



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO**

**TEMA: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO PARA LA
PRODUCCIÓN DE MICROFIBRAS A TRAVÉS DE LA TÉCNICA DE
MELT ELECTROSPINNING MEDIANTE UN EXTRUSOR DE HUSILLO”**

AUTOR: ARIAS ORTEGA, JEFFERSON JAVIER

CANTUÑA TONGUINO, YESENIA MARIANA

DIRECTOR: ING. CARRIÓN MATAMOROS, LUIS MIGUEL

SANGOLQUÍ

2018

CERTIFICADO DEL DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “**Diseño y construcción de un equipo para la producción de microfibras a través de la técnica de melt electrospinning mediante un extrusor de husillo**” fue realizado por los señores **Arias Ortega, Jefferson Javier** y **Cantuña Tonguino, Yesenia Mariana**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 7 de septiembre de 2018

Ing. Luis Carrión

DIRECTOR

C.C: 1103574677

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **Arias Ortega, Jefferson Javier y Cantuña Tonguino, Yesenia Mariana**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “**Diseño y construcción de un equipo para la producción de microfibras a través de la técnica de melt electrospinning mediante un extrusor de husillo**” es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 7 de septiembre de 2018

.....
Arias Ortega, Jefferson Javier

C.C: 1721005823

.....
Cantuña Tonguino, Yesenia Mariana

C.C: 1721025763

AUTORIZACIÓN



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Arias Ortega, Jefferson Javier y Cantuña Tonguino, Yesenia Mariana**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño y construcción de un equipo para la producción de microfibras a través de la técnica de melt electrospinning mediante un extrusor de husillo”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 7 de septiembre de 2018

.....
Arias Ortega, Jefferson Javier

C.C: 1721005823

.....
Cantuña Tonguino, Yesenia Mariana

C.C: 1721025763

DEDICATORIA

A mis padres Rocío y Manuel, por su sabiduría y esfuerzo en este camino, a mi hermana Mayra y a mi abuelita Mariana, por su ejemplo y humildad; gracias a su apoyo incondicional y su confianza pude cumplir este sueño.

Ustedes han sido la motivación para conseguir esta meta, que no fue fácil pero que hoy finalmente es un logro familiar.

Yesenia

A mis padres Mercedes y Manuel, quiénes nos criaron a mi hermana Erika y a mí con todo el amor posible que unos hijos han podido recibir.

Jefferson Arias

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a Dios por la fortaleza y sabiduría, por la dicha de tener a mi familia y por las personas que conocí a lo largo de este camino.

Quisiera expresar el inmenso agradecimiento que tengo hacia mis padres, porque les debo mi formación, mis estudios y la vida, por ser aquellas personas que siempre están ahí, sin importar las circunstancias son el apoyo incondicional, pero me faltan palabras para darles mis gracias. A mi hermana quiero agradecer por ser mi ejemplo e inspiración de una mujer que lucha a pesar de todo.

A mis abuelitos y familiares, su cariño es el apoyo necesario en los momentos más difíciles.

Dicen que el tiempo de Dios es perfecto, y no hay muestra más clara que la familia que te regala la vida, aquellas personas que hoy son de gran importancia en mi vida, amigos, gracias por ser parte de este proceso que no fue fácil, pero con altos y bajos vamos cumpliendo nuestro sueño de ser Ingenieros. A ti Jefferson, por ser el amigo que siempre está cuando los problemas aparecen, cuando todo parece imposible, espero que esta amistad sea duradera.

Yesenia

A mi abuela Gladys, desde que tengo memoria la admiro y aunque no estemos cerca su apoyo siempre lo he tenido presente.

A mis padres Mercedes y Manuel y a mi hermana Erika, no existen palabras para agradecerles por todo lo que me han brindado, todo lo que alcance en esta vida será gracias a ustedes.

A mi amiga de tesis Yesy, aún en los momentos más complicados nuestro mutuo apoyo nos permitió salir adelante y formar un gran equipo.

A mis amigos, espero haber sido tan importante para ustedes como lo son ustedes para mí, todos los momentos compartidos los llevaré en mi corazón.

Jefferson Arias

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DEL DIRECTOR.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Definición del Problema	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Justificación e Importancia	5
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1. Objetivo General.....	7
1.4.2. Objetivos Específicos.....	7
1.5. Alcance del Proyecto	7
1.6. Estructura del Documento	8
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	9
2.1. Polímeros	9

2.1.1.	Termopolímeros	9
2.1.2.	Termoestables	10
2.1.3.	Polipropileno PP	10
2.1.3.1.	Polipropileno Isotáctico IPP ó PP-i.....	10
2.1.3.2.	Polipropileno Atáctico APP ó PP-a.....	11
2.2.	Microfibras Poliméricas.....	12
2.2.1.	Características	12
2.2.2.	Métodos de obtención	13
2.2.3.	Aplicaciones.....	15
2.3.	Electrospinning	15
2.3.1.	Melt Electrospinning.....	16
2.3.2.	Historia.....	19
2.3.3.	Tipos de Electrospinning	25
2.3.4.	Aplicaciones.....	26
2.4.	Etapas.....	28
2.4.1.	Carga eléctrica de la disolución	29
2.4.2.	Formación del cono y filamento del fluido (jet)	29
2.4.3.	Adelgazamiento del filamento	29
2.4.4.	Inestabilidades del filamento	29
2.4.5.	Recolección del filamento o solidificación de fibras	30
2.5.	Parámetros de consideración	30
2.5.1.	Peso molecular (Mw).....	31
2.5.2.	Aditivos.....	32

2.5.2.1.	Viscosidad	33
2.5.2.2.	Conductividad eléctrica.....	34
2.5.3.	Caudal	34
2.5.4.	Capilar.....	35
2.5.5.	Influencia de la distancia del capilar al colector (TDC)	37
2.5.6.	Voltaje aplicado	38
2.5.7.	Temperatura	38
2.6.	Extrusión de Polímeros	42
2.6.1.	Extrusor.....	43
2.6.2.	Extrusor de husillo	43
2.6.3.	Aplicaciones.....	45
CAPÍTULO 3 DISEÑO E IMPLEMENTACION		46
3.1.	Metodología de diseño.....	46
3.1.1.	Función de desarrollo de la calidad.....	46
3.2.	Análisis funcional	51
3.3.	Módulo 1. Extrusor	53
3.3.1.	Subsistema 1.1. Tolva	53
3.3.2.	Subsistema 1.2. Capilar.....	55
3.3.3.	Subsistema 1.3. Husillo.....	56
3.1.1.	Subsistema 1.4. Generación de movimiento.....	84
3.2.	Módulo 2. Sistema de temperatura	86
3.2.1.	Subsistema 2.1. Sistema de calentamiento.....	91
3.2.2.	Subsistema 2.2. Instrumentación	97

3.2.3. Subsistema 2.3. Circuito de Potencia.....	101
3.3. Módulo 3. Recolección de fibras	103
3.3.1. Subsistema 3.1. Fuente de alto voltaje.....	104
3.3.2. Subsistema 3.2. Colector.....	105
3.4. Módulo 4. Control y monitoreo	105
3.4.1. Subsistema 4.1. Tarjeta de control.....	105
3.4.2. Subsistema 4.2. Controlador	111
3.6.2.1 Tipo de Controlador	111
3.6.2.2 Obtención de la Planta.....	112
3.6.2.3 Diseño del controlador	113
3.4.3. Subsistema 4.2. Interfaz HMI	116
CAPÍTULO 4 PRUEBAS Y RESULTADOS	123
4.1. Funcionamiento	123
4.2. Pruebas.....	124
4.3. Análisis	126
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	136
5.1. Conclusiones.....	136
5.2. Recomendaciones	137
5.3. Trabajos futuros	138
Bibliografía.....	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Propiedades del polipropileno</i>	11
Tabla 2 <i>Comparación entre electrospinning en solución y melt electrospinning</i>	18
Tabla 3 <i>Aplicaciones de polímeros usados para electrospinning</i>	28
Tabla 4 <i>Polímeros y sus condiciones para melt electrospinning</i>	40
Tabla 5 <i>Temperaturas de trabajo de polímeros usados para melt electrospinning</i>	42
Tabla 6 <i>Necesidades del consumidor</i>	47
Tabla 7 <i>Características técnicas</i>	48
Tabla 8 <i>Resultados de la matriz QFD</i>	49
Tabla 9 <i>Estructura funcional del proyecto</i>	52
Tabla 10 <i>Características de los polímeros</i>	56
Tabla 11 <i>Características de husillos para termoplásticos</i>	57
Tabla 12 <i>Consideraciones de diseño para el husillo</i>	58
Tabla 13 <i>Parámetros de diseño</i>	62
Tabla 14 <i>Criterios de selección para el material del husillo y barril</i>	74
Tabla 15 <i>Evaluación de Maquinabilidad para la selección de material del husillo y barril</i>	75
Tabla 16 <i>Evaluación de Costo para la selección de material del husillo y barril</i>	75
Tabla 17 <i>Evaluación de Temperatura para la selección de material del husillo y barril</i>	75
Tabla 18 <i>Evaluación de Corrosión para la selección de material del husillo y barril</i>	75
Tabla 19 <i>Selección final del material del husillo y del barril</i>	76
Tabla 20 <i>Especificaciones del motor seleccionado</i>	85
Tabla 21 <i>Criterios de selección para el sistema de calentamiento</i>	94
Tabla 22 <i>Evaluación de Eficiencia para el sistema de calentamiento</i>	94
Tabla 23 <i>Evaluación de Costo para el sistema de calentamiento</i>	94
Tabla 24 <i>Evaluación de Temperatura para el sistema de calentamiento</i>	95
Tabla 25 <i>Evaluación de Control para el sistema de calentamiento</i>	95
Tabla 26 <i>Selección final del sistema de calentamiento</i>	95
Tabla 27 <i>Especificaciones Técnicas Resistencia de Abrazadera</i>	95
Tabla 28 <i>Criterios de selección para el sensor de temperatura</i>	99

Tabla 29 <i>Evaluación de Costo para la selección del sensor de temperatura</i>	99
Tabla 30 <i>Evaluación de Resolución para la selección del sensor de temperatura</i>	100
Tabla 31 <i>Evaluación de Rango para la selección del sensor de temperatura</i>	100
Tabla 32 <i>Evaluación de Señal para la selección del sensor de temperatura</i>	100
Tabla 33 <i>Selección Final del Sensor de temperatura</i>	100
Tabla 34 <i>Características Termocupla tipo K</i>	101
Tabla 35 <i>Características del MOSFET IRF 830A</i>	102
Tabla 36 <i>Características Fuente de Poder Genvolt 73030</i>	104
Tabla 37 <i>Criterios de Selección para la tarjeta de control</i>	108
Tabla 38 <i>Evaluación de costo para la selección de la tarjeta de control</i>	108
Tabla 39 <i>Evaluación de Programación para la selección de la tarjeta de control</i>	108
Tabla 40 <i>Evaluación de Implementación para la selección de la tarjeta de control</i>	109
Tabla 41 <i>Evaluación de Disponibilidad para la selección de la tarjeta de control</i>	109
Tabla 42 <i>Selección Final de la Tarjeta de Control</i>	109
Tabla 43 <i>Características Técnicas ATmega328 (Arduino)</i>	110
Tabla 44 <i>Ventajas y desventajas de los tipos de controladores</i>	111
Tabla 45 <i>Parámetros de prueba A</i>	126
Tabla 46 <i>Parámetros de prueba B</i>	128
Tabla 47 <i>Parámetros de prueba C</i>	129
Tabla 48 <i>Parámetros de prueba D</i>	131
Tabla 49 <i>Parámetros de prueba E</i>	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema del dispositivo de electrospinning.....	3
Figura 2 Fibras de polipropileno obtenidas por melt electrospinning.....	4
Figura 3 Extrusor Brabender 3/4" de tornillo simple	5
Figura 4 Polipropileno Isostático	10
Figura 5 Polipropileno Atáctico	11
Figura 6 Comparación: cabello humano con nano fibras electro hiladas	12
Figura 7 Técnica de Drawing.....	13
Figura 8 Proceso de síntesis por molde.....	14
Figura 9 Esquema de la técnica Separación de fase.....	14
Figura 10 Equipo convencional de electrospinning	16
Figura 11 Láser usado para fundir la alimentación de polímero para electrospinning	17
Figura 12 Número de artículos y patentes publicados con el concepto de electrospinning.....	20
Figura 13 Esquema del extrusor usado para melt electrospinning.....	23
Figura 14 Esquema de preparación para melt electrospinning	24
Figura 15 Electrospinning en configuración vertical	26
Figura 16 Electrospinning en configuración horizontal.....	26
Figura 17 Aplicaciones del electrospinning.....	27
Figura 18 Cono y jet de solución al 2% de óxido de polietileno.	29
Figura 19 Inestabilidades en el filamento de óxido de polietileno en agua al 2%	30
Figura 20 Relación del peso molecular con el diámetro de las fibras del IPP.....	31
Figura 21 Viscosidad de corte de polipropileno PP con diferentes aditivos.....	33
Figura 22 Efecto de la cantidad de aditivos en la conductividad eléctrica a) SO b) NaCl	34
Figura 23 Fibras de PP A) 10s B) 20s C)30s	35
Figura 24 Efecto del diámetro interno del capilar sobre el diámetro de la fibra.....	36
Figura 25 Efectos del diámetro del capilar sobre el diámetro de fibras de PCL.....	36
Figura 26 Variación diámetro respecto a la distancia al capilar	37
Figura 27 Efecto del campo eléctrico sobre el diámetro de las fibras	38
Figura 28 Propuestas de calentamiento para melt electrospinning	39

Figura 29 Esquemas de configuración de calentamiento para melt electrospinning	40
Figura 30 A) Efecto de la temperatura en el diámetro B) Relación temperatura y velocidad	41
Figura 31 Extrusión de polímeros	42
Figura 32 Zonas de una extrusora y evolución de la presión en las mismas	44
Figura 33 Parámetros del diseño de un tornillo de extrusión.....	45
Figura 34 Casa de la calidad del equipo para melt electrospinning	50
Figura 35 Medidas de la tolva.....	53
Figura 36 Tolva.....	54
Figura 37 Capilar de Cobre	55
Figura 38 Capilar de acero inoxidable	55
Figura 39 Acople para capilar	56
Figura 40 Geometría del husillo.....	58
Figura 41 Zonas del husillo.....	60
Figura 42 Relación de compresión y longitud de las zonas en el husillo	61
Figura 43 Husillo.....	63
Figura 44 Extremo final del extrusor	64
Figura 45 Cabezal del extrusor	65
Figura 46 Capilar.....	66
Figura 47 Perfil de velocidad de flujo total.....	67
Figura 48 Perfil de velocidad de flujo de arrastre	68
Figura 49 Perfil de velocidad de flujo de presión	69
Figura 50 Tornillo cortado a lo largo de su eje y desenrollado.....	71
Figura 51 Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable 304.....	76
Figura 52 Esfuerzos presentes en el husillo	77
Figura 53 Desplazamientos producidos en el tornillo.....	78
Figura 54 Factor de Seguridad obtenido por CAE.....	80
Figura 55 Factor de Seguridad al aplicar torsión en el tornillo.....	81
Figura 56 Escala para el cálculo de rodamientos	83
Figura 57 Chumacera seleccionada.....	83
Figura 58 Husillo.....	84

Figura 59 Barril	84
Figura 60 Motor Nema 23 con caja reductora	86
Figura 61 Secciones en el cilindro del extrusor	87
Figura 62 Flujo de calor en las secciones cilíndricas.....	87
Figura 63 Variación de la temperatura de la resistencia con el tiempo.	90
Figura 64 Resistencia Tipo Tubular	91
Figura 65 Resistencias de Abrazadera	93
Figura 66 Resistencia tipo abrazadera.....	96
Figura 67 Fibra Cerámica.....	96
Figura 68 Ubicación de los elementos en la extrusora.....	97
Figura 69 LM35	98
Figura 70 Termocupla tipo J	98
Figura 71 Diseño clásico de un sensor RTD	99
Figura 72 Termocupla tipo K.....	101
Figura 73 Circuito de Potencia.....	102
Figura 74 Esquema 3D del circuito diseñado	103
Figura 75 Fuente Poder Genvolt 73030	104
Figura 76 Colector.....	105
Figura 77 ATmega328	106
Figura 78 PIC 16F877A.....	107
Figura 79 Raspberry PI modelo A+	107
Figura 80 Controlador, driver y fuente de alimentación.	110
Figura 81 Diagrama del lazo de control.....	112
Figura 82 Respuesta de la planta a una entrada escalón	113
Figura 83 Lugar de las raíces de la planta.....	114
Figura 84 Funcionamiento del sistema con el controlador	115
Figura 85 Arquitectura del HMI	116
Figura 86 Navegabilidad del HMI	117
Figura 87 Pantalla de Inicio	119
Figura 88 Pantalla de Control	120

Figura 89 Pantalla de Monitoreo.....	120
Figura 90 Diagrama de flujo del proceso de extrusión en HMI.....	121
Figura 91 Ensamble del equipo.....	122
Figura 92 Implementación de los subsistemas.....	122
Figura 93 Diagrama de flujo proceso de extrusión	123
Figura 94 Temperatura [°C] vs Tiempo [s] del cilindro	124
Figura 95 Temperatura [°C] vs Tiempo [s] del capilar	125
Figura 96 Equipo para la producción de microfibras.....	125
Figura 97 Cono de Taylor	126
Figura 98 Fibras obtenidas prueba A	127
Figura 99 Microscopía de las fibras en la prueba A.....	127
Figura 100 Fibras obtenidas prueba B	128
Figura 101 Microscopía de las fibras en la prueba B.....	129
Figura 102 Fibras obtenidas prueba C	130
Figura 103 Microscopía de las fibras en la prueba C.....	130
Figura 104 Fibras obtenidas prueba D	131
Figura 105 Microscopía de las fibras en la prueba D.....	132
Figura 106 Fibras obtenidas prueba E.....	133
Figura 107 Microscopía de las fibras en la prueba E.....	133
Figura 108 Efecto de la distancia del colector al capilar en el diámetro de las fibras	134
Figura 109 Efecto del voltaje aplicado sobre el diámetro de las fibras	135

RESUMEN

Las investigaciones para la obtención de fibras poliméricas han ido evolucionando, logrando diversas aplicaciones en el campo farmacéutico, energético e industrial. Electrospinning o electrohilado es el método convencional de producción de fibras poliméricas, este requiere la preparación de una solución con aditivos, el solvente permite la solidificación de la fibra al evaporarse, emitiendo en ocasiones gases nocivos para la salud y el medio ambiente. Por esta razón, otros métodos de electrohilado emplean polímero fundido, esta técnica se conoce como melt electrospinning. El presente trabajo muestra el diseño y construcción de un equipo para la obtención de microfibras poliméricas (polipropileno) mediante un extrusor de husillo, a través de melt electrospinning. En el desarrollo del tema, se presenta el diseño e implementación del husillo que transporta los pellets de polipropileno hacia el capilar, para la fundición del polímero se implementa un control de temperatura que permite alcanzar la temperatura de trabajo del material. La salida del material por el capilar se realiza con caudales en escala de [uL/min]. Las variables del proceso son monitoreadas y controladas mediante una interfaz de usuario (HMI). Finalmente, el equipo trabaja hasta 300 [°C] y es capaz de variar el caudal de salida desde 8 [uL/min] hasta 1 [mL/min]. Como resultado de las pruebas de funcionamiento, las fibras obtenidas de polipropileno isotáctico presenta un diámetro mínimo de 22 [um] y las fibras de polipropileno atáctico de 36 [um].

PALABRAS CLAVE:

- **MELT ELECTROSPINNING**
- **HUSILLO**
- **CAPILAR**
- **FIBRAS POLIMÉRICAS**

ABSTRACT

Researchers for obtaining polymeric fibers has been evolving, achieving various applications in the pharmaceutical, energy and industrial fields. Electrospinning is the conventional method of production of polymeric fibers, this requires the preparation of a solution with additives, the solvent allows the solidification of the fiber, when this evaporates, sometimes emits gases harmful to health and the environment. For this reason, other electrospinning methods employ molten polymer, this technique is known as melt electrospinning. The present work shows the design and construction of an equipment to obtain polymeric microfibers (polypropylene) starting from a screw extruder, through melt electrospinning. In the development of the theme, the design and implementation of the spindle that transports polypropylene pellets to the capillary is presented, for melting the polymer a temperature control is implemented that allows to reach the working temperature of the material. The output of the material by the capillary is carried out with flows in scale of [uL / min]. The process variables are monitored and controlled through a user interface (HMI). Finally, the equipment works up to 300 [° C] and can vary the output flow rate from 8 [uL / min] to 1 [mL / min]. After performance tests, the fibers obtained from isotactic polypropylene have a minimum diameter of 22 [um] and atactic polypropylene fibers of 36 [um].

KEYWORDS:

- MELT ELECTROSPINNING
- SPINDLE
- CAPILLARY
- POLYMERIC FIBERS

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El presente capítulo contempla la problemática, antecedentes y justificación del trabajo realizado. Determinando los objetivos, alcance e importancia del proyecto para la obtención de microfibras poliméricas, mencionando las investigaciones realizadas acerca del tema y planteando los nuevos desafíos. En el desarrollo del capítulo se incluye una descripción de las áreas que comprende el proyecto.

1.1. Definición del Problema

La creciente tendencia es la miniaturización, es decir, la búsqueda de materiales más pequeños, más fuertes y ligeros para diversas áreas de la tecnología actual, la denominada nanociencia. El potencial de los nanomateriales presenta grandes desafíos para la tecnología actual y sus diversas y diferentes aplicaciones, debido a las propiedades únicas e incluso superiores que ofrecen en la medicina, la biología, el medio ambiente y la industria en general. El sector público y privado ha mostrado gran interés en la investigación de nanotecnología con una inversión de alrededor de 5 mil millones de dólares anualmente (Díaz del Castillo, 2012).

El reto consiste en controlar los parámetros de producción de microfibras a través de melt electrospinning con el fin de alcanzar las características y morfología deseada, las cuales son importantes dependiendo de la aplicación en la cual se esté trabajando. Considerando las variables del trabajo que son: variables de la solución (peso molecular, concentración, viscosidad, conductividad y tensión superficial), variables del proceso (distancia de punta a colector, campo eléctrico aplicado y alimentación de flujo) y variables ambientales; se tiene que realizar el análisis

adecuado de la manipulación de estos parámetros para la caracterización de la morfología y diámetros de las fibras (Marín & Martínez, 2009).

Además de lo mencionado, el método convencional de trabajo de la técnica de melt electrospinning generalmente utiliza una bomba de jeringa para la traslación de polímero, buscando la optimización del proceso se realizan variantes en el método de transporte del polímero, entre ellas extrusores de husillo.

1.2. Antecedentes

Durante las últimas dos décadas, se han desarrollado numerosos estudios de nanotecnología en campos industriales y científicos, dentro del desarrollo de nanomateriales se presenta un interés particular en la obtención de fibras poliméricas con diámetros que van desde nano hasta micrómetros. Las aplicaciones de estos materiales están en diversas áreas como la ingeniería de tejidos en la medicina, en la industria textil, farmacéutica y de cosméticos, así como en el desarrollo de equipos y maquinaria a nano y micro escala.

Para la producción de microfibras existe un renovado interés en la ya conocida técnica de electrospinning debido a su gran potencial, facilidad y eficiencia sobre métodos tradicionales de fabricación de fibras. En 1914, se publican los primeros trabajos sobre el comportamiento de fluidos en el extremo de un capilar frente a cargas eléctricas altas (Hassounah, 2012), estos estudios son patentados posteriormente por Formhals (US Patente nº 1975504 A, 1934) quien realizó varios métodos experimentales, determinando una relación entre la distancia del capilar al colector y su influencia en los resultados. Larrondo y Manley fueron los primeros autores en obtener fibras a partir de polímero fundido, usando una cámara de calor en 1981. En su trabajo demostraron la

posibilidad de obtener fibras a partir de la fundición de poliolefinas lineales como polipropileno y polietileno (Lyons, 2004), dando los principios que definen la técnica de melt electrospinning.

El proceso convencional de electrospinning consiste en forzar el paso de una solución de polímero a través de un cilindro hueco con el movimiento continuo del émbolo, la solución de polímero es transportada hasta el extremo final del cilindro donde se encuentra una aguja (Senturk-Ozer, Ward, Gevgilili, & Kalyon, 2013), en la parte final de la aguja se aplica fuerza eléctrica para vencer la tensión superficial y cargar a un voltaje determinado el chorro de solución polimérica, de esta manera finos chorros se forman desde el capilar hasta el plato colector (Duque, Rodríguez, & López, 2013).

Dentro de los dispositivos desarrollados para este proceso, se encuentra el desarrollado en la Universidad Técnica de Aquisgrán, Alemania. En la **Figura 1** se muestra el esquema general de este dispositivo, que consiste en una fuente de alta tensión, un plato plano de aluminio (colector), una bomba de jeringa de tipo HA 11, una cámara de calefacción y una pistola de calefacción.

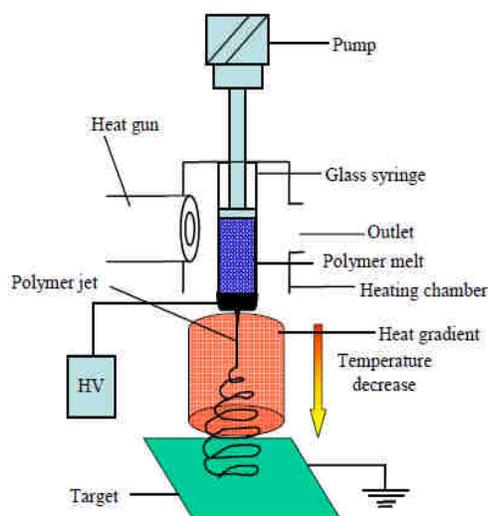


Figura 1 Esquema del dispositivo de electrospinning

Fuente: (Hassounah, 2012)

Los parámetros de configuración del sistema fueron: distancia de recolección entre 40 a 260 [mm], el caudal se varió de 0.2 a 1 [mL/h] y la intensidad del campo eléctrico estuvo en el rango de 2 a 7.5 [kV/cm]. Se utilizó 2 [mL] de polímero para ser llenados en la jeringa a una temperatura de 220 °C, posteriormente se caracterizaron las fibras a través de un microscopio electrónico de barrido (SEM) Hitachi S-300 N teniendo como resultado fibras de diámetros de $13.4 \pm 12 \mu m$ hasta $0.55 \pm 0.26 \mu m$. (Hassounah, 2012)

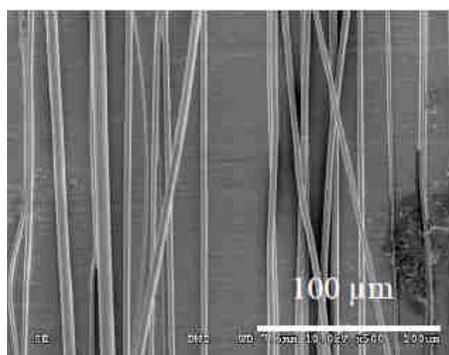


Figura 2 Fibras de polipropileno obtenidas por melt electrospinning

Fuente: (Hassounah, 2012)

En la **Figura 2** se muestra la microscopía de fibras de polipropileno de peso molecular 12000 g/mol producidas a un caudal de 0.2 mL/h, aplicando un campo eléctrico de 26.5 kV/cm, con una distancia entre electrodos de 4 cm.

Otro equipo para este fin es el utilizado por Lyons (2004), quien utiliza un extrusor simple de tornillo para la obtención de microfibras de polipropileno a través de melt electrospinning (Ver **Figura 3**). Este dispositivo es distribuido comercialmente por Brabender CWB (C.W. Brabender® Instruments, Inc, 2011), una de las ventajas de este equipo son sus cuatro zonas de calefacción para la fundición del material y capaz de procesar polímeros con temperaturas de fundición menores a 230°C. En términos generales, los resultados dependen de las variables de prueba tales como:

temperatura de fusión, material de extrusión, diseño de tornillo y matriz, velocidad y presión. A través de una consola de control se realiza la regulación de la temperatura en la cámara de calefacción, los valores de medición se registran continuamente y se muestran en un software.



Figura 3 Extrusor Brabender 3/4'' de tornillo simple

Fuente: (Lyons, 2004)

1.3. Justificación e Importancia

El proceso de obtención de fibras poliméricas consiste en el hilado del material fundido o en solución, los diámetros convencionales están entre milésimas de milímetros hasta varios milímetros, siendo usados en diversas aplicaciones. Sin embargo, en la actualidad se busca fibras de diámetros de decenas a cientos de nanómetros, que presenten mejores propiedades que sus antecesoras. (Caracciolo et al., 2011)

Existen varias técnicas para la obtención de microfibras, entre ellas, una de las más versátiles es el melt electrospinning, debido a que reduce costos y permite eludir las restricciones medio

ambientales y técnicas, en comparación a otros métodos tradicionales para la producción de microfibras. La principal limitación del método tradicional es la realización de procedimientos como la fusión, compresión y expulsión del polímero.

En consecuencia, el proyecto busca disminuir estas limitaciones a un bajo costo; mediante el uso de un extrusor de husillo con el fin de conseguir una producción continua de microfibras de polímero, sobre una base reproducible para eliminar así uno de los inconvenientes del proceso de electrospinning convencional. La importancia del control de los parámetros del proceso radica en la influencia que estos poseen en la morfología y diámetros de las fibras resultantes.

Los investigadores, docentes y estudiantes del área del Laboratorio de Reología y Fluidos Complejos de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, fortalecerán los conocimientos de obtención de fibras poliméricas mediante melt electrospinning, con fines investigativos para trabajos futuros.

Con base al Plan Nacional para el Buen Vivir 2017 – 2021 (SENPLADES, 2017), objetivo nacional 5 “Impulsar la productividad y competitividad para el crecimiento económico sustentable de manera redistributiva y solidaria” este proyecto pretende contribuir con la siguiente política:

- 5.3: “Promover la investigación, la formación, la capacitación, el desarrollo y la transferencia tecnológica, la innovación y el emprendimiento, en articulación con las necesidades sociales, para impulsar el cambio de la matriz productiva.”

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Diseñar, construir e implementar un sistema para la obtención de microfibras poliméricas mediante la técnica de melt electrospinning.

1.4.2. Objetivos Específicos

Diseñar y construir un extrusor de husillo para la obtención de flujo continuo de polímero fundido.

Verificar el diámetro de las microfibras obtenidas por el equipo desarrollado mediante microscopía.

Diseñar e implementar los circuitos eléctricos necesarios para la distribución de voltaje y corriente para los sensores y actuadores; así como, su correspondiente circuito de acondicionamiento de señales.

Implementar una unidad de control encargada del manejo de velocidad y temperatura, integrando al sistema la retroalimentación de los sensores correspondientes, visualizando estos parámetros en una interfaz de comunicación entre el equipo y el usuario.

1.5. Alcance del Proyecto

El presente proyecto plantea el diseño y construcción de un extrusor de husillo para la obtención de microfibras de polímeros a través de la técnica de melt electrospinning de forma continua, en el que se pueda controlar la temperatura del sistema hasta 300 °C para alcanzar el punto de fusión del material, además se busca controlar la velocidad de giro del husillo de manera que se pueda determinar el caudal de polímero resultante; estos parámetros podrán ser controlados y

monitoreados desde una interfaz humano máquina (HMI), buscando experimentalmente los valores de las variables de control óptimos para la obtención de microfibras. Posteriormente, se realizará la comprobación del diámetro de las microfibras para validación del equipo implementado mediante el uso de microscopía.

Para cargar eléctricamente al polímero se empleará una fuente de alto voltaje existente, acoplada a la estructura diseñada del extrusor; se considerará materiales y técnicas que eviten la formación de arco eléctrico entre la fuente y la estructura del extrusor, debido que esto puede generar mal formaciones en las microfibras.

1.6. Estructura del Documento

En los siguientes capítulos del documento se empezará indicando la literatura pertinente a la obtención de microfibras por el método de electro hilado (electrospinning), las variantes de la técnica a lo largo de los años, después se indicará la metodología de diseño utilizada en el proyecto con los cálculos realizados para la construcción de los equipos empleados, finalmente se mostrará la implementación del conjunto. En un siguiente capítulo se detallarán las pruebas realizadas una vez que la máquina se ha construido, los resultados obtenidos con el equipo también se analizarán en esta sección. Por último, las conclusiones del trabajo, así como recomendaciones y trabajos futuros se indican.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se recopila información de temas relacionados al proyecto, así como trabajos realizados en el campo de microfibras a través de melt electrospinning, las variables que influyen en el proceso, el avance de la técnica en el tiempo. Se detalla las características de los materiales que se emplearán.

2.1. Polímeros

Los polímeros son macromoléculas, que resultan de la unión de moléculas conocidas como monómeros cuya principal característica es su bajo peso molecular, dotando a los polímeros de pesos moleculares elevados. Siendo de origen natural o sintético, los polímeros pueden ser clasificados por su comportamiento térmico en:

- Termopolímeros
- Termoestables

2.1.1. Termopolímeros

Son aquellos que al exponerlos a calor pueden ser moldeados. Por ejemplo:

- Policarbonato PC
- Cloruro de polivinilo PVC
- Polipropileno PP
- Polietileno PE

2.1.2. Termoestables

Son materiales moldeados que al exponerlos a calor no regresan a su forma primitiva.

Como:

- Resinas fenólicas PF
- Resinas de poliéster UP
- Resinas melamínicas MF

2.1.3. Polipropileno PP

Se obtiene de la polimerización de propileno en presencia de un catalizador. Es uno de los plásticos más económicos y competitivo en el mercado ya sea en forma de láminas o fibras. Es uno de los elementos más versátiles por su procesabilidad, su alto punto de fusión y su buena resistencia térmica y química. Entre sus propiedades principales están:

De acuerdo con arreglo molecular del grupo metilo se logran obtener diferentes configuraciones: isotáctico, atáctico y sinditáctico.

2.1.3.1. Polipropileno Isotáctico IPP ó PP-i

Los grupos metilos se encuentran por encima o por debajo de la cadena principal (Ver *Figura 4*) presentan una gran resistencia mecánica y gran tenacidad, es el tipo más utilizado en inyección de piezas y en extrusión de película plana.

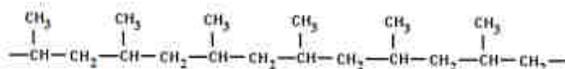


Figura 4 Polipropileno Isotáctico

Fuente: (Hernández, 2015)

2.1.3.2. Polipropileno Atáctico APP ó PP-a

Los grupos metilos no presentan una disposición regular, se encuentra de forma aleatoria alrededor de la cadena principal (*Figura 5*).

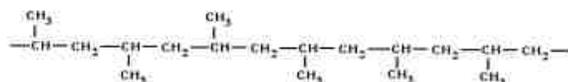


Figura 5 Polipropileno Atáctico

Fuente: (Hernández, 2015)

Tabla 1

Propiedades del polipropileno

POLIPROPILENO	
Símbolo	
Propiedades Físicas	
Densidad [g/cm^3]	0.9
Inflamabilidad	HB
Absorción de agua [%]	0.03
Propiedades Mecánicas	
Coefficiente de fricción	0.1 - 0.3
Dureza – Rockwell	R80-100
Módulo de Tracción [GPa]	0.9-1.5
Propiedades Térmicas	
Temperatura de fusión [°C]	165-180
Conductividad térmica [W/m °K]	0.1-0.22
Calor específico [J / K kg]	1700 – 1900
Coefficiente de expansión térmica [$10^{-6}k^{-1}$]	100-180

Fuente: (Goodfellow, 2017)

2.2. Microfibras Poliméricas

Las microfibras poliméricas son el resultado de la disminución en el diámetro de fibras de polímero normales, a escalas de micras e incluso nanos. De acuerdo Caracciolo et al. (2011), un cabello humano tiene un diámetro cercano a 80 micrómetros, siendo unas doscientas veces mayor que el diámetro de las nanofibras (Ver *Figura 6*).

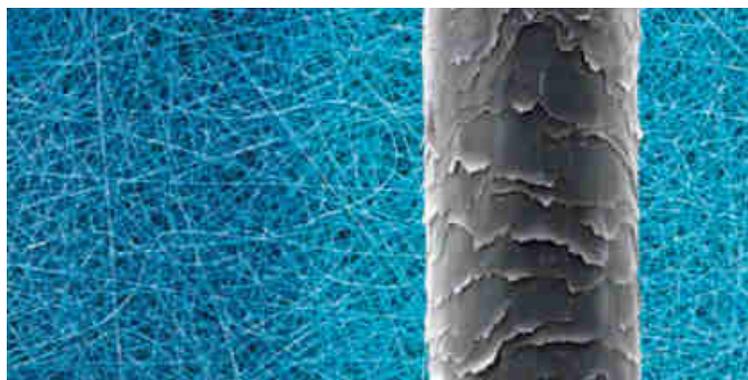


Figura 6 Comparación: cabello humano con nano fibras electro hiladas

Fuente: Caracciolo et al., (2011)

2.2.1. Características

De acuerdo con Marín y Martínez (2009), los diámetros de las fibras poliméricas pueden ir en valores de micras ($10 - 100 \mu m$) y submicras ($10 \cdot 10^{-3} - 100 \cdot 10^{-3} \mu m$). Con la disminución en el diámetro se consiguen mejores características como:

- Elevada relación superficie / volumen.
- Excelentes propiedades mecánicas como tenacidad y resistencia a la tracción.

2.2.2. Métodos de obtención

Algunas de las técnicas para la obtención de microfibras poliméricas son: Drawing, Síntesis por molde, Separación de fase y Electrospinning (Huamani, 2011).

- Drawing

En la **Figura 7** se muestra la técnica de Drawing, consiste en sumergir una pipeta con diámetro en micrómetros dentro de una gota y alejarla lentamente, el resultado son nanofibras.

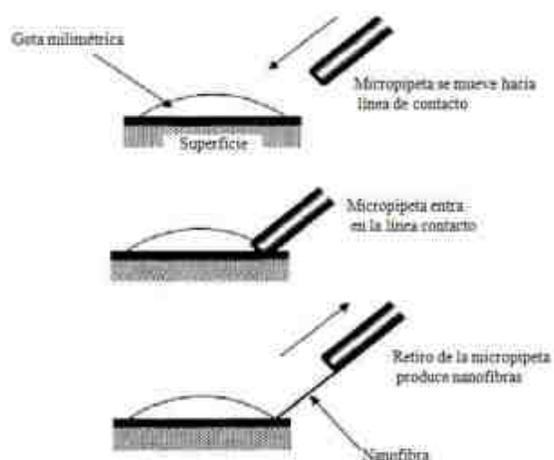


Figura 7 Técnica de Drawing

Fuente: (Huamani, 2011)

- Síntesis por molde

La solución de polímero es empujada por la presión del agua, al pasar por una membrana se forman pequeñas fibras cuyo diámetro está relacionado con el diámetro de la membrana, en este caso en escala nanométrica. (Ver **Figura 8**)

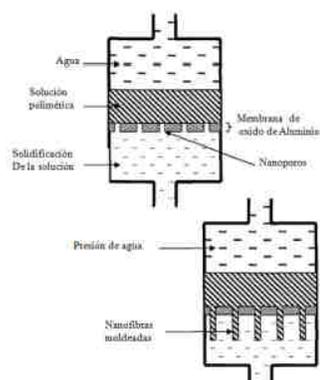


Figura 8 Proceso de síntesis por molde

Fuente: (Huamani, 2011)

- Separación de fase

Es un proceso lento, consiste en la adición de un solvente al polímero permite la separación de fase debido a la incompatibilidad física, al ser removido el solvente se obtienen una espuma de nanoporos. El proceso se distribuye en tres etapas: Disolución del polímero, gelificación y extracción del solvente como se muestra en la **Figura 9**.

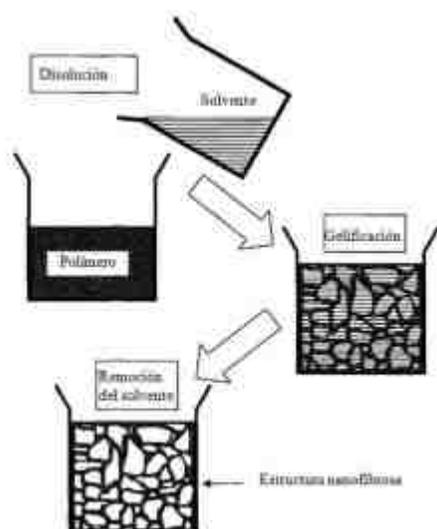


Figura 9 Esquema de la técnica Separación de fase

Fuente: (Huamani, 2011)

2.2.3. Aplicaciones

De forma general, las microfibras y nanofibras se abren campo en diversas áreas por sus mejores propiedades en comparación de materiales anteriores, por ejemplo, las mencionadas por Nuria García (2013):

- Farmacéutico: Liberación controlada de fármacos.
- Ingeniería de tejidos: Soporte o sustrato celular.
- Energético: pilas de combustible, capacitores, separadores de baterías.
- Industrial: productos de filtrado, separación y aislamiento.
- Biotecnología: biosensores, entre otras.

2.3. Electrospinning

De acuerdo con García (2013) electrospinning, proviene del término spinning electrostático, es un procedimiento sencillo y de bajo costo que permite la fabricación continua de fibras de diversas clases de polímeros. Su técnica consiste en el estiramiento uniaxial de una corriente viscoelástica derivada de una disolución o fundido de polímero; este último se utilizará en el desarrollo de este proyecto; a partir de la aplicación de un campo eléctrico. Esta corriente se va estirando por las repulsiones electrostáticas y la evaporación del disolvente, de aquí su similitud con el electrospray.

El equipo convencional de electrospinning (*Figura 10*) incluye un extrusor de una solución de polímero, tarea realizada generalmente por un émbolo, que inserta la solución a velocidad constante en una aguja la cual a su vez está conectada a una fuente de alto voltaje y el respectivo colector puesto a tierra dónde se depositan las fibras producidas (Senturk-Ozer et al., 2016).

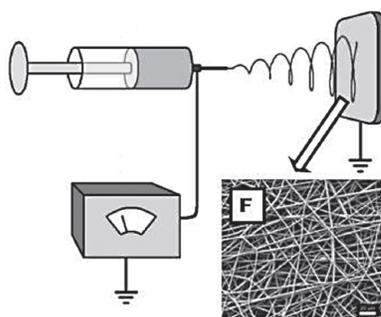


Figura 10 Equipo convencional de electrospinning

Fuente: (García, 2013)

La carga electrostática del fluido en la punta de la gota del polímero resulta en la formación del denominado “Cono de Taylor”, cuando el fluido está sometido a un fuerte campo eléctrico con el gradiente de campo apropiado la gota se vuelve inestable y un único chorro del fluido es conducido fuera del cono de Taylor. Al salir este chorro del cono de Taylor, en casi una línea recta, es sometido a una variedad de fuerzas como: fuerza de Coulomb, la fuerza del campo eléctrico inducido por el campo eléctrico externo, fuerzas viscoelásticas, fuerzas de tensión superficial, fuerza gravitacional y fuerza de arrastre del aire. El chorro de electrospinning sigue un camino complejo y cambia su forma al tiempo que las fuerzas eléctricas estiran y adelgazan el chorro en proporciones muy grandes, el disolvente se evapora finalmente y las fibras secas se recogen en el colector (Angamma & Jayaram, 2011).

2.3.1. Melt Electrospinning

Melt electrospinning (Ver **Figura 11**) ha sido considerado como una forma de incrementar la salida de las fibras producidas y eliminar el riesgo potencial para la salud causado por el solvente con el método convencional de electrospinning (Dalton & Hutmacher, 2011). En la industria es

muy común el requerimiento de esta técnica para el uso de polietileno y polipropileno los cuales no se disuelven fácilmente en solventes. Otros polímeros como poliolefinas y poliamidas pueden ser procesados una vez fundidos.

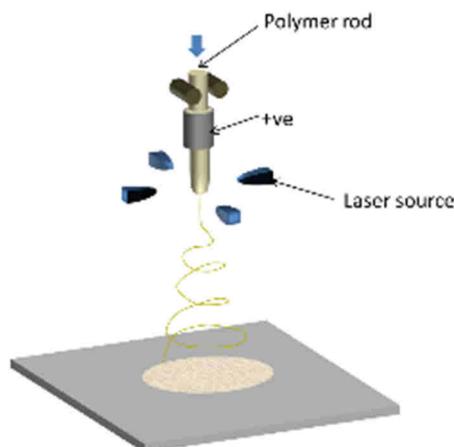


Figura 11 Láser usado para fundir la alimentación de polímero para electrospinning

Fuente: (Wee-Eong, 2013)

La técnica de melt electrospinning ofrece un nuevo enfoque para resolver restricciones técnicas, incluso con el objetivo de procesar materiales como PCL en su forma pura. El comportamiento de un chorro de polímero cargado electrostáticamente es diferente entre una solución y una fundición de polímero, una solución de polímero presenta inestabilidades de curvatura electrostática cerca al colector, produciéndose dificultades para controlar la deposición de fibras. Por el contrario, electrospinning de alta viscosidad y fundición de polímeros no conductivos provoca que la parte inicial del chorro pueda ser prolongado debido a la alta tensión superficial del chorro la cual amortigua cualquier inestabilidad de flexión y reduce la influencia de aceleración del campo eléctrico (Zhou, Green, & Joo, 2006).

Otra de las consecuencias del melt electrospinning es la velocidad reducida del chorro, a causa de esto el proceso se vuelve más controlable que la solución de electrospinning, la tecnología de

impresión de fibras se ha desarrollado en base a este principio. El melt electrospinning tiene como ventaja realizar los pasos del procesamiento de un polímero: transporte, mezcla, fusión y compactación. Así mismo, la técnica evita la aglomeración elevada o sedimentación de las partículas. El uso de un husillo de extrusión aporta estas capacidades para la generación de fibras continuas, con propiedades superiores en términos de porosidad, tamaño del poro, diámetro de las fibras, etc.

En la **Tabla 2** se muestra las principales diferencias de melt electrospinning con la forma convencional de electrospinning, es decir, trabajar con una solución polimérica y con el polímero fundido.

Tabla 2

Comparación entre electrospinning en solución y melt electrospinning

	Electrospinning en solución	Melt electrospinning (fundido)
Mecanismo de solidificación	Trasferencia de masa (Evaporación de solvente)	Transferencia de calor (Enfriamiento)
Disolvente	Sí	No
Alto rendimiento	No	Sí
Amigable con el medio ambiente	No	Sí
Fácil de modelar	No	Sí
Fibras menores a 100 ηm	Sí	No
Limitación de la viscosidad	No	Sí

Fuente: (Zhou H. , 2007)

2.3.2. Historia

De acuerdo con lo mencionado por Yao, Batiaanse y Pejis (2014) el electrospinning, una técnica relativamente vieja, ha presentado un gran interés en los últimos años debido a su gran potencial de producir nanofibras de polímero. El electrospinning ha ido evolucionando a lo largo de los años hasta llegar al método que se conoce en la actualidad. En el año 1600, Gilbert fue el primero que apreció el fenómeno producido sobre una gota de agua que reposaba en una superficie seca, y quedar cargada eléctricamente cuando un pedazo de ámbar fue sostenido en su proximidad, causando de esta manera una deformación en la gota tomando una forma cónica, conocida en la actualidad como “Cono de Taylor”. A continuación, siguieron observaciones más detalladas de como un chorro de agua cargado genera gotas separadas, sin embargo, no fue hasta el inicio del siglo XX que Zeleny realizó los primeros estudios en electro-hidrodinámica (Brown, 2015).

A partir de esta época, la comercialización potencial de la electro-hidrodinámica fue reconocida, apareciendo los primeros dispositivos que esparcían líquidos a través de la aplicación de una carga eléctrica, los cuales fueron patentados por Cooley y Morton. En 1929, se describió la fabricación de seda artificial a través del uso de carga eléctrica (Japón Patente nº 1699615, 1929). No obstante, la patente crucial en la que el electrospinning de plásticos fue descrita por primera vez la realizó Formhals (US Patente nº 1975504 A, 1934). Todas estas patentes no pudieron concluir en una aplicación comercial, debido a la falta de equipo adecuado para la investigación de las características micrométricas de los procesos físicos involucrados, así como, de las estructuras de fibras generadas (Persano et al. (2013)).

Los descubrimientos en la producción de fibras de electro hilado para aplicaciones industriales avanzaron mucho más rápido en la antigua USSR, en el año 1930 se estableció la primera

instalación industrial para filtros usados en máscaras de gases. Más tarde, en 1970 se patentó la producción de fibras con diámetros menores a $1\ \mu\text{m}$, a pesar de estas patentes seguidos por otros trabajos éstos permanecieron ocultos hasta que Donaldson Co., Inc. introdujo los primeros productos comerciales basados en diámetros submicrométricos de fibras en los Estados Unidos, finalmente fibras electro hiladas fueron comercializadas como aplicaciones de filtración para industrias no tejedoras en 1991 (Greiner & Wendorff, 2007).

Brown (2015) sostiene que el electrospinning de una solución había sido superado en gran medida por otras tecnologías de fabricación de fibras hasta mediados de la época de 1990, en donde las actividades del grupo Reneker, quienes reportaron el alto valor añadido resultante de los nanomateriales orgánicos. Modelos matemáticos formulados para examinar la formación del cono de Taylor han sido desarrollados para explicar el decaimiento asintótico, estabilidad y la flexión del chorro. La dependencia de las características de la superficie de la fibra como la flexión y porosidad en la elección del polímero, así como la concentración del polímero y las variables del proceso han sido investigados a lo largo de los años.

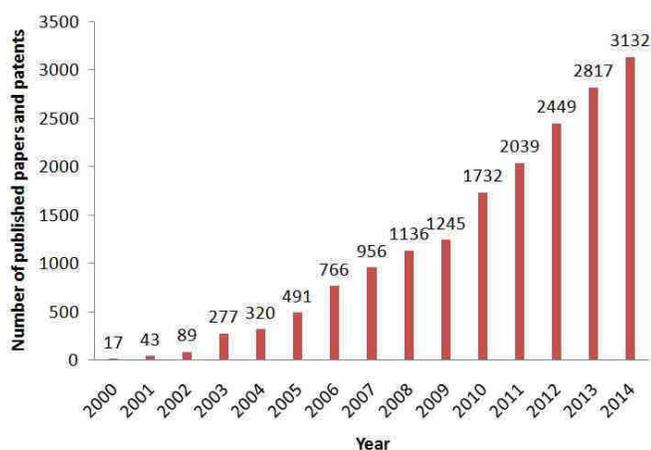


Figura 12 Número de artículos y patentes publicados con el concepto de electrospinning

Fuente: (Li & Yang, 2016)

En la *Figura 12* se puede observar como las investigaciones han aumentado, demostrado en el incremento de publicaciones, los estudios son amplios en países como Estados Unidos, China y Corea del Sur, éstos abarcan el 70% de los artículos publicados, seguidos por Japón, Alemania y Singapur. Una distinción importante de la mayoría de los acercamientos a la nanotecnología es que en los países desarrollados existe una fuerte inversión en el tema, confirmando la particularidad requerida para entrar en este campo. Diferentes modificaciones al equipo y tratamientos posteriores a la técnica de electrospinning han sido propuestos, para alcanzar un campo eléctrico mejorado y adquirir control sobre la posición de alineamiento molecular de la fibra. Sin embargo, la acumulación de solvente evaporado puede afectar la calidad de la fibra, limitar el control de experimentos debido a la necesidad de configuraciones en áreas ventiladas (Zhou, Gong, & Porat, 2009).

De hecho, según Ramakrishna et al., (2005) uno de los retos actuales para las soluciones de electrospinning consiste en la transición para lograr una producción industrial. A pesar de que en su mayor parte este campo es cubierto por la perspectiva de la nanotecnología, esta observación debe ser resuelta en la forma que la mayoría de las publicaciones científicas sobre electrospinning se centran en la producción de fibras en valores de submicras pero no en el rango de nano fibras, de acuerdo con la Iniciativa Nacional de la Nanotecnología (NNI) define a la nanotecnología como la manipulación de materia con al menos una dimensión de 0.1 a 100 ηm .

Las patentes emitidas desde 1976 hasta 2006 revelaron que un gran número de ellas (75%) relacionadas con nanofibras estuvieron directamente enfocadas en métodos de fabricación para las nanofibras para mejorar el rendimiento de sistemas de filtración existentes (Ngiam et al., (2007)). Otra de las potenciales aplicaciones del electrospinning consiste en ropa de protección y compuesto

de refuerzo; las limitaciones en el proceso se deben a las dificultades en fabricar suficientes cantidades de fibra a larga escala en un tiempo de producción razonable, con los consiguientes problemas en manufactura. Nuevos enfoques surgen para las nanofibras en el campo de fuentes de energía renovables, como dispositivos fotovoltaicos, manejo y almacenamiento de energía como separadores de batería. Las aplicaciones biomédicas y de cuidado de la salud requieren relativamente pocas cantidades de fibras electro hiladas por lo que su investigación se ha ampliado en este campo (Brown, 2015)

Melt electrospinning ha tenido una investigación en menor medida, debido a que generalmente resulta en diámetros más largos de fibras que utilizando solución de polímeros. Sin embargo, recientes investigaciones han demostrado que melt electrospinning puede desarrollar fibras de diámetros micrométricos y submicrónicos. Melt electrospinning fue por primera vez descrito en una patente en 1936, 45 años después de la primera publicación una serie de artículos describieron el mismo proceso demostrando su utilidad con polímeros como: polietileno y polipropileno, las fibras resultantes tuvieron diámetros de 75 μm a 400 μm . Estudiando las variables del proceso, Larrondo y St. John Manley fueron los primeros en notar que el diámetro de las fibras se reduce aumentando el voltaje aplicado y la temperatura de fundición del polímero. (Larrondo & Manley, 1981).

Otro período de publicaciones sobre el proceso de melt electrospinning continuó, en el año 2000 Kim y sus colegas compararon las propiedades térmicas de tereftalato de polietileno (PET) y naftalato de polietileno (PEN). En 2001, el artículo de Reneker y Rangkupan describió el proceso de melt electrospinning de PE, PP, PET y PEN (Rangkupan & Reneker, 2003). La siguiente publicación importante que presente un conocimiento más profundo de melt electrospinning fue la

presentada por Lyons (2004), (Ver **Figura 13**) fibras de PP y PET fueron producidas con un diámetro entre cientos de nanómetros hasta cientos de micrómetros. Se encontró que el peso molecular tiene un papel importante en el electrospinning, con un pequeño campo eléctrico es imposible obtener un cono de Taylor y por lo tanto no se consigue producir una fibra continua.

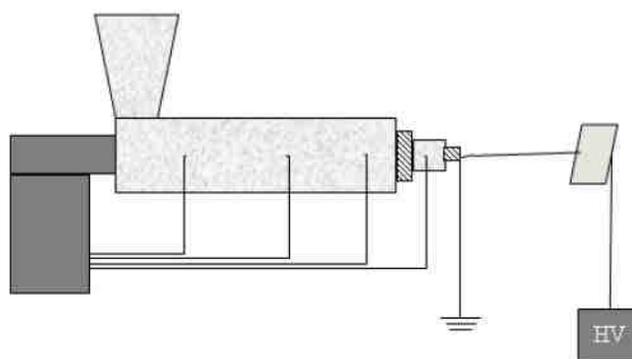


Figura 13 Esquema del extrusor usado para melt electrospinning

Fuente: (Lyons, 2004)

En 2006, Ogata junto con sus colaboradores demostraron los efectos de variar los parámetros de melt electrospinning en el diámetro de fibras de PLA, PET y EVAL, se determinó que bajo condiciones específicas se obtienen fibras submicrométricas. Zhmayev determinó un modelo por los polímeros no isotérmicos con superficie libre de flujo cargados visco elásticamente y electrificados para la región estable del chorro de melt electrospinning. La relación asintótica del chorro utilizado ampliamente en los trabajos previos de electrospinning no fueron aplicables en el caso de fundido de polímeros (Ver **Figura 14**). Los polímeros fundidos exhibieron fuerzas elevadas de tracción en toda la región de hilado, particularmente bajo condiciones no isotérmicas. Una nueva condición fue desarrollada para fluidos con baja conductividad y alta viscosidad basados en balancear la fuerza cerca de la aguja (Zhmayev, Zhou, & Joo, 2008).

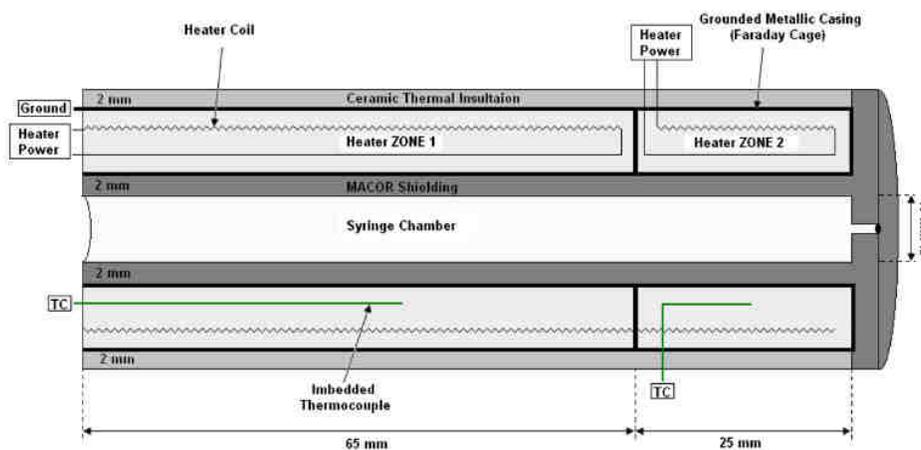


Figura 14 Esquema de preparación para melt electrospinning

Fuente: (Zhmayev, Zhou, & Joo, 2008)

En 2007, estudios más especializados cuantificaron los parámetros en el proceso de melt electrospinning de PCL CON (PEG-b-PCL), complementario a los trabajos anteriores se demostró que los caudales tienen influencia en el diámetro de las fibras producidas por melt electrospinning. Comparando con un método convencional de solución de electrospinning el excesivo movimiento del chorro de polímero es significativamente reducido permitiendo el control sobre la recolección de las fibras. De la misma manera con el avance de las investigaciones en polímeros, existe un especial interés en entender los efectos de la combinación de las propiedades de los materiales y los parámetros de procesamiento, con el fin de determinar las características óptimas para producir fibras finas uniformes con una particular morfología y funcionalidad (Dasdemir, Topalberikoglu, & Demir, 2013).

Las investigaciones de Dasdemir y sus colaboradores determinaron que la tasa de deposición de melt electrospinning [0.6 g h^{-1}] fue cuatro veces mayor que una realizada por solución de electrospinning [0.125 g h^{-1}] bajo el mismo procesamiento, realizando un control mejorado sobre el proceso de formación de fibras en melt electrospinning para un rango de materiales, el estudio

se centra hacia las aplicaciones con propiedades y características particulares de cada material. A pesar de que existen pocos productos médicos usando fibras submicrométricas en el mercado, el número de patentes indican que las aplicaciones y productos médicos usando este procedimiento están aumentando (Ngiam et al. (2007)).

Aún con todos los estudios realizados anteriormente, la investigación de melt electrospinning se encuentra en etapa inicial, sin embargo, considerando el amplio campo de aplicación se estima que el crecimiento de artículos científicos y patentes aumente sobre melt electrospinning para contribuir en el conocimiento del tema y en este aspecto es en el que pondremos atención en la realización de este proyecto.

2.3.3. Tipos de Electrospinning

En la actualidad, Bhardwaj y Kundu (2010) sostienen que existen dos configuraciones para realizar electrospinning: vertical y horizontal. Con el avance de la tecnología se han desarrollado máquinas más sofisticadas para producir complejas estructuras de nanofibras de una manera controlada y eficiente. El electrospinning toma lugar en un espacio con las condiciones atmosféricas que se presenten en ese momento.

Al utilizar la configuración vertical (Ver *Figura 15*) es posible que gotas de solución caigan al plato colector dañando posiblemente las fibras producidas y por lo tanto deteriorando la superficie e interrumpiendo el proceso (Duque, Rodríguez, & López, 2013).

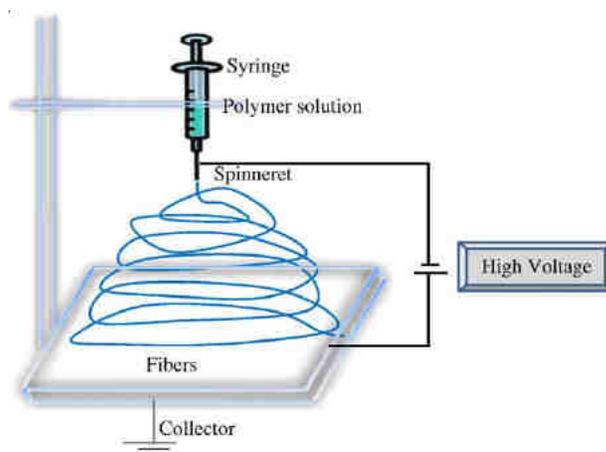


Figura 15 Electrospinning en configuración vertical

Fuente: (Bhardwaj & Kundu, 2010)

Uno de los métodos para transportar la solución a través del capilar es utilizando una bomba de jeringa, trabajando el electrospinning de forma horizontal (**Figura 16**) la salida de la solución podría estar determinada por la acción de la fuerza de gravedad enlazado a su vez a la viscosidad de la solución.

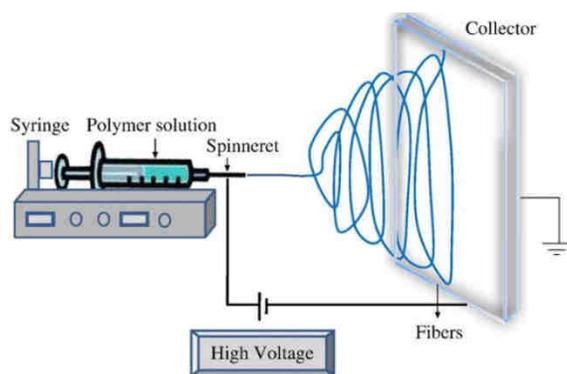


Figura 16 Electrospinning en configuración horizontal

Fuente: (Bhardwaj & Kundu, 2010)

2.3.4. Aplicaciones

Las fibras obtenidas por el electrospinning ofrecen varias ventajas como: elevada relación superficie - volumen, porosidad alta y mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas; los

parámetros del proceso pueden ser fácilmente modificados con el fin de obtener la morfología y esfuerzos mecánicos de las fibras deseadas. De hecho, las fibras electro hiladas son requeridas en varios campos y el proceso de electrospinning es versátil debido a que se puede utilizar un sinnúmero de polímeros.



Figura 17 Aplicaciones del electrospinning

Fuente: (García, 2013)

Las aplicaciones de las nanofibras electro hiladas (Ver **Figura 17**) se encuentran en varios campos como: aplicaciones biomédicas principalmente para la ingeniería de tejidos, para cicatrización de heridas, liberación de fármacos, sistemas de filtración como membranas de afinidad, para inmovilizar enzimas, cuidado de la salud, en biotecnología, ingeniería ambiental, para defensa y seguridad, almacenamiento y generación de energía, así como en nuevos campos de investigación (Bhardwaj & Kundu, 2010).

Burguer, Hsiao y Chu (2006) menciona que, de acuerdo con el número de patentes emitidas, dos tercios de las aplicaciones de electrospinning se utilizan en el campo de la medicina, de las patentes restantes la mitad se emplean en sistemas de filtración. Existen aplicaciones específicas para cada polímero utilizado en electrospinning recopiladas en la (Ver **Tabla 3**).

Tabla 3*Aplicaciones de polímeros usados para electrospinning*

POLÍMEROS	APLICACIONES
Poliglicolato (PGA)	Ingeniería de Tejidos, sustrato celular
Poli (ácido láctico-co-ácido glicólico) (PGLA)	Aplicaciones Biomédicas, cicatrización de heridas
Policaprolactona (PCL)	Ingeniería de Tejidos, huesos
Ácido Poli(L-láctico)(PLLA)	Sustrato celular en 3D
Poliuretano (PU)	Ingeniería de Tejidos, cicatrización de heridas
Poliestireno (PS)	Ingeniería de Tejidos, piel
Sindiotáctico 1,2-Polibutadieno	Ingeniería de Tejidos
Fibrinógeno	Cicatrización de heridas
Poli(acetato de vinilo) (PVA/CA)	Biomateriales
Acetato de Celulosa	Membranas de adsorción
Alcohol de Polivinilo	Gasas para heridas
Fibroína de seda	Ingeniería de Tejidos, nanofibras
Seda	Aplicaciones Biomédicas
Seda/Quitosano	Gasas para heridas
Quitosano/PEO	Ingeniería de Tejidos, liberación de fármacos, cicatrización de heridas
Gelatina	Sustrato celular para cicatrización de heridas
Ácido hialurónico (HA)	Implantes médicos
Celulosa	Membrana de afinidad
Gelatina/polianilina	Ingeniería de Tejidos, sustrato celular
Colágeno/Quitosano	Biomateriales

Fuente: (Bhardwaj & Kundu, 2010)

2.4. Etapas

Los fenómenos físicos que se producen en el proceso de melt electrospinning, se dividen en las siguientes etapas:

2.4.1. Carga eléctrica de la disolución

La fuente de alto voltaje permite cargar a la solución de polímero, dependiendo de la naturaleza del fluido y de la polaridad del potencial aplicado se forman portadores de cargas (electrones, iones o pares de iones libres). Esta etapa es muy sensible a impurezas de la solución y tiene relación con la conductividad del material. (Espinoza, 2016)

2.4.2. Formación del cono y filamento del fluido (jet¹)

Al final del capilar se forma una gota que al ser sometida al potencial eléctrico adecuado permite la formación del cono de Taylor. A partir del cono se forma el filamento.



Figura 18 Cono y jet de solución al 2% de óxido de polietileno.

Fuente: (Rutledge & Fridrikh, 2007)

2.4.3. Adelgazamiento del filamento

El filamento se forma desde el cono hasta el colector, en este trayecto se produce una disminución en su diámetro. (Ver **Figura 18**)

2.4.4. Inestabilidades del filamento

En teoría la formación del filamento podría realizarse de manera continua a través de la técnica de electrospinning, sin embargo, debido a la dimensión del diámetro de la fibra, durante su trayectoria desde el cono hasta el colector se pueden producir distorsiones, estas son producidas generalmente por inestabilidades: latigazos o conocidos como whipping y de rompimiento de gota.

¹ Jet: Filamento

Esta etapa está relacionada con la velocidad de flujo y campo eléctrico aplicado, mencionado por Rutledge y Fridrikh (2007), quienes experimentaron con una solución de óxido de polietileno al 2% con peso molecular de 200 kg/mol en agua para observar las inestabilidades que se generan en la obtención de fibras (Ver **Figura 19**). En el primer caso se aplica $E = 1.33 \text{ kV/cm}$ y $Q = 0.2 \text{ ml/min}$ generando los conocidos latigazos, mientras para una combinación de $E = 1.75 \text{ kV/cm}$ y $Q = 1.5 \text{ ml/min}$ se producen rompimientos de gota.

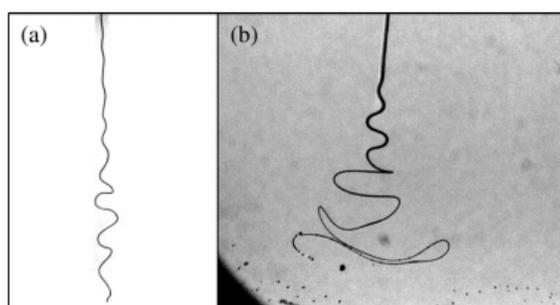


Figura 19 Inestabilidades en el filamento de óxido de polietileno en agua al 2%

Fuente: (Rutledge & Fridrikh, 2007)

2.4.5. Recolección del filamento o solidificación de fibras

El filamento llega al colector de fibras (electrodo de menor potencial), el cual de acuerdo con su forma o característica determina la orientación y deposición de las fibras pudiendo ser guiadas o aleatorias, estas últimas son el resultado de un colector en su forma más básica, una placa orientada de forma vertical.

2.5. Parámetros de consideración

Debido a la manera en que se desarrolla la técnica de melt electrospinning, la morfología y diámetros de las fibras están relacionadas a varios factores que permiten manipular estas características, a pesar de que no se puede determinar una ley o el comportamiento del polímero,

debido principalmente a no está relacionado a un solo factor, al contrario es la combinación de varios de ellos, se han realizado observaciones experimentales que ayudan a la aproximación o entendimiento de los parámetros en la formación, morfología y el diámetro de la fibra. Entre ellos:

2.5.1. Peso molecular (Mw)

El peso molecular es el resultado de la suma de los pesos atómicos que componen el compuesto. En literatura relacionada al procesado de polímero se menciona la existente relación del peso molecular de un polímero con propiedades como la viscosidad, el módulo y la resistencia de tracción; la primera de gran importancia para el proceso de melt electrospinning por este motivo se han desarrollado trabajos de investigación.

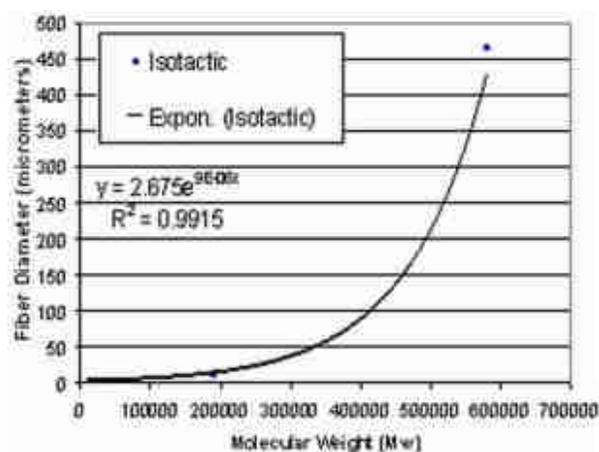


Figura 20 Relación del peso molecular con el diámetro de las fibras del IPP

Fuente: (Lyons, Li, & Ko, 2004)

Lyons, Li y Ko (2004) demuestran que el polipropileno isotáctico a una temperatura de 200°C y con un peso molecular relativamente alto no permite la formación del cono de Taylor a la exposición del campo eléctrico. Al reducir el Mw se consigue la formación del cono y en consecuencia fibras, aunque con diámetros relativamente grandes, con la disminución continua del

Mw se presenta la reducción exponencial del diámetro como se muestra en la *Figura 20*. Sin embargo, a una disminución excesiva de Mw el filamento presenta rompimientos.

Algunos autores caracterizan el polímero que usan en medida del MFI², que tiene relación directa con el peso molecular, definiéndose como la cantidad de masa de polímero que fluye en 10 minutos a través de un capilar de diámetro y longitud determinado.

2.5.2. Aditivos

Para el método convencional de electrospinning, es necesario formar la solución de polímero, agregando solventes que además de su función principal, también contribuyen en la mejora de las características del fluido para la obtención de fibras. En melt electrospinning, se tiene la ausencia de esta sustancia ya que se trabaja directamente con el polímero fundido, sin embargo, esto presenta ciertas limitaciones asociadas con el proceso, como: i) Fibras gruesas debido a la alta viscosidad del polímero fundido en comparación con la solución ii) Problemas con descargas eléctricas (Nayak et al. (2013)). Aunque no ha sido motivo de gran interés se ha encontrado la posibilidad de usar aditivos que permitan mejorar estas características.

Nayak y sus colaboradores (2013), investigan la obtención de fibras de bajo peso molecular del PP con la reducción de la viscosidad usando aditivos como poli etilenglicol (PEG) y poli di-metil siloxano (PDMS) y el aumento de la conductividad con sales iónicas como sodio oleate (SO).

² Melt Flow Index

2.5.2.1. Viscosidad

La viscosidad es la resistencia al movimiento que presenta el fluido. (De las Heras, 2012). Con la técnica de melt electrospinning, la viscosidad del polímero solo puede ser reducida hasta cierto grado al aumentar la temperatura, lo que con lleva a tener una mayor viscosidad en el polímero fundido que en el polímero en solución (electrospinning), esta última es menor por la presencia de solventes. Esta es una de las causas que se atribuye a la formación de fibras en diámetros micrométricos a través de melt electrospinning y la dificultad de fabricar nanofibras con este método. En el trabajo de Nayak y sus colaboradores (2013) se observa el decrecimiento de la viscosidad de PP ante la presencia de PEG y PDMS, sin embargo, con SO la viscosidad aumenta como se muestra en la **Figura 21**, esto contribuye a los resultados del efecto de los aditivos sobre el diámetro de las fibras resultantes.

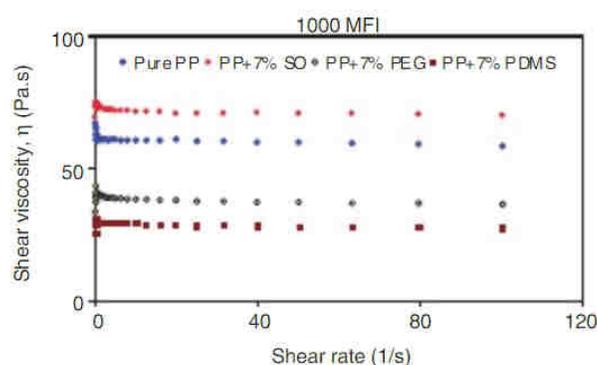


Figura 21 Viscosidad de corte de polipropileno PP con diferentes aditivos

Fuente: Nayak et al. (2013)

2.5.2.2. Conductividad eléctrica

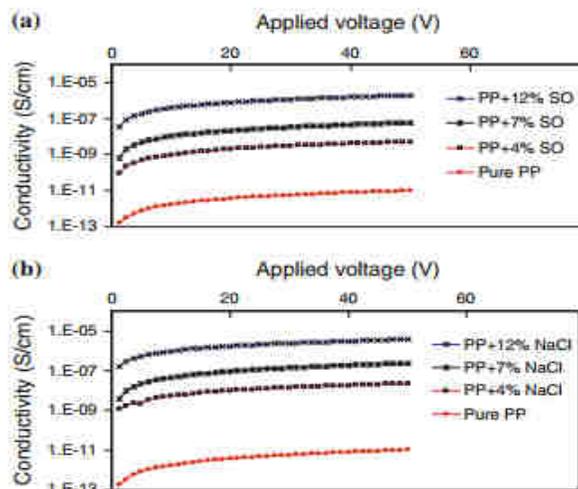


Figura 22 Efecto de la cantidad de aditivos en la conductividad eléctrica a) SO b) NaCl

Fuente: Nayak et al. (2012)

Otra de los parámetros que influyen en la dimensión del diámetro es la conductividad eléctrica que presenta el polímero, logrando una mayor conductividad con la adición de NaCl en comparación con SO (Ver **Figura 22**), teniendo en cuenta que la conductividad eléctrica se establece por la movilidad de los iones dentro del polímero, es decir, la facilidad al paso de corriente, al adicionar sales iónicas se incrementa la conductividad y en consecuencia la fuerza de estiramiento es fuerte, el chorro se divide en chorros pequeños y el resultado de estos aspectos es diámetros de fibras pequeñas.

2.5.3. Caudal

El caudal es directamente proporcional al diámetro de la fibra, al tener menor cantidad de polímero el cono de Taylor disminuye continuamente y las fibras obtenidas son de menor tamaño.

Este fenómeno fue observado por Lyons, Li y Ko (2004) en fibras de polipropileno con campo eléctrico de 10 Kv/cm a un TDC de 2 cm, en las miografías se observa los resultados (**Figura 23**).

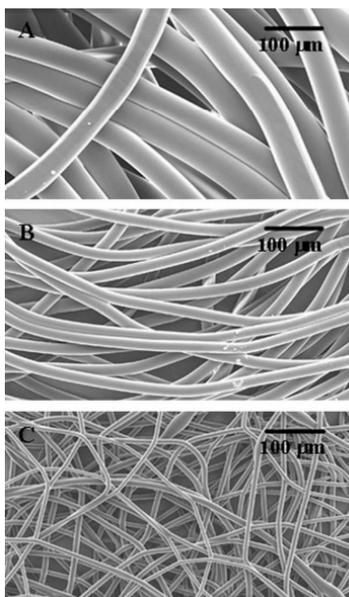


Figura 23 Fibras de PP A) 10s B) 20s C)30s

Fuente: (Lyons, Li, & Ko, 2004)

2.5.4. Capilar

El diámetro inicial de la fibra es determinado por el diámetro del capilar, parámetros como el campo eléctrico intervienen en la reducción posterior del diámetro. Al trabajar con el polímero fundido su viscosidad es relativamente alta en comparación con el polímero en solución, presentando una restricción al desear usar capilares de diámetros muy pequeños. Siendo motivo de estudio, por ejemplo, Deng y sus colaboradores (2009) mencionan que para trabajar con Polietileno de baja densidad el diámetro interno del capilar puede ir de 0.4 a 0.6 mm (Ver **Figura 24**).

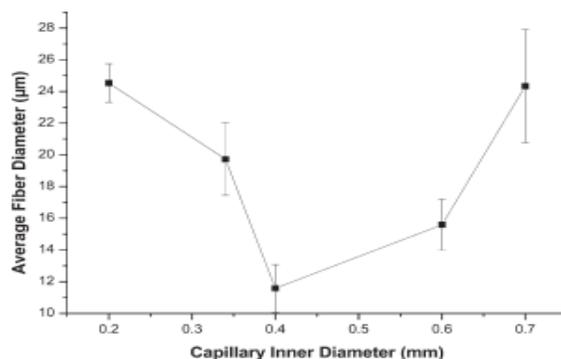


Figura 24 Efecto del diámetro interno del capilar sobre el diámetro de la fibra

Fuente: Deng et al. (2009)

Mientras que Ko (2014), al trabajar con policaprolactona (PCL) observa que al incrementar el diámetro del capilar de 150 a 1700 μm , las fibras aumentan de 12 a 220 μm (Ver **Figura 25**), manteniendo constantes parámetros como la distancia al colector de 5 cm y el voltaje de 20 kV.

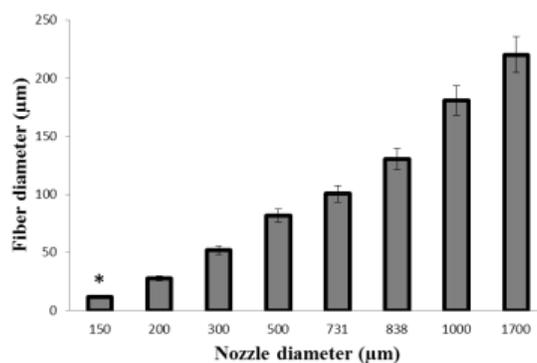


Figura 25 Efectos del diámetro del capilar sobre el diámetro de fibras de PCL

Fuente: (Ko, 2014)

2.5.5. Influencia de la distancia del capilar al colector (TDC³)

Para la técnica se debe encontrar la distancia óptima de recolección o la conocida TDC, aunque no se ha establecido su importancia en concreto se han realizado algunas observaciones experimentales, típicamente se usan distancias de 3 – 5 cm (Dalton & Hutmacher, 2011). Sabiendo que la distancia es inversamente proporcional al campo eléctrico, al alejar el colector se debilita la fuerza eléctrica y puede ser influyente en la formación de las fibras. Si la distancia es muy pequeña las fibras pueden llegar al colector aun estado líquido (ligeramente fundidas) produciendo la fusión con las demás (Dalton & Hutmacher, 2011), para distancia adecuada se permite la formación de las fibras y la solidificación (Kong et al. (2009)), mientras que para distancias muy largas el campo eléctrico se debilita. Deng et al. (2009), comprueban que a pesar de estos efectos su relación con el diámetro resultante de la fibra no es significativo, trabajaron con Polipropileno de baja densidad (LDPE) a un voltaje de 40 KV (Ver *Figura 26*).

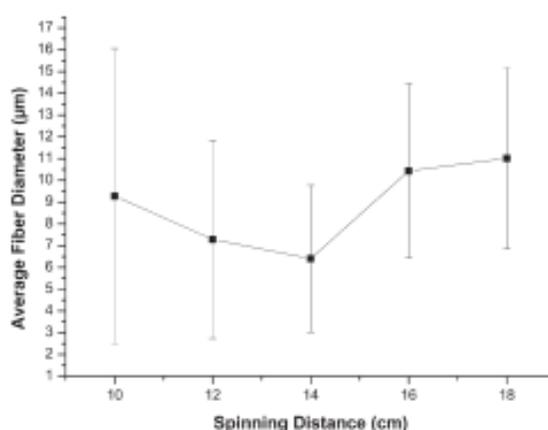


Figura 26 Variación diámetro respecto a la distancia al capilar

Fuente: Deng et al. (2009)

3 TDC: Tip – to – collector distance

2.5.6. Voltaje aplicado

La intensidad de campo eléctrico (E) formado entre el colector y el capilar es directamente proporcional al voltaje aplicado, por lo tanto, forma parte de los parámetros que son influyentes en la obtención de fibras. Por la alta viscosidad del polímero fundido es necesario aplicar un alto voltaje, aunque algunos mencionan que no existe diferencia al trabajar con solución y fundido pudiendo trabajar con valores de 7 kV a 20 kV (Dalton & Hutmacher, 2011), otros mencionan que la intensidad de campo debe ser 10 veces más fuerte que al trabajar con electrospinning en solución (Lyons, Li, & Ko, 2004). Lyons, Li y Ko observan que al incrementar el voltaje aplicado los diámetros de las fibras disminuyen, sus resultados se realizan con un TDC de 2 cm y se muestran en la siguiente figura.

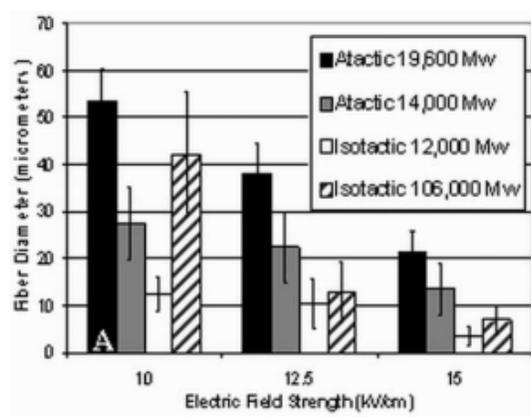


Figura 27 Efecto del campo eléctrico sobre el diámetro de las fibras

Fuente: (Lyons, Li, & Ko, 2004)

2.5.7. Temperatura

Para que el polímero se funda se quiere elevar la temperatura del sistema principalmente del contenedor hasta el capilar donde se debe tener una estabilidad térmica. Existen varias formas que permiten realizarlo en melt electrospinning, como muestra la (**Figura 28**), comercialmente el

calentamiento eléctrico es el método más común, sin embargo, para alcanzar altas temperaturas de forma económica se suele emplear la circulación de aire caliente, otra alternativa es la circulación de aceite, aunque represente un gasto mayor.

Para temperaturas bajas se usa la circulación de agua. En el mercado se encuentran pistolas de calor que son controladas electrónicamente que también facilitan este trabajo. Una variación del electrospinning emplea un láser que permite la elevar la temperatura del polímero sólido.

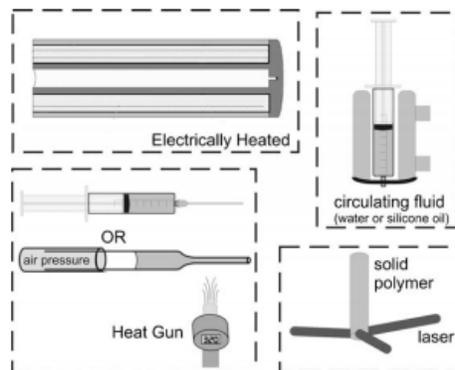


Figura 28 Propuestas de calentamiento para melt electrospinning

Fuente: (Dalton & Hutmacher, 2011)

Dalton et. al (2007), presentan dos configuraciones de calentamiento de polímero dependiendo del punto de fusión (Ver **Figura 29**), considerando la seguridad del operario y la estabilidad de la temperatura. Para este trabajo se usó $PEG_{47} - b - PCL_{95}/PCL$, polipropileno a $44 \text{ cm}^3/10\text{min}$ (P-44) y polipropileno de $15\text{cm}^3/10 \text{ min}$ (PP-15) cuyas características se describen en la **Tabla 4**, en el primer caso se emplea un sistema circulatorio manteniendo la temperatura en $\pm 2^\circ\text{C}$ consiguiendo la temperatura adecuada en alrededor de 20 minutos, mientras en el caso B se emplea una pistola de calor controlada electrónicamente y con retroalimentación de la temperatura de

fusión calentando aproximadamente durante 25 minutos hasta conseguir la temperatura de equilibrio, en este segundo caso se emplea una termocupla tipo K. El capilar de este trabajo es una aguja 20 G correspondiente a 0.9mm.

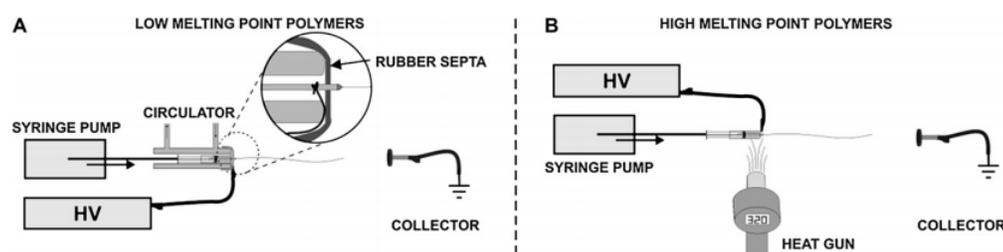


Figura 29 Esquemas de configuración de calentamiento para melt electrospinning

Fuente: Dalton et. al (2007)

Tabla 4

Polímeros y sus condiciones para melt electrospinning

Polímero	Temperatura electrospinning (°C)	Punto de Fusión (°C)	Diámetro fibras (μm)
PP – 44	320	163-167	8.6 ± 1.0
PP-15	270	164-166	35.6 ± 1.7
$PEG_{47} - b - PCL_{95}$ + 30%PCL	90	55-58	2.0 ± 0.3

Fuente: Dalton et. al (2007)

Como se ha mencionado el objetivo de elevar la temperatura es alcanzar el punto de fusión del polímero, este se define como la temperatura a la cual se pasa del estado sólido a líquido. Sin embargo, el sobrepasar esta temperatura tiene una influencia sobre el diámetro de la fibra que se obtiene, presentando una relación directa, es decir, mientras se incrementa la temperatura aumenta el diámetro, Ko (2014) realiza una investigación con PCL cuyo punto de fusión es a 60 °C, mantiene constante el diámetro del capilar y varía la temperatura de 80 – 120 °C, sus resultados se muestran en la **Figura 30.A**.

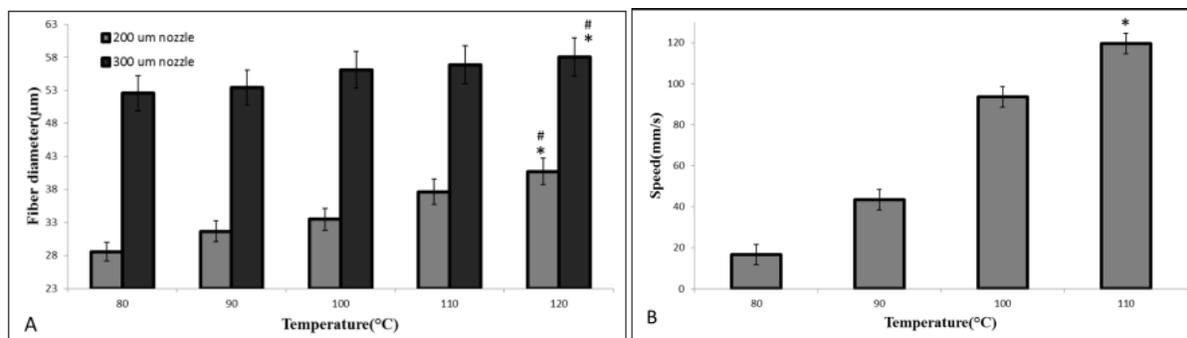


Figura 30 A) Efecto de la temperatura en el diámetro B) Relación temperatura y velocidad

Fuente: (Ko, 2014)

Además, el aumento de la temperatura incide en la reducción de la densidad (δ) y viscosidad, en consecuencia, en la velocidad que presenta el fluido se incrementa (**Figura 30.B**). La velocidad (V) del polímero se define por la ecuación:

$$\frac{dV}{dt} = \pi r^2 \frac{dl}{dt} = \frac{1}{\delta} \frac{dm}{dt} \quad (2.2.1)$$

Donde:

m es el peso total de las fibras de electrospinning

r el radio de fibra

t el tiempo de electrospinning.

Estas últimas consideraciones, respecto al diámetro de la fibra establece que la temperatura de trabajo para melt electrospinning sea superior a la temperatura de fusión, en la **Tabla 5** se muestran algunos polímeros procesados a través de melt electrospinning.

Tabla 5

Temperaturas de trabajo de polímeros usados para melt electrospinning

Polímero	Temperatura de procesamiento (°C)
Polipropileno	220-240
Poli (tereftalato de etileno)	270
Poli – (etilenglicol – bloque - ϵ - caprolactona)	58.2
Polietileno	200-220
Poli (metacrilato de metilo)	130-157
Poliamidas (nylon)	220
Poliestireno	240

Fuente: (Bhardwaj & Kundu, 2010)

2.6. Extrusión de Polímeros

La extrusión de polímeros es un procedimiento mecánico que consiste en el transporte de un material termoplástico a través de una boquilla, logrando de esta manera una forma final de sección transversal constante. El polímero usualmente ingresa al extrusor por medio de una tolva en la cual el material cae por gravedad, después el polímero es transportado por un tornillo de alimentación y forzado a pasar a través de una boquilla (Kopeliovich, 2014).

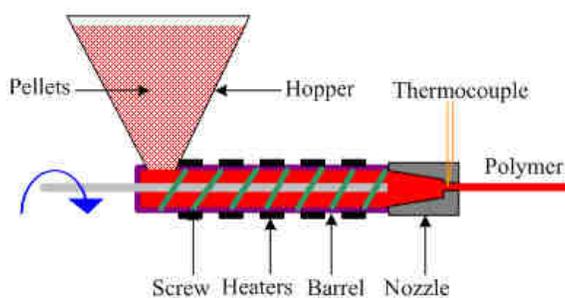


Figura 31 Extrusión de polímeros

Fuente: (Kopeliovich, 2014)

2.6.1. Extrusor

Es usado para fundir un polímero sólido y transportar el mismo para moldearlo de una forma particular. Existen varios componentes en un extrusor, sin embargo, el tornillo es el único componente activo del extrusor, los demás equipos (motor, caja reductora, tolva, cañón, boquilla, etc.) proveen el soporte necesario para que el tornillo realice su función asignada. La función de alimentar el polímero a la tolva sucede en el exterior del extrusor y por esta manera no depende del diseño del tornillo (Chung, 2000).

Flores (2013) sostiene que de acuerdo con la presión necesaria para hacer pasar el plástico fundido a través de la boquilla existen varios tipos de extrusores:

- Extrusores de desplazamiento positivo

Mediante el uso de un cilindro mecánico o ariete de prensa se transporta el material a una abertura de una matriz, logrando de esta manera una extrusión directa o en avance

- Extrusores de fricción viscosa

Estos equipos hacen hincapié en la reología del polímero durante todo el proceso, tomando como ventaja las propiedades físicas del material y la fricción de éste con las paredes transportadoras de la máquina, en las cuales se produce la fundición del polímero. En este tipo de extrusores encaja el monohusillo utilizado para la realización de este proyecto.

2.6.2. Extrusor de husillo

Un extrusor de husillo cumple con tres funciones básicas: a) transporte del material, b) fundir el material y c) dosificación del material, en la mayoría de los casos estas tres funciones ocurren simultáneamente y ocurren en la longitud del husillo, las cuales son inherentemente independientes.

Adicionalmente, el husillo puede realizar funciones secundarias como son mezclado, dispersión y homogenización, estas funciones se refieren a la reducción del tamaño de componentes (Chung, 2000).

En su definición más simple un extrusor de husillo de único tornillo es una bomba volumétrica continua sin la capacidad de desplazamiento positivo, en otras palabras, lo que primero ingresa, sale primero. Un polímero, ya sea sólido o fundido, se desplaza a través de los conductos del tornillo por las fuerzas ejercidas en el polímero por el giro del tornillo hacia la boquilla.

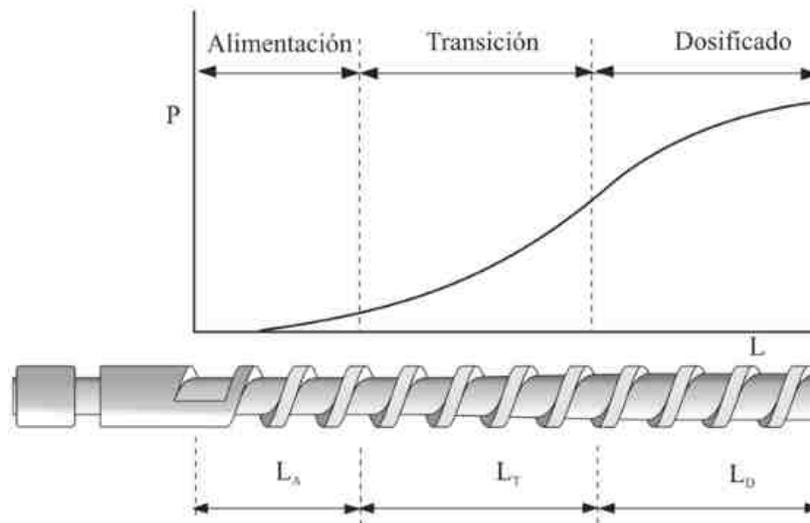


Figura 32 Zonas de una extrusora y evolución de la presión en las mismas

Fuente: (Beltrán & Marcilla, 2012)

Las características más importantes en el diseño de un husillo son: la longitud del husillo (L), diámetro (D), ángulo de filete (θ) y el paso de rosca (w).

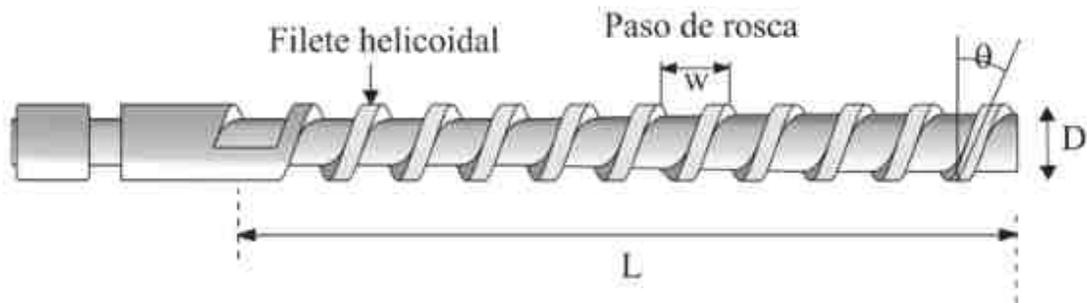


Figura 33 Parámetros del diseño de un tornillo de extrusión

Fuente: (Beltrán & Marcilla, 2012)

2.6.3. Aplicaciones

El proceso de extrusión de plástico es muy usado en la industria para la producción de: perfiles, tuberías, fibras, películas, mangueras, etc. El material usado en la extrusión de tubos y tuberías es básicamente PVC y poliolefinas como HDPE, PP y LDPE, la principal ventaja de estos materiales es que poseen buenas características en largos períodos de tiempo con un costo accesible. El limitante de producción se halla en la velocidad que el material se enfría, lo que depende del diámetro y del espesor de pared de la pieza. (Beltrán & Marcilla, 2012)

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACION

En el presente capítulo se desarrolla la metodología de diseño concurrente mecatrónico a partir de la realización de la matriz QFD, la cual permite establecer los requerimientos para cumplir el objetivo del proyecto, el capítulo incluye el diseño, selección de alternativas a través de matrices de selección, simulaciones de esfuerzos por software y dimensionamiento de elementos utilizados en el desarrollo del equipo previo a su manufactura.

Finalmente se concluye con la implementación del proyecto que consta de la parte mecánica, electrónica y de control distribuidas en subsistemas.

3.1. Metodología de diseño

3.1.1. Función de desarrollo de la calidad

Conocido como QFD “Quality Funtion Deployment”, por sus siglas inglesas. Es un método aplicado en la industria para resolver problemas de diseño, estrategias de planeación, y mejoramiento del servicio al cliente. El concepto de QFD requiere traducir los requerimientos del cliente en características del diseño del producto o parte, evaluando subjetivamente el grado de dificultad para determinar la importancia de cada una de ellas, consiguiendo el mejor resultado posible. (Ficalora & Cohen, 2009) Siendo una base para la toma de decisiones en el diseño del equipo de melt electrospinning.

- Definición de necesidades

Son las características que se requiere en el diseño final. En la **Tabla 6**, se mencionan las necesidades planteadas para el equipo de melt electrospinning, con estas características se busca que el equipo sea fiable, económico y factible para su desarrollo.

Tabla 6

Necesidades del consumidor

No.	Requerimiento
1	Alimentación continua de material
2	Procesar varios polímeros
3	Económico y eficiente
4	Ligero
5	Resistir y mantener altas temperaturas
6	Manejar caudales bajos
7	Facilidad de mantenimiento
8	Modular
9	Seguro y Facilidad de uso
10	Obtener microfibras
11	Verificación del diámetro de las fibras
12	Evitar la producción de arco eléctrico

- Características técnicas

Son las características de ingeniería del producto, donde los requerimientos del cliente son reflejados en especificaciones técnicas que guían el diseño y construcción del equipo, mencionados en la **Tabla 7**.

Tabla 7*Características técnicas*

No.	Características técnicas
1	Tolva
2	Material y diseño del husillo
3	Material de estructura
4	Sistema de temperatura
5	Temperatura variable
6	Control de velocidad
7	Voltaje variable
8	Interfaz HMI
9	Robusto
10	Dimensionamiento del capilar
11	Sistema modular
12	Verificación del diámetro de las fibras
13	Componentes normalizados

El desarrollo de la casa de la calidad o QFD para el equipo de melt electrospinning, se muestra en la **Figura 34**, en las filas se ubican las necesidades del cliente conocidas como “Que’s” mientras que en las columnas las especificaciones técnicas o “Como’s” en el desarrollo se establecen las relaciones entre estos, por ejemplo en la parte superior, es decir, el techo de la casa la relación de “Como’s”, la ponderación se establece en la leyenda de cada uno.

Los resultados del QFD **Tabla 8**, realizado para el equipo de melt electrospinning permiten jerarquizar las características específicas de acuerdo con la puntuación obtenida.

Tabla 8*Resultados de la matriz QFD*

Hito	Características técnicas	Porcentaje
1	Dimensionamiento del capilar	13.0
2	Temperatura variable	11.3
3	Robusto	10.0
4	Material y diseño del husillo	9.4
5	Sistema de temperatura	8.5
6	Voltaje variable	8.3
7	Control de velocidad	7.9
8	Componentes normalizados	7.6
9	Sistema modular	7.3
10	Material de estructura	5.4
11	Tolva	4.8
12	Verificación del diámetro de las fibras	3.8
13	Interfaz HMI	2.7

Tomando como referencia el promedio de los valores de 7.7, se tendrá mayor atención en los hitos que superan este valor. Los cuales son:

- Dimensionamiento de capilar

Debido a las características del polímero, a los requerimientos de temperatura y caudal se seleccionará un diámetro adecuado para cumplir con lo establecido.

- Temperatura variable

Para alcanzar el punto de fusión de los polímeros, se requiere un sistema que permita variar la temperatura.

- Robusto

El equipo debe ser capaz de soportar las condiciones ambientales, así como las condiciones propias de su funcionamiento.

- Material y diseño del husillo

Al ser el componente que está en mayor contacto con el material procesado es necesario seleccionar un material adecuado, además se requiere diseñar en función de los requerimientos de fase del proceso como la compactación, transporte y descarga.

- Sistema de temperatura

Para elevar la temperatura eficientemente se seleccionará el método de calentamiento, incluyendo la instrumentación necesaria para el sensado adecuado de las variables de control.

- Voltaje variable

Se determinará experimentalmente el rango de trabajo óptimo.

- Control de velocidad

La técnica de melt electrospinning requiere trabajar a caudales bajos, se determinará de forma experimental el rango de trabajo.

3.2. Análisis funcional

Para integrar los distintos componentes del equipo, se organizan en módulos teniendo en cuenta sus funciones similares, los cuales en conjunto forman la estructura funcional para la obtención de microfibras poliméricas a través de melt electrospinning. Para asegurar el correcto funcionamiento

del módulo dentro del sistema completo se puede desglosar en subsistemas, para este proyecto se establece la estructura mostrada en la **Tabla 9**.

Tabla 9

Estructura funcional del proyecto

No.	Módulo	Subsistema	Funciones	Hitos
1	Extrusor	Tolva	Alimentación de polímero	1, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 11
		Capilar	Salida de polímero Formación de gota	
		Husillo	Transporte, compactación y dosificación	
		Generación de movimiento	Impulsar el husillo	
2	Sistema de temperatura	Sistema de calentamiento	Elevar la temperatura	2, 3, 5, 8, 9, 10
		Instrumentación		
		Circuito de potencia		
3	Recolección de fibras	Fuente de alto voltaje	Aplicar alto voltaje	6, 8
		Colector	Recolección de fibras	
4	Control y monitoreo	Tarjeta de control	Adquisición de datos Envío y recepción de señales	2, 7, 13
		Controlador	Control del sistema	
		Interfaz HMI	Interacción con el usuario	
5	Microscopía		Diámetro de las fibras	12

3.3. Módulo 1. Extrusor

3.3.1. Subsistema 1.1. Tolva

La tolva (*Figura 36*) permite el ingreso del material al extrusor, se conecta a la zona de alimentación del cañón permitiendo que el material se deposite en el husillo para ser transportado. Los cálculos se realizaron de tal manera que el husillo esté continuamente alimentado, para lo cual se tomó en cuenta el ángulo de inclinación y la capacidad de volumen de la tolva.

De acuerdo con la norma **DIN 1055** el ángulo de inclinación mínimo de la tolva debe ser 15° mayor al ángulo de reposo, el ángulo recomendado para pellets de densidad aparente menor a 1 g/cm^3 (densidad aparente del PP reciclado 0.48 g/cm^3) es de 17° , por lo tanto:

$$\text{Ángulo de inclinación}_{\text{mín}} = \text{ángulo de reposo} + 15^\circ \quad (3.2)$$

$$\text{Ángulo de inclinación}_{\text{mín}} = 32^\circ$$

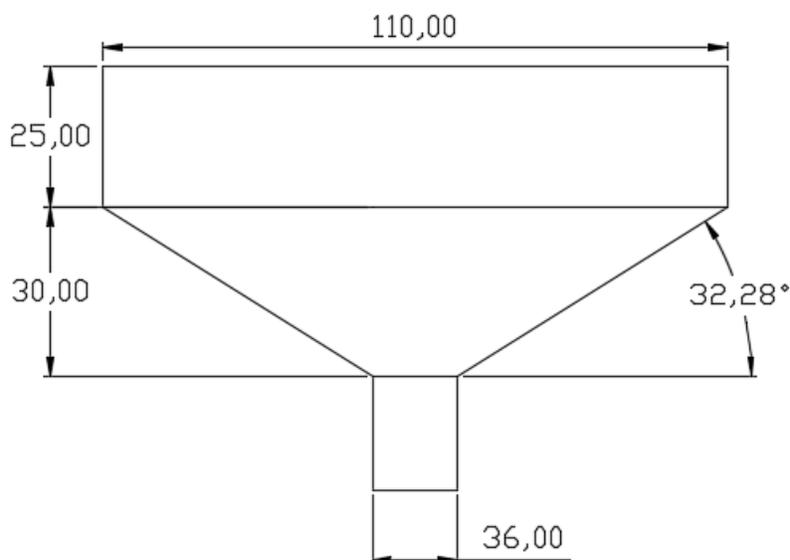


Figura 35 Medidas de la tolva

A partir de esta consideración se adquirió una tolva en el mercado de material acero inoxidable AISI 304, ahora se procede a realizar los cálculos de su volumen.

$$\text{Volumen} = (\pi * R^2 * H_1) + \frac{1}{3} \pi * H * (R^2 + R * r + r^2) \quad (3.3)$$

$$\text{Volumen} = (\pi * 55^2 * 25) + \frac{1}{3} \pi * 30 * (55^2 + 55 * 18 + 18^2)$$

$$\text{Volumen} = 373896.649 \text{ mm}^3$$

$$\text{Volumen} = 373.9 \text{ cm}^3$$

Es importante calcular el volumen real de la tolva, para ello se emplea la fórmula de los espacios vacíos de la tolva, de acuerdo con la norma se debe considerar un 20% de espacios vacíos por las características del material.

$$E = (1 - F_{ev}) * \delta_{pp} \quad (3.4)$$

$$E = (1 - 0.2) * 1.15 \text{ g/cm}^3$$

$$E = 0.92 \text{ g/cm}^3$$

Finalmente se procede a calcular el volumen total de la tolva:

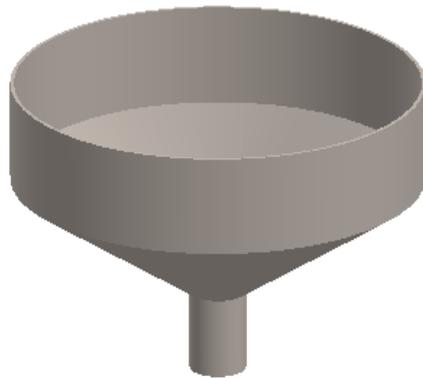


Figura 36 Tolva

$$\text{Volumen Total} = \text{Volumen} * E$$

$$\text{Volumen Total} = 373.9 * 0.92$$

$$\text{Volumen Total} = 343.9 \text{ g}$$

3.3.2. Subsistema 1.2. Capilar

El capilar ha sido seleccionado de elementos disponibles en el mercado como boquillas de impresión 3d (*Figura 37*) o agujas (*Figura 38*). Por ser de cobre facilita la conexión con la fuente de alto voltaje, además de permitir la salida el polímero del extrusor. Se dispone en diámetros de 0.2 a 2.0 mm favorables para el proceso.



Figura 37 Capilar de Cobre



Figura 38 Capilar de acero inoxidable

El capilar es el único elemento en contacto con el polo positivo de la fuente de alto voltaje, por lo cual se utiliza un acople de un material no conductor.



Figura 39 Acople para capilar

3.3.3. Subsistema 1.3. Husillo

En esta sección se realiza el diseño del husillo para el extrusor, considerando las características de los polímeros a procesar, y las necesidades propias del equipo para la producción de fibras poliméricas.

Diseño del husillo

Las fibras poliméricas serán procesadas de polímeros que son fácil acceso en el mercado, además que presentan características similares (**Tabla 10**) permitiendo realizar un solo equipo para trabajar con distintos materiales.

Tabla 10

Características de los polímeros

Material	Densidad $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	MFI $\left[\frac{g}{10min}\right]$	Temperatura de fusion $[^{\circ}C]$
LDPE	0.91-0.94	0.25 (190°C, 2,16kg)	135
PP	0.9	3.00 (230°C, 2.16kg)	165 -180

Para la densidad que se va a considerar en el diseño del husillo se considera el menor valor, en este caso $\eta = 0.9 \text{ g/cm}^3$.

En la literatura del procesamiento de polímeros, se presentan algunas consideraciones necesarias en el diseño del husillo con relación al material como se presenta en la **Tabla 11**.

Tabla 11

Características de husillos para termoplásticos

Husillos para termoplásticos		
Material	Relación de comprensión	Ángulo de inclinación (máx)
LDPE	3:1 a 4:1	17.7°
PP	3:1	17.7°

Fuente: (Cuadros), citado en Enciclopedia del Plástico Industrial

Una de las primeras e importantes consideraciones para el diseño del husillo es la relación L/D, ya que debe abarcar las tres zonas de procesamiento del polímero. Considerando las ventajas de presentar una relación L/D corta:

- Menor tiempo de permanencia en el barril, manteniendo los materiales sensibles al calor a una temperatura de fusión por menos tiempo, lo que reduce las posibilidades de degradación.
- Ocupa menos espacio
- Requiere menor torque por la resistencia del husillo y la cantidad de trabajo (HP) no es tan significativo
- Menor costo de inversión inicial y para el reemplazo de las partes

De acuerdo con las consideraciones anteriores se utilizará una relación L/D de 10:1.

Por lo tanto, en la **Tabla 12** se presentan las consideraciones iniciales para el diseño del husillo de procesamiento del PP y LDPE, se ha tomado como referencia máxima lo presentado en la **Tabla 11**, además de revisarse trabajos anteriores que permitan establecer los valores.

Tabla 12

Consideraciones de diseño para el husillo

Parámetro	Símbolo	Valor
Relación L/D	L/D	10:1
Relación de compresión	R_c	3:1
Ángulo de inclinación	φ	12°
Densidad del material	η	0.9 g/cm ³
Diámetro	D	27 mm

Fuente: (Cuadros)

Considerando la geometría del husillo **Figura 40**, el diseño pretende establecer los valores para cada parámetro que permita el procesamiento de polímeros, además de considerar los resultados del QDF.

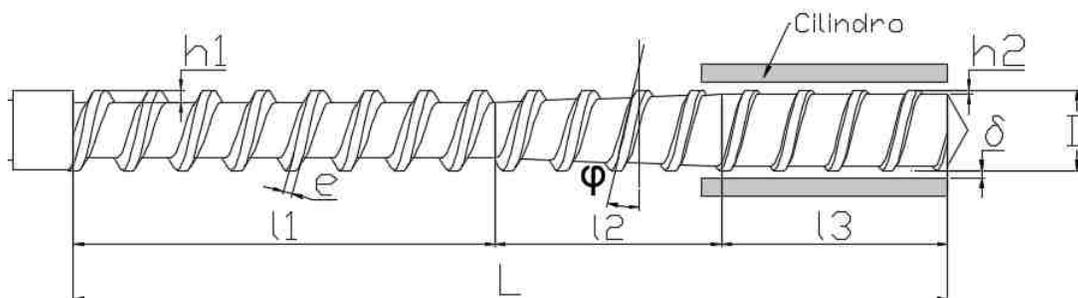


Figura 40 Geometría del husillo

Asumiendo un diámetro de 27 mm para el tornillo, y una relación de 10:1 se obtiene la longitud efectiva del husillo aplicando la siguiente ecuación:

$$\frac{L}{D} = R \quad (3.5)$$

$$L = 270 \text{ mm}$$

Paso S:

$$\tan(\varphi) = \frac{S}{\pi \cdot D} \quad (3.6)$$

$$S = 18 \text{ mm}$$

Profundidad de alimentación h_1 :

$$h_1 = 0.11 \cdot D \quad (3.7)$$

$$h = 2.97 \text{ mm} \approx 3 \text{ mm}$$

Ancho del filete:

$$e = 0.12 \cdot D \quad (3.8)$$

$$e = 3.24 \text{ mm}$$

Número de filetes:

$$\# \text{ filetes} = \frac{L}{S} \quad (3.9)$$

$$\# \text{ filetes} = 15$$

En general, el husillo debe cumplir con tres objetivos principales definidos en tres zonas: alimentación, compresión y dosificación (Ver **Figura 41**). En la zona de alimentación el polímero entra en forma de pellets al canal y avanza con el giro del tornillo. En la segunda zona el canal empieza a reducirse y el polímero se calienta hasta fundirse mientras se comprime. Finalmente, en la zona de dosificación el canal es mínimo y el material es obligado a salir de manera constante y sin turbulencias.

Por la importancia de cada zona en el proceso de extrusión de polímero, se consideran en el diseño del husillo algunos aspectos importantes que garantizan el funcionamiento adecuado, recurriendo al diseño tradicional de husillo, se tiene las siguientes consideraciones:

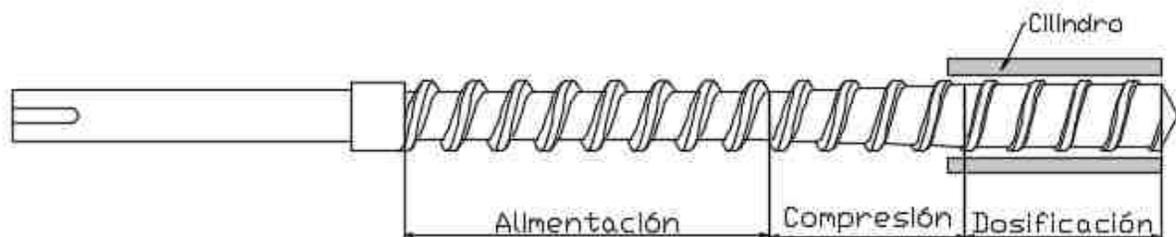


Figura 41 Zonas del husillo

Zona de alimentación

La profundidad del husillo es constante y la longitud es tal que se produzca una alimentación correcta.

Zona de compresión

La profundidad del canal es decreciente, en consecuencia, expulsa el aire atrapado en los gránulos originales, mejora la transferencia de calor y se da el cambio de densidad resultado de la fusión.

Zona de dosificación

Para conseguir homogenizar el material fundido y suministrar a la salida un material a temperatura y presión constante la profundidad se mantiene constante.

Dependiendo del material con el que se trabaja se establece longitud de cada zona y la relación de compresión. Esta última necesaria para conocer si el sistema es capaz de comprimir el plástico y evitar la formación de burbujas de aire, esta relación viene dada por la ecuación (3. 10).

$$Rc = \frac{h_1}{h_2} \quad (3.10)$$

$$h_2 = 1 \text{ mm}$$

Donde:

h_1 profundidad de la zona de alimentación

h_2 profundidad de la zona de dosificación

De la

Figura 42, se obtiene la longitud para la zona de alimentación l_1 , para la zona de compresión l_2 y para la zona de dosificación l_3 :

$$l_1 = 12 + 2 = 14 \text{ cm}$$

$$l_2 = 7.5 \text{ cm}$$

$$l_3 = 7.5 \text{ cm}$$

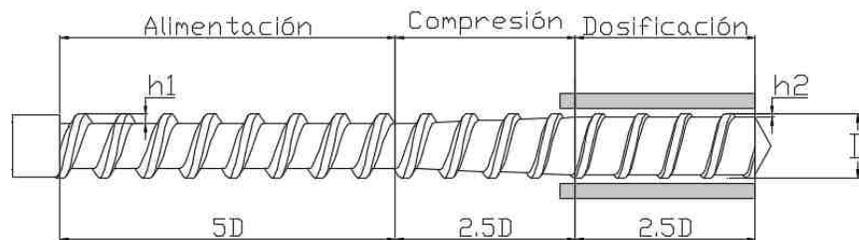


Figura 42 Relación de compresión y longitud de las zonas en el husillo

Se adiciona 2 cm en la zona de alimentación, por razones de montaje para garantizar que la longitud de esta zona (12 cm) sea efectiva en el proceso.

Generalmente se suelen emplear husillos de diámetro constante, manteniendo un huelgo entre el cilindro y el husillo de $0.002D$ para los husillos de diámetro grande y $0.005D$ para los de diámetros pequeños. Así, δ :

$$\delta = 0.005 \cdot D \quad (3.11)$$

$$\delta = 0.135 \text{ mm}$$

Sin embargo, se tomará como valor de diseño $\delta = 0.15 \text{ mm}$.

Por lo tanto, los parámetros de diseño del husillo son:

Tabla 13

Parámetros de diseño

Parámetro	Símbolo	Valor
Diámetro	D	27mm
Longitud	L	270 mm
Paso	S	18 mm
Ángulo de inclinación	φ	12°
Ancho de filete	e	3.24 mm
Holgura radial	δ	0.15 mm
Zona de alimentación		
Longitud	l_1	140 mm
Altura constante	h_1	3 mm
Zona de compresión		
Longitud	l_2	75 mm
Altura decreciente	$h_1 a h_2$	3 a 1 mm
Zona de dosificación		
Longitud	l_3	75 mm

Altura constante	h_2	1 mm
-------------------------	-------	------

El diseño final del husillo se representa en la siguiente figura:



Figura 43 Husillo

Para determinar la velocidad a la que gira el husillo es necesario primero conocer la cantidad de material y el tiempo en que se va a procesar. Para este diseño se van a considerar dos caudales de trabajo, el primero que involucra la extrusión de polímero y el segundo caudal el requerido para la obtención de microfibras. Como ya se ha mencionado el proceso de melt electrospinning requiere de caudales muy bajos, suponiendo que solo se trabaje con este caudal, al material le tomaría mucho tiempo llegar desde la tolva (zona de alimentación) hasta el capilar. Esta es la principal razón por la cual se hace la diferenciación de caudales de trabajo.

Primer caso:

Para el determinar el caudal de trabajo, se considera el volumen del reservorio presente en el barril del extrusor y el conducto final (Ver

Figura 44), es decir, al conseguir este caudal se tendrá fluido fundido y de forma continua en la salida del extrusor, necesario para iniciar con el proceso de obtención de microfibras.

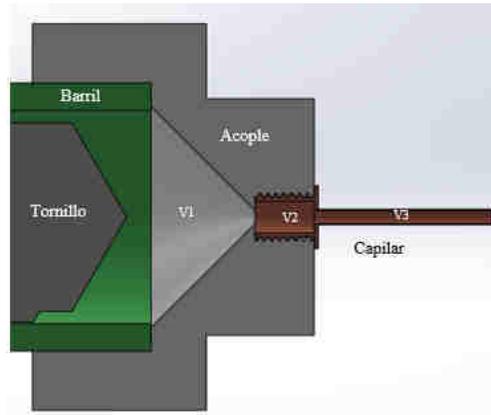


Figura 44 Extremo final del extrusor

$$V_1 = 5.726 \text{ cm}^3$$

$$V_2 = 2.575 \text{ cm}^3$$

$$V_3 = 0.126 \text{ cm}^3$$

$$V_T \approx 8.5 \text{ cm}^3$$

Por lo tanto, V_T es el volumen total del extremo final del extrusor que se desea llenar en un tiempo de 2s. Teniendo Q_1 :

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.12)$$

$$Q_1 = 4.25 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

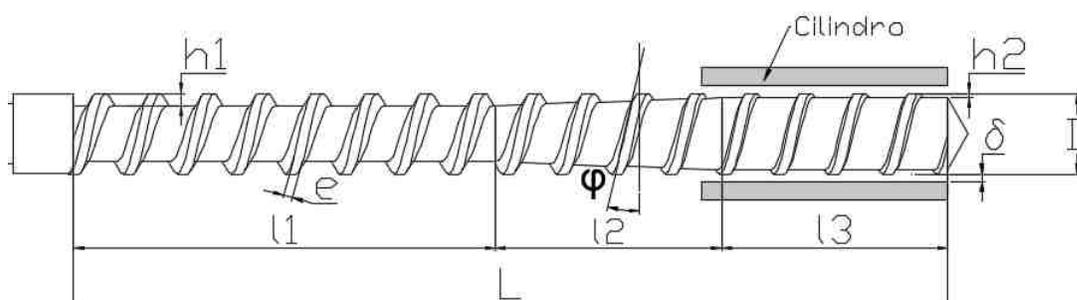
Para cálculos, 4 g/min .

Segundo caso:

De literatura, se sabe que el caudal para obtener microfibras es pequeño, se toma como referencia un $Q_2 = 0.5 \text{ mL/h}$ correspondiente a 0.007 g/min .

$$Q_2 = 0.008 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

Por la forma geométrica con la que se diseña el husillo, se considera la ecuación (3. 13), usada para obtener la producción de la extrusora.



$$Q = \frac{A \cdot \operatorname{ctg}(\varphi) \cdot \left[\frac{l_1}{h_1^2} + \frac{l_2}{h_1 \cdot h_2} + \frac{l_3}{h_2^2} \right]}{\frac{\psi}{K} + \operatorname{cosec}(\varphi) \cdot \left[\frac{l_1}{h_1^3} + \frac{l_2(h_1 + h_2)}{2 \cdot h_1^2 \cdot h_2} + \frac{l_3}{h_2^2} \right]} \quad (3.13)^4$$

$$A = \frac{\pi^2 \cdot D^2 \cdot n}{2} \quad (3.14)$$

$$\psi = \frac{\pi \cdot D}{12} \quad (3.15)$$

Donde, K es la constante del cabezal y viene dada por la forma geométrica, para su cálculo se divide por zonas de la misma configuración, como se muestra en la **Figura 45** y en la **Figura 46**.

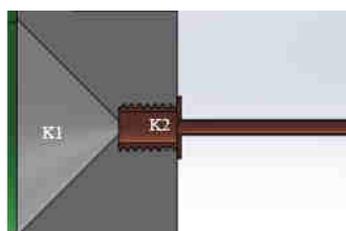


Figura 45 Cabezal del extrusor

⁴ (Savgorodny, 1973)

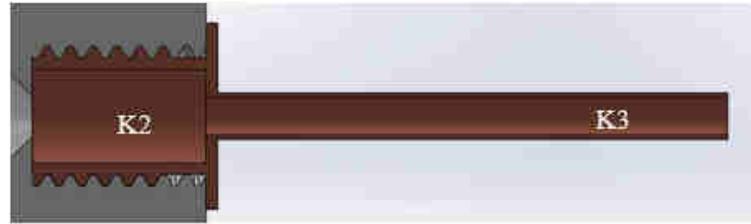


Figura 46 Capilar

Para un canal cónico, de diámetro de entrada $d_0 = 27 \text{ mm}$, diámetro de salida $d_1 = 2 \text{ mm}$ y de longitud $l = 12.5 \text{ mm}$:

$$k_1 = \frac{3 \cdot \pi \cdot d_0^3 \cdot d_1^3}{128 \cdot l \cdot (d_0^2 + d_0 \cdot d_1 + d_1^2)} \quad (3.16)^5$$

$$k_1 = 1.179 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^3$$

Para un canal cilíndrico de $d = 4 \text{ mm}$ y longitud $l = 7.5 \text{ mm}$, la constante viene dada por:

$$k_2 = \frac{\pi \cdot d^4}{128 \cdot l} \quad (3.17)^6$$

$$k_2 = 8.378 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$$

Para un canal cilíndrico de $d = 0.2 \text{ mm}$ y longitud $l = 1.2 \text{ mm}$, la constante viene dada por:

$$k_3 = 3.272 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3$$

Finalmente, K se define como la suma de las resistencias experimentadas en las diferentes zonas:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}} \quad (3.18)$$

⁵ (Savgorodny, 1973)

$$K = 3.272 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3$$

Reemplazando la ecuación (3. 14) en la ecuación (3. 13), obtenemos el valor de la velocidad del husillo:

$$\text{Para } Q_1 = 4.25 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}:$$

$$n_1 = 15 \text{ rpm} = 90 \text{ }^\circ/\text{s}$$

$$\text{Para } Q_2 = 0.008 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}:$$

$$n_2 = 0.03 \text{ rpm} = 0.18^\circ/\text{s}$$

En concordancia con los resultados, se desarrolla el estudio del movimiento del material en el tornillo analizando los tipos de flujo presentes, teniendo: flujo de arrastre, flujo de presión y flujo de pérdida. Por lo tanto, el flujo total (Ver **Figura 47**) viene dado por la suma:

$$Q_T = Q_D + Q_p + Q_{p\acute{e}rdida} \quad (3. 19)$$

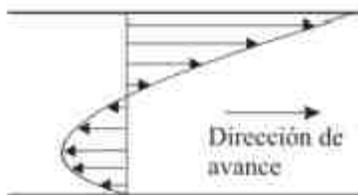


Figura 47 Perfil de velocidad de flujo total

Flujo de arrastre o de fricción Q_D

Este flujo es el que provoca el movimiento del material desde la tolva hasta el capilar, como consecuencia de la fricción del material con el tornillo y las paredes del cilindro, debido que el material fundido se adhiere a las paredes.

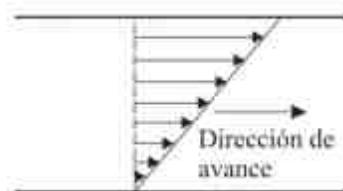


Figura 48 Perfil de velocidad de flujo de arrastre

Constante de flujo directo:

$$\alpha = \frac{\pi \cdot m \cdot D \cdot h \cdot \left(\frac{S}{m} - e\right) \cdot \cos(\varphi)}{2} \quad (3.20)^7$$

$$\alpha = 3.334 \text{ cm}^3$$

Donde:

m : número de canales del husillo = 1

Se calcula la constante para cada zona del tornillo debido a la diferencia de altura presente, así:

Zona de alimentación:

$$\alpha_1 = 2.431 \text{ cm}^3$$

Zona de compresión:

$$\alpha_2 = 1.62 \text{ cm}^3$$

⁷ (Savgorodny, 1973)

Zona de dosificación:

$$\alpha_3 = 0.81 \text{ cm}^3$$

Flujo de presión o de retroceso Q_P

Es producido por el gradiente de presión, que aumenta desde el extremo de alimentación hasta el extremo del capilar.

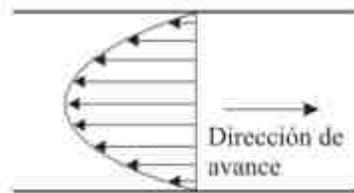


Figura 49 Perfil de velocidad de flujo de presión

Constante de flujo de presión:

$$\beta = \frac{m \cdot h^3 \cdot \left(\frac{S}{m} - e\right) \cdot \text{sen}(\varphi) \cdot \text{cos}(\varphi)}{12 \cdot L} \quad (3.21)^8$$

Zona de alimentación:

$$\beta_1 = 1.388 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^3$$

Zona de compresión:

$$\beta_2 = 6.578 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^3$$

Zona de dosificación:

$$\beta_3 = 8.222 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3$$

⁸ (Savgorodny, 1973)

Flujo de pérdida o de fugas $Q_{p\acute{e}rdida}$

Tiene lugar entre el cilindro u el filete del tornillo, como resultado del gradiente de presión. Tiene una estrecha relación con la tolerancia de ajuste entre el tornillo y el cañón, siendo mucho más pequeño que los dos anteriores.

Constante de flujo de pérdida:

$$\gamma = \frac{\pi^2 \cdot D^3 \cdot \delta^3 \cdot \tan(\varphi)}{10 \cdot e \cdot L} \quad (3.22)$$

$$\gamma = 3.348 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^3$$

La ecuación (3.23), puede ser escrita con relación a las constantes de cada flujo obteniendo:

$$Q = \alpha \cdot n - \beta \cdot \left(\frac{\Delta P}{\mu}\right) - \gamma \cdot \left(\frac{\Delta P}{\mu}\right) \quad (3.23)$$

Donde:

ΔP : Diferencia de presión

μ : Viscosidad del polímero

Adicionalmente se conoce que, para líquidos newtonianos, el cabezal influye en el caudal de producción:

$$Q = K \cdot \left(\frac{\Delta P}{\mu}\right) \quad (3.24)$$

De las ecuaciones anteriores, se concluye:

$$Q = \left(\frac{K \cdot \alpha_1}{K + \beta_1 + \gamma} + \frac{K \cdot \alpha_2}{K + \beta_2 + \gamma} + \frac{K \cdot \alpha_3}{K + \beta_3 + \gamma} \right) \cdot n \quad (3.25)$$

Comprobando los resultados obtenidos anteriormente, donde:

$$n_1 = 90 \text{ }^\circ/s$$

$$n_2 = 0.18 \text{ }^\circ/s$$

Para el estudio del movimiento del polímero en la extrusora, se considera características geométricas y de velocidad, si el tornillo es cortado a lo largo de su eje y desenrollado como muestra la figura:

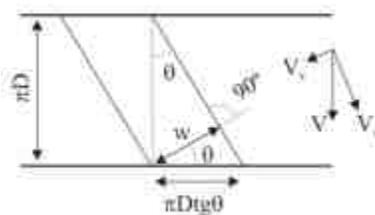


Figura 50 Tornillo cortado a lo largo de su eje y desenrollado

Se tiene:

$$w = \pi \cdot D \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (3.26)$$

$$w = 19.1 \text{ mm}$$

La velocidad lineal y sus componentes vienen dadas por:

$$V = \pi \cdot n \cdot D \quad (3.27)$$

$$V = 135.61 \text{ mm/s}$$

$$V_x = V \cdot \cos(\varphi) \quad (3.28)$$

$$V_x = 132.65 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$V_y = V \cdot \text{sen}(\varphi) \quad (3.29)$$

$$V_y = 28.20 \text{ mm/s}$$

Material del Barril y Husillo

El material del husillo y barril es de gran consideración, debido a que este permitirá realizar el transporte del polímero, además de resistir al punto de fusión alcanzado por el polímero, entre sus características químicas se busca evitar la corrosión en el husillo y barril. Por estos motivos una correcta selección del material del husillo y barril es preponderante en el desarrollo de este equipo.

Alternativas para el diseño

Existe diversidad de materiales generalmente aceros para la construcción de husillo de extrusores y barriles, lo que se busca en estos materiales es que posean la capacidad de transportar el material a ser procesado principalmente y que puedan soportar las altas temperaturas; dentro de los materiales se encuentran los siguientes:

Aceros al carbono (Solución A)

Se los utiliza para aplicaciones que no requieran mayor resistencia y que los requerimientos no sean muy severos. Comprende el 90% de los aceros producidos mundialmente. Se los conoce como aceros de construcción, su composición química es compleja, el hierro y el carbono que poseen no supera el 1%.

Características:

- El aumento de carbono en un acero incrementa la resistencia a la tracción y el índice de fragilidad en frío.
- La tenacidad y la ductilidad disminuyen al incrementar el porcentaje de carbono.
- Se dividen en acero extra suave, suave, semi suave, semiduro y duro.
- Estos aceros vienen acompañados de tratamientos térmicos como: recocido, temple y revenido.

Aceros inoxidables (Solución B)

Poseen una elevada resistencia a la corrosión formando una capa pasivadora, sin embargo, esta capa se puede ver afectada en presencia de algunos ácidos. Además de estas características estos aceros poseen buenas cualidades estéticas lo que permite utilizarlos en infinidad de aplicaciones como: electrodomésticos, automoción, construcción, vestimenta, etc.

Características:

- Ideal en la industria alimenticia y médica.
- Resistencia al calor, la corrosión y la oxidación
- Superficie poco rugosa lo que representa bajo coeficiente de rozamiento
- Larga vida útil para grandes cargas
- Biológicamente neutro.

Aceros aleados (Solución C)

Vence las limitaciones que poseen los aceros al carbono, los elementos para aleación más utilizados son: cromo, vanadio, manganeso, cobalto, cobre, aluminio, níquel, titanio, etc. Las características de estos aceros son:

- Incrementar la resistencia a temperaturas ordinarias.
- Aumentar la resistencia a la corrosión y al desgaste.
- En altas y bajas temperaturas mejorar las propiedades mecánicas.
- En cualquier dureza o resistencia mínima, mejorar la tenacidad.

Evaluación y selección de alternativas

Para escoger la mejor alternativa se realiza la ponderación de criterios. En la siguiente tabla se indican los criterios de selección. Después, en las tablas siguientes se evalúa cada solución con los criterios y finalmente se selecciona una de las posibilidades.

Tabla 14
Criterios de selección para el material del husillo y barril

Criterio	Maquinabilidad	Costo	Temperatura	Corrosión	$\Sigma+1$	Ponderación
Maquinabilidad	-	2,5	5	5	13,5	0,40
Costo	2,5	-	0	0	3,5	0,10
Temperatura	0	5	-	0	6	0,18
Corrosión	0	5	5	-	11	0,32
				Total	34	1,00

Tabla 15*Evaluación de Maquinabilidad para la selección de material del husillo y barril*

Maquinabilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond
Solución A	-	0	0	1	0,06
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	5	0	-	6	0,33
			Total	18	1,00

Tabla 16*Evaluación de Costo para la selección de material del husillo y barril*

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond
Solución A	-	2,5	5	8,5	0,47
Solución B	2,5	-	5	8,5	0,47
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1,00

Tabla 17*Evaluación de Temperatura para la selección de material del husillo y barril*

Temperatura	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond
Solución A	-	0	0	1	0,06
Solución B	5	-	2,5	8,5	0,47
Solución C	5	2,5	-	8,5	0,47
			Total	18	1,00

Tabla 18*Evaluación de Corrosión para la selección de material del husillo y barril*

Corrosión	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond
Solución A	-	0	0	1	0,06
Solución B	5	-	0	6	0,33
Solución C	5	5	-	11	0,61
			Total	18	1,00

Tabla 19*Selección final del material del husillo y del barril*

	Maquinabilidad	Costo	Temperatura	Corrosión	Σ	Prioridad
Solución A	0,024	0,047	0,011	0,019	0,101	3
Solución B	0,244	0,047	0,085	0,106	0,482	1
Solución C	0,132	0,006	0,085	0,195	0,418	2
				Total	1,000	

La prioridad 1 resulta la Solución B (Acero Inoxidable), el cual se acopla mejor a los requerimientos para el material del husillo y el barril del extrusor de tornillo propuesto en el proyecto, en la siguiente tabla se detallan las propiedades mecánicas del acero inoxidable 304.

Resistencia a la tracción			Limite de fluencia			Alargamiento en 2" (%)	Reducción de área (%)	Relación de maquinabilidad ¹²¹² EF =100%	Dureza (HRB)
MPa	kgf/mm ²	KSI	MPa	kgf/mm ²	KSI				
481	49	70	176	18	26	40	50	45	92
510	52	74	206	21	30				=

Figura 51 Propiedades Mecánicas del Acero Inoxidable 304

Esfuerzos en el husillo

Una vez realizado el diseño geométrico del husillo, se utilizan estos valores para comprobar que, con los valores obtenidos, el conjunto pueda soportar los esfuerzos que se presentan en el husillo. En un husillo se presentan tres cargas: la fuerza axial P , la carga distribuida q , originada por el propio peso del husillo, y el momento de giro Mg , cómo se puede apreciar en la **Figura 52**.

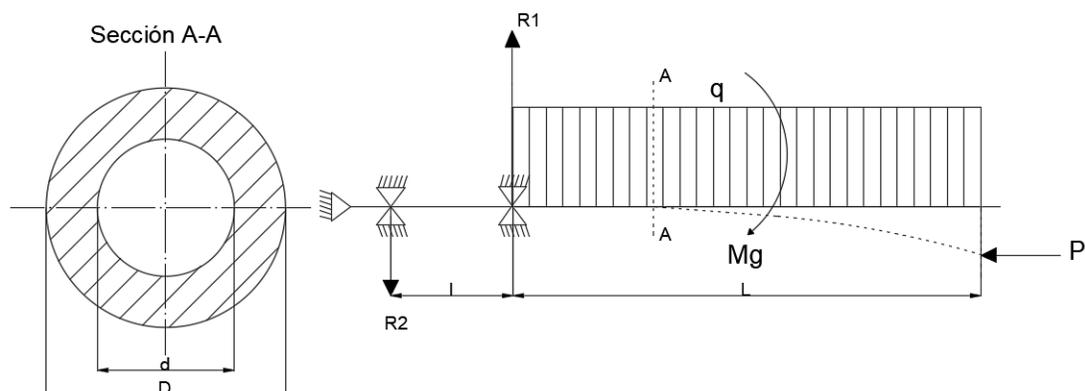


Figura 52 Esfuerzos presentes en el husillo

Con el torque calculado previamente junto con el diámetro del eje, así como la relación existente entre los diámetros d y D , se busca obtener la tensión tangencial máxima sobre la superficie del husillo.

$$d = D - 2 * h \quad (3.30)$$

$$d = 21 \text{ mm}$$

Relación entre los diámetros del husillo:

$$u = \frac{d}{D} \quad (3.31)$$

$$u = 0.824$$

A continuación, se calcula la superficie transversal del husillo mediante la siguiente fórmula:

$$F = \frac{\pi * D^2}{4} * (1 - u^2) \quad (3.32)$$

$$F = 203.418 \text{ mm}^2$$

$$J = \frac{\pi * D^4}{64} (1 - u^4) \quad (3.33)$$

$$J = 17220 \text{ mm}^4$$

El radio de inercia de la sección es:

$$R_i = \sqrt{\frac{J}{F}} \quad (3.34)$$

$$R_i = 9.2 \text{ mm}$$

Finalmente, obtenemos la tensión tangencial máxima aplicada a la superficie del husillo.

$$\tau = \frac{16 * Torque}{\pi * D^3 * (1 - u^4)} \quad (3.35)$$

$$\tau = 4.33 \times 10^5 \text{ Pa}$$

La carga repartida q , se calcula de la siguiente manera para su peso de 1.35 kg:

$$q = \frac{\text{Peso del husillo}}{\text{Longitud del husillo}} \quad (3.36)$$

$$q = 4.963 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

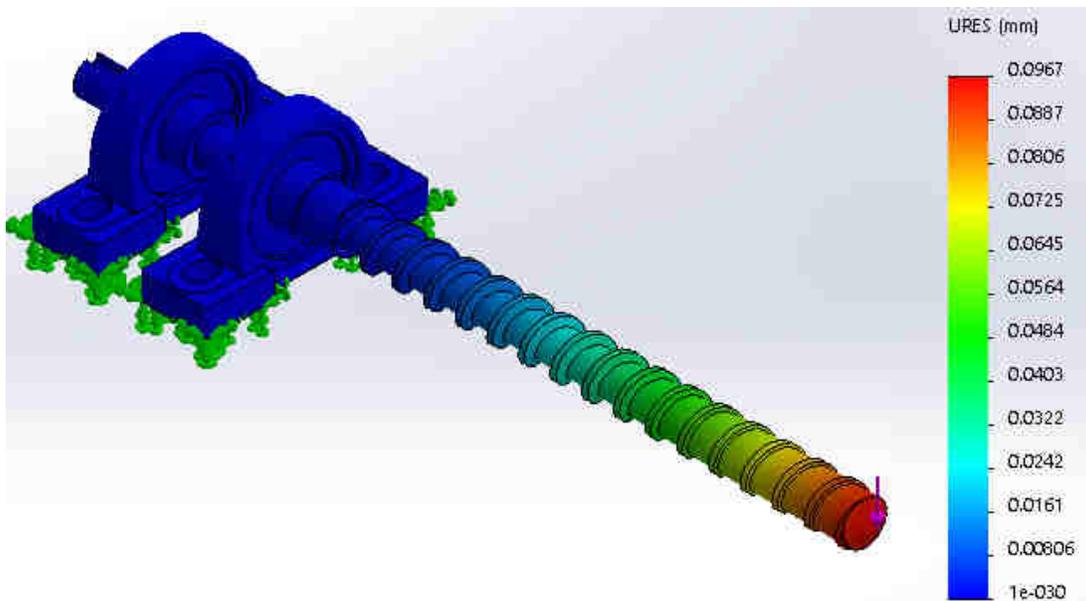


Figura 53 Desplazamientos producidos en el tornillo

Como se puede apreciar en la figura los desplazamientos más significativos se producen en el extremo del tornillo dónde se aplica la carga correspondiente al peso del mismo.

Para obtener la tensión normal, primero se debe calcular el momento de flexión máximo y el momento de inercia respecto al eje neutro:

Momento de flexión máximo

$$Mf = \frac{q * L^2}{2} \quad (3.37)$$

$$Mf = 0.181 \text{ kg} * m$$

$$Mf = 1.773 \text{ N} * m$$

Momento respecto al eje neutro

$$W_o = \frac{\pi * D^3}{32} (1 - u^4) \quad (3.38)$$

$$W_o = 1212 \text{ mm}^3$$

Con los datos obtenidos reemplazamos para hallar la tensión normal

$$\sigma = \frac{P}{F} + \frac{Mf}{W_o} \quad (3.39)$$

$$\sigma = 5.462 \text{ MPa}$$

El esfuerzo equivalente se halla mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_R = \sqrt{\sigma^2 + 4 * \tau^2} \leq \sigma_{admisible} \quad (3.40)$$

$$\sigma_R = 7.73 \text{ MPa}$$

El esfuerzo admisible del acero inoxidable es de 176 MPa por lo que se obtiene un factor de seguridad de 22, debido a que los esfuerzos presentes en el tornillo no son significativos, pero por el tipo de material que debe procesar el extrusor (polímero) se utiliza el acero inoxidable AISI 304.

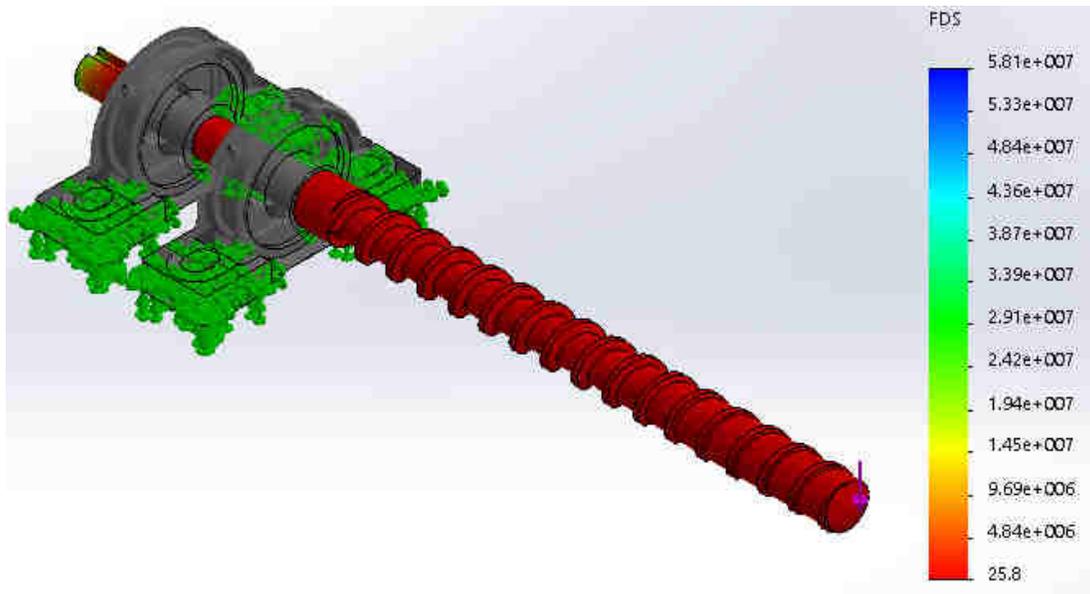


Figura 54 Factor de Seguridad obtenido por CAE

La flecha máxima al aplicar la carga es:

$$f_{max} = \frac{q * L^2}{8 * \epsilon * J} \quad (3.41)$$

$$f_{max} = 1.269 * 10^{-5} \text{ mm}$$

Esta flecha debe ser menor que la holgura radial entre la cresta del filete del husillo y el cilindro por lo que se determina que el diseño realizado del husillo es el adecuado.

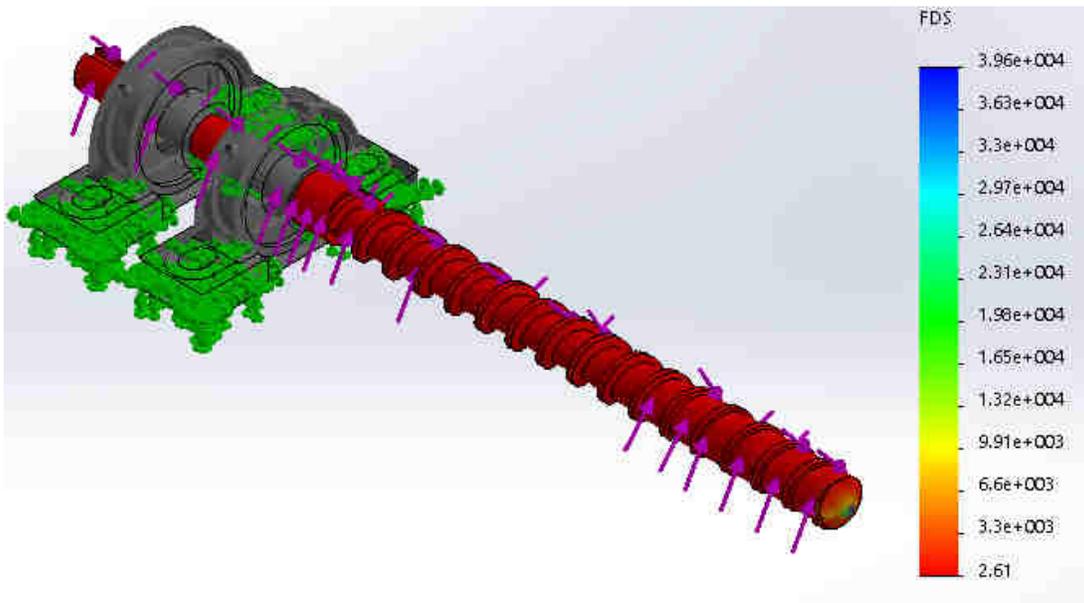


Figura 55 Factor de Seguridad al aplicar torsión en el tornillo.

Selección del rodamiento

Para el cálculo del rodamiento es necesario determinar todas las fuerzas efectivas, utilizando la fórmula de los momentos y la proyección de las fuerzas.

$$\Sigma M_a = Q * \frac{L}{2} - R_2 * l = 0 \quad (3.42)$$

$$\Sigma M_b = R_1 - R_2 - Q = 0$$

Q es el peso del husillo, aplicado a una distancia $\frac{L}{2}$ desde el primer apoyo.

$$Q = \frac{\pi * D^2}{4} (1 - u^2) * L * \rho \quad (3.43)$$

$$Q = 4.271 \times 10^6 \text{ g}$$

Reacciones en los apoyos

$$R2 = \frac{Q * L}{2 * l} \quad (3.44)$$

$$R2 = 1.31 * 10^7 \text{ g}$$

$$R1 = R2 + Q$$

$$R1 = 1.738 * 10^7 \text{ g}$$

El rodamiento se elige de acuerdo con la fuerza axial, por cada uno de los rodamientos ubicados en el eje (en este caso un único rodamiento).

$$p_1 = \frac{P}{n} \quad (3.45)$$

$$p_1 = 0.016 \text{ N}$$

Ahora se debe determinar la carga dinámica del rodamiento para 15rpm con una vida mínima de 20000 horas, a partir de la siguiente ecuación:

$$C_r = \frac{f_h}{f_n} * p_1 \quad (3.46)$$

Los valores de f_h y f_n se obtienen de la siguiente figura:

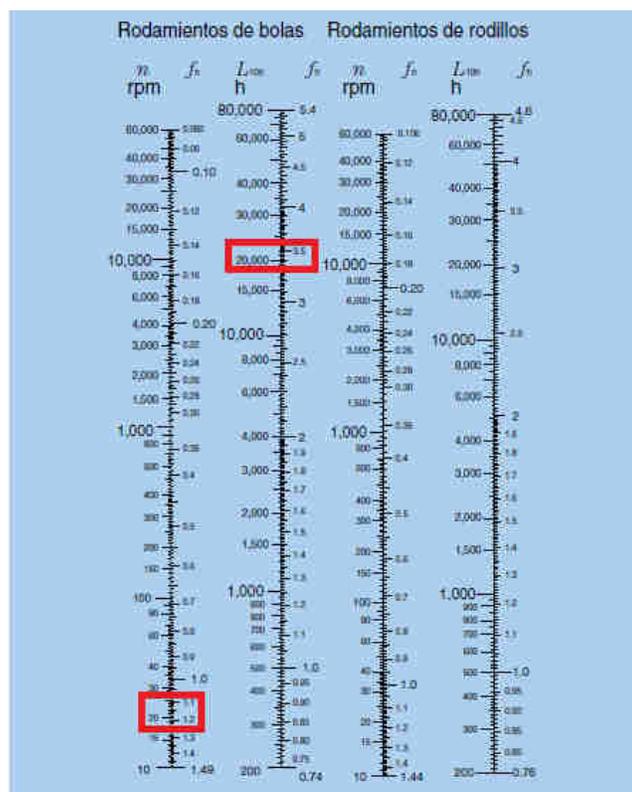


Figura 56 Escala para el cálculo de rodamientos

$$C_r = 0.035 N$$

Con el valor de la carga dinámica C_R se procede a seleccionar la chumacera adecuada.

Shaft Dia. / Eje día.		Dimensions/ Dimensiones								Basic Load Ratings/ Capacidad de carga kN		Factor	Bearing/ Rodamiento No.	
mm	inch	D		B		C		r (min.)		C_r	C_{0r}	f_0	Standard	L3 Type
d		mm	inch	mm	inch	mm	inch	mm	inch					
20	-	47	1.850	25	0.984	14	0.551	1	0.039	12.8	6.65	13.2	GAY204	
		47	1.850	31	1.220	16	0.630	1	0.039	12.8	6.65	13.2	GYE204	UC204-DL

Figura 57 Chumacera seleccionada

Fuente: (Rodamientos Bulnes, 2014)

Debido a que la capacidad de carga se ajusta a la capacidad obtenida se selecciona la chumacera de 20 mm “UC204 - DL”.

Los elementos maquinados se presentan en la *Figura 58* y *Figura 59*.



Figura 58 Husillo



Figura 59 Barril

3.1.1. Subsistema 1.4. Generación de movimiento

Cálculo del tamaño del motor

La tasa de salida del material calculado es $0.135 \frac{kg}{h}$, con una temperatura promedio de $230^{\circ} C$.

Para el cálculo de la potencia se asume una eficiencia de la energía mecánica del 70%.

$$Salida = 0.135 \frac{kg}{h} = 0.297 \frac{lb}{h}$$

$$\Delta H = \left(280 \frac{Btu}{lb} \text{ a } 230^{\circ} C \right) - \left(0 \frac{Btu}{lb} \text{ a } \text{Temperatura Ambiente} \right) = 280 \frac{Btu}{lb}$$

Se procede a calcular el trabajo mediante la siguiente fórmula:

$$W_o^* = Salida * \Delta H \quad (3.47)$$

$$W_o^* = 83.16 \frac{Btu}{h} = 0.0327 \text{ HP}$$

$$W_o = W_o^* * \left(\frac{100}{\% \text{ Efi. energía mecánica}} \right)$$

$$W_o = 0.0467 \text{ HP} = 0.035 \text{ kW}$$

Con los datos anteriores se obtiene el torque requerido por el sistema, donde W_o : potencia efectiva y n : el número de revoluciones del motor.

$$\text{Torque} = 9550 * \frac{W_o}{n} \quad (3.48)$$

$$\text{Torque} = 15.19 \text{ N} * \text{m}$$

En base a los requerimientos se seleccionó un motor a pasos Nema 23 con las siguientes características:

Tabla 20

Especificaciones del motor seleccionado

<i>Especificaciones Eléctricas</i>	
Ángulo de Paso	0.039°
Torque sin caja reductora	1.25 Nm
Corriente(fase)	2.8 A
Resistencia de fase	0.9 Ohms
Inductancia	2.5mH
<i>Especificaciones de la Caja Reductora</i>	
Tipo de Caja Reductora	Planetaria
Reducción	47:1
Eficiencia	73%
Torque	20 Nm



Figura 60 Motor Nema 23 con caja reductora

3.2. Módulo 2. Sistema de temperatura

Cálculo de la potencia requerida para la resistencia eléctrica

Para fundir el polímero es necesario calentar a partir de la temperatura ambiente (20°C) hasta la temperatura más alta para procesar el polímero (300°C), en una primera instancia se tomará en cuenta el flujo másico total del polímero. Para los cálculos se selecciona el polipropileno isotáctico (IPP), debido a que este material presenta la temperatura más alta a la que debe ser procesado.

$$\dot{Q} = m_T * c_p * (T_{\text{proceso}} - T_{\text{ambiente}}) \quad (3.49)$$

$$\dot{Q} = 34.83 \text{ W}$$

A continuación, se procede a realizar el cálculo del flujo de calor que circula a través del cilindro del extrusor, la resistencia eléctrica provee el flujo de calor, el cual es transmitido a las paredes del cilindro por conducción incluyendo el flujo de calor del polímero en contacto con el tornillo extrusor.

Los radios son los siguientes:

$$r_1 = r_3 - h_1 = 9 \text{ mm}$$

$$r_2 = r_3 - h_3 = 11.65 \text{ mm}$$

$$r_3 = \frac{D_c}{2} = 13 \text{ mm}$$

$$r_4 = r_3 + e = 19 \text{ mm}$$

$$r_m = \frac{r_1 + r_2}{2} = 10.325 \text{ mm}$$

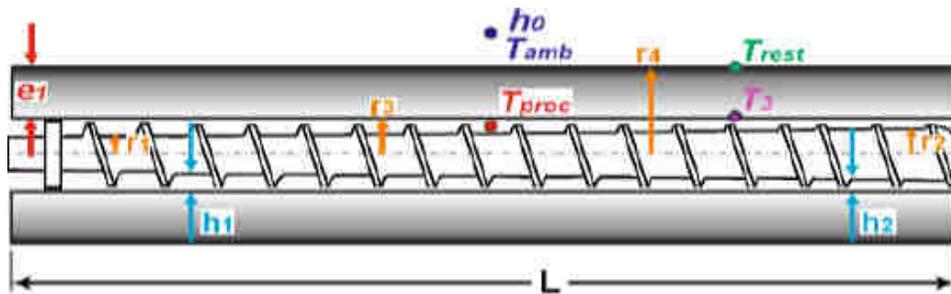


Figura 61 Secciones en el cilindro del extrusor

La transferencia de calor puede expresarse análogamente a un conjunto de resistencias que conforman un circuito eléctrico, como se expresa en la siguiente figura.

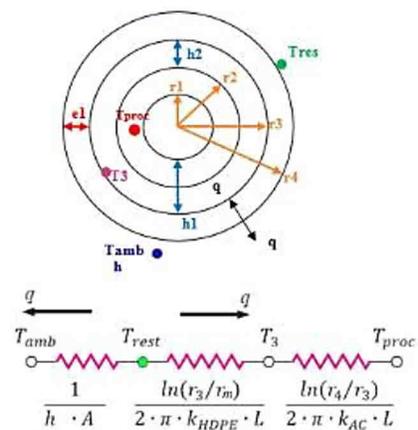


Figura 62 Flujo de calor en las secciones cilíndricas

Se procede a calcular el flujo de calor total del sistema.

Dónde:

$$T_{proceso} = 573 \text{ K}$$

$$k_{inox} = 28 \frac{W}{m * K}$$

$$k_{IPP} = 0.17 \frac{W}{m * K}$$

$$q = \frac{T_{resistencia} - T_{proceso}}{\frac{\ln\left(\frac{r3}{rm}\right)}{2 * \pi * k_{IPP} * L} + \frac{\ln\left(\frac{r4}{r3}\right)}{2 * \pi * k_{inox} * L}} \quad (3.50)$$

$$q = 0.964 * T_{resistencia} - 552.555$$

Pérdidas de calor en la extrusora

Estas pérdidas se producen por el flujo de aire que circula por las resistencias, aun siendo la velocidad de circulación del aire entre el cañón y la cubierta mínima, a partir de la siguiente fórmula.

Dónde:

$$h = 5 \frac{W}{m^2 * K}$$

$$T_{ambiente} = 298 \text{ K}$$

$$q_{convección} = \frac{T_{resistencia} - T_{ambiente}}{\frac{1}{h * A}} \quad (3.51)$$

$$q_{convección} = h * 2 * \pi * r4 * L * (T_{resistencia} - T_{ambiente})$$

$$q_{convección} = 0.125 * T_{resistencia} - 37.25$$

Igualando las ecuaciones anteriores del calor que entra con el calor que sale, se obtiene la temperatura de la resistencia.

$$T_{resistencia} = 615 K$$

Con este valor se reemplaza y se obtienen las pérdidas de convección.

$$q_{convección} = 39.625 W$$

Después, se procede a calcular las pérdidas por radiación, para lo cual es necesario conocer el valor de la emisividad del acero inoxidable 304 a 300°C, la temperatura más alta que alcanzará el extrusor.

$$q_{radiación} = \text{Área zona} * e * \sigma * (T_s^4 - T_a^4) \quad (3.52)$$

Dónde:

$$e = 0.1755 \quad \text{Emisividad del acero inoxidable 304 a 573 K}$$

$$\text{Área zona} = 0.016 m^2$$

$$\sigma = 5.67 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 * K}$$

$$T_s = 573 K$$

$$T_a = 293 K$$

$$q_{radiación} = 15.78 W$$

Cálculo de la potencia requerida para la resistencia.

Es necesario considerar el tiempo necesario para alcanzar la temperatura requerida por el polímero, este tiempo no debe ser muy extenso. Se realiza el cálculo para considerar la variación de la temperatura con el tiempo.

La temperatura de operación se expresa en la siguiente fórmula:

$$T(t) = \left[1 - e^{\left(\frac{-h \cdot \text{área} \cdot t \cdot 60}{m_{\text{cilindro}} \cdot C_{\text{cilindro}} + m_{\text{husillo}} \cdot C_{\text{husillo}}} \right)} \right] * \frac{Q_{\text{real}}}{h * \text{área}} + T_a \quad (3.53)$$

Dónde:

$$m_{\text{cilindro}} = 0.84 \text{ kg}$$

$$m_{\text{husillo}} = 1.35 \text{ kg}$$

$$C_{\text{cilindro}} = 510 \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} \quad \text{Calor específico del material del cilindro}$$

$$C_{\text{husillo}} = 510 \frac{\text{J}}{\text{kg} * \text{K}} \quad \text{Calor específico del material del husillo}$$

$$Q = 140 \text{ W} \quad \text{Potencia de la resistencia}$$

$$Q_{\text{real}} = 84 \text{ W}$$

A continuación, se presenta la gráfica resultante reemplazando los valores correspondientes de la extrusora a la temperatura máxima de trabajo 300°C [573 K].

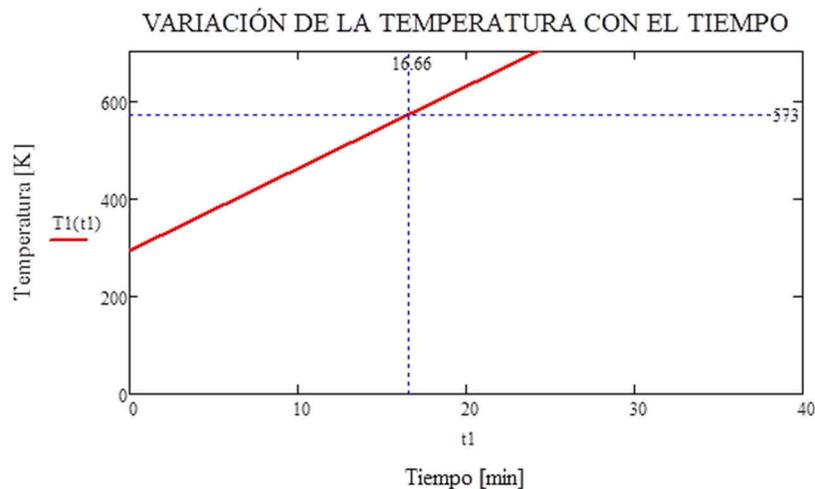


Figura 63 Variación de la temperatura de la resistencia con el tiempo.

El tiempo necesario para que el extrusor alcance su temperatura máxima de funcionamiento es de 16 minutos, un tiempo adecuado por lo que la selección de la resistencia de 140 Watts está acorde con los parámetros de diseño.

3.2.1. Subsistema 2.1. Sistema de calentamiento

Es necesario para el correcto funcionamiento de la técnica de melt electrospinning con la consecuente producción de microfibras, este sistema debe ser seleccionado para obtener una alta transferencia de calor que a su vez sea eficiente y permita ser controlado y monitoreado desde el exterior.

Existen varias posibilidades para conseguir el objetivo de incrementar la temperatura, de forma que determinado polímero alcance su punto de fusión. Son de diversa índole, desde accionados eléctricamente hasta el uso de fluidos para realizar el trabajo, éstas formas para elevar la temperatura son las siguientes:

Resistencia Eléctrica Tipo Espiral (Solución A)

Estas resistencias tienen aplicaciones en hornos, secadoras, barras selladoras, deshumificadores, calentamiento por inmersión, etc. Son fiables y robustas como dispositivo de generación de calor.

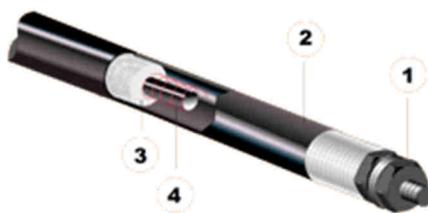


Figura 64 Resistencia Tipo Tubular

Fuente: (Kintel)

Características:

- Poseen una bobina de alambre de níquel-cromo para ofrecer una distribución uniforme del calor.
- De acero inoxidable hasta 650°C para procesos alimenticios o sustancias corrosivas.
- De incoloy para radiación de calor que requiera altas temperaturas hasta 870°C o para sustancias corrosivas que el acero inoxidable no soporta.
- De cobre ideal para el calentamiento de agua hasta 175°C.
- Rellenadas con óxido de magnesio de alta pureza que se utiliza como aislamiento interno para asegurar la mejor transferencia de calor y un excelente aislamiento eléctrico.

Resistencia Eléctrica Tipo Abrazadera (Solución B)

Son en su mayoría usadas en los extrusores debido a la facilidad inminente para su sujeción en las boquillas, existen de diversos tipos, pero en esencia son las mismas, su diferencia radica en el material usado para el aislamiento.

Características:

- Resistencias blindadas, no estancas, con envoltorio exterior en plancha de acero.
- Pueden incluirse agujeros o entalladuras. Pueden llevar termopar incorporado.
- Hasta 250°C: con aislamiento de mica. La carga de superficie máxima admisible es de 4W/cm².
- Más de 250°C: con aislamiento cerámico. La carga de superficie máxima admisible es de 9W/cm².

- Las conexiones pueden ser, con cables, con terminales roscados o con clavija de conexión.



Figura 65 Resistencias de Abrazadera

Fuente: (CRN, 2017)

Sistemas de Fluido Térmico (Solución C)

Es un calentamiento indirecto, en el cual se calienta un fluido de transferencia de calor de fase líquida, a partir de un circuito cerrado la energía es bombeada hasta llegar al destinatario de la energía. Entre los medios más comunes de transferencia térmica se encuentran aceite térmico, agua y glicol. Sus características son:

- El aceite térmico permite operar hasta temperaturas de 316°C con aceites térmicos y 427°C con ciertos sintéticos.
- Se trabajan con bajas presiones de acuerdo con la norma ASME Sección VII y no requieren en su mayoría de operación de personal con licencia para calderas.
- El agua es un medio de transferencia térmica ideal para calentamiento indirecto de hasta aproximadamente 149°C.

3.2.1.1. Evaluación y selección de alternativas

Para escoger la mejor alternativa se realiza la ponderación de criterios. En la (**Tabla 21**) se indican los criterios de selección. Después en las tablas siguientes se evalúa cada solución con los criterios y finalmente se selecciona una de las posibilidades.

Tabla 21

Criterios de selección para el sistema de calentamiento

Criterio	Eficiencia	Costo	Temperatura	Control	$\Sigma+1$	Ponderación
Eficiencia	-	5	2,5	0	8,5	0,25
Costo	0	-	0	2,5	3,5	0,10
Temperatura	2,5	5	-	2,5	11	0,32
Control	5	2,5	2,5	-	11	0,32
				Total	34	1,00

Tabla 22

Evaluación de Eficiencia para el sistema de calentamiento

Eficiencia	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma +1$	Ponderación
Solución A	-	0	5	6	0,33
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1,00

Tabla 23

Evaluación de Costo para el sistema de calentamiento

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	5	11	0,61
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1,00

Tabla 24*Evaluación de Temperatura para el sistema de calentamiento*

Temperatura	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	0	5	6	0,33
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1,00

Tabla 25*Evaluación de Control para el sistema de calentamiento*

Control	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	-	5	2,5	8,5	0,47
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	2,5	0	-	3,5	0,19
			Total	23	1,28

Tabla 26*Selección final del sistema de calentamiento*

	Eficiencia	Costo	Temperatura	Control	Σ	Prioridad
Solución A	0,083	0,061	0,106	0,1504	0,400	2
Solución B	0,153	0,033	0,1952	0,1952	0,576	1
Solución C	0,015	0,006	0,019	0,061	0,101	3
				Total	1,000	

La prioridad 1 resulta la Solución B (Resistencia Eléctrica Tipo Abrazadera), el cual se acopla mejor a los requerimientos para el extrusor de tornillo propuesto en el proyecto, a continuación, se presentan las características de la resistencia tipo abrazadera del proyecto.

Tabla 27*Especificaciones Técnicas Resistencia de Abrazadera*

Voltaje de Operación	110 VAC
Resistencia	113 ohmios
Potencia	140 watts
Diámetro Interno	34 mm
Longitud	60 mm



Figura 66 Resistencia tipo abrazadera

Aislante

Como aislante térmico se utilizó fibra cerámica debido a su bajo coeficiente de conductividad térmica a 300°C (0.005 W/m*°K), con los datos obtenidos anteriormente $Q = 84\text{W}$ se procede a realizar el cálculo del espesor del aislante para evitar pérdidas de flujo de calor.

$$e = \frac{\lambda}{Q} * (T_e - T_i) \quad (3.54)$$

$$e = \frac{0.005}{84} * (25 - 300)$$

$$e = 0.016 \text{ m} = 16\text{mm}$$



Figura 67 Fibra Cerámica

El resultado obtenido fue de un espesor de fibra cerámica de 16 mm, la longitud utilizado fue de 150 mm con el fin de abarcar toda el área de las resistencias, así como, el de la capa metálica

del exterior. A continuación, se muestra una imagen de la disposición de los elementos implementados en la extrusora.



Figura 68 Ubicación de los elementos en la extrusora

3.2.2. Subsistema 2.2. Instrumentación

La temperatura máxima de funcionamiento del extrusor alcanzará los 300°C, es necesario que el sensor utilizado posea este rango de medida, así también que presente características robustas para que las señales exteriores no interfieran en el buen funcionamiento del sensor.

3.2.2.1. Alternativas para el diseño

En el mercado nacional existen varios ejemplares de sensores de temperatura, se diferencian de acuerdo con el tipo de señal, rango, resolución, así como el costo de estos; entre ellos se destacan los siguientes:

LM35 (Solución A)

Este sensor presenta un rango de medición de -55 a 150 °C, presenta una salida lineal y 10 mV presenta por cada grado receptado. Su alimentación es de 4 a 30 V.

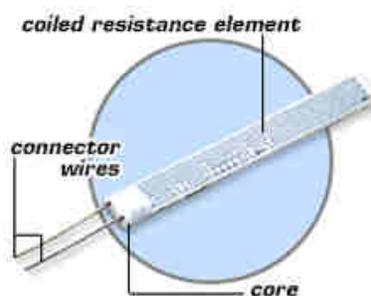


Figura 71 Diseño clásico de un sensor RTD

Fuente: (OMEGA, 2013)

3.2.2.2. Evaluación y selección de alternativas

Para escoger la mejor alternativa se realiza la ponderación de criterios. En la siguiente tabla se indican los criterios de selección. Después, en las tablas siguientes se evalúa cada solución con los criterios y finalmente se selecciona una de las posibilidades.

Tabla 28

Criterios de selección para el sensor de temperatura

Criterio	Costo	Resolución	Rango	Señal	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo	-	5	0	0	6	0,19
Resolución	0	-	0	0	1	0,03
Rango	2,5	5	-	5	13,5	0,43
Señal	5	5	0	-	11	0,35
				Total	31,5	1,00

Tabla 29

Evaluación de Costo para la selección del sensor de temperatura

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond
Solución A	-	5	5	11	0,61
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1,00

Tabla 30*Evaluación de Resolución para la selección del sensor de temperatura*

Resolución	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond
Solución A	-	2,5	5	8,5	0,47
Solución B	2,5	-	5	8,5	0,47
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1,00

Tabla 31*Evaluación de Rango para la selección del sensor de temperatura*

Rango	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond
Solución A	-	0	0	1	0,06
Solución B	5	-	2,5	8,5	0,47
Solución C	5	2,5	-	8,5	0,47
			Total	18	1,00

Tabla 32*Evaluación de Señal para la selección del sensor de temperatura*

Señal	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond
Solución A	-	0	0	1	0,06
Solución B	5	-	5	11	0,61
Solución C	5	0	-	6	0,33
			Total	18	1,00

Tabla 33*Selección Final del Sensor de temperatura*

	Costo	Resolución	Rango	Señal	Σ	Prioridad
Solución A	0,116	0,014	0,026	0,021	0,177	3
Solución B	0,063	0,014	0,202	0,2135	0,493	1
Solución C	0,014	0,002	0,202	0,116	0,334	2
				Total	1,000	

A partir de la evaluación de los requerimientos la solución B resulta la prioridad 1, es decir el sensor de temperatura seleccionado es la termocupla, la cual se adapta mejor a las características para el diseño. A continuación, se detalla las características de la termocupla tipo k utilizada.



Figura 72 Termocupla tipo K

Tabla 34

Características Termocupla tipo K

Temperatura de Operación	0-600°C
Blindaje Externo	Acero Inoxidable
Aislamiento Interno	Fibra de Vidrio
Longitud	2m
Precisión	± 2 a ± 6 °C

3.2.3. Subsistema 2.3. Circuito de Potencia

Para mantener la temperatura necesaria en el equipo se requiere un circuito capaz de regular la energía en cada una de las resistencias, de forma que la intensidad de calor emitida por cada resistencia varíe hasta llegar a la temperatura requerida por el polímero a extruirse. El circuito seleccionado utiliza la modulación por ancho de pulsos (PWM) para su funcionamiento, de esta

manera entrega la potencia necesaria para que las resistencias varíen su intensidad para lograr el control en las mismas.

El circuito utiliza un MOSFET junto con un puente de diodos para controlar el voltaje que llega a las resistencias mediante modulación por ancho de pulsos (PWM). El voltaje que circula por el MOSFET se utiliza para la activación de la compuerta la cual requiere un voltaje aplicado para entrar en funcionamiento. Para el aislamiento entre el circuito de control y el de potencia, así como para sincronizar el disparo con la frecuencia de la red (cruce por cero) se utiliza un optoacoplador.

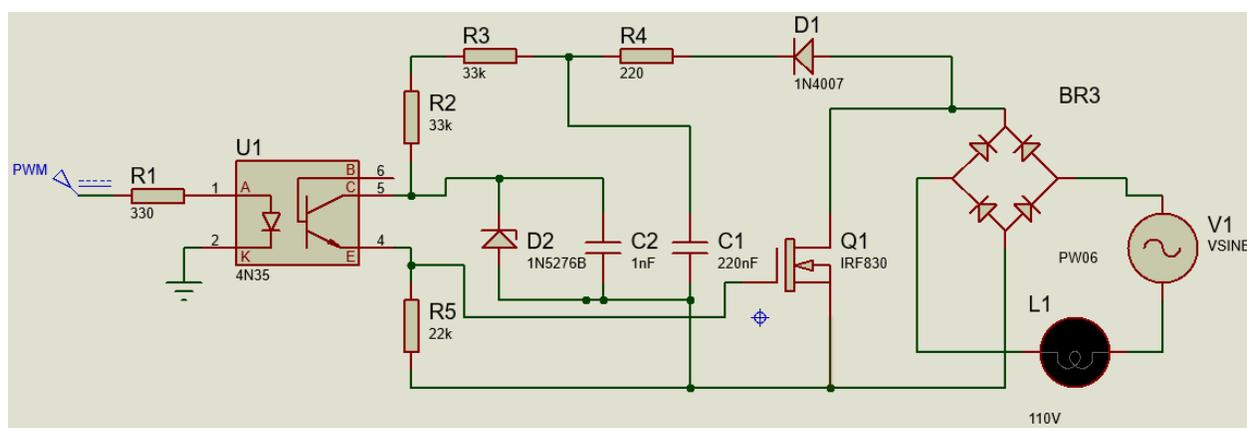


Figura 73 Circuito de Potencia

Tabla 35

Características del MOSFET IRF 830A

Parámetro	Valor	Unidad
Voltaje drain-source (V_{ds})	500	V
Resistencia drain-source (R_{ds})	1.5	Ω
Corriente drain (I_d)	4.5	A

En el circuito, L1 representa la resistencia de tipo abrazadera la cual será controlada mediante el valor PWM colocada en la entrada, los demás elementos utilizados en el circuito (resistencias, capacitores, diodos) se los utiliza para limitar la corriente, así como para mantener el voltaje en los dispositivos de manera que la conducción de la corriente del MOSFET se garantice en todo momento.

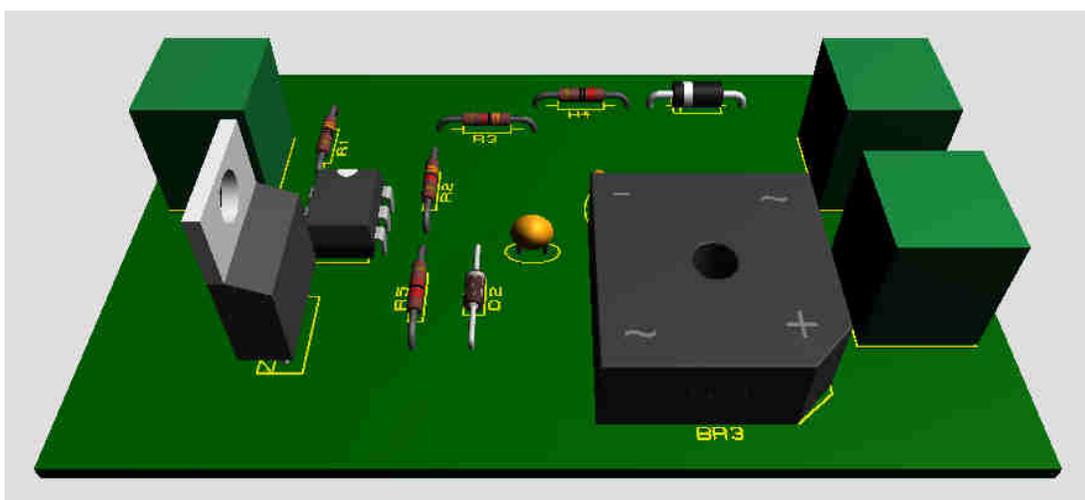


Figura 74 Esquema 3D del circuito diseñado

3.3. Módulo 3. Recolección de fibras

A continuación, se indican los componentes necesarios para la recolección de fibras; es necesario indicar que la producción de fibras se realiza sin ningún método (convección natural) para enfriar las fibras salientes como en el proceso convencional de una extrusora de plástico.

3.3.1. Subsistema 3.1. Fuente de alto voltaje

La fuente de alto voltaje es necesaria para crear el campo eléctrico, indispensable en la formación del cono de Taylor y la atracción de las fibras del polo positivo conectado a la aguja al polo negativo conectado al colector. La fuente de poder Genvolt 73030 (*Figura 75*) se encuentra disponible en el Laboratorio de Reología.

Tabla 36

Características Fuente de Poder Genvolt 73030

Voltaje de entrada	85 – 260 VAC
Voltaje de salida	0 – 30 kV
Máxima corriente de salida	1.0 mA
Potencia de salida	30 W
Polaridad	P / N
Eficiencia	> 75%

Fuente: (Genvolt, 2016)



Figura 75 Fuente Poder Genvolt 73030

Fuente: (Genvolt, 2016)

3.3.2. Subsistema 3.2. Colector

Para la recolección de fibras se usa un plato colector, de superficie plana y recubierto de aluminio (*Figura 76*). Al colector se conecta el polo negativo de la fuente para la generación del campo eléctrico, permitiendo que las fibras se adhieran a esta superficie.



Figura 76 Colector

3.4. Módulo 4. Control y monitoreo

3.4.1. Subsistema 4.1. Tarjeta de control

La tarjeta de control gobierna los actuadores, indicándoles cuando deben activarse y cuánto tiempo permanecer en ese determinado estado. Se busca una tarjeta que posea salidas digitales, PWM de acuerdo con el tipo de actuador, finalmente también se debe tomar en cuenta que sea compatible con el programa en el que se realizará la interfaz de usuario (HMI).

3.3.4.1 Alternativas para el diseño

En el mercado nacional existen varias tarjetas de control dependiendo de la necesidad del usuario sus características varían de acuerdo con el número de entradas y salidas, tipos de comunicación, programación, etc., entre ellas se destacan las siguientes:

Atmega328 (ARDUINO)

Es un microchip de alto rendimiento de 8 bits, pertenece a la familia de microcontroladores AVR. Combina una memoria flash de 32KB con capacidades para leer/escribir. Posee además una memoria EEPROM de 1KB, 32 registros de propósito general, 3 timers con modos de comparación, interrupciones externas e internas, un conversor A/D de 10 bits. El dispositivo opera entre 1.8 – 5.5 Voltios.



Figura 77 ATmega328

PIC16F877A

Posee un tiempo de 200 nanosegundos para ejecutar una instrucción, fácil de programar, es un microcontrolador de 8 bits de memoria CMOS, envuelve la robusta arquitectura de los PIC en un empaque de 40-44 pines (compatible con varias familias de microcontroladores). Contiene 256 bytes de memoria de datos EEPROM, 2 comparadores, 8 canales de conversores A/D de 10 bits, 2 pines PWM.

Estas características lo hacen ideal para aplicaciones en el sector industrial, automotriz, aplicaciones de consumo, etc.

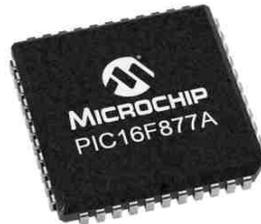


Figura 78 PIC 16F877A

Fuente: (MICROCHIP, 2018)

Raspberry PI

Es compatible con todos los sistemas operativos de la serie PI, con conector GPIO y los zócalos para cámaras y displays; trabaja con HDMI y conector microUSB para su funcionamiento. Posee 512 MB de RAM, con un procesador ARM 700Mhz, salida para audio y video.



Figura 79 Raspberry PI modelo A+

Fuente: (RASPBERRY PI FOUNDATION, s.f.)

3.3.4.2 Evaluación y selección de alternativas

Para escoger la mejor alternativa se realiza la ponderación de criterios. En la siguiente tabla se indican los criterios de selección. Después, en las tablas siguientes se evalúa cada solución con los criterios y finalmente se selecciona una de las posibilidades.

Tabla 37
Criterios de Selección para la tarjeta de control

Criterio	Costo	Programación	Implementación	Disponibilidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo	-	5	2,5	2,5	11	0,35
Programación	0	-	0	2,5	3,5	0,11
Implementación	2,5	5	-	2,5	11	0,35
Disponibilidad	2,5	2,5	0	-	6	0,19
				Total	31,5	1,00

Tabla 38
Evaluación de costo para la selección de la tarjeta de control

Costo	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond
Solución A	-	5	5	11	0,61
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1,00

Tabla 39
Evaluación de Programación para la selección de la tarjeta de control

Programación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond
Solución A	-	5	5	11	0,61
Solución B	0	-	5	6	0,33
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1,00

Tabla 40*Evaluación de Implementación para la selección de la tarjeta de control*

Implementación	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond
Solución A	-	5	2,5	8,5	0,47
Solución B	0	-	0	1	0,06
Solución C	2,5	5	-	8,5	0,47
			Total	18	1,00

Tabla 41*Evaluación de Disponibilidad para la selección de la tarjeta de control*

Disponibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	$\Sigma+1$	Pond
Solución A	-	2,5	5	8,5	0,47
Solución B	2,5	-	5	8,5	0,47
Solución C	0	0	-	1	0,06
			Total	18	1,00

Tabla 42*Selección Final de la Tarjeta de Control*

	Costo	Programación	Implementación	Disponibilidad	Σ	Prioridad
Solución A	0,214	0,067	0,165	0,089	0,535	1
Solución B	0,116	0,036	0,021	0,089	0,262	2
Solución C	0,021	0,007	0,165	0,011	0,204	3
				Total	1,000	

A partir de la evaluación de los requerimientos la solución A resulta la prioridad 1, es decir la tarjeta de control seleccionada es la ATmega328, la cual se adapta mejor a las características para el diseño. A continuación, se detalla las características de la tarjeta utilizada.

Tabla 43

Características Técnicas ATmega328 (Arduino)

Voltaje de Operación	5V
Voltaje de Entrada	7-12V
Voltaje de Entrada (Límite)	6-20 V
Pines para entrada/salida digital	14
Pines de entrada analógica	6
Corriente continua por pin IO	40 mA
Memoria Flash	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Frecuencia de Reloj	16 Hz

En la siguiente figura se visualiza la tarjeta de control, con el driver del motor a pasos DC para el control de la velocidad y por consiguiente la regulación del caudal necesario y la fuente de alimentación.



Figura 80 Controlador, driver y fuente de alimentación.

3.4.2. Subsistema 4.2. Controlador

3.6.2.1 Tipo de Controlador

El tipo de controlador determinará el comportamiento del sistema con el fin de alcanzar una determinada temperatura de acuerdo al polímero presente en el extrusor, de ahí deriva la importancia del controlador seleccionado. Existen varios tipos de controladores con sus ventajas y desventajas como a continuación se describe en la siguiente tabla:

Tabla 44
Ventajas y desventajas de los tipos de controladores

Controlador	Ventajas	Desventajas
ON – OFF	Control simple, no hay Offset	Overshoot y hunting
P	Overshoot y seguimiento inicial pequeños	Estabilización lenta
PI	Sin offset	Estabilización lenta
PD	Respuesta rápida	Offset
PID	Control preciso en procesos continuos	Difícil de ajustar

Fuente: (Balseca & Zambrano, 2017)

El controlador para el proyecto desarrollado será un proporcional-integral (PI), debido a la naturaleza lenta en sí de la temperatura, utilizará un error del $\pm 5\%$ en el estado estacionario. Adicionalmente, es útil la característica del controlador PI de no provocar sobre pico. El esquema del sistema de control del proyecto se presenta en la siguiente figura:

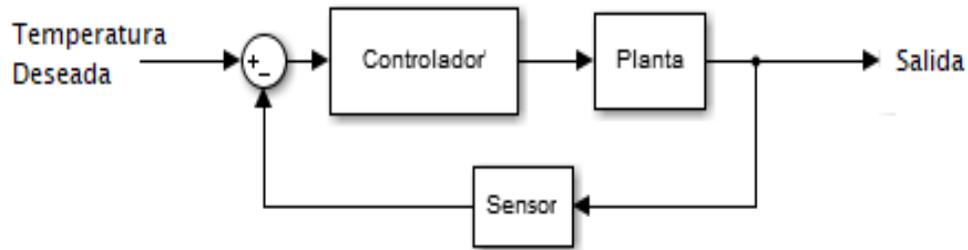


Figura 81 Diagrama del lazo de control

El Set Point del sistema es la temperatura deseada, éste se restará del valor de la temperatura dada por la termocupla tipo K para ingresar como señal de error al controlador PI, después mediante la variación del actuador en este caso el voltaje de la resistencia permitirá obtener en la salida la temperatura del polímero a extruir obteniéndose de esta manera un sistema controlado.

3.6.2.2 Obtención de la Planta

Para determinar la función de transferencia de la planta, se procedió a utilizar un software que permita identificar mediante una expresión matemática el comportamiento del sistema, a medida que esta expresión se acerque de mayor manera al comportamiento real, la acción del controlador será más eficaz. Al software se ingresan dos vectores: el primero es la entrada en este caso un escalón (5 V) y el segundo la salida que son los datos de la temperatura recopilados por la termocupla. Debido al comportamiento de los sistemas térmicos de presentar nulas o pocas oscilaciones y no requerir de excesiva exactitud se escogió un sistema de primer orden para la función de transferencia de la planta, la función obtenida es:

$$G(s) = \frac{101.2}{1565.4 s + 1}$$

A continuación, se presenta la gráfica de la respuesta de la planta sometida a un escalón. El tiempo de establecimiento es de 102 minutos.

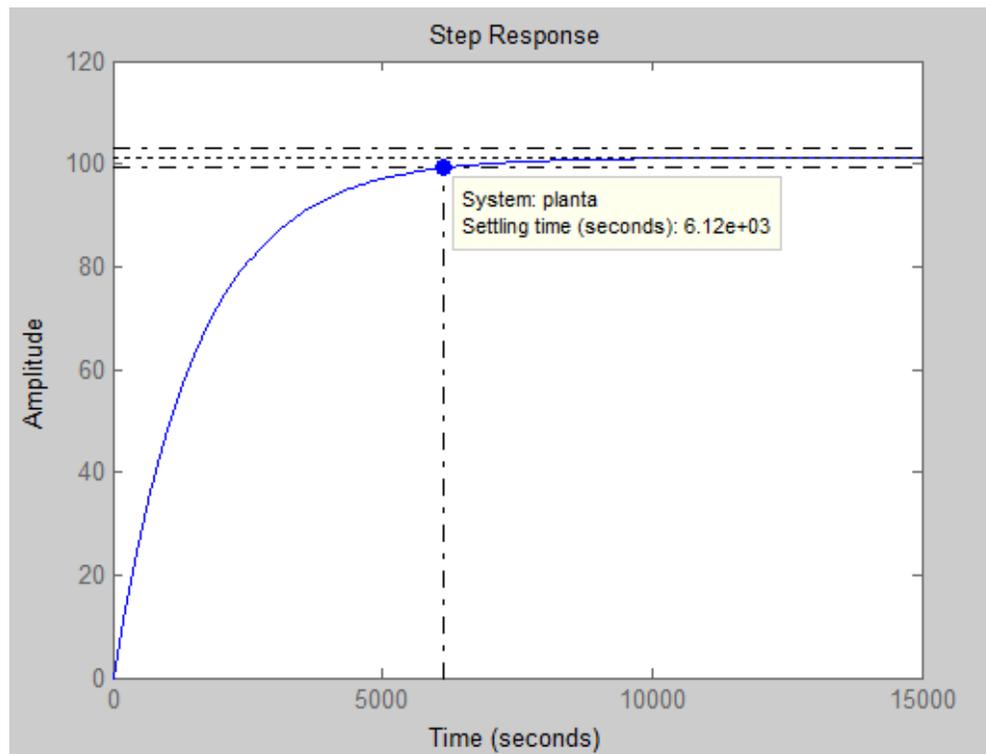


Figura 82 Respuesta de la planta a una entrada escalón

3.6.2.3 Diseño del controlador

Después de obtener la función de transferencia del sistema, se procede a realizar el diseño del controlador PI con los requerimientos planteados:

Error en estado estacionario: $\pm 5\%$

Tiempo de Establecimiento (τ) < 300 s

Función de transferencia del sistema

$$G(s) = \frac{101.2}{1565.4 s + 1}$$

Función de transferencia del controlador

$$C(s) = Kp + \frac{Ki}{s}$$

A continuación, se presenta el lugar de las raíces de la planta

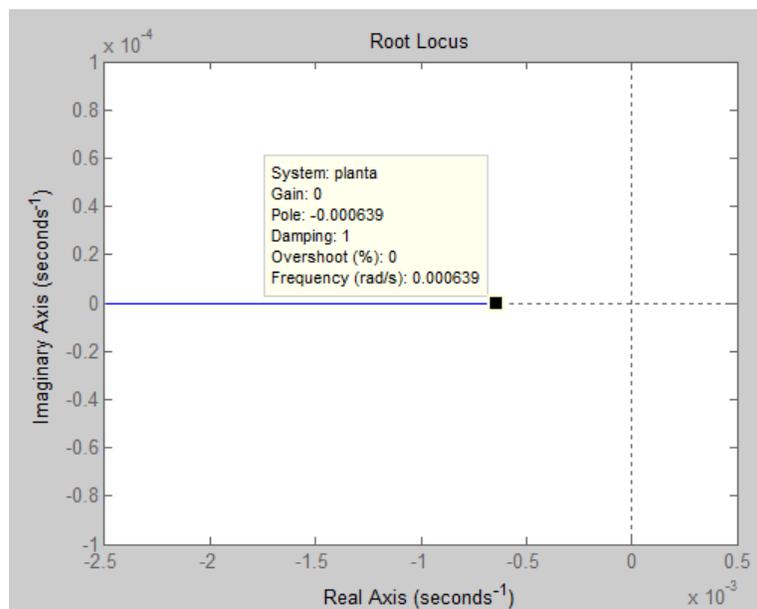


Figura 83 Lugar de las raíces de la planta

Para que $(\tau) < 300s$

$$\frac{k}{\tau s + 1}$$

$$\frac{k}{300 s + 1}$$

$$300 s + 1 = 0$$

$$s = -0.00083$$

Para obtener el polo se anula un polo con un cero.

$$\frac{Ki}{Kp} = 0.0006388$$

Para el valor de K_p se verifica que cumpla con la condición de magnitud del lugar de las raíces.

$$|1 + G_c * G|_s = 0$$

$$s + K_p * 0.064648 = 0$$

$$K_p = 0.2583$$

$$K_i = 0.000165$$

Por lo tanto, la función de transferencia del controlador es:

$$C(s) = 0.26 + \frac{0.00017}{s}$$

Finalmente, simulamos el sistema de control con los valores de las funciones de transferencia de la planta y del controlador para corroborar su funcionamiento.

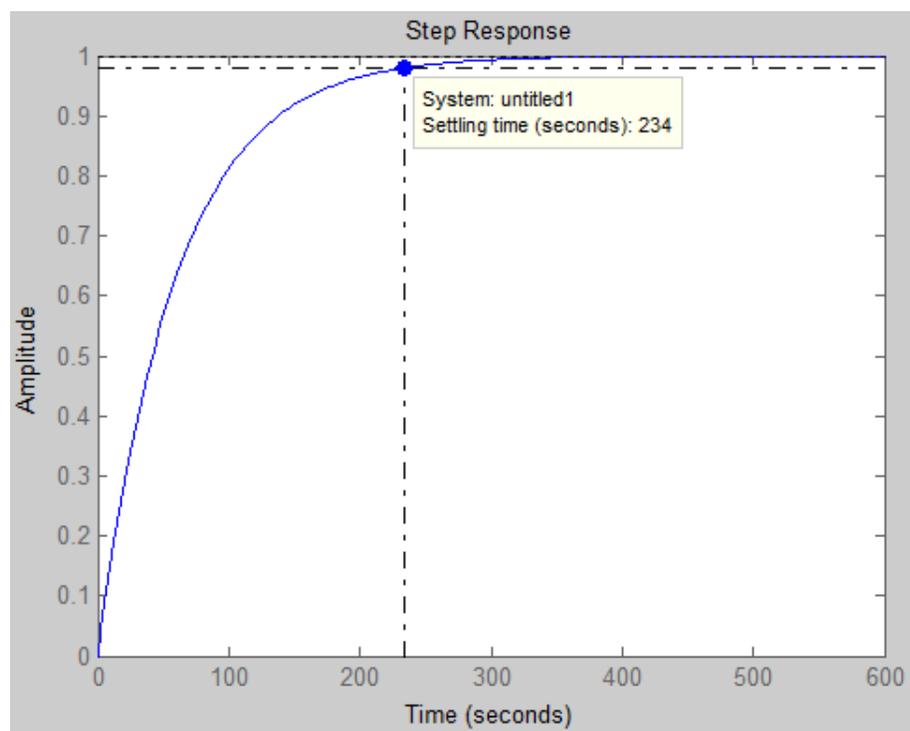


Figura 84 Funcionamiento del sistema con el controlador

Como se puede apreciar, el sistema se comporta de acuerdo a los parámetros de diseño, es decir, su error en estado estacionario está dentro del $\pm 5\%$, así como el tiempo de estabilización es de 234 segundos.

3.4.3. Subsistema 4.2. Interfaz HMI

La Interfaz Humano Máquina (HMI) muestra de forma visual e intuitiva el estado del proceso, proporcionando información en tiempo real al operario del funcionamiento del proceso para la toma de decisiones. Sus principales funciones son de monitoreo y control del equipo o del sistema.

Para el diseño del HMI se consideran recomendaciones o criterios establecidos en la guía GEDIS (Guía ergonómica de diseño de interfaces de supervisión):

- Arquitectura y navegación

La arquitectura del HMI permite reflejar de forma organizada la información del sistema, para que el operador acceda rápidamente a datos o controles. La arquitectura usada se muestra en la *Figura 85*.

TÍTULO	
INDICADORES DE ALARMAS	
PROCESO DE DATOS (CALIBRACIÓN)	RESULTADOS Y TABLAS
CONTROLADORES DE HMI	
LOGO DE LA EMPRESA	M. DE NAVEGABILIDAD
	FECHA Y HORA

Figura 85 Arquitectura del HMI

Para permitir al operario el manejo efectivo y sencillo del HMI, se establece la creación de varias pantallas donde la información se encuentre distribuida de acuerdo su funcionalidad. La distribución establecida se muestra en la **Figura 86**.



Figura 86 Navegabilidad del HMI

- Distribución de pantallas

El movimiento del ojo determina los puntos donde nuestra visión se enfoca, el movimiento se establece de arriba abajo y del lado izquierdo al derecho, considerando esto:

- La información más importante se ubica en la parte superior
- En el centro del HMI es el área de mayor visibilidad
- Los gráficos se posicionan mejor a la izquierda

- Color y texto

El color, es un indicativo visual que facilita el entendimiento del HMI. Por lo cual, se recomienda usar colores convencionales y conservadores. Los estándares usados:

- Limitar el uso de varios colores
- El color indica calidad, no cantidad

Colores:

- Fondo de pantalla: color neutro (gris)
- Temperatura (señal analógica): Marrón
- Texto: Negro

La identificación de elementos del HMI usa generalmente texto, o la información se muestra de forma textual, por lo que se ha establecido:

- No usar más de tres fuentes y tamaños de letras
- Alinear el texto de igual jerarquía
- No subrayar o sombrar información no necesaria

- Indicadores

Muestran el cambio de estado de equipos, como el encendido o apagado de motores y de la resistencia en el presente trabajo, establecidos por:

- Simples y visibles
- Borde oscuro

Estados:

- Encendido 
- Apagado 
- Alarma

Muestran el estado del equipo o proceso, pero primordialmente situaciones anómalas que requieran de la intervención del operario. De acuerdo con su prioridad se clasifican en críticas, advertencias o mensajes. Considerando:

- Evitar numerosas alarmas o mensajes
- El texto debe mostrar información relevante que ayude a identificar el problema
- Texto conciso y claro

Con las consideraciones mencionadas, se realiza el HMI para el control y monitoreo del extrusor donde se presenta la información de material, temperatura, caudal relevante del proceso y que permite al operario el manejo de las variables del proceso como de la extrusión en sí de material, el HMI consta de tres pantallas:

- Inicio

Pantalla inicial, que presenta la información general del proyecto. *Figura 87.*



Figura 87 Pantalla de Inicio

- Control

En esta pantalla se pueden manipular las variables de control, como el encendido y apagado de la resistencia eléctrica y del motor, seleccionar el material con el que se va a trabajar, apagar el sistema.

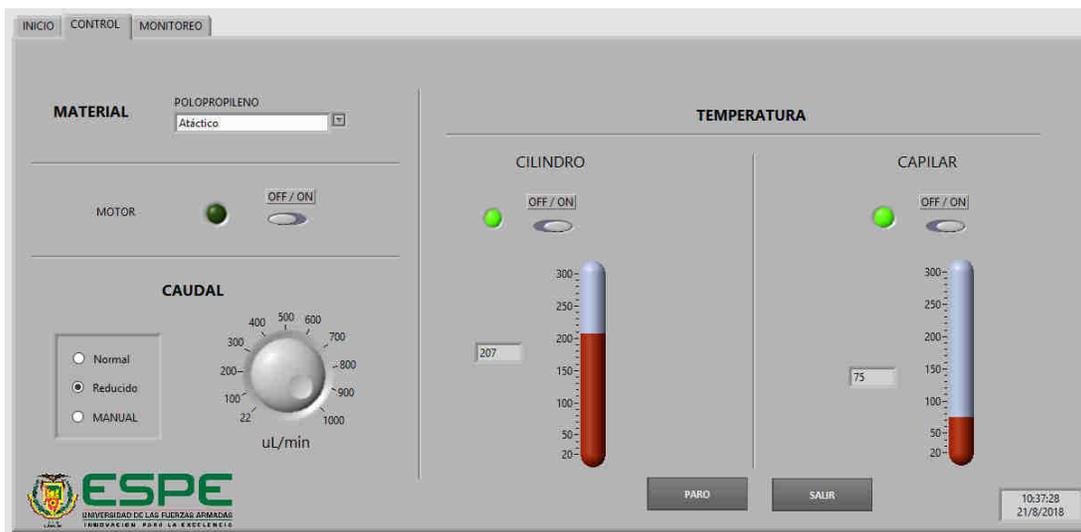


Figura 88 Pantalla de Control

- Monitoreo

La pantalla de monitoreo tiene como finalidad presentar de forma visual el estado del proceso, primero se conoce con el material que se trabaja, la temperatura y caudal correspondiente, y en la gráfica se representa el comportamiento de la temperatura en tiempo real.

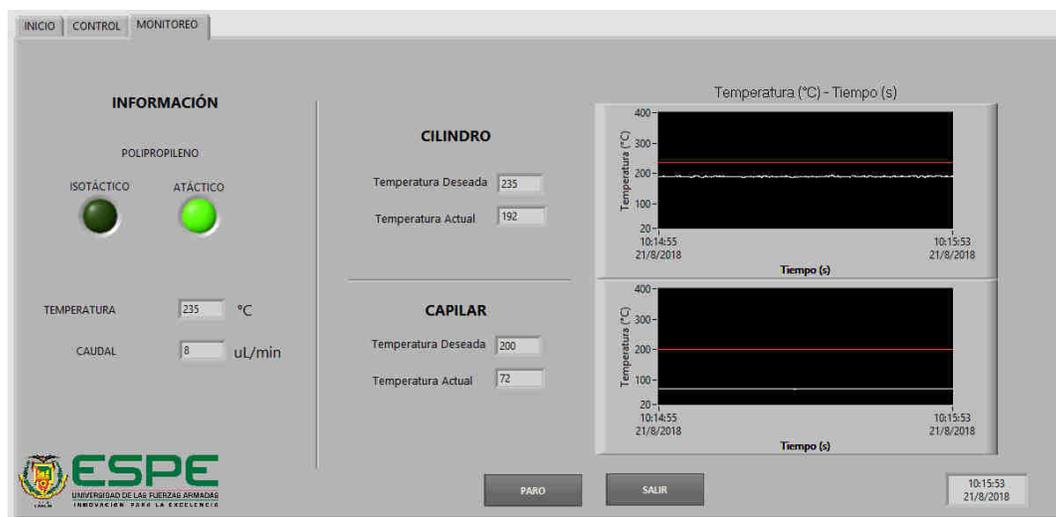


Figura 89 Pantalla de Monitoreo

El HMI presenta indicadores visuales y textuales para facilitar su uso, para el proceso de extrusión se establece el siguiente proceso:

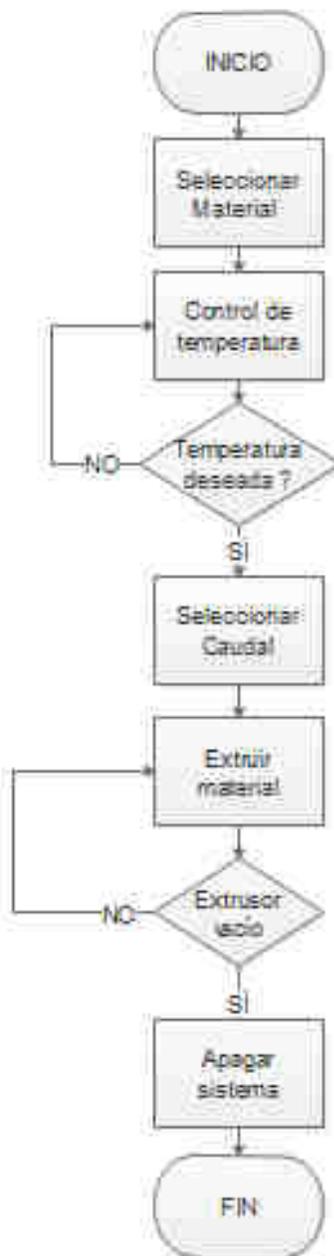


Figura 90 Diagrama de flujo del proceso de extrusión en HMI

Finalmente, se presenta el ensamble final en un software CAD y la implementación de los subsistemas.

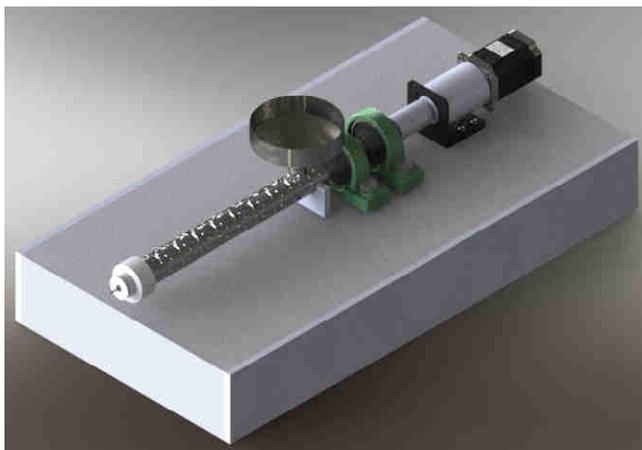


Figura 91 Ensamble del equipo



Figura 92 Implementación de los subsistemas

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se analizan las fibras obtenidas de las pruebas realizadas con la implementación del extrusor, el control de temperatura y velocidad.

4.1. Funcionamiento



Figura 93 Diagrama de flujo proceso de extrusión

El proceso de extrusión (*Figura 93*) inicialmente requiere de un precalentamiento dependiendo del material. Al obtener la temperatura se procede con el ingreso del material granulado (pellets) a través de la tolva, el material es conducido por el movimiento del husillo hasta la zona final, en el extremo se encuentra el capilar. La fuente de alto voltaje permite la formación del campo eléctrico entre el capilar y el colector y en consecuencia de fibras.

4.2. Pruebas

El funcionamiento del control de temperatura es comprobado con una gráfica de Temperatura [°C] vs Tiempo [s] *Figura 94*, al seleccionar el material deseado para trabajar se establece la temperatura deseada (Set Point). La gráfica muestra el comportamiento de la planta al control, es decir, el aumento de la temperatura y el establecimiento en la temperatura de trabajo para mantenerla durante todo el proceso.

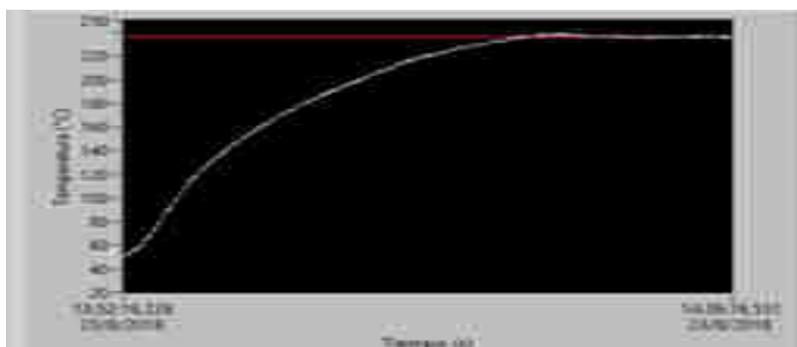


Figura 94 Temperatura [°C] vs Tiempo [s] del cilindro

En la *Figura 95*, se muestra el control de la temperatura en el capilar del extrusor, para evitar obstrucciones en la punta. La temperatura está relacionada con el material que se trabaja y se establece en el HMI.

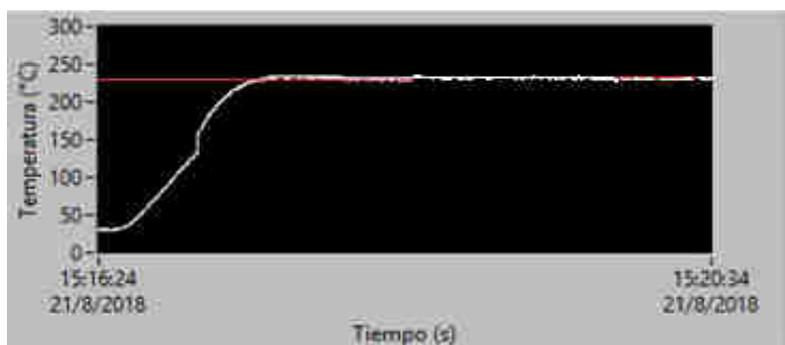


Figura 95 Temperatura [°C] vs Tiempo [s] del capilar

El campo eléctrico generado por la fuente de alto voltaje entre el capilar y el colector permite que la gota de material sufra una deformación denominada Cono de Taylor (**Figura 97**), llamada así por la forma cónica.



Figura 96 Equipo para la producción de microfibras

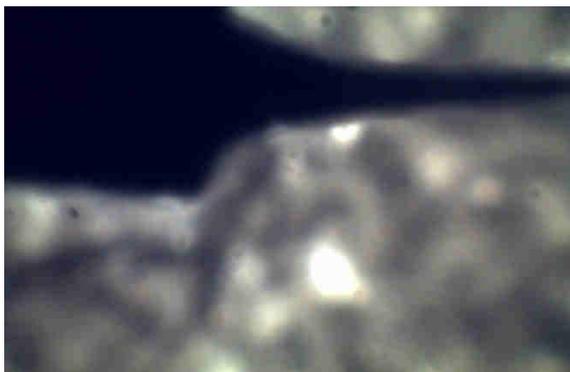


Figura 97 Cono de Taylor

4.3. Análisis

Con el polipropileno atáctico e isotáctico se realizaron varias pruebas variando las configuraciones de las variables de proceso, hasta lograr que las fibras se obtengan de modo continuo. Para cada muestra se detalle los parámetros empleados, así como los diámetros obtenidos mediante microscopía, se utilizó el microscopio óptico Olympus SZ51 disponible en el laboratorio de microscopía de Biotecnología en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

Tabla 45

Parámetros de prueba A

Material	Polipropileno
Tipo	Isotáctico
Temperatura de fusión [°C]	160 – 180
Temperatura de trabajo [°C]	245
Voltaje [kV]	13.5
Distancia [cm]	7
Temperatura ambiente [°C]	22.7
Caudal [μ l/min]	10
Humedad del ambiente [%]	43
Diámetro [μ m]	22.2 – 39.8



Figura 98 Fibras obtenidas prueba A

Con los parámetros previamente indicados se obtuvieron fibras discontinuas de diámetros entre 22.2 μm a 39.8 μm , con un capilar de cobre de 0.8 mm, para la producción de fibras se utilizó polipropileno isotáctico reciclado; debido a su impureza se observa que las fibras resultaron con roturas y puntos de material (bits).



Figura 99 Microscopía de las fibras en la prueba A

Tabla 46*Parámetros de prueba B*

Material	Polipropileno
Tipo	Isotáctico
Temperatura de fusión [°C]	160 – 180
Temperatura de trabajo [°C]	245
Voltaje [kV]	13.5
Distancia [cm]	5
Temperatura ambiente [°C]	21.9
Caudal [μ l/min]	10
Humedad del ambiente [%]	43
Diámetro [μ m]	32.6 – 35.1

En esta prueba se cambió la distancia del colector al capilar a 5 cm con respecto a la anterior prueba, esto resultó en fibras de mayor diámetro de 30.6 μ m a 35.1 μ m. Las fibras fueron más continuas que las anteriores, sin embargo, aún presentan rupturas de las fibras con lo que da lugar a puntos de polímero en las fibras (bits).

**Figura 100** Fibras obtenidas prueba B



Figura 101 Microscopía de las fibras en la prueba B

Tabla 47

Parámetros de prueba C

Material	Polipropileno
Tipo	Isotáctico
Temperatura de fusión [°C]	160 – 180
Temperatura de trabajo [°C]	245
Voltaje [kV]	12.5
Distancia [cm]	6
Temperatura ambiente [°C]	22.7
Caudal [μ l/min]	12
Humedad del ambiente [%]	43
Diámetro [μ m]	30.8 – 40.6

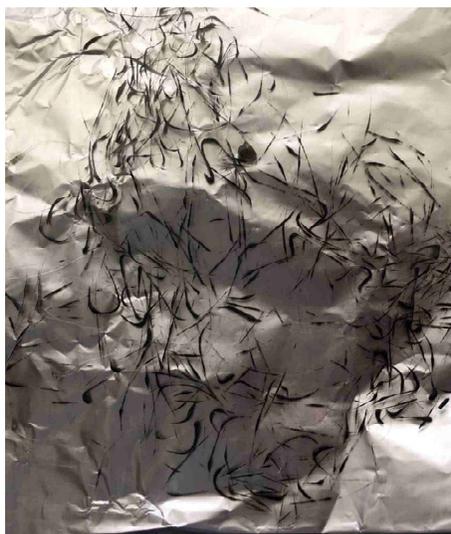


Figura 102 Fibras obtenidas prueba C

El capilar de cobre de 0.8 mm se cambió para esta prueba por un capilar de acero inoxidable de 2 mm, el caudal se aumentó a 12 ul/min, a pesar de ello, se obtuvieron fibras de menor diámetro entre 30.8 μm a 40.6 μm y con pocas rupturas de fibras.



Figura 103 Microscopía de las fibras en la prueba C

Tabla 48*Parámetros de prueba D*

Material	Polipropileno
Tipo	Atáctico
Temperatura de fusión [°C]	160 – 180
Temperatura de trabajo [°C]	235
Voltaje [kV]	11
Distancia [cm]	8
Temperatura ambiente [°C]	21.4
Caudal [μ l/min]	10
Humedad del ambiente [%]	39
Diámetro [μ m]	43.2 – 60.2

**Figura 104** Fibras obtenidas prueba D

Para la prueba con el propileno isotáctico, se mantuvo el capilar de acero inoxidable de 2 mm y cambiando la distancia del colector al capilar, así como el voltaje aplicado ahora de 12.5 kV, se pudo obtener fibras continuas de material, aunque con diámetros mayores entre 60.2 μ m a 80.7 μ m a un caudal de 10 μ l/min.



Figura 105 Microscopía de las fibras en la prueba D

Tabla 49

Parámetros de prueba E

Material	Polipropileno
Tipo	Atáctico
Temperatura de fusión [°C]	160 – 180
Temperatura de trabajo [°C]	235
Voltaje [kV]	12
Distancia [cm]	8
Temperatura ambiente [°C]	22.5
Caudal [μ l/min]	10
Humedad del ambiente [%]	37
Diámetro [μ m]	36.5 – 58.9



Figura 106 Fibras obtenidas prueba E

Al cambiar el voltaje aplicado al capilar de 12.5 kV a 11 kV, se obtuvieron fibras de menor diámetro entre 42.5 μm a 58.9 μm , el caudal utilizado en esta prueba fue de 10 $\mu\text{l}/\text{min}$. Los parámetros ambientales en las pruebas no son excesivamente distantes uno de otro para cada una de las pruebas, sin embargo, las fibras resultantes son diferentes en cada experimento.



Figura 107 Microscopía de las fibras en la prueba E

Con las pruebas realizadas se realizó una comparación entre dos parámetros importantes en la creación de las microfibras: la distancia del colector al capilar (TDC) y el voltaje aplicado. En el caso de la distancia del colector al capilar se tomaron tres distancias: 500, 600 y 700 mm. Para estas distancias se mantuvo un caudal de 10 [$\mu\text{l}/\text{min}$] y el voltaje aplicado fue de 13 kV. Los resultados se presentan en la siguiente figura.

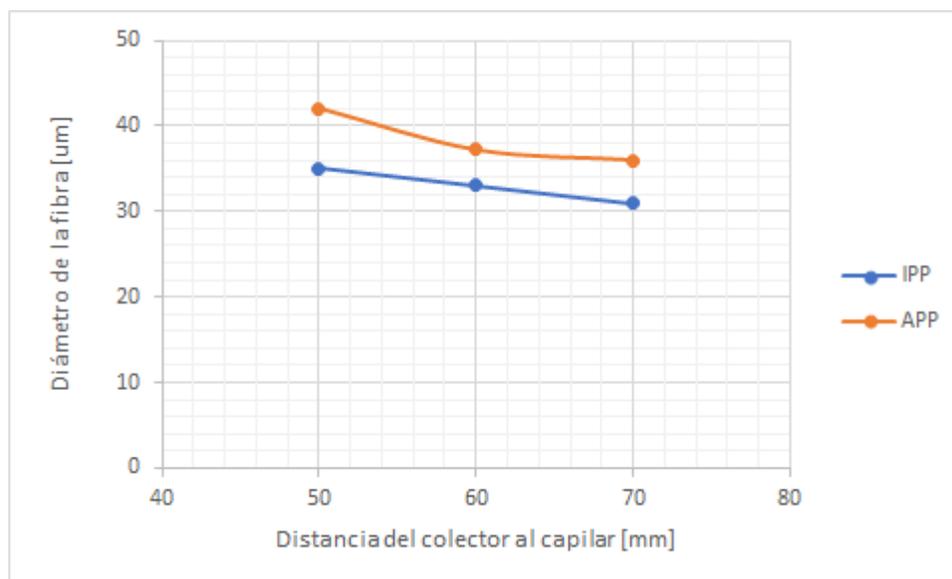


Figura 108 Efecto de la distancia del colector al capilar en el diámetro de las fibras

Como se aprecia en la figura las microfibras de polipropileno isotáctico (IPP) decrecen en su diámetro conforme la distancia es mayor; así mismo las fibras de polipropileno atáctico (APP) tienen un diámetro menor al alejar el colector del capilar, aunque estas fibras son de mayor tamaño.

En lo referente al voltaje aplicado tiene relación directa con el campo eléctrico producido para crear las fibras, en los experimentos se varió el voltaje aplicado en valores de 10 a 15 [kV]; los resultados de utilizar 8 cm de distancia entre colector y capilar y caudal de 10 [$\mu\text{l}/\text{min}$] se presentan a continuación.

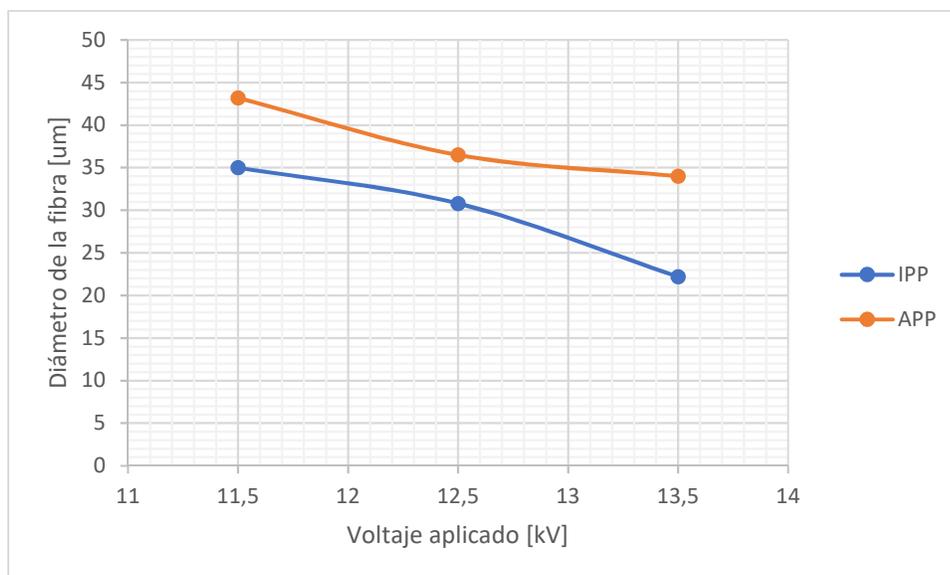


Figura 109 Efecto del voltaje aplicado sobre el diámetro de las fibras

Los diámetros de las fibras tanto del polipropileno isotáctico (IPP) y del polipropileno atáctico (APP) disminuyen conforme se aumenta el voltaje aplicado, los factores ambientales en las pruebas variaban por lo que se debería mantenerlos de alguna manera constantes para obtener mejores resultados.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se diseñó y construyó un equipo para la producción de microfibras poliméricas a través de la técnica de melt electrospinning. El sistema es capaz de utilizar polímeros con puntos de fusión de hasta 300°C, usa un extrusor de husillo el cual permite obtener caudales desde 8 ul/min hasta 4.25 ml/min. Además, consta de una interfaz HMI para monitoreo y control del proceso en tiempo real.
- Las fibras poliméricas obtenidas poseen diámetros desde 22.2 um a 40.6 um usando polipropileno isotáctico y con el propileno atáctico los diámetros varían de 36.5 um hasta 60.2 um las mejores fibras se obtuvieron a partir de pellets de polipropileno atáctico una distancia de 8 cm desde la punta del capilar al colector, utilizando un voltaje de 11 kV y un caudal de 10 ul/min.
- La evidencia demuestra que con diferentes condiciones ambientales (humedad y temperatura) las fibras poliméricas tienen características diferentes en su formación, diámetros resultantes y continuidad, aún con los mismos parámetros de configuración

del equipo, por lo que se determina que el medio ambiente en el que se obtengan las fibras necesita ser controlado para obtener fibras de iguales características.

- La implementación del controlador PI para la temperatura permite que el sistema se estabilice en un tiempo de 234 segundos, con un error en estado estacionario de $\pm 5\%$, para el caudal suministrado el motor gira a 3 rpm para suministrar 8 ul/min, por el contrario, el máximo caudal es de 4.25 ml/min cuando el motor gira a 15 rpm.
- El interfaz del equipo controla el funcionamiento de la máquina, mediante el accionamiento del motor para que el husillo empiece a extraer polímero hacia el capilar; de la misma manera, controla el encendido y apagado de las niquelinas para alcanzar la temperatura respectiva de cada polímero, se utilizó la guía de diseño para HMI, GEDIS.

5.2. Recomendaciones

- El uso de materiales puros influye en la obtención de las fibras poliméricas, se recomienda reemplazar el uso de polipropileno reciclado por polímeros puros que garanticen las propiedades del material.
- En el desarrollo de las pruebas se configuran los parámetros como temperatura, caudal, voltaje, distancia del colector, entre otros; cada uno en un rango de trabajo, es necesario realizar una optimización de los parámetros a través de matrices de Taguchi u otro método que permita obtener mejores resultados.

- Para un control superior del proceso, se puede agregar un tratamiento previo del material antes del ingreso al extrusor, adicionalmente controlar la temperatura en la zona de alimentación del extrusor.

5.3. Trabajos futuros

- Existen varios tipos de colectores utilizados en electro spinning, la literatura indica que la calidad de las fibras es distinta con cada tipo, en este proyecto se desarrolló con un colector plano y fijo, se plantea la variación a un colector móvil junto con la construcción de un extrusor con dos husillos para obtener fibras de materiales compuestos, la caracterización determinará como resultan las propiedades de las fibras resultantes.

Bibliografía

- Angamma, C., & Jayaram, S. (6 de January de 2011). The Effects of Electric Field on the Multijet Electrospinning Process and Fiber Morphology. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 47, 1028-1035. doi:10.1109/TIA.2010.2103392
- Arian. (2010). *Arian Control & Instrumentation*. Obtenido de <http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf>
- Balseca, L., & Zambrano, C. (2017). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN CONTROL DE TEMPERATURA Y EXTRUSOR DE TERMOPOLÍMEROS PARA LA OBTENCIÓN DE MICROFIBRAS A TRAVÉS DEL PROCESO DE MELT-ELECTROSPINNING*. Trabajo de Titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Ciencias de la Energía y Mecánica, Sangolquí. Recuperado el 12 de Agosto de 2018
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (2012). *Tecnología de Polímeros: Procesado y Propiedades* (Vol. 1). Universidad de Alicante.
- Bhardwaj, N., & Kundu, S. C. (Junio de 2010). Electrospinning: A fascinating fiber fabrication technique. *Avances en Biotecnología*, 28(3), 325-347. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.01.004>
- Brown, T. D. (2015). *Melt Electrospinning Writing*. PhD Thesis, Universidad de la Tecnología de Queensland, Facultad de Ciencia e Ingeniería, Brisbane, Australia. Recuperado el 13 de Octubre de 2017
- Burguer, C., Hsiao, B., & Chu, B. (2006). Nanofibrus materials and their applications. *Annu Rev Mater*, 36, 333-368.
- C.W. Brabender® Instruments, Inc. (2011). *Brabender CWB*. Obtenido de <http://www.cwbrabender.com/>
- Caracciolo, P., Cortez, P., Buffa, F., Montini, F., Cuadrado, T., & Abraham, G. (2011). Pequeñas fibras, grandes aplicaciones. *Instituto de Investigaciones en Ciencia y Tecnología de Materiales*, 21(121), 57-64.
- Chung, C. I. (2000). *Extrusion of Polymers Theory and Practice* (Vol. Segunda Edición). Hanser. Recuperado el 23 de Octubre de 2017

- CRN. (2017). *CRN Tecnopart S. A.* Obtenido de <http://www.crntecnopart.com/index.php/es/productos/res-equip-cal/resistencias-abrazadera>
- Cuadros, Á. (2011). *REconstrucción y reconversión de una máquina de extrusión soplado para el Laboratorio de Procesamiento de Plásticos*. Tesis de Pregrado, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Dalton, P., & Hutmacher, D. (2011). Melt Electrospinning. *Chemistry-An Asian*, 6(1), 44-56.
- Dalton, P., Grafahrend, D., Klinkhammer, K., Klee, D., & Möller, M. (2007). Electrospinning of polymer melts: Phenomenological observations. *Polymer*, 48.
- Dasdemir, M., Topalberikoglu, M., & Demir, A. (2013). Electrospinning of thermoplastic polyurethane microfibers and nanofibers from polymer solution and melt. *Applied Polymer Science*, 127(3), 1901-1908.
- De las Heras, S. (2012). *Mecánica de fluidos en Ingeniería*. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.3/36608/9788476539361.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Deng, R., Liu, Y., Xie, P., Luo, L., & Yang, W. (2009). Melt Electrospinning of Low-Density Polyethylene Having a Low-Melt Flow Index. *Applied Polymer Science*, 114, 166-175.
- Díaz del Castillo, F. (2012). *Lecturas de Ingeniería 20: Introducción a los nanomateriales*. Cuautitlán: Departamento de Ingeniería, Laboratorio de Tecnología de Materiales.
- Duque, L., Rodríguez, L., & López, M. (2013). Electrospinning: La era de las nanofibras. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 10-27.
- Espinoza, U. (2016). *Principios de diseño cinemático aplicados a la reinterpretación del colector de fibras de la técnica de electrohilado*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Ficalora, J. P., & Cohen, L. (2009). *Quality Function Deployment and SIX SIGMA, A QFD Handbook*. Crawfordsville, Indiana: Prentice Hall.
- Flores, L. (2013). *Máquina Extrusora para reciclaje de Plástico*. Tesis de Pregrado, Ibarra.
- Formhals, A. (2 de Octubre de 1934). *US Patente n° 1975504 A*.

- García, N. (2013). Electrospinning: una técnica fascinante para la obtención de nanofibras poliméricas. *Plásticos Modernos*, 105(677), 166-173.
- Genvolt. (2016). *Genvolt - High Voltage Power Supplies*. Obtenido de <https://www.genvolt.com>
- Goodfellow. (2017). *Información sobre el material*. Obtenido de Goodfellow50: <http://www.goodfellow.com>
- Greiner, A., & Wendorff, J. (2007). Electrospinning: a fascinating method for the preparation of ultrathin fibers. *Angewandte Chemie International Edition*, 46, 5670-5703.
- Hagiwaba, X., Ohi-Machi, O., & Ku. (1929). *Japón Patente n° 1699615*.
- Hassounah, I. (2012). *Melt Electrospinning of Thermoplastic Polymers*. Universidad Técnica de Aquisgrán, Renania del Norte - Westfalia, Alemania.
- Hernández, A. (2015). *Cuantificación de propiedades mecánicas y químicas del polipropileno usando espectroscopia de resonancia magnética nuclear protónica*. Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia.
- Huamani, E. (2011). *Síntesis y caracterización de nano y microfibras de PVA/Plata fabricados por la técnica de electrospinning para la descontaminación de agua*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Kintel. (s.f.). Obtenido de <http://www.kintel.com.mx/resistencias-tipo-tubular/>
- Ko, J. (2014). *Melt electrospinning using Polycaprolactone (PCL) polymer for various applications: Experimental and Theoretical analysis*. Universidad de Victoria, Victoria, Canadá.
- Kong, C. S., Jo, K. J., Jo, N. K., & Kim, H. S. (2009). Effects of the Spin Line Temperature Profile and Melt Index of Poly(propylene) on Melt-Electrospinning. *Polymer Engineering and Science*, 391-396.
- Kopeliovich, D. (22 de Noviembre de 2014). *SubsTech*. Obtenido de Substances & Technologies: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=extrusion_of_polymers
- Larrondo, L., & Manley, S. J. (1981). Electrostatic fiber spinning from polymer melts. III. Electrostatic deformation of a pendant drop of polymer melt. (P. P. Edition, Ed.) *Polymer Science*, 19(6), 933-940. Recuperado el 16 de Octubre de 2017

- Leyva, A. G. (2007). *Síntesis y caracterización de nano-estructuras de óxidos de metales de transición*. Tesis para optar al título de Doctor en , Universidad Nacional de General San Martín, Instituto de Tecnología.
- Li, H., & Yang, W. (24 de Marzo de 2016). *Electrospinning Technology in Non-Woven Fabric Manufacturing*. doi:10.5772/62200
- Lyons, J. (2004). *Melt-electrospinning of Thermoplastic Polymers: An Experimental and Theoretical Analysis*. Drexel University, Filadelfia, EEUU.
- Lyons, J., Li, C., & Ko, F. (2004). Melt-electrospinning part I: processing parameters and geometric properties. *Polymer*, 7597-7603.
- Marín, P., & Martínez, P. (2009). *Diseño y estudio de una máquina de Electrospinning*. Proyecto / Trabajo final de carrera, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.
- MICROCHIP. (2 de Febrerp de 2018). Recuperado el 28 de Febrero de 2018, de <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega328>
- Nayak, R., Kyratzis, I. L., Truong, Y. B., Padhye, R., & Arnold, L. (2012). Melt-Electrospinning of polypropylene with conductive additives. *Materials Science*, 47, 6387 - 6396.
- Nayak, R., Padhye, R., Kyratzis, I. L., Truong, Y. B., & Arnold, L. (2013). Effect of viscosity and electrical conductivity on the morphology and fiber diameter in melt electrospinning of polypropylene. *Textile Research Journal*, 83(6), 606-617.
- Ngiam, M., Ramakrishna, S., Raghunath, M., & Chan, C. K. (2007). Nanofiber patent landscape. *Recent Patents on Nanotechnology*, 1(2), 137-144.
- OMEGA. (2013). *OMEGA*. Obtenido de A Spectris Company: <https://es.omega.com/prodinfo/pt100.html>
- Open Course Ware. (2008). *Plásticos*. Recuperado el 25 de Octubre de 2017, de Universidad de Salamanca: <http://ocw.usal.es/eduCommons/enseñanzas-tecnicas/materiales-ii/contenidos/PLASTICOS.pdf>
- Patagoniatec. (2015). *Patagoniatec Blog*. Obtenido de <http://saber.patagoniatec.com/sensor-de-temperatura-lm35-arduino-argentina-ptec/>
- Pérez, G. (s.f.). *ESPECTROMETRÍA.COM*. Recuperado el 25 de Octubre de 2017, de https://www.espectrometria.com/espectrometra_infrarroja

- Persano, L., Camposeo, A., Tekmen, C., & Pisignano, D. (8 de Enero de 2013). Industrial Upscaling of Electrospinning and Applications of Polymer Nanofibers: A Review. *Macromolecular Materials and Engineering*, 298, 504-520. doi:10.1002/mame.201200290
- Ramakrishna, S., Fujihara, K., Teo, W.-E., & Teik-Cheng Lim, Z. M. (2005). *An Introduccion to Electrospinning and Nanofibers*. Singapur: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Rangkupan, R., & Reneker, D. (2003). Electrospinning Process of Molten Polypropylene in Vacuum. *Metals, Materials and Minerals*, 12(2), 81-87.
- RASPBERRY PI FOUNDATION. (s.f.). *RASPBERRY PI*. Recuperado el 28 de Febrero de 2018, de <https://www.raspberrypi.org/>
- Rodamientos Bulnes. (2014). *Catálogo de Soportes*.
- Rutledge, G., & Fridrikh, S. (2007). Formation of fibers by electrospinning. *Advanced drug delivery reviews*, 1384-1391.
- Savgorodny, V. K. (1973). *Transformación de Plásticos*.
- SAX Soluciones Analíticas. (02 de 09 de 2013). *Microscopía Electrónica de Barrido*. Obtenido de http://www.edinetwork.net/w8/z/030/index.asp?seccion1=contenido&id_web=252&sec=7&id_articulo=888
- SENPLADES. (21 de Julio de 2017). *Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo*. Obtenido de <http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/07/Plan-Nacional-para-el-Buen-Vivir-2017-2021.pdf>
- Senturk-Ozer, S., Ward, D., Gevgilili, H., & Kalyon, D. M. (2013). Dynamics of Electrospinning of Poly (caprolactone) via a Multi-Nozzle Spinneret Connected to a Twin Screw Extruder and Properties of Electrospun Fibers. *Polymer Engineering and Science*, 1463-1474.
- Skoog, D., Leary, J., & Holler, F. J. (1998). *Principios de Análisis Instrumental*. McGraw-Hill.
- Universidad de Alicante. (s.f.). *Servicios Técnicos de Investigación*. Recuperado el 25 de Octubre de 2017, de <https://sstti.ua.es/es/instrumentacion-cientifica/unidad-de-rayos-x-de-monocristal-y-espectroscopias-vibracional-y-optica/espectroscopia-ultravioleta-visible.html>
- Universidad de Vigo. (29 de Junio de 2015). *Atlas de histología vegetal y animal*. Recuperado el 25 de Octubre de 2017, de <https://mmegias.webs.uvigo.es/6-tecnicas/6-electronico.php>

Universidad Politécnica de Valencia. (2012). *Servicio de Microscopía Electrónica*. Obtenido de <http://www.upv.es/entidades/SME/info/753329normalc.html>

Wee-Eong, T. (27 de Abril de 2013). *Electrospin Tech*. Recuperado el 18 de Octubre de 2017, de <http://electrospintech.com/meltspin.html#.Wee2hTBrzIU>

Yao, J., Bastiaansen, C., & Peijs, T. (30 de Abril de 2014). High Strength and High Modulus Electrospun Nanofibers. *Fibers*, 2, 158-187. doi:10.3390/fib2020158

Zhmayev, E., Zhou, H., & Joo, Y. (2008). Modeling of non-isothermal polymer jets in melt electrospinning. *Mecánica de Fluidos No-Newtonianos*, 153(2), 95-108.

Zhou, F., Gong, R., & Porat, I. (2009). Mass production of nanofibre assemblies by electrostatic spinning . *Polymer International*, 58, 331-342.

Zhou, H. (2007). *Electrospun fibers from both solution and melt: Processing, structure and property*. Universidad Cornell, Nueva York, EEUU.

Zhou, H., Green, T., & Joo, Y. (2006). The thermal effects on electrospinning of polylactic acid melts. *Polymer*, 47(21), 7497-7505.