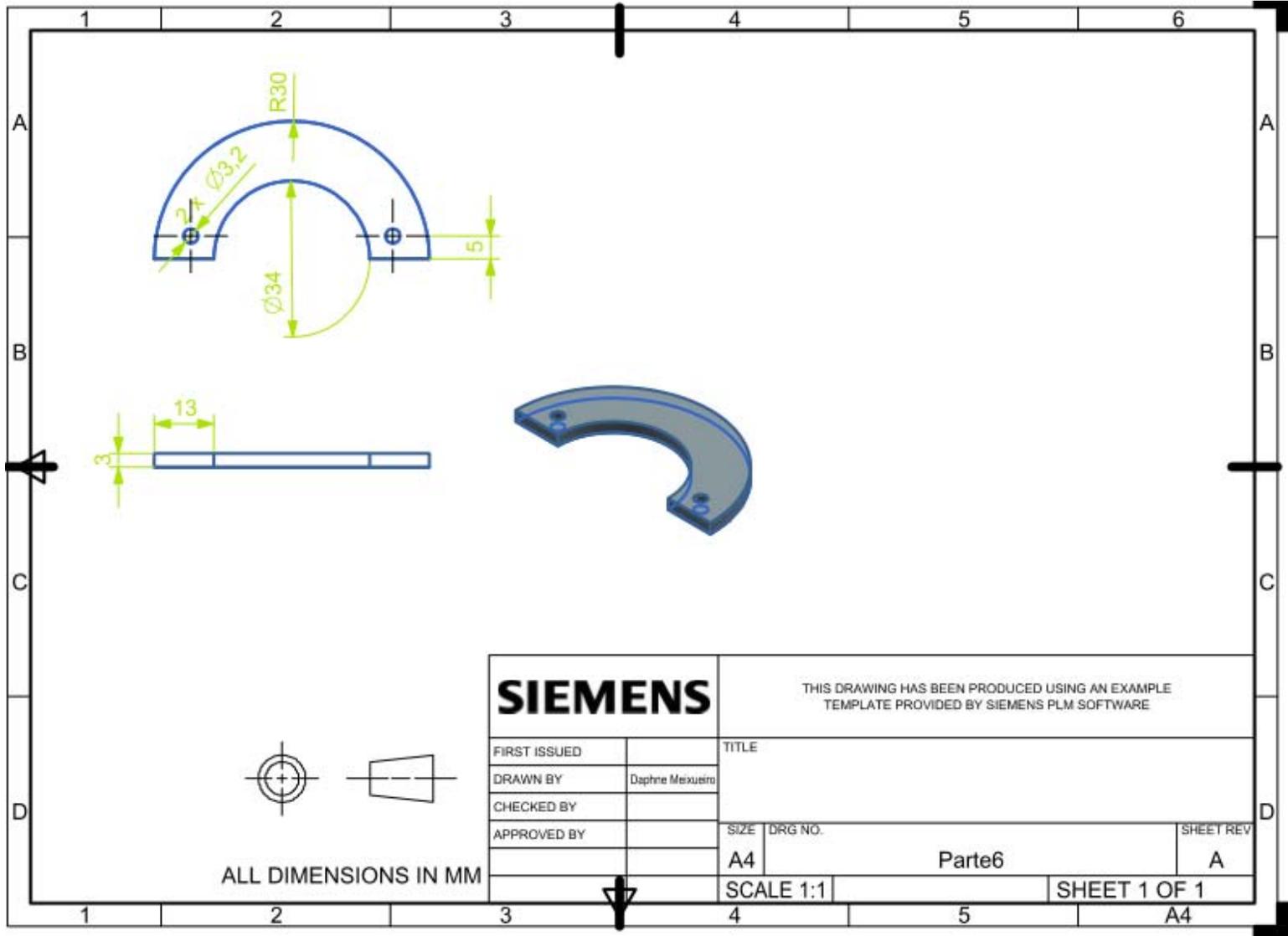




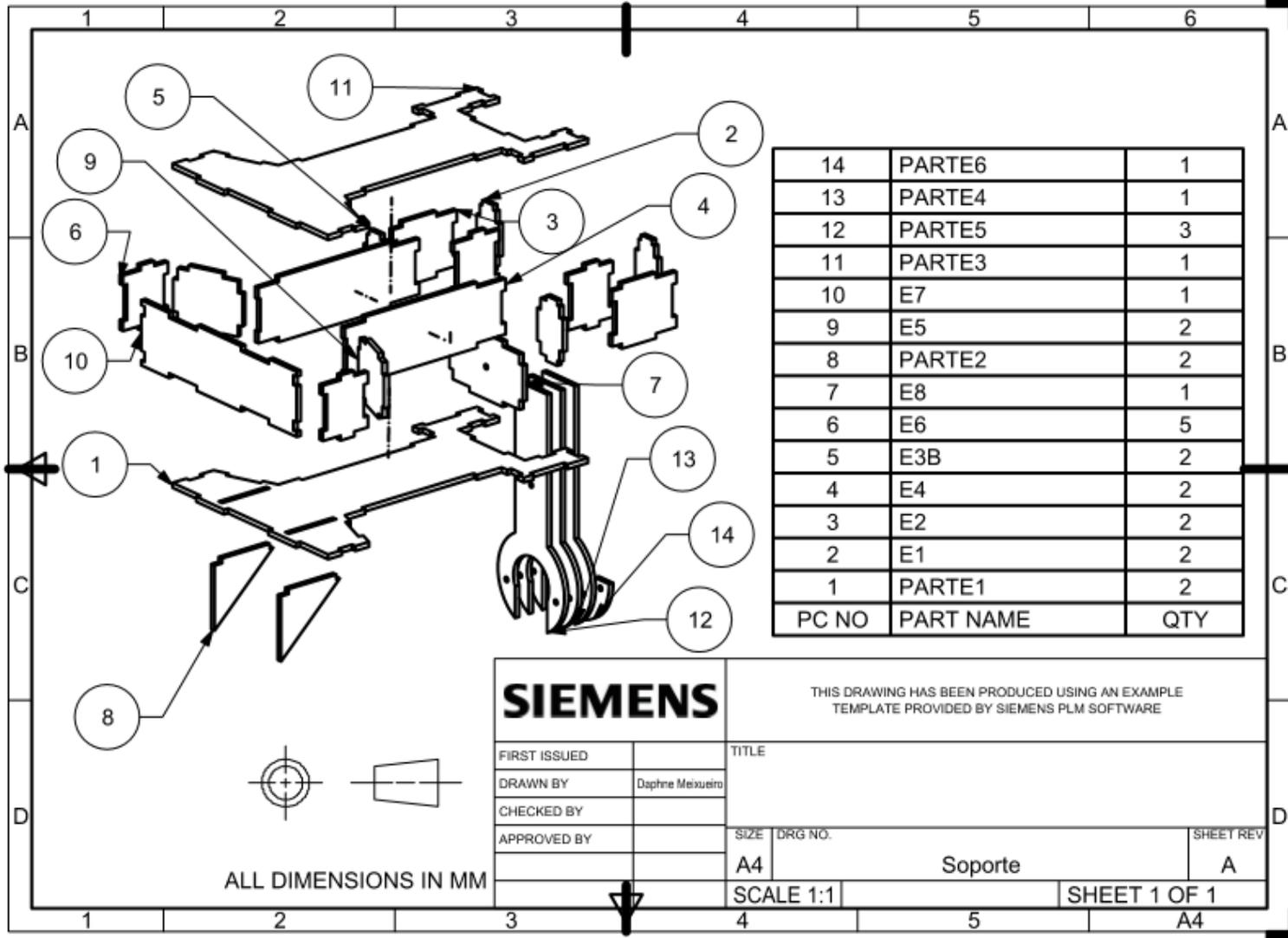


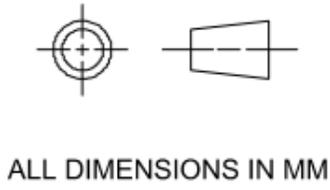
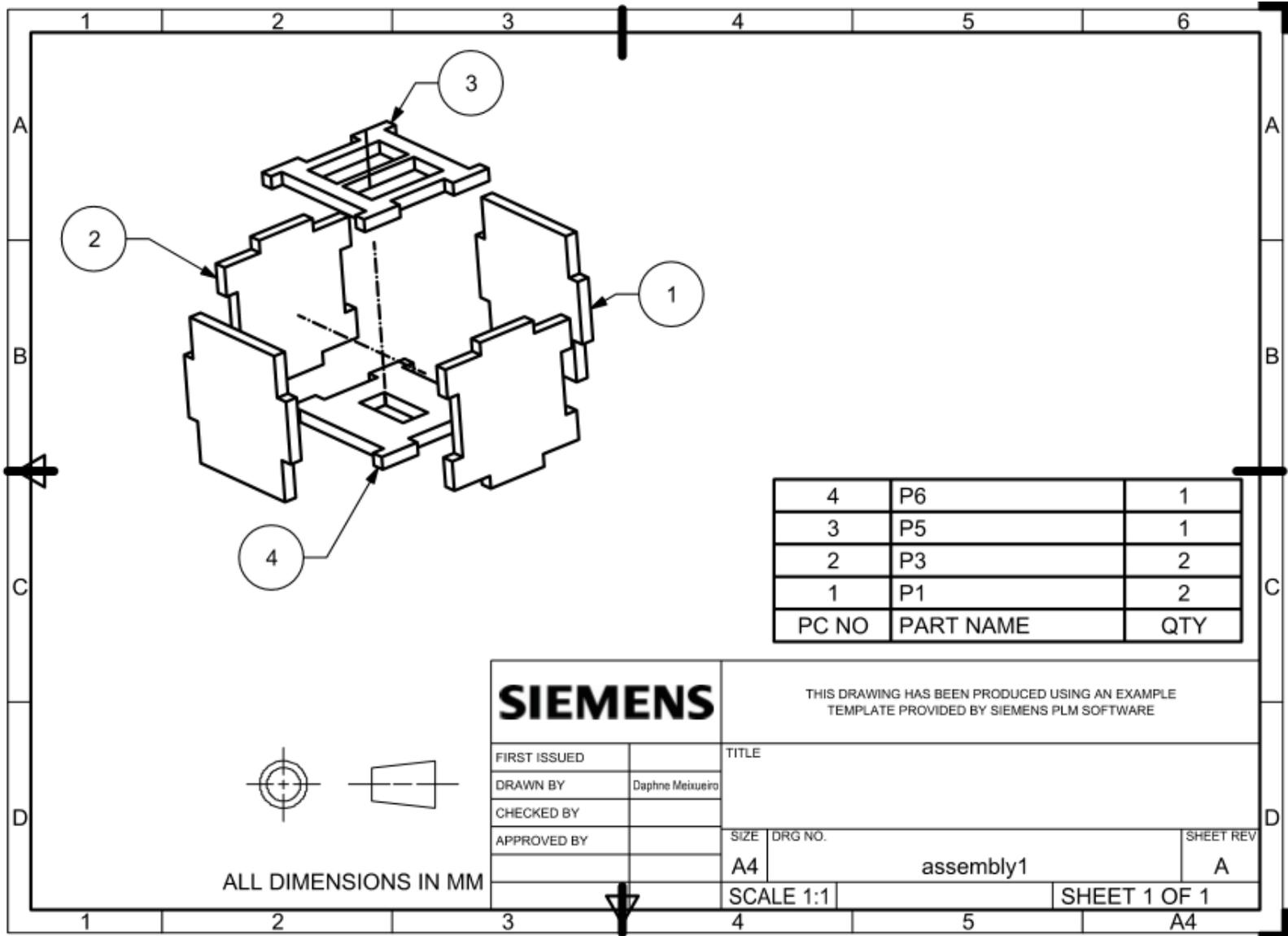






# ANEXO C. PLANOS DE EXPLOSIÓN





**SIEMENS**

THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE

FIRST ISSUED		TITLE	
DRAWN BY	Daphne Meixueiro		
CHECKED BY			
APPROVED BY		SIZE	DRG NO.
		A4	assembly1
			SHEET REV
			A

SCALE 1:1 SHEET 1 OF 1 A4

## ANEXO D. CÓDIGO ARDUINO

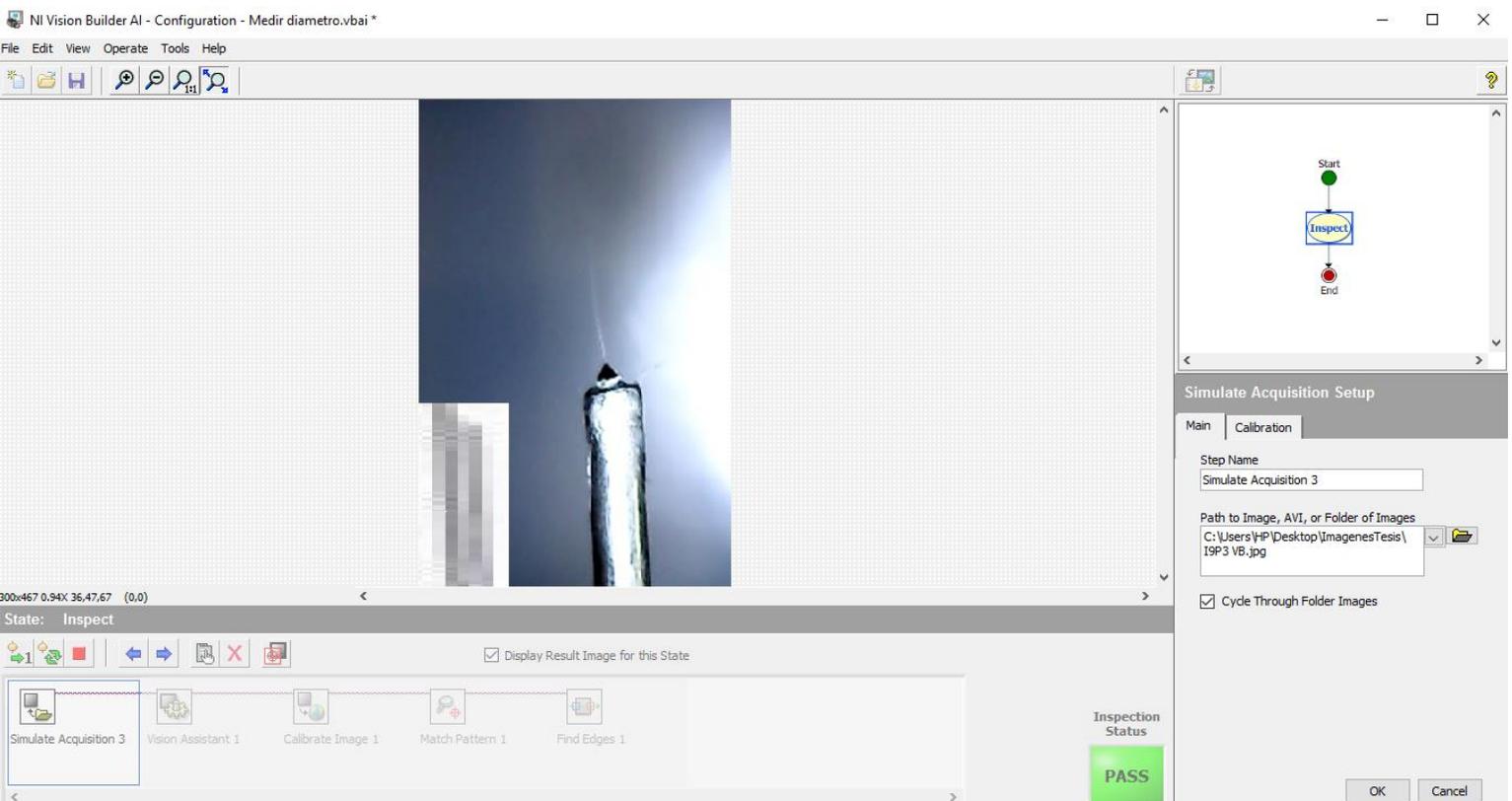
```
float average = 0;
int sensor = 0;

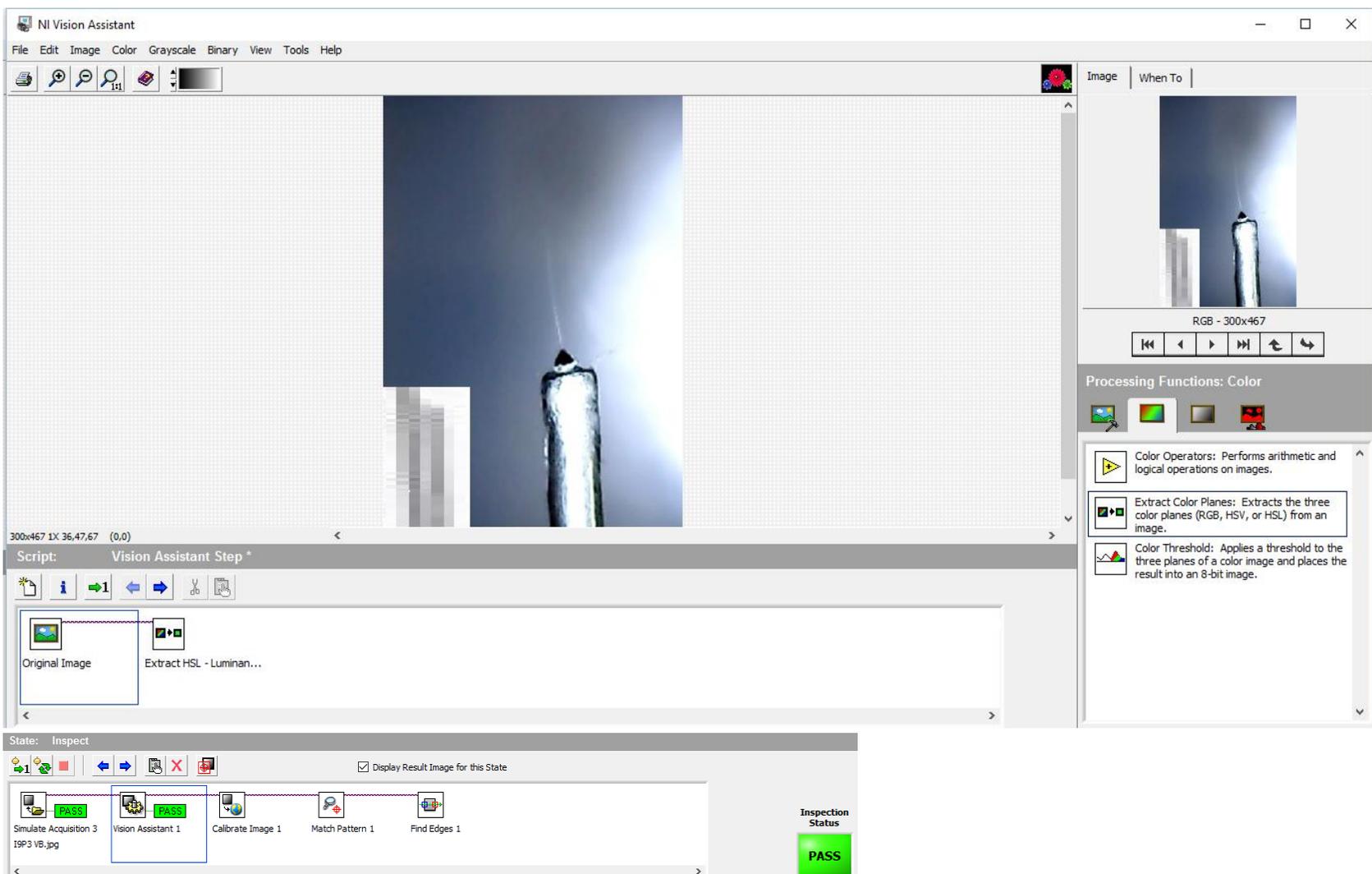
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  sensor = analogRead(A0);
  average = 0.0264 * sensor -13.51; // Sensibilidad de 185

  Serial.print(sensor);
  Serial.print(" ");
  Serial.print(average,4);
  Serial.println("A");
  delay(500);
}
```

# ANEXO E. PROGRAMA DE VISION BUILDER





The screenshot displays the NI Vision Builder AI configuration environment. A dialog box titled "Step 3 - Specify Real-World Distances" is open over a grayscale image of a pencil. The dialog box contains the following text and controls:

Specify a different scale for the Y axis if your sensor has rectangular pixels, or if you want to account for scaling in only one direction. Click Next to define values for the Y axis.

Specify a different scale for the Y axis

Select 2 points by clicking the image, then define the distance between the points in real-world units. Select the point in the list to adjust X and Y coordinates.

Points	X	Y
<input checked="" type="checkbox"/> 1- User Point 1	13	365
<input checked="" type="checkbox"/> 2- User Point 2	60	365

Distances

	Image	Real World
Length	47.00	0.3
Unit	pixels	millimeter

Navigation buttons: << Previous, Next >>, OK, Cancel, Help.

The main interface shows a state diagram with steps: Simulate Acquisition 3 (PASS), Vision Assistant 1 (PASS), Calibrate Image 1 (highlighted), Match Pattern 1, and Find Edges 1. A large green "PASS" button is visible in the bottom right corner.

The "Calibrate Image Setup" panel on the right includes:

- Step Name: Calibrate Image 1
- Calibration: V9 P3
- Correct Image
- Interpolation Type: Zero Order, Replace Value: 0
- Save Calibrated Image to File
- Variable Image Size
- New Calibration... button
- Large green PASS button, OK, Cancel buttons.

NI Vision Builder AI - Configuration - Medir diametro.vbai \*

File Edit View Operate Tools Help

300x467 0.94x 46 (0,0)

State: Inspect

Display Result Image for this State

Simulate Acquisition 3 I9P3 VB.jpg [PASS]

Vision Assistant 1 [PASS]

Calibrate Image 1 [PASS]

Match Pattern 1 # Matches = 1 [PASS]

Find Edges 1

Inspection Status

PASS

Start

Inspect

End

Inspection Steps: Acquire Images

- Acquire Image: Acquires an image from the selected camera and image acquisition board.
- Acquire Image (1394, GigE, or USB): Acquires an image from the selected IEEE 1394, Gigabit Ethernet, USB, or IP camera.
- Read/Write Camera Attributes: Read and write attributes from the selected IEEE 1394, Gigabit Ethernet, or USB camera.
- Simulate Acquisition: Simulates the acquisition of images by reading images from file.
- Select Image: Selects a new image to inspect.

NI Vision Builder AI - Configuration - Medir diametro.vbai \*

File Edit View Operate Tools Help

300x467 1.04X 46 (0,0)

State: Inspect

Display Result Image for this State

Simulate Acquisition 3 Vision Assistant 1 Calibrate Image 1 Match Pattern 1 Find Edges 1

19P3 VB.jpg # Matches = 1

Inspection Status

PASS

Start

Inspect

End

Find Edges Setup

Main Settings Advanced Limits

Pass Inspection if...

Minimum Number of Edges 1

Maximum Number of Edges 1

Number of Edges Found: 2

Step Results

Name	Value	Unit
X Position Calibrated	1.09	mm
Y Position Calibrated	1.74	mm
Distance	8.04	pix
Distance Calibrated	0.05	mm
Strength	100.00	
SNR	20.92	dB
Rising	True	
Edge #2		
X Position	194.63	pix
Y Position	269.61	pix
X Position Calibrated	1.24	mm
Y Position Calibrated	1.73	mm

Step Status

PASS OK Cancel