



**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, CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN  
CONTROL DE TEMPERATURA Y EXTRUSOR DE  
TERMOPOLÍMEROS PARA LA OBTENCIÓN DE MICROFIBRAS  
A TRAVÉS DEL PROCESO DE MELT-ELECTROSPINNING**

**AUTORES:**

**BALSECA CAMPAÑA LORENA VANESSA  
ZAMBRANO CARTAGENA LUVY CAROLINA**

**DIRECTOR:**

**CARRIÓN MATAMOROS, LUIS MIGUEL**

**SANGOLQUÍ**

**2017**

**CERTIFICADO TUTOR****ESPE**  
**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS**  
**INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA****Certificación de la elaboración del  
proyecto**

Certifico que el trabajo de titulación, "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". Fue realizado en su totalidad por las señoritas Lorena Vanessa Balseca Campaña y Luvy Carolina Zambrano Cartagena, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniera Mecatrónica.

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Luis Carrión", escrita sobre una línea horizontal.

**Ing. Luis Carrión****DIRECTOR**

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD



### Autoría de responsabilidad

Nosotras, Lorena Vanessa Balseca Campaña, con cédula de identidad N° 1722174073, y Luvy Carolina Zambrano Cartagena con cédula de identidad N°1724948623; declaramos que este trabajo de titulación “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” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Lorena Balseca", acompañada de dos estrellas azules.

Lorena Vanessa Balseca Campaña

CC 1722174073

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Luvy Carolina Zambrano", acompañada de una línea horizontal.

Luvy Carolina Zambrano Cartagena

CC 1724948623

## AUTORIZACIÓN



## Autorización

Nosotras, Lorena Vanessa Balseca Campaña y Luvy Carolina Zambrano Cartagena, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución del presente trabajo con el tema: "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", cuyos contenidos son de nuestra responsabilidad y autoría.

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Lorena Balseca", con un pequeño símbolo de estrella a la derecha.

Lorena Vanessa Balseca Campaña

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir "Luvy Carolina", con un símbolo de estrella a la derecha.

Luvy Carolina Zambrano Cartagena

## DEDICATORIA

*A mis padres Sonia y Carlos que son un pilar fundamental en mi vida y sin su apoyo no habría alcanzado esta meta.*

*A mis hermanas Karol y Alejandra para servir de ejemplo y sepan que cuando se proponen algo siempre lo van a lograr.*

*A Eduardo mi novio, mi complemento, quien me alentó para continuar, cuando parecía que me iba a rendir.*

*A mis amigos quienes siempre estuvieron junto a mí en los buenos y malos momentos.*

*Lorena Balseca*

*A a mis abuelos Rosaura e Isaac, quienes siempre han velado por mí, demostrándome su cariño y afecto.*

*A mis padres, que con sus consejos han sabido guiarme para culminar mi carrera profesional.*

*A mis hermanos por compartir conmigo alegrías y fracasos, siendo pilares fundamentales de mi vida.*

*Para mi gran amor Alexander por acompañarme durante este arduo camino y demostrarme su apoyo incondicional incluso en los momentos más difíciles.*

*Carolina Zambrano*

## AGRADECIMIENTO

*A Dios por permitirme estar aquí, por regalarme la dicha de tener una familia que siempre me apoya y por rodearme de personas excepcionales las cuales me ayudaron este largo camino.*

*A mis padres por haberme convertido en la persona que soy, por nunca dejar que me rinda y sobre todo por creer en mí.*

*A mi novio por todo el amor que me ha entregado, por ayudarme cuando lo necesito y por nunca dejarme sola.*

*A mis Profesores por impartirme todo el conocimiento necesario para culminar esta etapa.*

*A Carolina por ser una excelente amiga y compañera.*

*Al Ing. Luis Carrión por brindarme todo el apoyo necesario, tanto en la parte académica como anímica.*

*A la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE por ser la fuente del conocimiento para formarnos tanto como profesionales y seres humanos.*

*Lorena Balseca*

*Agradezco Dios por la fortaleza recibida, permitiéndome llegar a este punto culminante de mi carrera universitaria.*

*A mis padres quienes a lo largo de mi vida han apoyado y motivado mi formación académica.*

*Alexander quien representó una gran fuente de sustento y motivación en momentos de decline y cansancio.*

*A mis profesores a quienes les debo gran parte de mis conocimientos, gracias por su paciencia y enseñanza.*

*Al Ing. Luis Carrión por su apoyo y asesoría brindada tanto en la parte académica como en la parte moral durante la elaboración de este proyecto.*

*A Lorena por la amistad y conocimientos compartidos durante este proceso.*

*Finalmente un eterno agradecimiento a esta prestigiosa universidad por abrirme sus puertas preparándome para un futuro profesional competitivo.*

*Carolina Zambrano*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADO TUTOR .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xvi
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
CAPÍTULO 1 .....	1
GENERALIDADES .....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Definición del proyecto.....	2
1.2.1. Suministro de alta tensión .....	3
1.2.2. Montaje de calefacción.....	4
1.2.3. Bomba de jeringa .....	4
1.2.4. Colector .....	4
1.3. Justificación e importancia.....	5
1.4. Área de influencia .....	6
1.5. Objetivos.....	7
1.5.1. Objetivo general .....	7
1.5.2. Objetivos específicos.....	7
1.6. Alcance del proyecto.....	8
1.7. Estructura del documento .....	10
CAPÍTULO 2.....	11
ESTADO DEL ARTE.....	11
2.1. Proceso de Electrospinning .....	11

2.2. Proceso de Melt-electrospinning.....	13
2.3. Polímeros.....	17
2.3.1. Termopolímeros .....	18
2.3.1.1. Polipropileno (PP) .....	18
2.3.1.1.1. Polipropileno Isotáctico (IPP) .....	19
2.3.1.1.2. Polipropileno Atáctico (APP).....	19
2.3.1.2. Polietileno de baja densidad (LDPE).....	20
2.3.1.3. Propiedades físicas .....	21
2.3.1.3.1. Temperatura de Transición vítrea (Tg).....	21
2.3.1.3.2. Temperatura de fusión (Tm) .....	21
2.4. Procesado de polímeros .....	21
2.5. Técnicas de caracterización de microfibras .....	22
2.5.1. Espectroscopia ultravioleta-visible.....	22
2.6. Proceso de extrusión .....	23
2.6.1. Tipos de máquinas extrusoras.....	24
2.6.1.1. Extrusoras de fricción viscosa .....	24
2.6.1.1.1. Extrusora de tambor rotatorio .....	24
2.6.1.1.2. Extrusora de rodillos .....	24
2.6.1.1.3. Extrusora de tornillo .....	25
2.6.1.2. Extrusoras de desplazamiento positivo .....	25
2.6.1.2.1. Extrusora con suministro de presión .....	25
2.6.1.2.2. Extrusora de pistón .....	26
2.6.1.2.3. Extrusora de jeringa .....	27
2.7. Transferencia de Calor .....	27
2.7.1. Conducción.....	27
2.7.2. Convección.....	28
CAPÍTULO 3.....	29
DISEÑO MECATRÓNICO E IMPLEMENTACIÓN .....	29
3.1. Diseño de los componentes mecánicos.....	29
3.1.1. Criterios de selección .....	29

3.1.2. Cálculos de diseño .....	30
3.1.2.1. Diseño de jeringa .....	30
3.1.2.1.1. Diseño del alojamiento del O-Ring.....	31
3.1.2.1.2. Diseño del pistón .....	35
3.1.2.1.3. Diseño del cilindro de la jeringa .....	43
3.1.2.1.4. Diseño del acople para la jeringa.....	46
3.1.2.2. Diseño y selección de los calentadores .....	48
3.2. Diseño de los subsistemas eléctricos y/o electrónicos .....	51
3.2.1. Criterios de selección del sensor de temperatura.....	51
3.2.2. Criterios de selección del actuador.....	55
3.3. Diseño de circuito de potencia.....	56
3.4. Diseño de los componentes del sistema del Control .....	59
3.4.1. Selección de tarjeta de control .....	59
3.4.2. Criterios de selección del tipo de controlador .....	60
3.4.3. Diseño del controlador del actuador .....	68
3.5. Diseño de software .....	75
3.5.1. Diseño en software del HMI.....	75
3.6. Implementación .....	80
3.6.1. Implementación de los componentes mecánicos. ....	80
3.6.2. Implementación de los componentes eléctricos y/o electrónicos. ....	85
3.6.3. Implementación del sistema de control. ....	88
CAPÍTULO 4 .....	90
PRUEBAS Y RESULTADOS .....	90
5.1. Pruebas y resultados del módulo de control de temperatura.....	90
5.1.1. Análisis termográfico del sistema .....	92
5.1.2. Prueba con el material APP.....	94
5.1.3. Prueba con el material IPP.....	98
5.1.4. Prueba con el material LDPE .....	101
5.2. Desarrollo del protocolo de pruebas.....	105
5.2.1. Microscopio Electrónico de Barrido .....	105

5.2.1.1. Análisis de fibras de material APP .....	106
5.2.1.2. Análisis de fibras de material IPP .....	107
5.2.1.3. Análisis de fibras de material LDPE .....	108
CAPÍTULO 5 .....	110
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	110
BIBLIOGRAFÍA .....	112

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diseño de equipo para melt-electrospinning.....	3
Figura 2 Concentración de ondas dependiendo de la polaridad del sistema.....	4
Figura 3 Microfibras obtenidas por melt-electrospinning.....	9
Figura 4 Proceso de Electrospinning .....	12
Figura 5 Enfoques para construcción de dispositivo de melt-electrospinning...	16
Figura 6 Simbología polipropileno (PP) .....	18
Figura 7 Distribución del polipropileno Isotáctico IPP .....	19
Figura 8 Distribución del polipropileno Atáctico APP .....	20
Figura 9 Simbología polietileno de baja densidad (PE) .....	20
Figura 10 Representación esquemática de una extrusora de husillo único. ....	25
Figura 11 Extrusora con suministro de presión.....	26
Figura 12 Extrusora de pistón .....	27
Figura 13 Extrusora de jeringa.....	27
Figura 14 Diseño del alojamiento de un O-Ring .....	32
Figura 15 Sello de pistón .....	33
Figura 16 Zonas de trabajo de O-Ring.....	34
Figura 17 Diseño del alojamiento de los O-Ring en el embolo del pistón .....	35
Figura 18 Diseño en Software CAD del pistón.....	36
Figura 19 Sensor de fuerza MF01 .....	36
Figura 20 Característica Resistencia vs. Fuerza del sensor MF01 .....	37
Figura 21 Sensor de fuerza acondicionado .....	38
Figura 22 Localización de cargas en el pistón para análisis estático.....	40
Figura 23 Análisis de esfuerzo de Von Mises .....	41
Figura 24 Análisis de factor de seguridad.....	42
Figura 25 Dimensiones del cilindro .....	44
Figura 26 Diseño en Software CAD del cilindro .....	45
Figura 27 Estructura interna del cilindro .....	46
Figura 28 Diseño en Software CAD del acople.....	47
Figura 29 Estructura interna del acople con la aguja .....	47

Figura 30	Ensamble del acople con la jeringa .....	47
Figura 31	Ensamble final de la jeringa.....	48
Figura 32	Transferencia de calor existente en el sistema de extrusión .....	49
Figura 33	Modelo de transferencia de calor en un cilindro .....	49
Figura 34	Termopar .....	52
Figura 35	Curva tensión – temperatura para tipos de termocuplas .....	54
Figura 36	Etapas de potencia.....	57
Figura 37	Diagrama de circuito implementado .....	59
Figura 38	Esquema de control.....	60
Figura 39	Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado .....	61
Figura 40	Diagrama de bloques del sistema a controlar.....	61
Figura 41	Ingreso de valores de los vectores de entrada y salida de la planta.	64
Figura 42	Obtención de los parámetros de la función de transferencia .....	65
Figura 43	Gráfica del modelo obtenido vs gráfica de los datos adquiridos .....	66
Figura 44	Respuesta de la planta frente a entrada escalón.....	67
Figura 45	Tiempo de establecimiento de la planta.....	68
Figura 46	Lugar de las raíces de la planta.....	70
Figura 47	Tiempo de establecimiento de la planta controlada.....	72
Figura 48	Sistema de control de lazo cerrado.....	73
Figura 49	Respuesta de la planta con Set Point de 220°C (IPP).....	73
Figura 50	Respuesta de la planta con Set Point de 200°C (LDPE) .....	74
Figura 51	Respuesta de la planta con Set Point de 170°C (APP) .....	74
Figura 52	Arquitectura HMI .....	76
Figura 53	Navegación sección Control .....	77
Figura 54	Navegación sección Monitoreo.....	77
Figura 55	HMI sección portada.....	78
Figura 56	HMI sección control .....	79
Figura 57	HMI sección Monitoreo .....	80
Figura 58	Ensamble general del extrusor realizado en Software CAD .....	81
Figura 59	Vista explotada de los elementos que conforman el extrusor.....	81

Figura 60	Ensamble general del extrusor .....	82
Figura 61	Acople con la aguja.....	82
Figura 62	Lámina aislante de fibra de vidrio .....	83
Figura 63	Adaptación de la jeringa con la bomba .....	83
Figura 64	Vista frontal de la jeringa con la abrazadera .....	84
Figura 65	Implementación de la cinta aislante .....	84
Figura 66	Implementación de la caja de seguridad.....	85
Figura 67	Comprobación del funcionamiento del circuito de potencia .....	86
Figura 68	Diseño en placa del circuito de potencia.....	86
Figura 69	Placa del circuito de potencia .....	87
Figura 70	Implementación del sistema extrusor.....	87
Figura 71	Diagrama de flujo proceso de extrusión.....	89
Figura 72	Fuente de alto voltaje.....	90
Figura 73	Colector .....	91
Figura 74	Lámpara.....	91
Figura 75	Cámara .....	92
Figura 76	Bomba de jeringa.....	92
Figura 77	Distribución térmica del sistema .....	93
Figura 78	Distribución térmica del sistema con la implementación de una vela	93
Figura 79	Esquema de configuración del dispositivo de melt-electrospinning ..	94
Figura 80	APP a ser fundido .....	95
Figura 81	Respuesta obtenida para control de temperatura de APP .....	95
Figura 82	Proceso de electrospinning con APP .....	96
Figura 83	Distribución térmica en el cono de Taylor .....	97
Figura 84	Cono de Taylor formado con APP .....	97
Figura 85	Fibras de APP obtenidas .....	98
Figura 86	IPP a ser fundido .....	98
Figura 87	Respuesta obtenida para control de temperatura de IPP .....	99
Figura 88	Proceso de electrospinning con IPP .....	100
Figura 89	Cono de Taylor formado con IPP .....	100

Figura 90 Fibras de IPP obtenidas.....	101
Figura 91 LDPE a ser fundido.....	101
Figura 92 Respuesta obtenida para control de temperatura de LDPE.....	102
Figura 93 Proceso de electrospinning con LDPE.....	103
Figura 94 Cono de Taylor formado con LDPE .....	104
Figura 95 Fibras de LDPE obtenidas .....	105
Figura 96 Microscopio electrónico de barrido .....	106
Figura 97 Microscopia SEM de APP a un zoom de 1000x .....	107
Figura 98 Microscopia SEM de IPP a un zoom de 1000x.....	108
Figura 99 Microscopia SEM de LDPE a un zoom de 1000x .....	109

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación entre electrospinning de solución y melt-electrospinning	15
Tabla 2 Propiedades del polipropileno.....	19
Tabla 3 Propiedades del polietileno de baja densidad.....	20
Tabla 4 Materiales analizados .....	30
Tabla 5 Medidas para el diseño de alojamiento de un O-Ring .....	32
Tabla 6 Características de O-Ring de Silicón .....	35
Tabla 7 Características del sensor MF01 .....	37
Tabla 8 Respuesta del sensor MF01 .....	38
Tabla 9 Valores de interpolación para obtención de fuerza en el sensor.....	39
Tabla 10 Datos de entrada para análisis estático de pistón.....	40
Tabla 11 Esfuerzos máximo y mínimo producidos en el émbolo .....	41
Tabla 12 Conductividad térmica del acero inoxidable 304.....	50
Tabla 13 Valores extrapolados de $k$ .....	50
Tabla 14 Tipos de termocuplas y características .....	52
Tabla 15 Especificaciones técnicas de la Resistencia.....	56
Tabla 16 Características principales del MOC 3041 .....	57
Tabla 17 Características Triac BT137.....	58
Tabla 18 Valores para circuito de acondicionamiento actuador.....	58
Tabla 19 Comparación de tarjetas de control .....	59
Tabla 20 Ventajas y desventajas de los controladores.....	61
Tabla 21 Temperaturas de fusión a emplearse.....	68

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación muestra la realización del diseño, construcción e implementación de un extrusor y control de temperatura de termopolímeros, para la obtención de microfibras a través del proceso de Melt-electrospinning. El melt-electrospinning es una técnica que permite generar microfibras de forma continua, empleando fuerza electrostática, a partir de la fusión de polímeros en estado sólido sin la necesidad de emplear disolventes químicos. El diseño del sistema inicia con la selección de la configuración del extrusor, tomando en cuenta las especificaciones requeridas, tales como: volumen admitido de alimentación, presión, resistencia a elevadas temperaturas, conductividad eléctrica y resistencia a factores químicos. Para este proceso se seleccionaron tres tipos de termopolímeros: polipropileno atáctico (APP), polipropileno isotáctico (IPP) y polietileno de baja densidad (LDPE); mismos que son sometidos a un proceso de fundición mediante la realización de un control de temperatura; considerando la selección del sensor, el dimensionamiento del actuador y el diseño electrónico del circuito de potencia. Adicionalmente, se diseña una interfaz que permite controlar y monitorear el sistema en base a los parámetros de temperatura correspondientes a cada termopolímero. Finalmente, se realiza la caracterización de las fibras obtenidas con el proceso implementado; las fibras de APP presentan un diámetro entre 13.35 a 11.94 [ $\mu m$ ]; con IPP las fibras presentan diámetros de 17.85 a 12.53 [ $\mu m$ ]; el LDPE presenta diámetros de 13.23 a 10.31 [ $\mu m$ ].

### Palabras clave:

- MELT-ELECTROSPINNING
- CONTROL DE TEMPERATURA
- TERMOPOLIMEROS
- FIBRAS
- EXTRUSOR

## **ABSTRACT**

The present titling work shows the realization of the design, construction and implementation of an extruder and thermopolymer temperature control for the production of microfibers through the Melt-electrospinning process. Melt-electrospinning is a technique that generates microfibers continuously, using electrostatic force, from the fusion of polymers in solid state without the necessity of employing chemical solvents. The design of the system begins with the selection of the extruder configuration, considering the required specifications, such as: admitted feed volume, pressure, resistance to high temperatures, electrical conductivity and resistance to chemical factors. Three types of thermopolymers were selected for this process: atactic polypropylene (APP), isotactic polypropylene (IPP) and low density polyethylene (LDPE); which are subjected to a melting process through the realization of a temperature control, considering the selection of the sensor, the actuator sizing and the electronic design of the power circuit. Additionally, an interface is designed that allows to control and monitor the system based on the temperature parameters corresponding to each thermopolymer. Finally, the characterization of the fibers obtained with the implemented process is carried out; obtaining for APP diameters from 13.35 to 11.94 [ $\mu m$ ] whit IPP diameters form 17.85 to 12.53 [ $\mu m$ ]; whit LDPE diameters from 13.23 to 10.31 [ $\mu m$ ].

### **Keywords**

- **MELT-ELECTROSPINNING**
- **TEMPERATURE CONTROL**
- **THERMOPOLYMERS**
- **FIBERS**
- **EXTRUDER**

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

En el presente capítulo se detallan los antecedentes, justificación, alcance y objetivos del proyecto de investigación desarrollado. Se menciona la importancia de expandir los estudios realizados sobre electrospinning e inclusión de la fundición de polímeros para la obtención de microfibras; hace referencia al diseño y partes que conforman el extrusor para el procesamiento de los termopolímeros, a su vez menciona un breve resumen de los componentes eléctricos, electrónicos y software utilizados dentro del proyecto. Por último se realiza una breve descripción del contenido de los siguientes capítulos.

### 1.1. Antecedentes

La primera fibra artificial, conocida como rayón viscosa, fue inventada por el científico francés e industrial Hilaire de Chardonnet en 1891. Desde entonces, las fibras sintéticas se han utilizado en gran medida en la industria textil para aplicaciones de prendas de vestir y como refuerzo para plásticos compuestos. En comparación con las fibras naturales, las fibras sintéticas se pueden producir de manera económica, fácil y en grandes volúmenes. Entre todas las fibras sintéticas, las fibras poliméricas son un subconjunto importante, que se fabrican generalmente de poliésteres, poliamidas y poliolefinas.

Tradicionalmente, las fibras de polímero se fabrican mediante un proceso de hilatura, incluyendo el hilado por fusión, hilado en seco e hilado húmedo. Durante el hilado de fibras, una masa fundida de polímero o solución se extruye a menudo a través de una hilera y se toma corriente abajo por una devanadora para formar un filamento. (Wente, 1956)

Las fibras ultrafinas (con medidas que van desde nanómetros a micrometros) en fibras / tejidos no tejidos fabricados por soplado en fusión reemplazan a las

fibras tradicionales en muchas aplicaciones muy exigentes, tales como sistemas de filtración, superabsorbentes y telas médicas. (Burger, 2006)

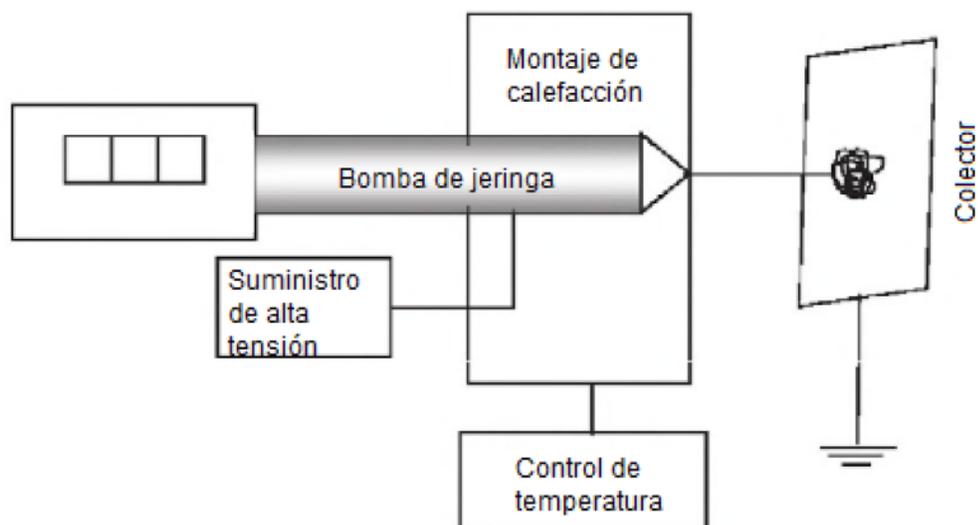
Los recientes desarrollos en los procesos de hilatura bicomponente y electrospinning pavimentaron nuevas formas de producir fibras más finas para aplicaciones más amplias como la administración de fármacos, biosensores y medicina regenerativa, incluyendo aplicaciones biomédicas como materiales de ingeniería de tejidos. Entre todos estos métodos, el hilado por fusión y el soplado en fusión siguen siendo los métodos más convenientes y económicos de fabricación de fibras debido a su alta productividad, que no requiere el uso de materiales auxiliares y la sencillez del proceso. (Jia, 2010)

En Ecuador, no se ha desarrollado la técnica debido a la baja disponibilidad de equipos y recursos. La Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE adquirió una máquina para el estudio de electrospinning, la cual no cuenta con un módulo que permita la utilización de polímeros fundidos (proceso de melt-electrospinning).

El presente trabajo pretende diseñar, construir e implementar un módulo de control de temperatura de termopolímeros para el proceso de melt-electrospinning y obtener fibras micrométricas a partir de polímeros fundidos, mediante la variación de parámetros dependiendo del material y de esta manera abrir el campo de investigación para sus múltiples aplicaciones y trabajos que se realizarán a futuro.

## **1.2. Definición del proyecto**

El diseño de equipos para melt-electrospinning es complejo en comparación con el de electrospinning de solución. Un sistema de melt-electrospinning se conforma de los siguientes componentes: fuente de alimentación de alto voltaje, conjunto de calefacción, bomba de jeringa, controlador de temperatura y colector (Afshari, 2016) como se puede apreciar en la Figura 1.

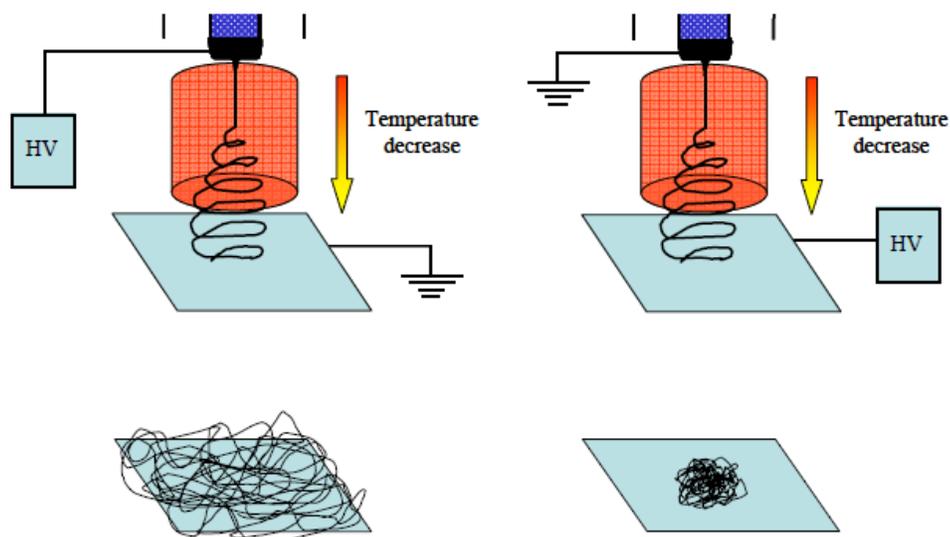


**Figura 1 Diseño de equipo para melt-electrospinning**

A continuación, se describe cada componente que conforma el equipo para melt- electrospinning:

### 1.2.1. Suministro de alta tensión

Generalmente, se utiliza corriente continua (DC) como fuente de suministro de energía, aunque es factible utilizar corriente alterna (CA). Se requiere un voltaje muy alto (usualmente en el rango de 10-30 KV) para electrospinning. La polaridad del sistema electrospinning es arbitraria y puede ser invertida dependiendo del tipo de polímero y del producto final, puesto que se puede variar las ondas de las fibras de diferente manera como se puede observar en la Figura 2, al tener la parte positiva de la fuente en la aguja las ondas son menos concentradas que al estar conectada al colector. Si la boquilla del extrusor está conectado a tierra y el colector está cargado positivamente, se crea la misma fuerza del campo eléctrico en comparación con el enfoque inverso.



**Figura 2 Concentración de ondas dependiendo de la polaridad del sistema**

**Fuente:** Melt Electrospinning of thermoplastic polymers, Möller M. Böker A.,2012.

### 1.2.2. Montaje de calefacción

Se diseña para fundir el polímero a una viscosidad adecuada que pueda ser electro hilado fácilmente. En todos los conjuntos de calentamiento, el objetivo principal es fundir el polímero proporcionando calor de diversas fuentes tales como: elemento de calentamiento, gomas de calefacción, calentamiento por láser y calentamiento por ultrasonidos.

### 1.2.3. Bomba de jeringa

Durante el proceso de fusión-electrospinning, se emplea una jeringa para bombear la masa fundida de polímero a una velocidad constante y controlable a través de la hilera.

### 1.2.4. Colector

El colector, o la superficie colectora, se utiliza para recoger las fibras electrospinning. La superficie de geometría y configuraciones diferentes se

utilizan como colectores. El colector está montado sobre un soporte aislante para poder controlar su potencial eléctrico. En dispositivos de melt electrospinning, la tensión se aplica al colector y la jeringa se conecta a tierra.

### **1.3. Justificación e importancia**

Melt electrospinning es una nueva técnica de fabricación basada en fibras que puede utilizarse para diseñar y construir materiales adecuados para varias aplicaciones de ingeniería de tejidos (TE) como son los vendajes para heridas, nanotecnología, biotecnología, entre otros. Contrariamente a la electrospinning de solución ampliamente utilizada, el proceso de fusión está libre de disolventes y por lo tanto se pueden evitar cuestiones de volatilidad y toxicidad asociadas con los mismos. Además, los polímeros fundidos son a menudo viscosos y no conductores, haciéndolos candidatos para generar chorros de electrospinning sin inestabilidades eléctricas. Esto, a su vez, permite una deposición de fibra precisa y predecible en la combinación con colectores en movimiento, denominada MEW, permite la fabricación capa a capa de andamios de pequeño a gran volumen con diseños, formas y espesores específicos. (Kelvin, 2014)

El Melt electrospinning de polímeros siempre ha sido considerado como una forma de aumentar la producción de fibra y eliminar el riesgo para la salud que plantea el electrospinning basado en disolventes. También se requiere el melt electrospinning para algunos polímeros industriales importantes tales como polietileno y polipropileno que no se disuelven fácilmente en disolventes. Las primeras investigaciones en melt electrospinning sólo podían producir fibras en el rango de diámetros de micras.

Similar a electrospinning de solución, la alta viscosidad de la masa fundida de polímero es el principal factor que contribuye al gran diámetro general de las fibras resultantes, se debe tener cuidado para evitar el sobrecalentamiento del polímero en la medida de la degradación o descomposición del material. (Electrospin Tech, 2016)

En el pasado, los científicos no se interesaron en desarrollar estudios con polímeros fundidos debido a razones lógicas como las que podemos nombrar:

- Dificultad de controlar un fluido caliente y más viscoso.
- Obtención de fibras con diámetros más grandes que las obtenidas en polímeros en solución acuosa.
- Complejidad de la máquina apta para altas temperaturas y a su vez altos voltajes.
- Las propiedades no conductoras del polímero fundido.

Muchos experimentos con polímeros fundidos se han hecho con aquellos difíciles de electrohilar en solución acuosa a temperatura ambiente, los polímeros más usados en trabajos de investigación por el método fundido incluyen el polipropileno (PP) y el polietileno (PE), la mayoría de estos polímeros han sido electrohilarlos a temperaturas por encima de 150 grados Centígrados. (Angamma, 2016)

La maduración de este campo reconoce con interés corporativo en diversos sectores de la industria tales como: filtración de aire y agua, ingeniería de tejidos y medicina por lo cual se realizará este proyecto para aumentar nuestro conocimiento sobre este tema y ampliar las aplicaciones académicas e industriales en que se utiliza electrospinning.

#### **1.4. Área de influencia**

El proyecto de investigación pretende utilizar la técnica de Melt-electrospinning para la obtención de microfibras, mismas que podrán ser utilizadas dentro de las ramas de Biotecnología, Ciencia de los Materiales, Análisis de Fluidos, Tecnología de materiales y Nanotecnología; aportando con nuevos materiales cuyas propiedades y características ofrezcan mayores ventajas y prestaciones dentro de los diferentes campos de aplicación.

Dentro del área textil, las microfibras se emplean en las industrias que comercializan ropa deportiva, cortinas, estuches, calzado y ortopedia (plantillas), gamuzas; además de revestimientos de paredes, paneles, cabezales de cama, entre otros.

El significativo avance de la Ciencia de Materiales, la Nanotecnología y la Biotecnología que suscitarán en los próximos años, aportarán al desarrollo de nuevos e interesantes dispositivos funcionales, terapias, métodos de monitoreo y diagnóstico. La mayoría de estas aplicaciones están aún en su infancia. En un futuro cercano, los estudios que se llevan a cabo hoy en día dejarán el ámbito académico del laboratorio y comenzarán su etapa de producción. El esfuerzo que se realiza mundialmente para el desarrollo de materiales y tecnologías, sumado a la investigación multidisciplinaria, revolucionará una vez más la calidad de vida del hombre.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general**

Diseñar, construir e implementar un módulo de control de temperatura y extrusora de termopolímeros adaptable a la maquina Yflow Star-Up ubicada en el laboratorio de fluidos e hidráulica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, para la obtención de microfibras a través del proceso de Melting-electrospinning.

### **1.5.2. Objetivos específicos**

- Diseñar y construir un módulo de control de temperatura de termopolímeros tales como polipropileno atáctico (APP), polipropileno isotáctico (IPP) y polietileno de baja densidad (LDPE).

- Diseñar, construir e implementar una extrusora de termopolímeros para la obtención de fibras del orden de los micrómetros.
- Realizar un control de temperatura aplicable en la fundición de los termopolímeros especificados en base a una configuración determinada, a través de software.
- Crear una HMI para el control y monitoreo de las variables que intervienen en el proceso.
- Validar el funcionamiento del módulo de control de temperatura, ejecutando un protocolo de pruebas.
- Analizar la morfología de las fibras a través de imágenes micrométricas obtenidas con el microscopio de barrido.

#### **1.6. Alcance del proyecto**

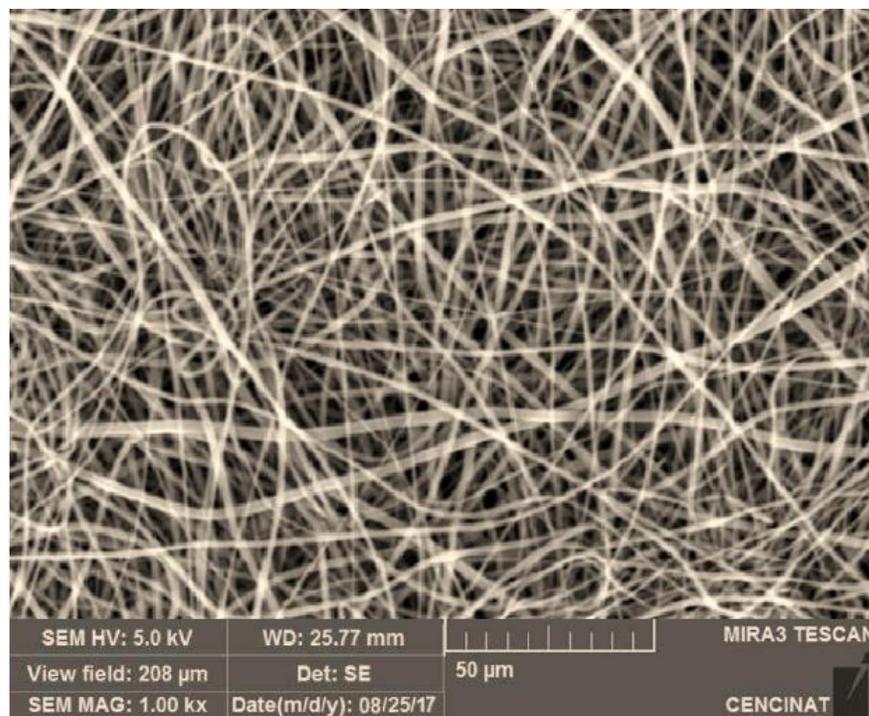
En una definición amplia el proceso de extrusión hace referencia a cualquier operación de transformación en la que un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para producir un artículo de sección transversal constante y, en principio, longitud indefinida.

En el proceso de extrusión, por lo general, el polímero se alimenta en forma sólida y sale de la extrusora en estado fundido. Para el caso más corriente de la extrusión de un polímero inicialmente sólido que se funde en el proceso, la extrusora puede realizar las funciones principales:

- Transporte del material sólido hacia zona de fusión
- Fusión del material
- Transporte o bombeo del material fundido

El proceso a realizarse inicia con la inserción de pellets de termopolímeros dentro del extrusor diseñado, mismo que se acopla a la bomba disponible en el laboratorio; a continuación se procede a fundir el material a través del control y monitoreo de la interfaz diseñada. Una vez que el polímero se ha fundido, se enciende la bomba de extrusión y se induce alto voltaje en el terminal del extrusor para producir microfibras que serán analizadas con el método denominado microscopía de barrido.

El microscopio de barrido empleado para los resultados presenta las propiedades de las estructuras micrométricas obtenidas en forma de fibras, tubos, cintas, anillos y varillas. En la Figura 3 se muestra el resultado de microfibras obtenidas a través de la técnica de Melt-electrospinning.



**Figura 3 Microfibras obtenidas por melt-electrospinning**

## **1.7. Estructura del documento**

El presente documento consta de seis capítulos, en el primer capítulo se muestra la descripción general del proyecto. Se presenta el planteamiento del problema con su respectiva justificación, alcance y los objetivos del proyecto.

El capítulo dos, titulado “Estado del arte”, menciona los fundamentos teóricos de la investigación refiriéndose a temas como: definición de electrospinning, las ventajas que ofrece el melt-electrospinning, las características de los termopolímeros a ser utilizados y los principios de transferencia de calor para poder realizar la fusión de los polímeros.

En el capítulo tres, denominado “Diseño Mecatrónico e implementación”, se presenta el desarrollo de los sistemas mecánico, eléctrico y electrónico detallando la jeringa de extrusión, el circuito de control, así como también el dimensionamiento de tanto sensores como actuadores. Adicionalmente se presenta el sistema de control y el software para realizar acciones de control y monitoreo. Posteriormente se incluye la construcción e implementación de los sistemas descritos anteriormente.

En el capítulo cuatro de “Pruebas y resultados” se describen los resultados obtenidos mediante el sistema extrusor de termopolímeros, a través del análisis de microfibras realizadas, empleando un microscopio de barrido. Adicionalmente se muestra la respuesta que presenta el sistema ante el control de temperatura implementado.

Finalmente, en el capítulo cinco se detallan las conclusiones y recomendaciones alcanzadas durante el desarrollo del proyecto y las propuestas de trabajos futuros.

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DEL ARTE

El capítulo presenta conceptos generales sobre el proceso de melt-electrospinning, su historia, funcionamiento y aplicación, así como los principales elementos que lo conforman; adicionalmente se detallan las propiedades de los termopolímeros a ser extruidos, los conceptos de técnicas de caracterización de microfibras, los tipos diferentes de control que existen y los mecanismos de transferencia de calor.

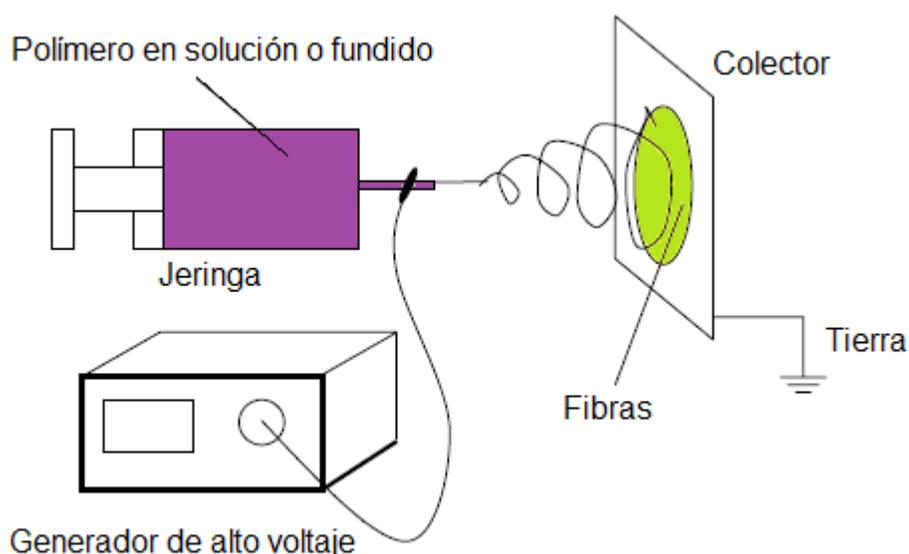
#### 2.1. Proceso de Electrospinning

Electrospinning es una técnica de hilado simple para la producción de fibras de nano a micro escala basado en un fenómeno electrohidrodinámico (EHD) que utiliza la fuerza electrostática para extraer fibras continuas, en forma de un chorro de líquido a partir de soluciones de polímeros o polímeros fundidos dependiendo del medio utilizado.

El uso de electrospinning para producir fibras de la solución, sin utilizar la presión, se informó por primera vez en una patente emitida en 1934 por A. Formhals (Formhals, 1934). Esta técnica incorpora la generación de un campo eléctrico fuerte entre la masa fundida polimérica dentro del extrusor y un dispositivo colector metálico.

Yu Dong et al (2010) menciona que en un proceso típico de electrospinning, se utilizan predominantemente tres componentes principales, a saber, una jeringa llena de una solución polimérica, un proveedor de alto voltaje para proporcionar la fuerza eléctrica requerida para estirar el chorro de líquido y una placa colectora conectada a tierra para sujetar alfombras de microfibra. En la etapa inicial, la masa fundida o solución de polímero se introduce en un tubo capilar. Se aplica un alto potencial eléctrico (por ejemplo, 10 - 50 kV) entre gotitas

de polímero en solución o polímero fundido en el extremo de una aguja y un colector conectado a tierra. Al aumentar la intensidad del campo eléctrico, la gota colgante de la solución polimérica se vuelve altamente electrificada, induciendo así la carga eléctrica sobre la superficie del líquido, lo que da lugar a la deformación de las gotas líquidas en una forma cónica conocida como "cono Taylor". Cuando la tensión eléctrica alcanza un valor crítico, las fuerzas de repulsión electrostática prevalecen sobre la tensión superficial de la solución de modo que se expulsa un chorro cargado de solución. Un chorro de polímero es entonces expulsado de la punta del "cono Taylor" y viaja rápidamente al colector de metal. (Yu Dong, 2010). En la Figura 4 se muestra el diagrama que describe el proceso de electrospinning.



**Figura 4 Proceso de Electrospinning**

Es posible producir una tela no tejida hecha de fibras muy finas, en donde el diámetro muy delgado proporciona una gran relación de área superficial a volumen y características únicas, que permite obtener una serie de aplicaciones como por ejemplo, filtración para submicrónicos o nanomateriales, separador,

andamiaje de tejidos, sistema de suministro de fármacos, órgano artificial, entre otros.

## **2.2. Proceso de Melt-electrospinning**

El electrospinning de fusión se describió por primera vez en una patente en 1936 por Norton C.L. "Method of and apparatus for producing fibrous or filamentary material" Esta invención se refiere a la formación de filamentos o fibras de material viscoso capaz de solidificarse relativamente rápido desde una condición líquida al ser expulsados del recipiente en el que se almacena el material en forma líquida, ya sea como resultado de la fusión o en solución en un líquido volátil. (Norton, 1936), y no fue hasta 45 años más tarde que una serie de tres artículos describió el mismo proceso, Larrondo L, St. demostró con electrospinning de polímero fundido, la producción de fibras de polietileno (PE) y polipropileno (PP) (Larrondo L S. J., 1981). El segundo trabajo investigó la fundición por electrospinning utilizando el aceite de silicona como fluido modelo (Larrondo L S. J., Electrostatic fiber spinning from polymer melts. II. Examination of the flow field in an electrically driven jet., 1981), mientras que el artículo final describió la deformación de la gota de PE o Nylon-12 (N12) disuelto en hexano (Larrondo L S. J., Electrostatic fiber spinning from polymer melts. III. Electrostatic deformation of a pendant drop of polymer melt., 1981).

El electrospinning de los polímeros fundidos, también conocido como melt-electrospinning ha surgido como una tecnología de procesamiento de polímeros para superar algunas desventajas del proceso de electrospinning convencional (electrospinning de solución), tales como las preocupaciones ambientales asociados con los disolventes, así como el electrospinning de polímeros no solubles. Esto ha resultado en la fabricación de fibras ultrafinas de una gama cada vez mayor de polímeros sintéticos, impulsando nuevas aplicación en áreas técnicas tales como textiles, energía, filtración y biomedicina.

Una preocupación clave es la acumulación del disolvente evaporado en electrospinning de solución que no sólo puede influir en la calidad de la fibra y limitar el control de los experimentos debido a la necesidad de configuraciones en áreas bien ventiladas, sino que también plantean problemas ambientales y de salud de la exposición, así como los retos del reciclaje tanto para la investigación como para las aplicaciones industriales

Uno de los inconvenientes del electrospinning de solución es que el chorro cargado eléctricamente es a menudo inestable durante el vuelo y hace que la deposición de fibras sea inherentemente aleatoria. Un aspecto importante del electrospinning de fusión es que la trayectoria de vuelo del chorro de fusión es estable, por lo tanto la deposición de fibra es razonablemente predecible y no tan caótica como en electrospinning solución. Esto permite un mejor control sobre la colocación de fibra en comparación con la solución electrospinning. (Zhou, 2007)

Se ha investigado en menor medida el electrospinning de fusión, debido a que típicamente resulta en fibras de diámetro mayor que en la solución. Las tecnologías de hilado actualmente aplicadas se basan todas en la extrusión de un polímero a través de una hilera, permitiendo la producción continua de materiales de uno o múltiples filamentos.

La comparación entre electrospinning de solución y melt-electrospinning se resume en la Tabla 1.

**Tabla 1**  
**Comparación entre electrospinning de solución y melt-electrospinning**

	<b>Solución Electrospinning</b>	<b>Melt Electrospinning</b>
<b>Mecanismo de Solidificación</b>	Transferencia de Masa (Evaporación de Solvente)	Transferencia de calor (enfriamiento)
<b>Disolventes</b>	Si	No
<b>Alto rendimiento</b>	No	Si
<b>Amigable con el medio ambiente</b>	No	Si
<b>Fácil de modelar</b>	No	Si
<b>Fibras menores a 100<math>\mu</math></b>	Si	No
<b>Limitación de la viscosidad</b>	No	Si

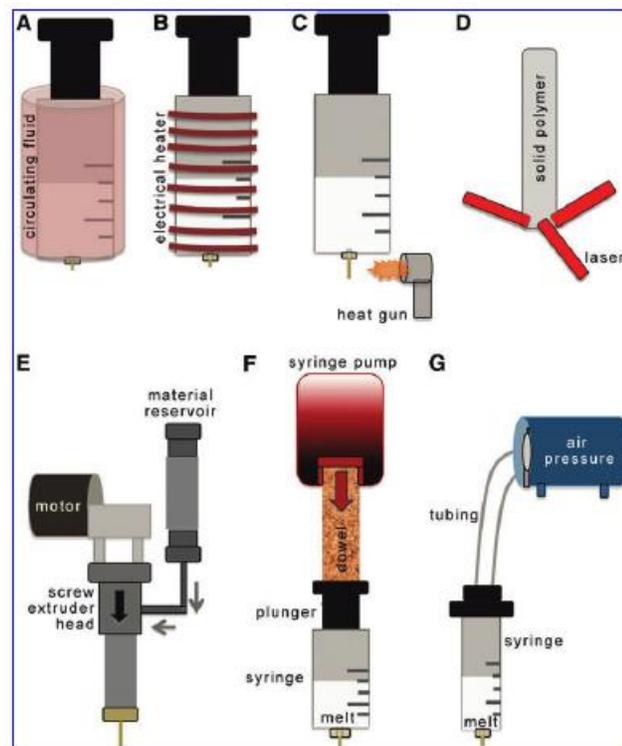
**Fuente:** Electrospun fibers from both solution and melt:processing, structure and property, Zhou H.,2007

El melt-electrospinning se encuentra actualmente en entornos de investigación donde su diseño e instrumentación es en gran medida personalizado, donde la elección de los componentes a menudo se rige por su disponibilidad comercial; consecuentemente, no hay consenso sobre el diseño óptimo para un dispositivo de electrospinning de fusión, y se han utilizado muchas configuraciones diversas en varios laboratorios de investigación.

Un método sencillo y frecuentemente utilizado para suministrar polímero a un sistema de melt-electrospinning es cargar gránulos de polímero en una jeringa que puede ser de plástico, metal o vidrio y precalentar el material para eliminar cualquier bolsa de aire de modo que pueda mantenerse un suministro ininterrumpido de polímero donde una masa fundida de polímero es expulsada

de la hilera usando un sistema de presión de aire o basada en un filamento de polímero sólido que es empujado fuera del dispositivo. Se pueden emplear varios sistemas de calefacción con ventajas y desventajas en cuanto a seguridad y eficiencia para calentar polímeros, los cuales pueden ser a través de (A) fluidos circulantes, (B) calentadores eléctricos, (C) aire calentado, o (D) láseres convergentes. La entrega de la masa fundida de polímero a la hilera ha sido utilizando extrusores de tornillo (E), (F) empujadores mecánicos en línea, o (G) presión de aire como se pueden apreciar en la Figura 5.

Entre estos, los sistemas de calefacción eléctrica son los más comúnmente utilizados. Sin embargo, si se aplica alta tensión, el calentador debe aislarse de ésta, a su vez que requiere una configuración complicada. (Kelvin, 2014)



**Figura 5 Enfoques para construcción de dispositivo de melt-electrospinning**

**Fuente:** Melt Electrospinning and Its Technologization in Tissue Engineering, Muerza et al, 2015

Una bomba de jeringa conectada a la jeringa o a un pistón de accionamiento en cámaras de calentamiento personalizadas se usa típicamente para controlar la extrusión de la masa fundida de polímero, aunque existen otras configuraciones que expulsan el polímero fundido: mecánicamente o neumáticamente. En algunos casos, el polímero se calienta lo suficiente como para fluir únicamente bajo la influencia de la gravedad, también los gránulos de polímero se han fundido en extrusores de tornillo. (Kelvin, 2014)

Con la falta adicional de adelgazamiento de la evaporación del disolvente, el melt-electrospinning se ha caracterizado típicamente por mayores diámetros de fibras que el de solución, sin embargo mediante el diseño cuidadoso del proceso, la optimización, el control de la viscosidad extensional y la solidificación del filamento a través del entorno térmico se pueden obtener fibras submicrónicas.

Hoy en día, sólo una fracción de polímeros comercialmente disponibles han sido fundidos por electrospinning. Algunos son polímeros que son difíciles de disolver y procesar en fibras finas usando métodos convencionales de procesamiento de fibras. Por ejemplo, los polímeros tales como las poliolefinas y las poliamidas sólo son solubles en disolventes específicos y requieren altas temperaturas de procesamiento (170°C-300°C). Una propiedad atractiva del melt-electrospinning es que, con un polímero homogéneo en condiciones adecuadas, se pueden obtener fácilmente fibras altamente uniformes, que pueden ser recogidas durante un largo período de tiempo y exhibir muy poca inhomogeneidad y/o cambios en el diámetro de la fibra.

### **2.3. Polímeros**

Los polímeros son materiales que están constituidos por muchas unidades llamadas monómeros, las cuales le proveen a estas macromoléculas pesos moleculares enormes en el orden de varios miles o más. Los polímeros están formados por monómeros de un mismo tipo que se les llama homopolímeros y son preparados a través de un proceso llamado adición, pero cuando son

formados por monómeros diferentes, se les llama heteropolímeros y son preparados por un proceso conocido como condensación. (Pinto, 2006)

Los polímeros se clasifican de acuerdo a sus propiedades físicas y mecánicas en tres grandes grupos:

- Termopolímeros
- Termorrígidos
- Elastómeros

### 2.3.1. Termopolímeros

Pueden ser moldeados cuando son calentados, entre ellos se encuentran:

- Polipropileno atáctico (APP)
- Polipropileno isotáctico (IPP)
- Polietileno de baja densidad (LDPE)

#### 2.3.1.1. Polipropileno (PP)

Pertenece a la familia de las poliolefinas y se conforma de enlaces simples carbono-carbono y carbono-hidrógeno. Se utiliza en una gran cantidad de láminas, fibras y filamentos. Una de sus características es la procesabilidad que posee debido a su bajo peso específico, además de poseer un alto punto de fusión, versatilidad, entre otras. En cuanto a propiedades químicas, destaca su resistencia a varios disolventes orgánicos. (CIRC, 2009)



**Figura 6 Simbología polipropileno (PP)**

Entre las propiedades más relevantes se tiene:

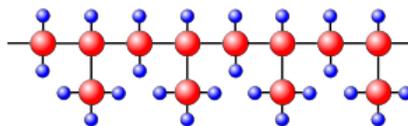
**Tabla 2**  
**Propiedades del polipropileno**

<b>Propiedades Físicas</b>	
Densidad (g cm <sup>-3</sup> )	0.9
Inflamabilidad	HB
Absorción de agua (%)	0.03
<b>Propiedades Mecánicas</b>	
Coefficiente de fricción	0.1 - 0.3
Dureza - Rockwell	R80-100
Módulo de Tracción (GPa)	0.9 - 1.5
Resistencia a la Tracción (MPa)	25 - 40
<b>Propiedades Térmicas</b>	
Temperatura de fusión (°C)	165 - 180
Conductividad térmica (W/m.°K)	0.1 - 0.22
Calor específico (kJ. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )	1.7 - 1.9
Coefficiente de dilatación lineal ( $\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )	100 - 180

**Fuente:** Polipropileno (PP) – Información, Goodfellow, 2016

#### 2.3.1.1.1. Polipropileno Isotáctico (IPP)

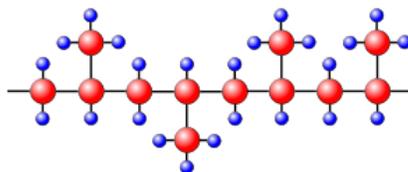
Tiene una distribución regular de los grupos metilo como se puede apreciar en la Figura 7, los metilos se encuentran solo en la parte inferior de la cadena; esto le otorga una alta cristalinidad entre 70 y 85%, presenta gran resistencia mecánica y gran tenacidad. Es el tipo más utilizado hoy día en inyección de piezas y en extrusión de película plana.



**Figura 7 Distribución del polipropileno Isotáctico IPP**

#### 2.3.1.1.2. Polipropileno Atáctico (APP)

Posee los metilos laterales espacialmente en desorden tal como se muestra en la Figura 8. Este polímero tiene una "pegajosidad" tal que permite adherirse en superficies aun en presencia de polvo, por lo cual se utiliza como una goma en papeles adheribles.



**Figura 8 Distribución del polipropileno Atáctico APP**

### 2.3.1.2. Polietileno de baja densidad (LDPE)

Clasificado dentro de los polímeros ramificados, es el de mayor producción actualmente, una de sus características es que no es tóxico, es inodoro e incoloro. Se lo reutiliza a través de procesos de extrusión y moldeo por prensado. (Tecnología del plástico, 2011)



**Figura 9 Simbología polietileno de baja densidad (PE)**

Presenta como propiedades más relevantes:

**Tabla 3**  
**Propiedades del polietileno de baja densidad**

<b>Propiedades Físicas</b>	
Densidad (g cm <sup>-3</sup> )	0.91-0.94
Inflamabilidad	HB
Absorción de agua (%)	<0.5
<b>Propiedades Mecánicas</b>	
Coefficiente de fricción	0.29
Dureza - Rockwell	D60-73
Módulo de Tracción (GPa)	0.5-0.12
Resistencia a la Tracción (MPa)	15-40
<b>Propiedades Térmicas</b>	
Temperatura de fusión (°C)	135
Conductividad térmica (W/m.°K)	0.45- 0.52
Calor específico (kJ. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )	0.9
Coefficiente de dilatación lineal (× 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	100-200

**Fuente:** Polietileno de baja densidad (PELD) – Información, Goodfellow, 2016

### **2.3.1.3. Propiedades físicas**

#### **2.3.1.3.1. Temperatura de Transición vítrea (T<sub>g</sub>)**

Temperatura en el cual un polímero pasa de un estado rígido y quebradizo a otro blando y maleable, está presente sólo en polímeros amorfos y es diferente para cada polímero.

#### **2.3.1.3.2. Temperatura de fusión (T<sub>m</sub>)**

Temperatura a la cual un polímero cambia de un estado sólido a un estado líquido (fundido); sólo se aprecia en polímeros cristalinos.

### **2.4. Procesado de polímeros**

El procesado o transformación de polímeros tiene como finalidad obtener piezas de formas predeterminadas que cumplan y posean un comportamiento adecuado según las aplicaciones a las que están destinados.

Los materiales plásticos pueden ser procesados con mayor facilidad y economía a partir de materia prima previamente preparada, a la cual se le puede añadir distintos aditivos que se crean necesarios dependiendo la aplicación para la cual se los están procesando. En su mayoría se obtienen productos finales de formas muy complejas, las cuales se las puede lograr con una sola operación y con muy poco desperdicio de material, las técnicas más utilizadas son la de extrusión y la de moldeo por inyección.

## 2.5. Técnicas de caracterización de microfibras

Técnicas	Descripción
<b>Microscopia electrónica de barrido</b>	Conocido como SEM (Scanning Electron Microscope) es una técnica que permite obtener información de las propiedades morfológica y topográfica de un sólido para el análisis de su comportamiento, utiliza un haz de electrones localizado sobre un área del sólido.
<b>Microscopio electrónico de transmisión</b>	Denominado también TEM, es un instrumento que proyecta un haz de electrones hacia la muestra, se caracteriza por mostrar imágenes con miles de aumentos y gran definición. Permite proporcionar información acerca de la estructura y morfología del sólido analizado.
<b>Espectroscopia de infrarrojo</b>	Esta técnica basa su funcionamiento en la absorción de radiación infrarroja debidas a los movimientos vibratorios de moléculas de muestras en estados gaseoso, líquido o sólido; permitiendo identificar las características o composición de las mismas.
<b>Espectroscopia ultravioleta-visible</b>	Conocida también como espectroscopia de fotones, basa su funcionamiento en la absorción de radiación ultravioleta-visible cuyas longitudes de onda se encuentran en el rango de los nanómetros; se emplea para la identificación de moléculas y determinación del contenido de una muestra o solución.

### 2.5.1. Espectroscopia ultravioleta-visible

Conocida también como espectroscopia de fotones, basa su funcionamiento en la absorción de radiación ultravioleta-visible cuyas longitudes de onda se

encuentran en el rango de los nanómetros; se emplea para la identificación de moléculas y determinación del contenido de una muestra o solución.

## **2.6. Proceso de extrusión**

Es una operación de transformación en la cual un material fundido es forzado a atravesar una boquilla, el enfriamiento se efectúa a la salida de la misma, en contacto con el aire, agua o una superficie fría. El proceso es continuo y proporciona productos de sección transversal constante, algunos ejemplos de estos productos son: Tubos (1 – 1500 mm. de diámetro), film, láminas, fibras, cintas, varillas, revestimiento de alambres, perfiles, entre otros. (Suárez, 2015)

Muchos materiales se procesan mediante extrusión, como los metales, cerámicos o alimentos y plásticos, obteniéndose productos muy variados. Este procedimiento se ha utilizado durante muchos años para metales, como es el caso del aluminio, el cual fluyen plásticamente cuando se someten a una presión de deformación. El proceso de extrusión de plásticos se lleva a cabo en máquinas denominadas extrusoras o extrusores; se usan tornillos para hacer fluir el polímero en el estado fundido a lo largo de la camisa de la máquina. Existen diversos tipos de extrusoras pero las más utilizadas son las de tornillo o de husillo simple.

La finalidad de una extrusora, es fundir y mezclar la alimentación para bombearla o empujarla hacia fuera a través de una boquilla a velocidad uniforme.

Para el caso de la extrusión de un termopolímero sólido que se funde en el proceso, se realizan estas funciones principales:

- Transporte del material sólido a la zona de fusión
- Fusión o plastificación del material
- Bombeo y presurización del material fundido
- Mezclado
- Conformado

### **2.6.1. Tipos de máquinas extrusoras**

Existen varios tipos de extrusoras empleadas para producir plástico fundido, mismas que se desglosan a continuación (Leonel, 2013):

- a) Tipos de extrusoras de fricción viscosa
  - Extrusora de tambor rotatorio
  - Extrusora de rodillos
  - Extrusora de tornillo
- b) Tipos de extrusoras de desplazamiento positivo
  - Bomba de extrusión
  - Extrusora de pistón
  - Extrusora de jeringa

#### **2.6.1.1. Extrusoras de fricción viscosa**

Se denominan así debido a que la propiedad de viscosidad propia de cada polímero empleado contribuye a la transformación de energía producida en el proceso, debido a la fricción que ocurre entre el material y la pared de la máquina extrusora.

##### **2.6.1.1.1. Extrusora de tambor rotatorio**

Se produce el ingreso de material a través de un émbolo y por acción de la gravedad hacia una cámara formada por un tambor rotatorio cubierto por un bastidor fijo. Sobre el bastidor se aloja el elemento calefactor permitiendo fundir al polímero; posteriormente el material se traslada hacia la boquilla mediante una pieza con forma de cuchilla que lo separa del cilindro rotatorio.

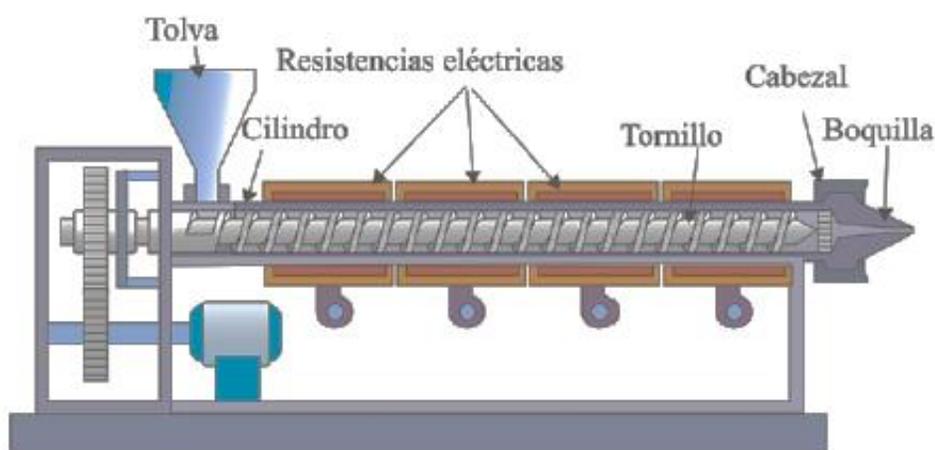
##### **2.6.1.1.2. Extrusora de rodillos**

Consta de dos rodillos ubicados de forma horizontal y con sus ejes paralelos entre sí, mismos que se calientan a través de una fuente externa; se conoce como extrusión plana debido a que se emplea para realizar láminas y películas.

### 2.6.1.1.3. Extrusora de tornillo

Las máquinas de extrusión de tornillo poseen para el sistema de alimentación una tolva, en la cual se deposita el material sólido a ser extruido; constan de un cilindro en el que se realiza la fusión-plastificación y bombeo, en el interior se aloja un tornillo de Arquímedes recoge el material, lo hace avanzar a lo largo del cilindro calentándolo, generalmente mediante resistencias eléctricas.

La Figura 10 muestra, como ejemplo, una representación esquemática de una extrusora de husillo único.



**Figura 10 Representación esquemática de una extrusora de husillo único.**

**Fuente:** Tecnología de Polímeros, Beltrán M. y Marcilla A., 2015

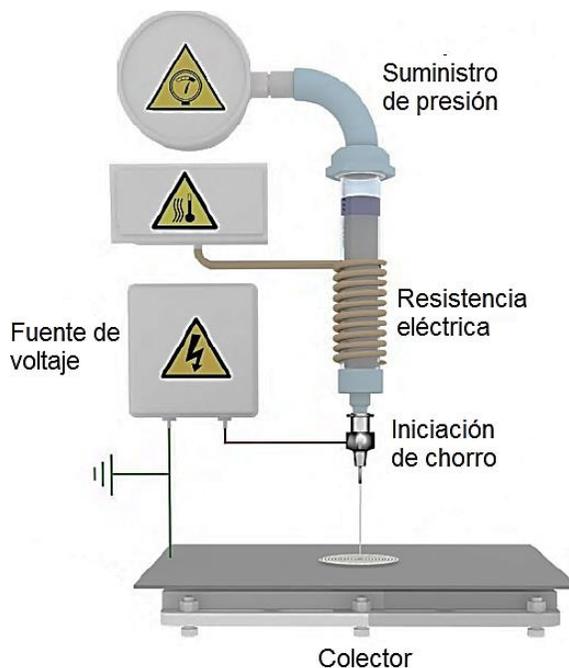
### 2.6.1.2. Extrusoras de desplazamiento positivo

Se definen como aquellas en las que se produce un proceso de extrusión de forma directa; es decir, el material ingresa al cilindro o cámara para ser expulsado a través de una boquilla mediante el uso de un pistón o suministro de presión.

#### 2.6.1.2.1. Extrusora con suministro de presión

Consiste en un cilindro vertical cubierto por una resistencia eléctrica, dentro del cual se aloja el material a fundirse; adicionalmente consta de una bomba de

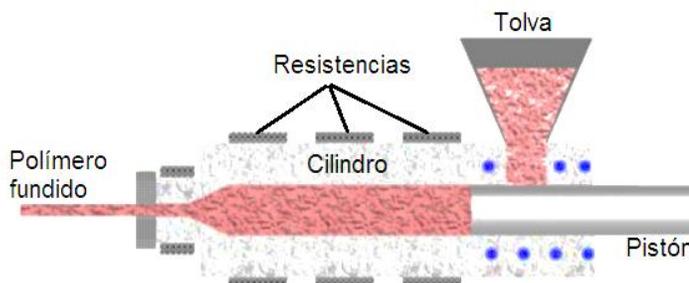
presión para dirigir el polímero fundido hacia la boquilla como se muestra en la Figura 11.



**Figura 11 Extrusora con suministro de presión**

#### 2.6.1.2.2. Extrusora de pistón

Como se observa en la Figura 12, una extrusora de pistón consta de una cámara de forma cilíndrica que contiene elementos de calefacción a su alrededor; la materia prima ingresa desde una tolva hacia el cilindro para que se produzca la fundición del plástico, posteriormente el material es empujado hacia la boquilla a través de un pistón con accionamiento neumático o hidráulico.



## Figura 12 Extrusora de pistón

### 2.6.1.2.3. Extrusora de jeringa

Consiste en una jeringa, como se muestra en la Figura 13, en la cual se ingresa el material a extruir; con la ayuda de una bomba se ejerce presión sobre el émbolo para que se produzca la salida del polímero a través de la boquilla hacia el colector.

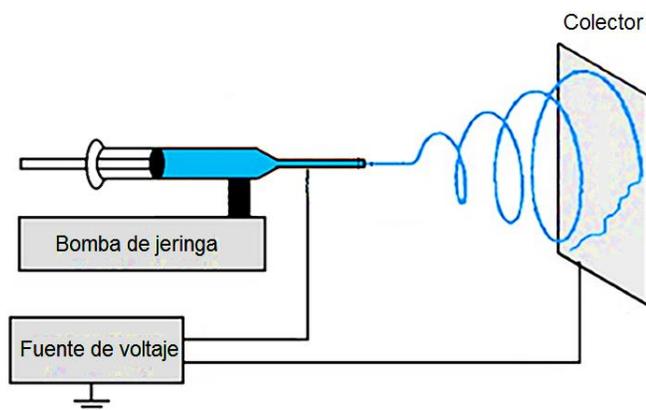


Figura 13 Extrusora de jeringa

## 2.7. Transferencia de Calor

Herrera L. cita que la transferencia de calor es “el estudio de las velocidades a las cuales el calor se intercambia entre fuentes de calor y receptores”, mientras que los procesos de transferencia de calor están relacionados con las razones de intercambio térmico que ocurren en los equipos.

Existen tres formas de transmitir calor: conducción, convección y radiación (Herrera, 2005)

### 2.7.1. Conducción

Cuando dos materiales sólidos a diferentes temperaturas se ponen en contacto directo, de tal forma que las moléculas del material a mayor temperatura,

con mayor movimiento molecular, transfieren energía en forma de movimiento a las moléculas del cuerpo a menor temperatura, sin que exista un movimiento aparente de las moléculas de los dos sólidos. Por tal razón la velocidad de transferencia de energía estará dada por una propiedad de los materiales asociada a la capacidad de transferir la movilidad de sus moléculas, dicha propiedad es conocida como conductividad térmica (K). (Herrera, 2005)

### **2.7.2. Convección**

La transferencia de calor se da entre dos puntos de un fluido, de tal forma que debido a la altísima movilidad de sus moléculas, la mezcla entre ellas pasa a ser el comportamiento predominante. Dicho comportamiento se puede presenciar cuando se pone a calentar agua en un recipiente, luego de un tiempo determinado se puede observar en la superficie la creación de remolinos debido a la diferencia de densidades entre puntos “calientes” y “fríos”. (Herrera, 2005)

## **CAPÍTULO 3**

### **DISEÑO MECATRÓNICO E IMPLEMENTACIÓN**

El presente capítulo se centra en el diseño del sistema mecatrónico, mismo que está conformado por los subsistemas mecánico, electrónico y de control, necesarios para llevar a cabo el proceso de Melt-electrospinning. Se empieza con el diseño de los componentes mecánicos para la realización del extrusor en base a requerimientos técnicos planteados, mediante los respectivos cálculos y dimensionamiento de cada uno de los elementos que intervienen en el proceso. Consecuentemente se describe el diseño electrónico que permite la selección adecuada del sensor de temperatura con su respectivo acondicionamiento y el tipo de señal que envía hacia el controlador; así como también se habla de la selección del tipo de actuador, su corriente y capacidad de funcionamiento para el dimensionamiento de elementos eléctricos. Adicionalmente, se detalla el diseño de la HMI a través de un software amigable con el usuario, siguiendo parámetros basados en la guía GEDIS, con la finalidad de proporcionar una interfaz de control y monitoreo factible para el usuario.

Finalmente, se detallan los pasos y procesos que se realizaron para la implementación de los subsistemas, iniciando con el ensamblaje del subsistema mecánico para su posterior implementación con los subsistemas electrónico y de control.

#### **3.1. Diseño de los componentes mecánicos**

##### **3.1.1. Criterios de selección**

Para poder realizar la fusión de los termopolímeros se analizaron los dispositivos más utilizados en los procesos de melt-electrospinning, los cuales son: extrusión por medio de tornillo sin fin y por medio de jeringa. Nuestra tesis al estar enfocada en la adaptación del proceso de extrusión a la máquina Y-flow,

misma que cuenta con bombas de jeringa, delimita el uso de una extrusora de jeringa puesto que permite un mejor desempeño y acoplamiento a la máquina.

### 3.1.2. Cálculos de diseño

#### 3.1.2.1. Diseño de jeringa

A la hora de seleccionar el material para la jeringa se tomaron en cuenta las condiciones de operación de la misma, así como factores químicos y mecánicos que influyen sobre la pieza; puesto que estará sometida a un ambiente agresivo dado por elementos corrosivos además de elevadas temperaturas.

Los materiales analizados se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4**  
**Materiales analizados**

Propiedades materiales	Módulo de rigidez GPa	Punto de Fusión °C	Conductividad eléctrica S/m
<b>Acero Inoxidable</b>	73,1	1430	$1,408 \cdot 10^6$
<b>Aluminio</b>	26,2	660	$37,8 \cdot 10^6$
<b>Cobre</b>	44,7	1083	$58,108 \cdot 10^6$

**Fuente:** Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Budynas R. y Nisbett K

El acero inoxidable presenta una menor conductividad eléctrica por lo cual es el material adecuado, puesto que la jeringa estará sometida a alto voltaje y se desea evitar una conducción eléctrica entre la jeringa y la resistencia. Además de caracterizarse por proporcionar alta resistencia frente a la corrosión y oxidación.

Analizando diferentes opciones se optó por seleccionar un acero inoxidable tipo 304 (ASTM A 276), el cual ofrece una serie de ventajas como son alta resistencia a la corrosión, baja conductividad eléctrica y alto grado de fusión.

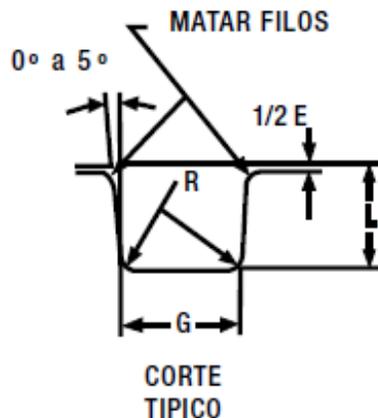
### 3.1.2.1.1. Diseño del alojamiento del O-Ring

Un O-Ring es el elemento más accesible y eficaz para prevenir la fuga de fluidos bajo distintas condiciones de servicio. Sus principales ventajas son:

- Puede ser utilizado como sello estático, cuando las piezas no tienen movimiento y también en uso dinámico de vaivén, oscilante o rotativo.
- Permite el sellado en todas las direcciones, radial, axial u oblicua.
- El fluido puede ser líquido o gaseoso.
- Disponible en medidas y tolerancias normalizadas internacionalmente.
- Se dispone de una amplia variedad de dimensiones y compuestos.
- Son de bajo precio relativo.
- En muchos casos permiten su desarme y reutilización.
- Cierran en un amplio rango de presiones, temperaturas y tolerancias.
- Una vez instalados no requieren de ajustes durante su tiempo de vida útil.
- Son de peso reducido y requieren muy poco espacio, permitiendo un diseño muy compacto

La acción de sellado del O-Ring se materializa mediante la deformación de su sección "W", obtenida a través de un correcto diseño de su alojamiento mostrado en la Figura 16.

Las dimensiones de ranura "L" y "G" pueden obtenerse de la Tabla 5 de diseño.



**Figura 14 Diseño del alojamiento de un O-Ring**  
**Fuente:** O-Ring, Parker Hannifin, Argentina S.A.I.C., 2016

Para uso estático, el aplastamiento varía del 12% al 25%. En uso dinámico la deformación debe ser del 8% al 20%. En alojamientos existentes, la cota "L" debe garantizar una deformación de la sección "W", no inferior a 0.25 mm en valor absoluto.

**Tabla 5**  
**Medidas para el diseño de alojamiento de un O-Ring**

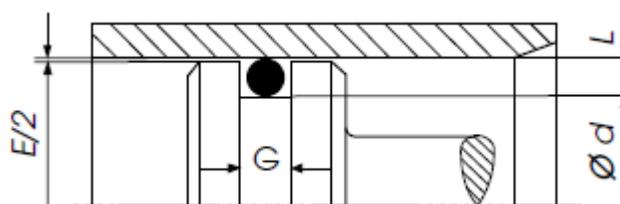
Tabla de Diseño				
Secc "W"	Dimensiones de Alojamiento			
	Profundidad "L"		Ancho "G" ± 0,1	Radio "R"
	Estático	Dinámico		
1,78	1,25	1,4	2,5	0,1
	1,35	1,45		0,4
2,62	2,05	2,25	3,7	0,1
	2,15	2,3		0,4
3,53	2,8	3,05	4,9	0,2
	2,95	3,1		0,6
5,33	4,3	4,65	7,3	0,5
	4,5	4,75		1
6,99	5,75	6	9,7	0,5
	5,95	6,1		1

**Fuente:** O-Ring, Parker Hannifin, Argentina S.A.I.C., 2016

En donde se selecciona un O-Ring de sección 2.62mm, cuya profundidad L (dinámico) es 2.30mm; ancho 3.7mm y radio 0.4mm.

### Sello de pistón- Deformación radial

El diámetro interior del O-Ring "D.I", deberá ser igual o menor a "d". Estiramiento máximo: 7%. La Figura 17 muestra el diagrama para la selección del sello del pistón.

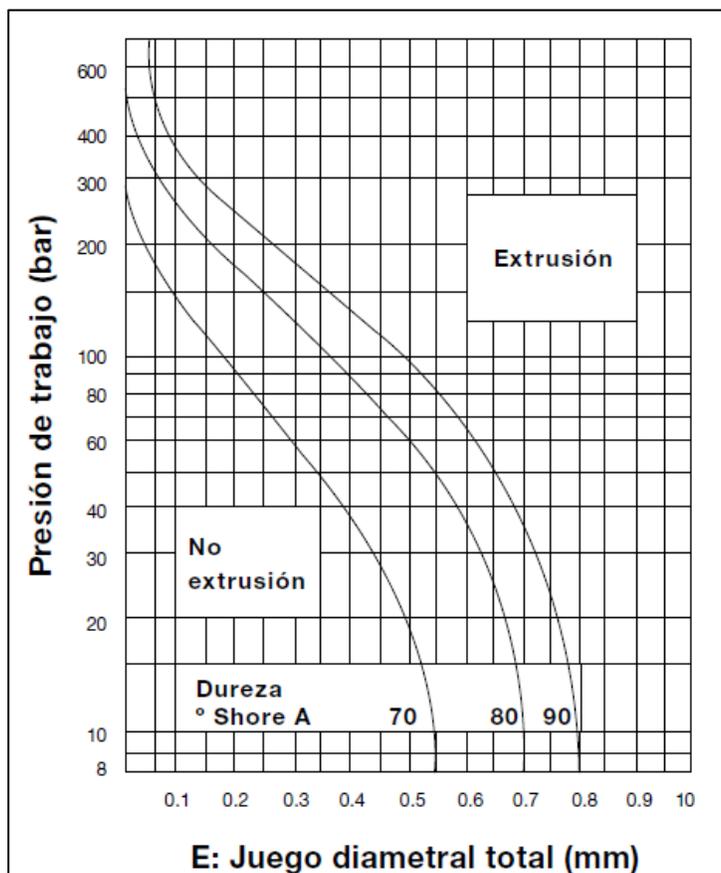


**Figura 15 Sello de pistón**

**Fuente:** O-Ring, Parker Hannifin, Argentina S.A.I.C., 2016

### Extrusión

Es el daño que experimenta el O-Ring sometido a elevadas presiones considerables. Para predecir este fallo puede recurrirse a la utilización de la Figura 18, donde se delimita las zonas de trabajo de los distintos compuestos en función de la dureza, presión y holgura "E", del alojamiento.



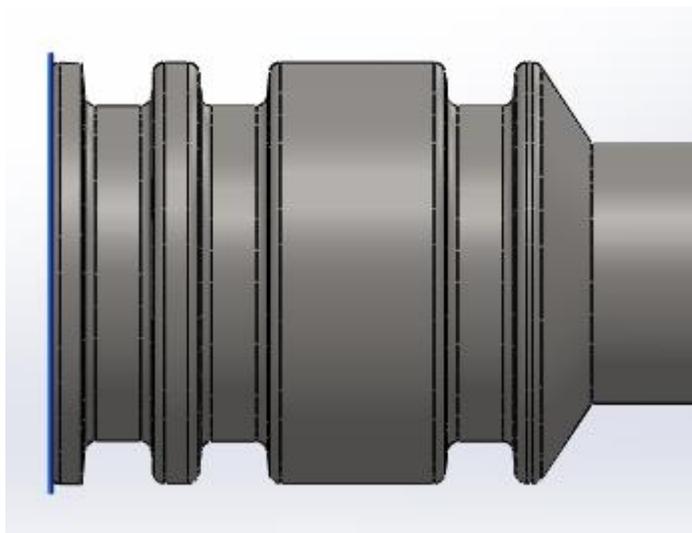
**Figura 16 Zonas de trabajo de O-Ring**

**Fuente:** O-Ring, Parker Hannifin, Argentina S.A.I.C., 2016

La presión a la cual va a trabajar nuestro pistón se encuentra en los 500 PSI (34.5 bar; 3.47 MPa) puesto que las jeringas existentes en el mercado se encuentran en ese rango de presión; lo cual nos especifica un juego diametral de 0.7mm.

Para el dimensionamiento del alojamiento de los O-Ring en el pistón de la jeringa se obtuvieron los datos de la tabla del catálogo indicado en el Anexo A y se muestra en la Figura 19.

Finalmente, se seleccionaron O-Rings de silicón debido a las características mostradas en la Tabla 6.



**Figura 17** Diseño del alojamiento de los O-Ring en el embolo del pistón

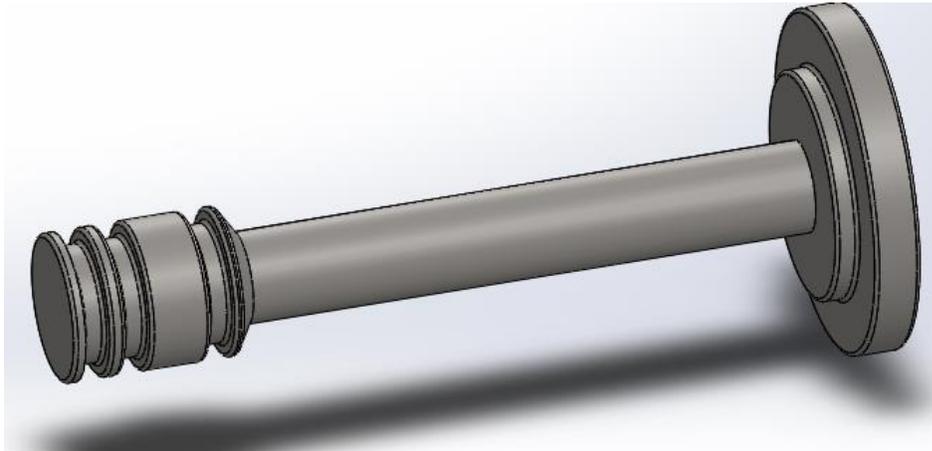
**Tabla 6**  
Características de O-Ring de Silicón

Propiedades mecánicas	Baja resistencia al desgaste
	Excelente Resistencia a la Permeación
	Elongación 150% (ASTM D2000)
Temperatura máxima de operación	300°C

### 3.1.2.1.2. Diseño del pistón

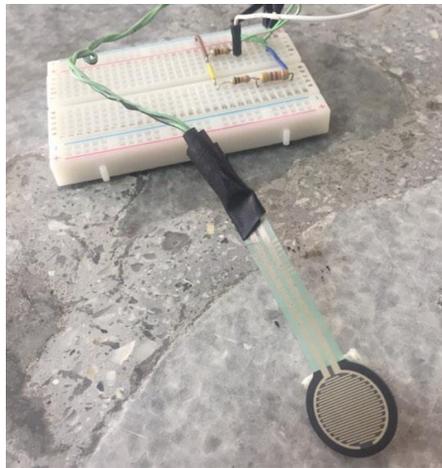
El pistón es el encargado de ejercer la fuerza necesaria para romper la inercia que posee el fluido y expulsar el material por el orificio de la jeringa.

El diseño del pistón se presenta en la Figura 20.

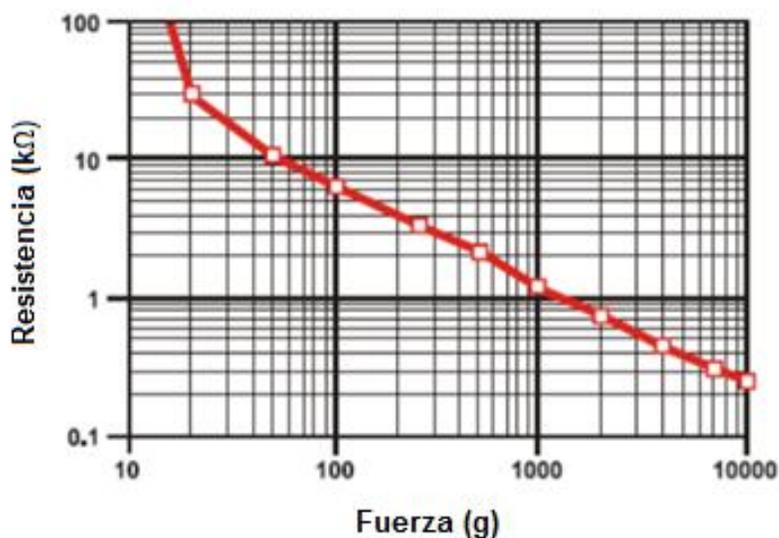


**Figura 18 Diseño en Software CAD del pistón**

Para determinar la fuerza de empuje que ejerce la bomba de jeringa sobre el pistón se emplea un sensor de fuerza MF01 como se observa en la Figura 18. Éste cambia su resistencia al detectar una flexión en su membrana; sin embargo presenta una respuesta no lineal como se muestra en la Figura 19.



**Figura 19 Sensor de fuerza MF01**



**Figura 20 Característica Resistencia vs. Fuerza del sensor MF01**

**Fuente:** Sensor de Fuerza o Presión, HETPRO, Febrero 2015

En la Tabla 7 se citan algunas de las características que presenta dicho sensor.

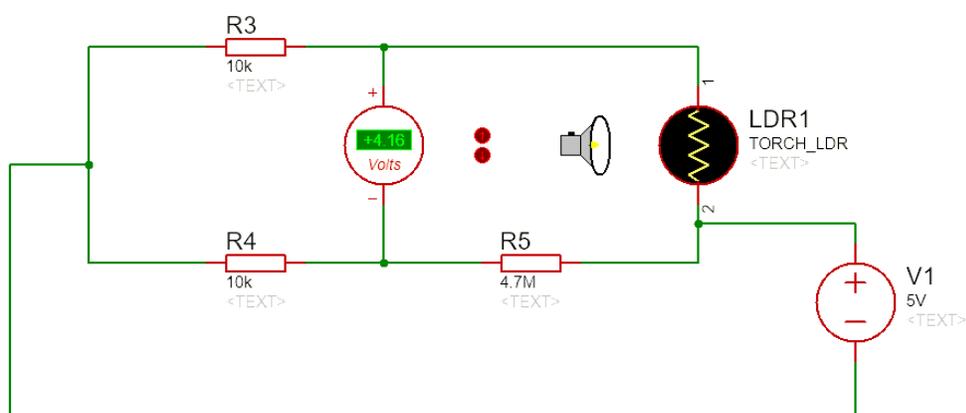
**Tabla 7**  
**Características del sensor MF01**

Parámetro	Valor
Rango de sensibilidad de la fuerza	<100 g hasta >10 kg
Rango de sensibilidad de la presión	<1,5 psi hasta >150 psi
Repetibilidad de la fuerza	±2% a ±5% de la resistencia nominal establecida
Resolución de la fuerza	Mejor que 0.5%
Resistencia sin aplicar fuerza	>1MΩ
Rango de temperatura	-30°C a +70°C
Máxima corriente	1 mA/cm <sup>2</sup>

**Fuente:** Análisis del funcionamiento del sensor de fuerza resistivo (FSR) con LabView, Highlights

Para realizar una medición adecuada del sensor se realiza un circuito de acondicionamiento mostrado en la Figura 20, en este caso se emplea un puente de Wheatstone que permite medir pequeñas variaciones de resistencia del sensor y consecuentemente apreciar de mejor forma las mediciones realizadas.

Dichas valores se obtienen a través de la tarjeta Arduino Uno, en donde se adquiere un valor de voltaje en Volts que se traduce a la fuerza aplicada en Newtons mediante la respuesta del sensor citada en la Tabla 9.



**Figura 21 Sensor de fuerza acondicionado**

**Tabla 8**  
**Respuesta del sensor MF01**

Fuerza (N)	Resistencia sensor [ $\Omega$ ]	Corriente a través del sensor [mA]	Voltaje a través del sensor [V]
Ninguno	Infinito	0	0
0.2	30K	0.13	1.3
1	6K	0.31	3.1
10	1K	0.45	4.5
100	250	0.49	4.9

**Fuente:** Sensor de Fuerza o Presión, HETPRO, Febrero 2015

Se realizaron pruebas empleando un eje de acero colocado sobre la bomba de jeringa, con lo cual se obtuvo un valor máximo de voltaje en el sensor de 4.3 V para un caudal de 10ml/min. Con dichos datos se realiza una interpolación de valores tomando los datos de la Tabla 10:

$$y = y_0 + \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}(x_1 - x_0) \quad (1)$$

**Tabla 9**

**Valores de interpolación para obtención de fuerza en el sensor**

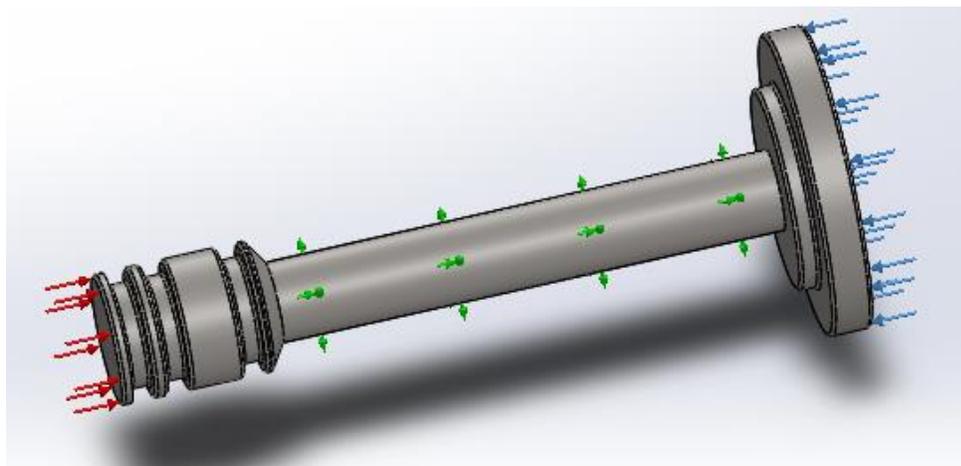
$x_0 = 3.1 V$	$y_0 = 1 N$
$x = 4.3 V$	$y = ?$
$x_1 = 4.5 V$	$y_1 = 10 N$

$$y = 1 + \frac{10 - 1}{4.5 - 3.1}(4.5 - 3.1)$$

$$y = 8.7 N$$

Sin embargo, debido a la sensibilidad del sensor se estableció un error del 5% en la medición; tomando así el valor de 4.5V con el cual se realiza el análisis estático con una fuerza ejercida de 10N sobre el émbolo.

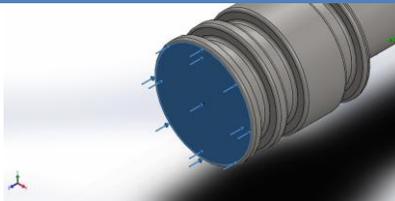
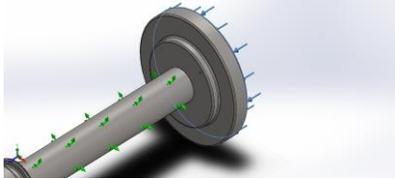
El análisis estático de dicho elemento se realiza empleando un software CAD, puesto que será sometido a diferentes cargas como se muestra en la Figura 24. De acuerdo al software, el émbolo posee una masa de 0.210 kg y peso de 2.058 N.



**Figura 22 Localización de cargas en el pistón para análisis estático**

En la Tabla 10 se detallan los valores de las cargas aplicadas sobre el elemento para su posterior análisis.

**Tabla 10**  
**Datos de entrada para análisis estático de pistón**

Carga	Representación	Carga aplicada
Presión		Tipo: Normal a la cara seleccionada Valor: 500 psi
Fuerza		Tipo: Normal Valor: 10 N

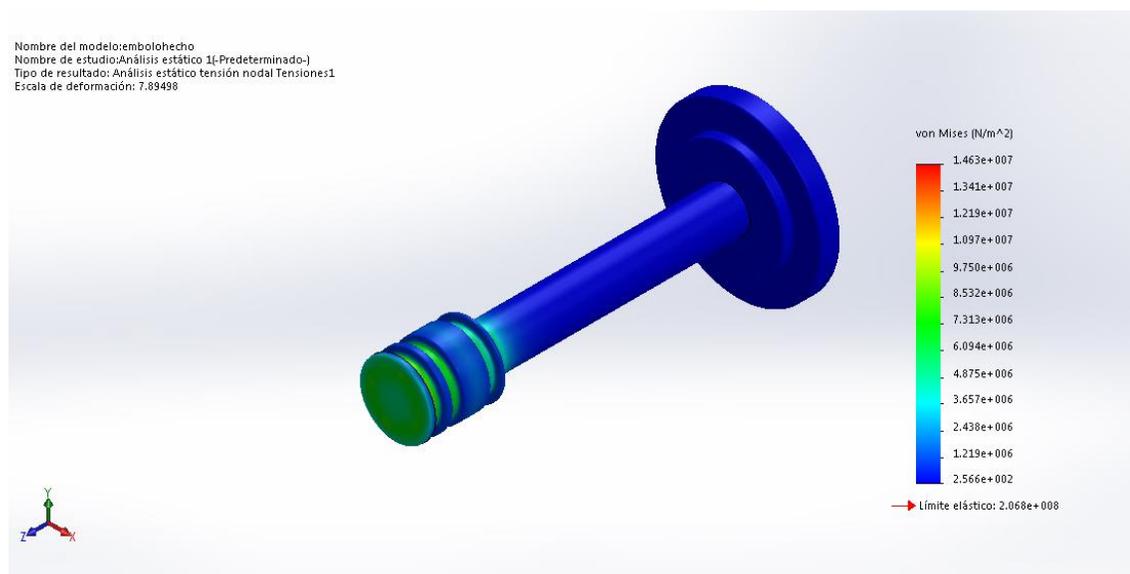
En base a ello y realizando un mallado estándar del sólido, se obtuvieron los siguientes resultados:

**Tabla 11**  
**Esfuerzos máximo y mínimo producidos en el émbolo**

Nombre	Valor mín	Valor máx
<b>Esfuerzo de Von Mises (N/m<sup>2</sup>)</b>	256.551	1.46255e+007

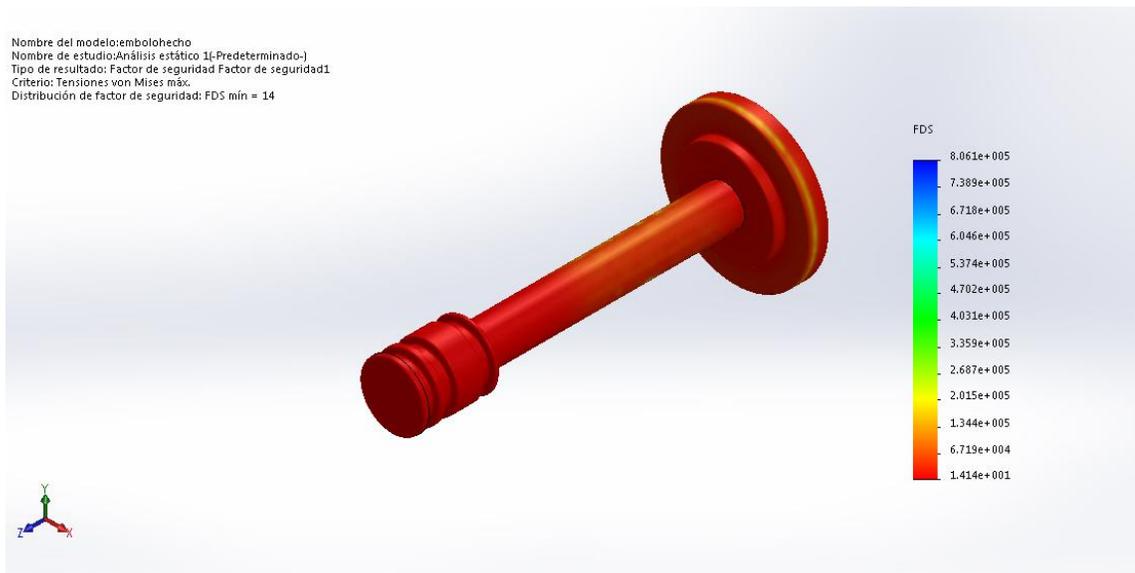
De acuerdo con el análisis realizado se tiene como valor máximo 14.62 (MN/m<sup>2</sup>), el cual está presente en puntos donde existen cambios de sección conocidos como puntos críticos; sin embargo, se reducen los esfuerzos producidos en los mismos realizando redondeos.

La Figura 25 muestra las zonas donde se producen mayores esfuerzos, en este caso presentes en los alojamientos de los O-Ring; mientras que existen esfuerzos mínimos a lo largo del vástago.



**Figura 23 Análisis de esfuerzo de Von Mises**

Finalmente se obtiene el factor de seguridad como se observa en la Figura 26 para verificar un adecuado diseño del pistón y evitar que se produzcan fallas al momento de ponerlo en funcionamiento.



**Figura 24 Análisis de factor de seguridad**

El factor de seguridad está definido por la siguiente ecuación:

$$n = \frac{S_y}{\sigma_e} \quad (2)$$

En donde:

$S_y$ : límite de fluencia

$\sigma_e$ : esfuerzo máximo (Von Mises)

Por tanto, se tiene:

$$n = \frac{2.068 \times 10^8}{1.463 \times 10^7}$$

$$n = 14.13$$

El valor obtenido es de 14.13, mismo que supera al valor ideal establecido  $n=2$ ; por tanto, se acepta el diseño realizado para el émbolo.

### 3.1.2.1.3. Diseño del cilindro de la jeringa

Para el diseño del cilindro, se comienza calculando el diámetro interior del mismo, en donde el diámetro del pistón se determina con el cálculo del alojamiento para el O-Ring:

#### Diámetro Interior del Cilindro

$$Di \text{ cilindro} = (Holgura * 2) + D \text{ pistón} \quad (3)$$

$$Di \text{ cilindro} = (0.35mm * 2) + 19.44mm$$

$$Di \text{ cilindro} = 20.14mm$$

#### Radio Interior del Cilindro

$$Ri \text{ cilindro} = \frac{20.14}{2} mm$$

$$Ri \text{ cilindro} = 10.07mm$$

Se retoman la presión máxima seleccionada que soportará la jeringa

$$Presión \text{ máxima} = 3.447 \frac{MN}{m^2} = 3.447 MPa$$

Se selecciona un material que tenga una conductividad térmica media y módulo cortante alto, como es el Acero Inoxidable Tipo 304, los datos más relevantes a considerar del material en los cálculos se detallan en el Anexo B, entre ellos se tiene:

- *Esfuerzo cortante admisible: 550MPa*
- *Módulo de elasticidad: 193000MPa*
- *Coefficiente de Poisson: 0.305*

Cálculo del espesor mínimo del cilindro

$$Emín cilindro = \frac{Presión máx * Radio Interior}{Esfuerzo cortante - (0.6 * Presión máx)} \quad (4)$$

$$Emín cilindro = \frac{3.447MPa * 10.07mm}{550MPa - (0.6 * 3.447MPa)}$$

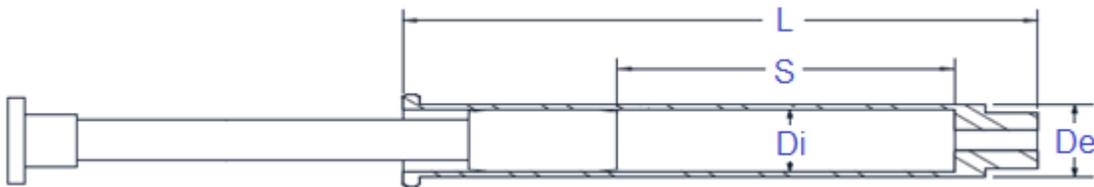
$$Emín cilindro = 0.068mm$$

Se determina que el cilindro debe tener un espesor mayor a 0.068mm. Sin embargo, para realizar el mecanizado de la pieza se necesita un valor más grande por lo cual se opta espesor de 3mm.

Dimensiones del cilindro

El cilindro consta de 4 medidas básicas que se aprecian en la Figura 27:

- L: Distancia total del cilindro
- S: Recorrido del pistón
- Di: Diámetro Interno
- De: Diámetro externo



**Figura 25 Dimensiones del cilindro**

La jeringa se diseña para un volumen de 20ml, con lo cual:

$$20ml = \pi * \left(\frac{Ri}{2}\right)^2 * S$$

$$S = \frac{20000\text{mm}^3}{\pi * (10.07\text{mm})^2}$$

$$S = 62.77\text{mm}$$

Aproximando, se tiene:

$$S = 63\text{mm}$$

### Dilatación térmica del cilindro

El coeficiente de dilatación del acero inoxidable es de  $17.8 \times 10^{-6} \text{C}^{-1}$  y el incremento de temperatura  $\Delta T$  se obtiene de restar la temperatura ambiente aproximadamente  $20^\circ\text{C}$  a la temperatura crítica de  $240^\circ\text{C}$  (máxima temperatura de trabajo).

$$\text{Dilatación} = \text{Long } f - \text{Long } i \quad (5)$$

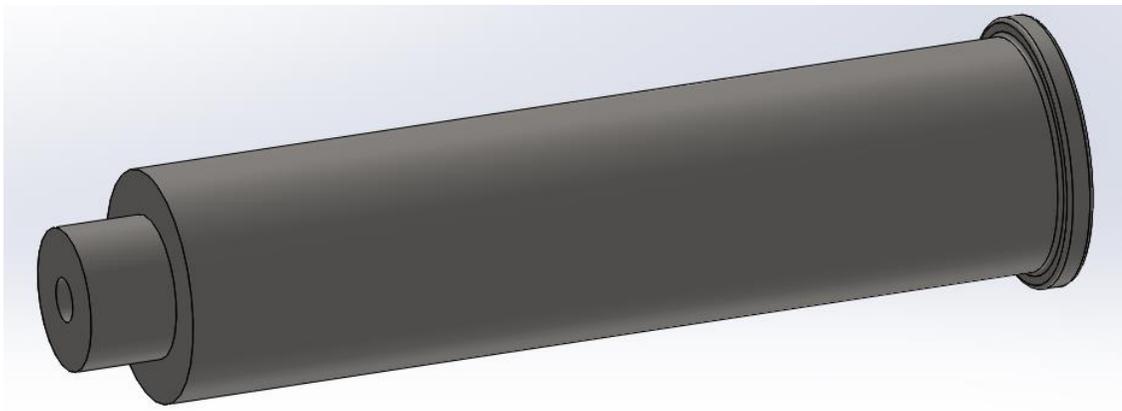
$$\text{Long } f = \text{Long } i * \text{Coef dilatación} * \Delta T + \text{Long } i \quad (6)$$

Con las ecuación 5 y 6 obtenemos

$$\text{Long } f = 120\text{mm} * 17.8 \times 10^{-6} \text{C}^{-1} * 220^\circ\text{C} + 120\text{mm} = 120.4699\text{mm}$$

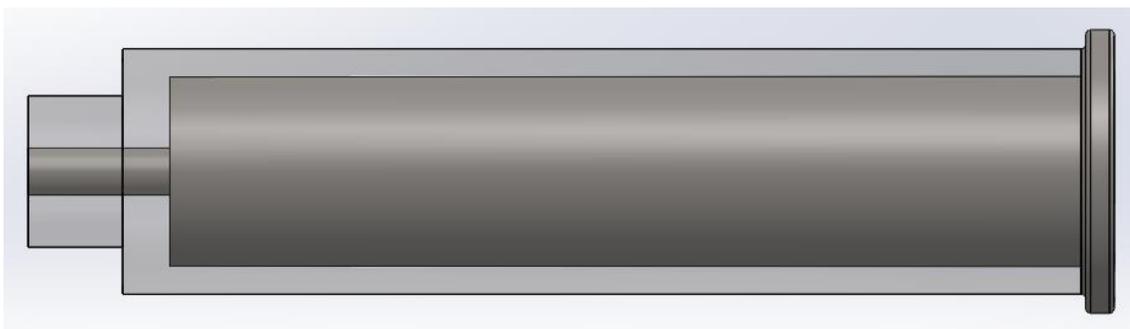
$$\text{Dilatación} = 120.4699 - 120 = 0.4699\text{mm}$$

El diseño del cilindro de la jeringa se presenta en la Figura 28.



**Figura 26 Diseño en Software CAD del cilindro**

En la Figura 29 se puede apreciar el cambio de sección en la parte final de la jeringa, esto se debe a que el fluido es forzado a salir por un agujero más pequeño en donde ingresa una aguja de diámetro 2mm, misma que es sometida a alto voltaje para poder crear las microfibras. Al ser la aguja de un diámetro tan pequeño se procedió a realizar un acople que permita un correcto posicionamiento entre la aguja y la salida de la jeringa.

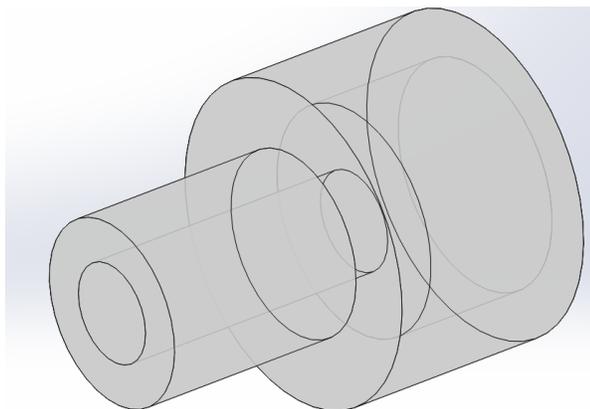


**Figura 27 Estructura interna del cilindro**

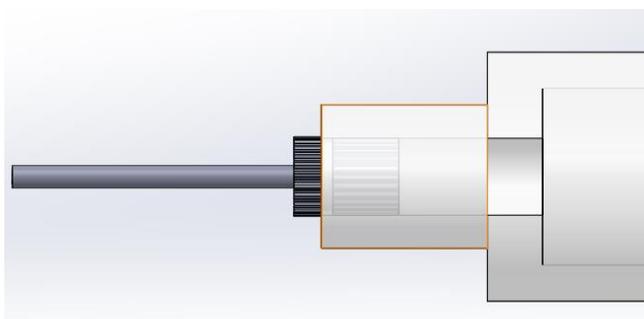
#### **3.1.2.1.4. Diseño del acople para la jeringa**

El acople se realizó de otro material puesto que es necesario aislar eléctricamente la aguja del resto del sistema; por tal razón se eligió el teflón, mismo que presenta una dureza más pequeña, permite fácil maquinabilidad y soporta temperaturas de hasta 300°C.

Para poder adaptar el acople al final de la jeringa se optó por realizar un roscado interno en la parte superior y en la parte inferior para adaptar a la aguja; el diseño del acople se puede apreciar en las Figura 30 y 31.

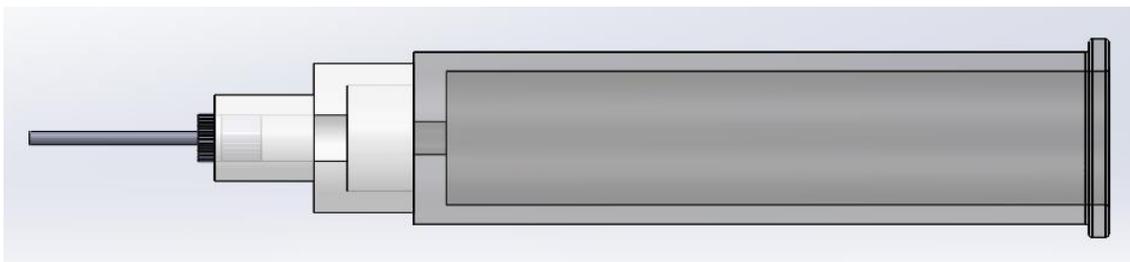


**Figura 28 Diseño en Software CAD del acople**



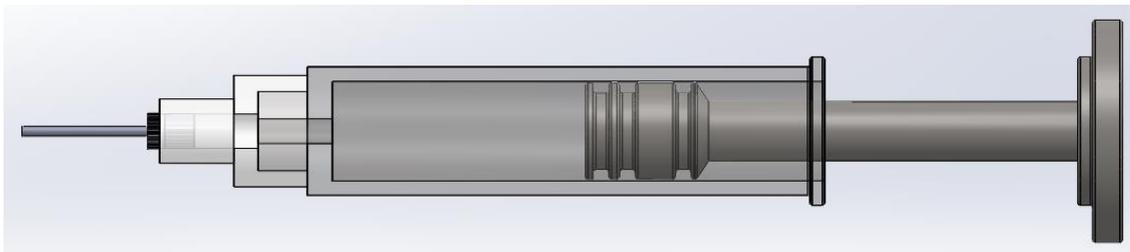
**Figura 29 Estructura interna del acople con la aguja**

En la Figura 32 se presenta el ensamble del acople con la jeringa, las tres piezas se articulan mediante un roscado.



**Figura 30 Ensamble del acople con la jeringa**

En la Figura 33 se muestra el ensamble de todas las piezas que conforman la jeringa.



**Figura 31 Ensamble final de la jeringa**

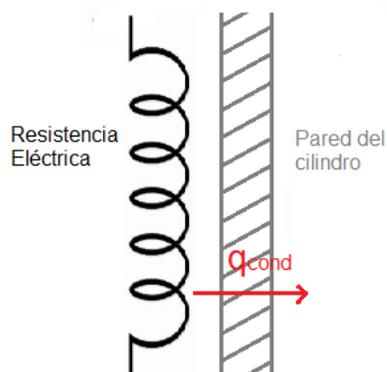
### 3.1.2.2. Diseño y selección de los calentadores

#### Transferencia de calor

Se realizan los cálculos de transferencia de calor por conducción, con objeto de determinar las pérdidas de energía en forma de calor producida durante el proceso de extrusión.

El sistema de extrusión diseñado consta de una resistencia eléctrica que se encarga de calentar al cilindro donde se aloja el material a fundirse. Sin embargo, debido a la presencia de alto voltaje necesario para el proceso de melt-electrospinning, se requiere que la resistencia no entre en contacto directo con la pared del cilindro; por tanto, existe una capa de aire entre ambos elementos.

En la Figura 34 se representa la transferencia de calor existente.

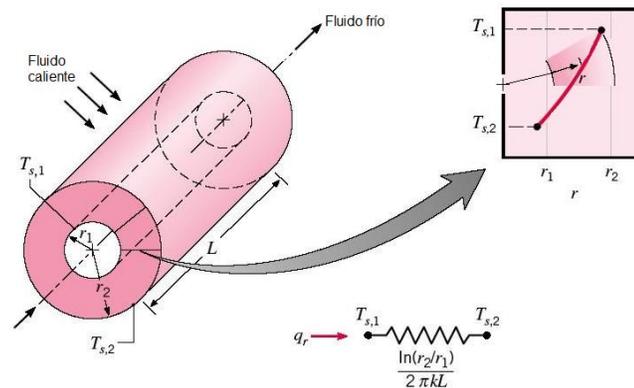


### Figura 32 Transferencia de calor existente en el sistema de extrusión

En donde:

- $q_{cond}$ : conducción a través de la pared del cilindro

Para los cálculos de transferencia de calor se utiliza la fórmula de conducción en una pared cilíndrica como se indica en la Figura 35.



### Figura 33 Modelo de transferencia de calor en un cilindro

En donde:

$T_{s,1}$ : Temperatura interna del cilindro [°K]

$T_{s,2}$ : Temperatura externa del cilindro [°K]

$r_1$ : Radio interno del cilindro [m]

$r_2$ : Radio externo del cilindro [m]

$L$ : Longitud del cilindro en contacto con la resistencia [m]

$k$ : Conductividad térmica del material [W/m°K]

$$q_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (7)$$

Para desarrollar los cálculos se tomaron los datos de  $k$  del acero inoxidable 304 del Anexo C, en donde se extraen los valores de la conductividad térmica del acero citados en la Tabla 12:

**Tabla 12**  
**Conductividad térmica del acero inoxidable 304**

Temperatura °C	$k$ del acero
150	21
100	16

Las temperaturas con las cuales se va a trabajar son las temperaturas de fusión de los polímeros por lo cual se deben realizar extrapolaciones para obtener las  $k$  correspondientes a cada temperatura.

- Temperatura de fusión del APP: 170°C
- Temperatura de fusión del IPP: 220°C
- Temperatura de fusión del LDPE: 200°C

Se obtienen los siguientes valores de  $k$ :

**Tabla 13**  
**Valores extrapolados de  $k$**

Temperatura °C	$k(W/m^{\circ}K)$ del acero
<b>100</b>	16
<b>150</b>	21
<b>170</b>	23
<b>200</b>	26
<b>220</b>	28

En base a la Tabla 13 y la ecuación 12, se calculan las pérdidas de calor existentes para la fusión de cada polímero:

- Pérdida producida en la fusión de APP

$$q_r = \frac{2\pi * 0.06m * 23 \frac{W}{m^{\circ}K} (443 - 440)^{\circ}K}{\ln(0.013m/0.01007m)}$$

$$q_r = 101.85 \text{ W}$$

- Pérdida producida en la fusión de LDPE

$$q_r = \frac{2\pi * 0.06m * 26 \frac{W}{m^{\circ}K} (493 - 491.5)^{\circ}K}{\ln(0.013m/0.01007m)}$$

$$q_r = 57.56 \text{ W}$$

- Pérdida producida en la fusión de IPP

$$q_r = \frac{2\pi * 0.06m * 28 \frac{W}{m^{\circ}K} (493 - 492)^{\circ}K}{\ln(0.013m/0.01007m)}$$

$$q_r = 41.33 \text{ W}$$

Se observa que a medida que incrementa la temperatura de fusión, las pérdidas de calor existentes disminuyen debido a la característica de conductividad del material. Con la finalidad de reducir las pérdidas causadas por el flujo de aire externo, se diseñó una caja que evita la circulación de aire en la zona de contacto de la jeringa con la resistencia eléctrica y permite la concentración de calor en el extrusor.

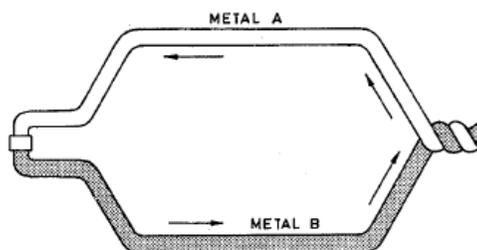
## 3.2. Diseño de los subsistemas eléctricos y/o electrónicos

### 3.2.1. Criterios de selección del sensor de temperatura

Para realizar la medición de la temperatura dentro de los rangos establecidos se pueden utilizar diferentes tipos de elementos. Sin embargo, considerando que se requiere electrónicamente controlar el proceso, se necesita que cumpla con ciertas características:

- Tener como salida una señal eléctrica
- Cubrir el intervalo de temperatura acorde a la aplicación

Más de un 98% de los sensores de temperatura utilizados en la industria del plástico son pares termoplásticos o conocidos por su nombre comercial como “termocuplas” (Figura 36). Consta de dos alambres de material distinto que se unen en uno de sus extremos, en donde al aplicar temperatura se produce una diferencia de potencial en el otro extremo. A este fenómeno se lo conoce como efecto Seebeck. (Maldonado & Vega, 2010)



**Figura 34 Termopar**

**Fuente:** Control de temperatura de sólidos mediante la utilización de termocuplas, Benigno L., 1989

Existen una infinidad de tipos de termocuplas, pero casi el 90% de las termocuplas utilizadas son del tipo J o del tipo K. (Suárez, 2015)

En la Tabla 14 se presentan las características y aplicaciones de los principales tipos de termocuplas.

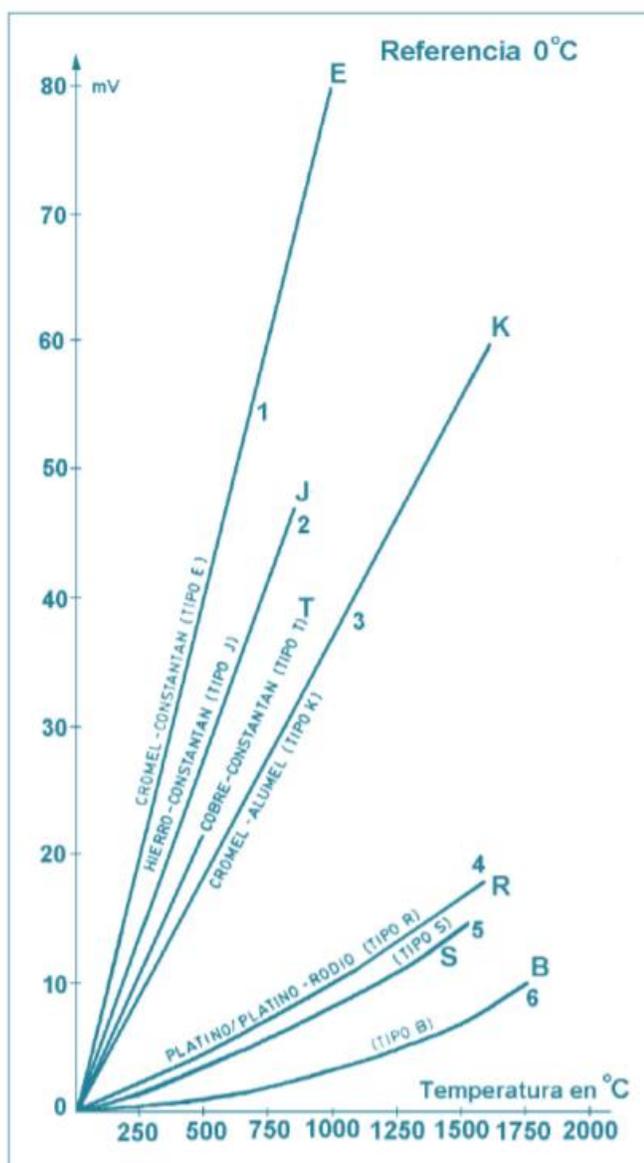
**Tabla 14**  
**Tipos de termocuplas y características**

Tipo ANSI	Metales	Sensibilidad ad mV/100°C	Rango de T°	Uso	Aplicación
J	Fe/Cu-Ni	5.6	-40 a 750	Atmósferas oxidantes y reductoras o atmósferas	Industria del plástico (extrusión e inyección) y

				de gas inerte.	fundición de metales.
<b>K</b>	Cromel (Cr-Ni) Alumel (Al-Ni)	3.6	-40 a 1200	Atmósferas oxidantes o de gas inerte.	Fundición y hornos.
<b>T</b>	Cobre/ Constantán	4.5	-50 a 400	Ideales para temperatura s bajo cero.	Industria de alimentos.
<b>E</b>	Cromel/ Constantán	7.9	-40 a 900	Atmósferas oxidantes o de gas inerte.	Industria siderúrgica.

**Fuente:** Termopares – Información Técnica, WIKA, 2016

La Figura 37 muestra la curva característica Voltaje – Temperatura para cada tipo de termocupla con referencia en 0°C.



**Figura 35 Curva tensión – temperatura para tipos de termocuplas**

**Fuente:** Termopares – Información Técnica, WIKA, 2016

Para pequeños cambios de temperatura en los termopares tipo E, J y K, el voltaje es linealmente proporcional a la temperatura.

$$V \propto T$$

En donde la constante de proporcionalidad es el coeficiente de Seebeck.

De acuerdo al rango de temperatura, características y aplicación que se encuentran en el Anexo D se selecciona el termopar tipo K (Cromel – Alumel).

Para realizar la medición de este sensor se optó por la utilización de un módulo de acondicionamiento MAX6675 que cuenta con las características detalladas en el Anexo E.

### 3.2.2. Criterios de selección del actuador

Dentro de la industria del plástico, específicamente en máquinas de inyección son ampliamente utilizadas las resistencias eléctricas tipo abrazaderas, debido a que mantienen una temperatura uniforme a lo largo de su sección y pueden ser ajustables de acuerdo al diámetro del cilindro que contiene el material a fundir.

Una resistencia es conocida como un elemento que se opone al paso de la corriente eléctrica a través de él. El valor de la resistencia de un cuerpo de longitud  $l$ , sección uniforme  $s$  y de resistividad  $r$ , está dado por la siguiente expresión (Benigno, 1989).

$$R = r \times \frac{l}{s} \quad (8)$$

En donde:

$r$ : resistividad [ $\Omega \cdot m$ ]

$l$ : longitud [ $m$ ]

$s$ : área de sección [ $m^2$ ]

La resistividad es una constante que depende de cada material; los elementos resistivos calefactores pueden ser metálicos, cerámicos-metálicos o no metálicos. En este caso se selecciona de material metálico.

Las especificaciones técnicas de la Resistencia se detallan en la Tabla 15.

**Tabla 15**  
**Especificaciones técnicas de la Resistencia**

Especificaciones técnicas	
Especificaciones	Valor
Potencia [W]	200
Voltaje de operación [V]	110
Longitud [mm]	60
Diámetro interno [mm]	30
Tipo	Metálica

Para el cálculo de corriente que necesita el actuador, se emplea el principio de la ley de Ohm:

$$V = I \cdot R \quad (9)$$

$$P = V \cdot I = I^2 \cdot R = V^2 / R$$

$$I = P / V$$

$$I = 1.82 \text{ A}$$

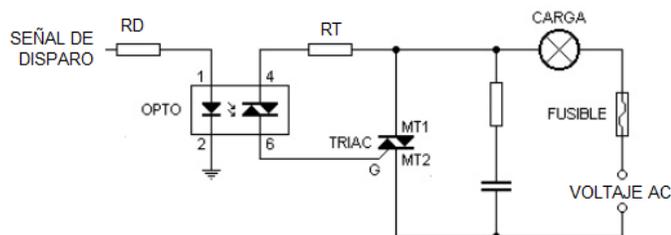
### 3.3. Diseño de circuito de potencia

En el diseño del circuito de potencia se plantearon los requerimientos técnicos para su correcto funcionamiento. Para controlar la resistencia de forma digital se requiere de una modulación por ancho de pulsos (PWM), por tal razón se desarrolló el circuito de potencia que se observa en la Figura 38.

El circuito seleccionado tiene como elemento de conmutación un Optoacoplador MOC, mismo que controla el disparo de un Triac de potencia, puesto que con el empleo de este tipo de dispositivos se garantiza un perfecto aislamiento entre el circuito de disparo y el circuito de potencia; este se encarga

de controlar el paso de corriente alterna hacia la abrazadera, permitiendo manipular el incremento y disminución de temperatura.

Según nuestras necesidades y la disponibilidad en el mercado se seleccionó el MOC 3041 que posee cruce por cero y un TRIAC BT137. Las características de ambos elementos se citan en la Tabla 16 y Tabla 17.



**Figura 36 Etapa de potencia**

A continuación se presentan los parámetros para cálculos de la etapa de potencia en circuitos con tiristor y MOC.

La siguiente ecuación representa el cálculo de la resistencia de disparo  $R_D$ , dicha resistencia debe estar en la entrada del led de disparo del MOC.

$$R_D = \frac{V_{cr}}{I_{FT}} \quad (10)$$

La resistencia  $R_T$ , se encarga de dar un valor adecuado para  $I_F$  cuando se dispara el tiristor y se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$R_T = \frac{V_R}{I_F} \quad (11)$$

**Tabla 16**  
**Características principales del MOC 3041**

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	RANGO	UNIDAD
<b>VR</b>	Voltaje de conducción	6	V
<b>IF</b>	Corriente de conducción	60	mA
<b>IFT (Max)</b>	Corriente máxima de conducción	1	A

**Fuente:** (Datasheet MOC 3041)

**Tabla 17**  
**Características Triac BT137**

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	RANGO	UNIDAD
<b>IG</b>	Corriente disparo de puerta	50	mA
<b>VG</b>	Voltaje disparo de puerta	2	V

**Fuente:** (Datasheet TRIAC BT137)

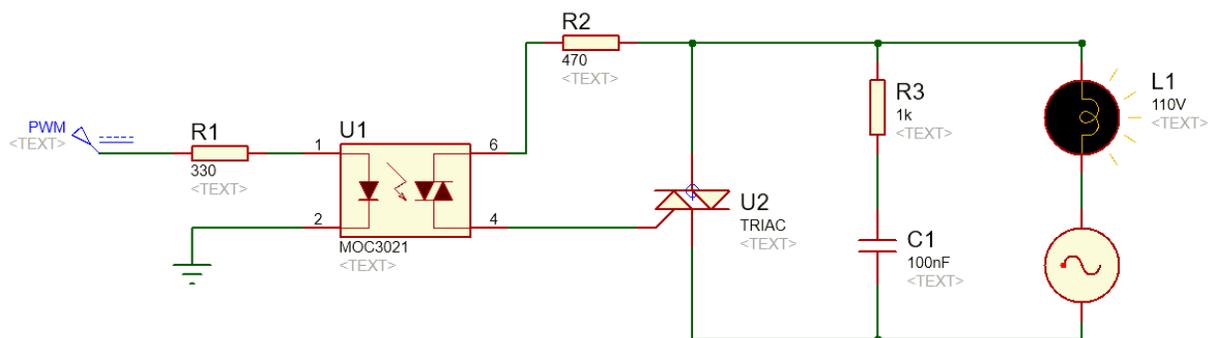
Analizando la información de cada uno de elementos y con las ecuaciones 10 y 11 anteriores se obtuvieron los resultados de resistencias que se muestran en la Tabla 18.

**Tabla 18**  
**Valores para circuito de acondicionamiento actuador**

SÍMBOLO	VALOR CALCULADO
<b>RD</b>	330 $\Omega$
<b>RT</b>	470 $\Omega$
<b>C</b>	100 nF
<b>R1</b>	1k $\Omega$

Los elementos C y R1 sirven como circuito de protección para evitar que se produzca sobrecalentamiento en el TRIAC.

En la Figura 39 se muestra el circuito de potencia con cada uno de sus elementos.



**Figura 37 Diagrama de circuito implementado**

### 3.4. Diseño de los componentes del sistema del Control

#### 3.4.1. Selección de tarjeta de control

Se analizaron tres tipos de tarjeta de control con la finalidad de determinar el más adecuado para la realización del subsistema electrónico, las características de éstos se muestran en la Tabla 19.

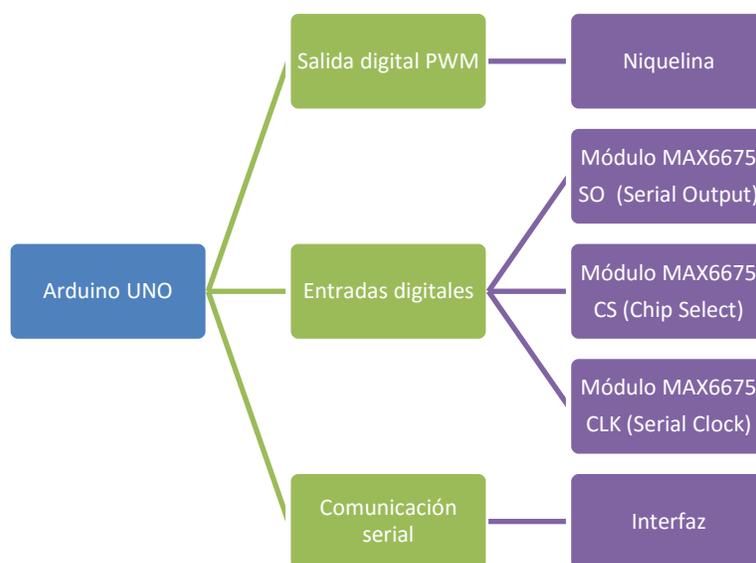
**Tabla 19**  
**Comparación de tarjetas de control**

	Arduino UNO	Arduino MEGA	PIC
<b>Disponibilidad en el mercado</b>	SI	SI	SI
<b>Facilidad de programación</b>	SI	SI	NO
<b>Fácil conexión e implementación</b>	SI	SI	NO
<b>Accesibilidad de precio</b>	SI	NO	SI

Por la disponibilidad en el mercado y facilidad de comunicación hacia el ordenador, se seleccionó la placa *Arduino UNO*. Esta placa cuenta con las siguientes características:

- Dispone de 6 pines de entrada analógicos
- Dispone de 14 pines que pueden configurarse como entrada o salida 6 de ellos se pueden utilizar como PWM
- Una velocidad de procesamiento de al menos 16MHz

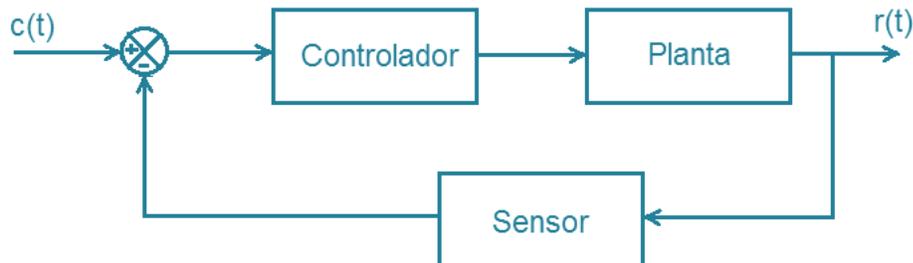
Esquema de control que realiza la tarjeta se muestra en la Figura 40.



**Figura 38 Esquema de control**

### 3.4.2. Criterios de selección del tipo de controlador

El control se desarrolla en configuración de lazo cerrado, como se representa en la Figura 41.



**Figura 39 Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado**

Dentro del control de temperatura se debe tomar en cuenta parámetros fundamentales como sobre-pico, tiempo de estabilización y error en estado estable. Las variables de entrada y salida que intervienen para el control se muestran en el sistema de la Figura 42.



**Figura 40 Diagrama de bloques del sistema a controlar**

En base a la descripción realizada en el capítulo 2, se presenta una comparación entre los tipos de controladores con sus ventajas y desventajas descritos en la Tabla 20.

**Tabla 20**  
**Ventajas y desventajas de los controladores.**

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

Un sistema en donde se requiere controlar la temperatura presenta características de dinámica lenta y perturbaciones de baja frecuencia; por tanto, es necesario realizar una acción de control que mantenga el parámetro en el valor esperado, tomando en cuenta un tiempo de estabilización adecuado y un valor aceptable de error de  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  en el estado estacionario. En base a ello se decide realizar un controlador PI cuyas ventajas permiten un control adecuado para la planta, las cuales permiten aumentar la estabilidad, y no produce sobre pico.

### Elementos del control PI

El sistema de control de temperatura tiene como función controlar la potencia calorífica que genera la niquelina; el sistema cuenta con estos elementos:

- Set point: Temperatura deseada a la cual debe llegar la planta ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Señal de error: Diferencia entre la temperatura de la planta y la temperatura deseada ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Señal de control: Se produce mediante la modulación de ancho de pulso PWM, mismo que permite seleccionar intervalos de encendido y apagado del actuador.
- Señal de salida/ Variable de control: Temperatura de la planta ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Controlador: Recibe la señal de error y la transforma en señal de control para la planta.
- Planta: Representa el proceso sobre el cual se genera la variable a ser controlada.

### Identificación del sistema

Una fase importante en el diseño es la identificación que tiene como objetivo obtener un modelo matemático que reproduzca con suficiente exactitud el comportamiento del proceso. De la exactitud del modelo obtenido dependerá

posteriormente el buen comportamiento del controlador diseñado. (C. Betancor, 2008)

Existen dos métodos básicos de identificación: identificación analítica (modelado) e identificación experimental (identificación clásica). Para el modelado se requiere un conocimiento muy especializado sobre la tecnología del proceso, mientras que para la identificación clásica (que es el método más directo) se requiere aplicar al proceso señales especiales como escalones, rampas, impulsos, sinusoides o señales pseudoaleatorias. (Ogata, 2003)

Para el tipo de planta que se ha de controlar es suficiente una identificación clásica, utilizando el escalón como señal de prueba. La función escalón es la señal que más se ha aplicado en la práctica convencional del control automático, obteniéndose con ella modelos sencillos suficientemente exactos. (C. Betancor, 2008)

Para nuestra planta se elige un modelo de primer orden puesto que este se puede utilizar en procesos simples tanto como en otros más complejos si no se requiere mucha exactitud; nuestra planta tiene como señal de control la temperatura y se sabe que los sistemas térmicos tienden a ofrecer una respuesta monótona creciente sin oscilaciones.

La expresión matemática para un modelo de primer orden es:

$$G(s) = \frac{K e^{-tds}}{(1 + \tau s)} \quad (12)$$

Donde se tiene que:

$K$ : Ganancia del sistema.

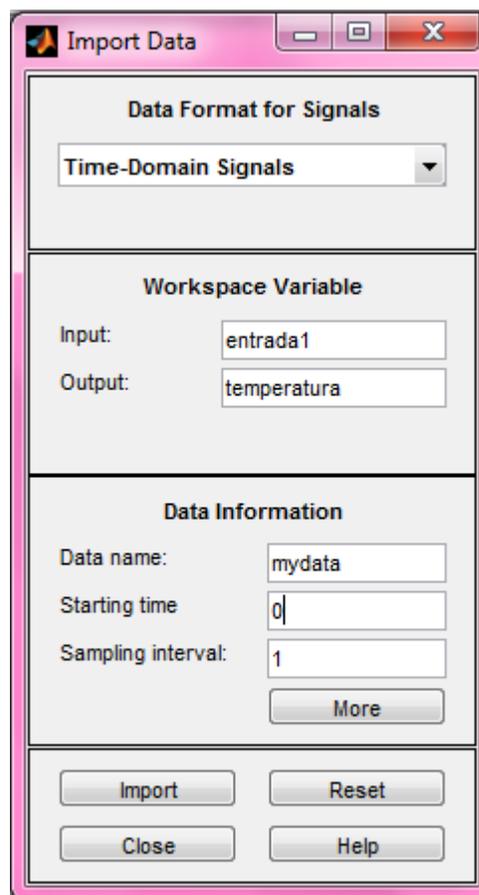
$td$ : Tiempo de retardo.

$\tau$ : Constante de tiempo.

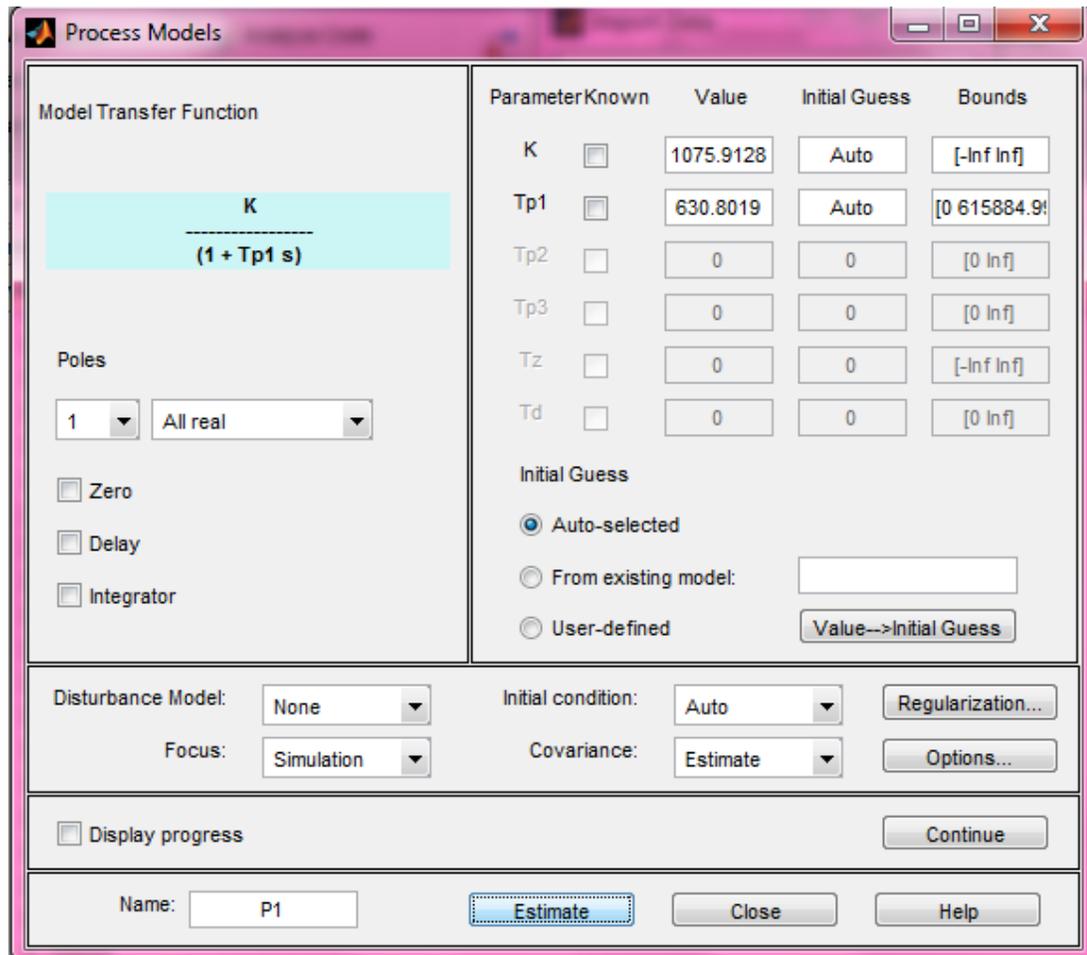
Para la identificación de nuestra planta, se utilizó el software *Matlab* el cual cuenta con la herramienta *System Identification Tool* que permite determinar los parámetros del sistema mediante la instrucción *ident*.

Se tomó como entrada un vector de 1.2 (V) y como vector de salida la temperatura obtenida.

Los datos tanto de entrada como salida se ingresan en la herramienta (Figura 43) para posteriormente obtener los parámetros de la función de transferencia (Figura 44).



**Figura 41 Ingreso de los valores de los vectores de entrada y salida de la planta**

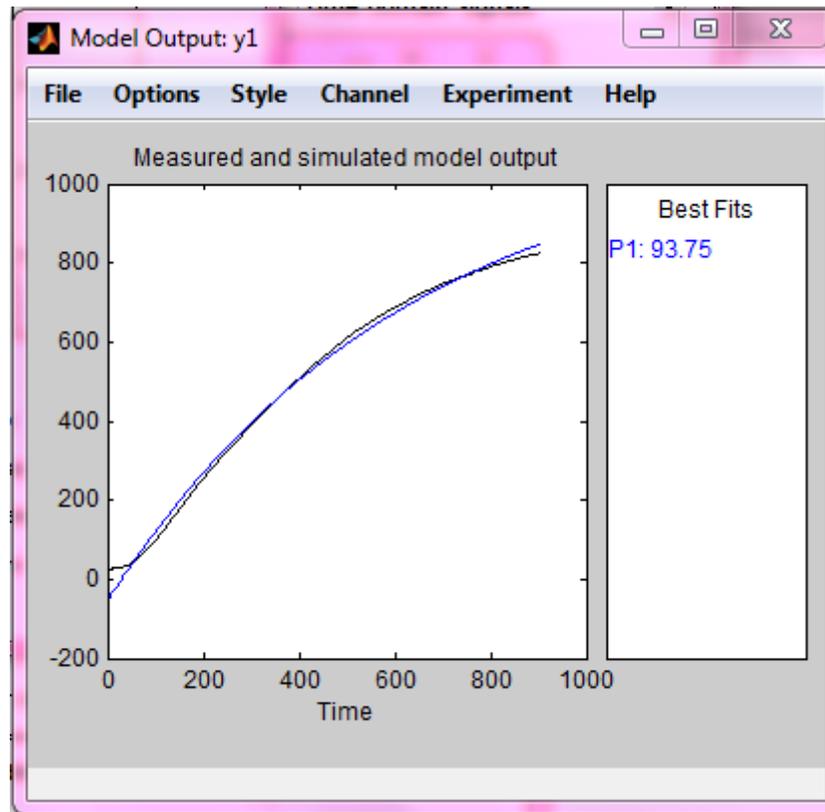


**Figura 42** Obtención de los parámetros de la función de transferencia

Función de transferencia sin retardo:

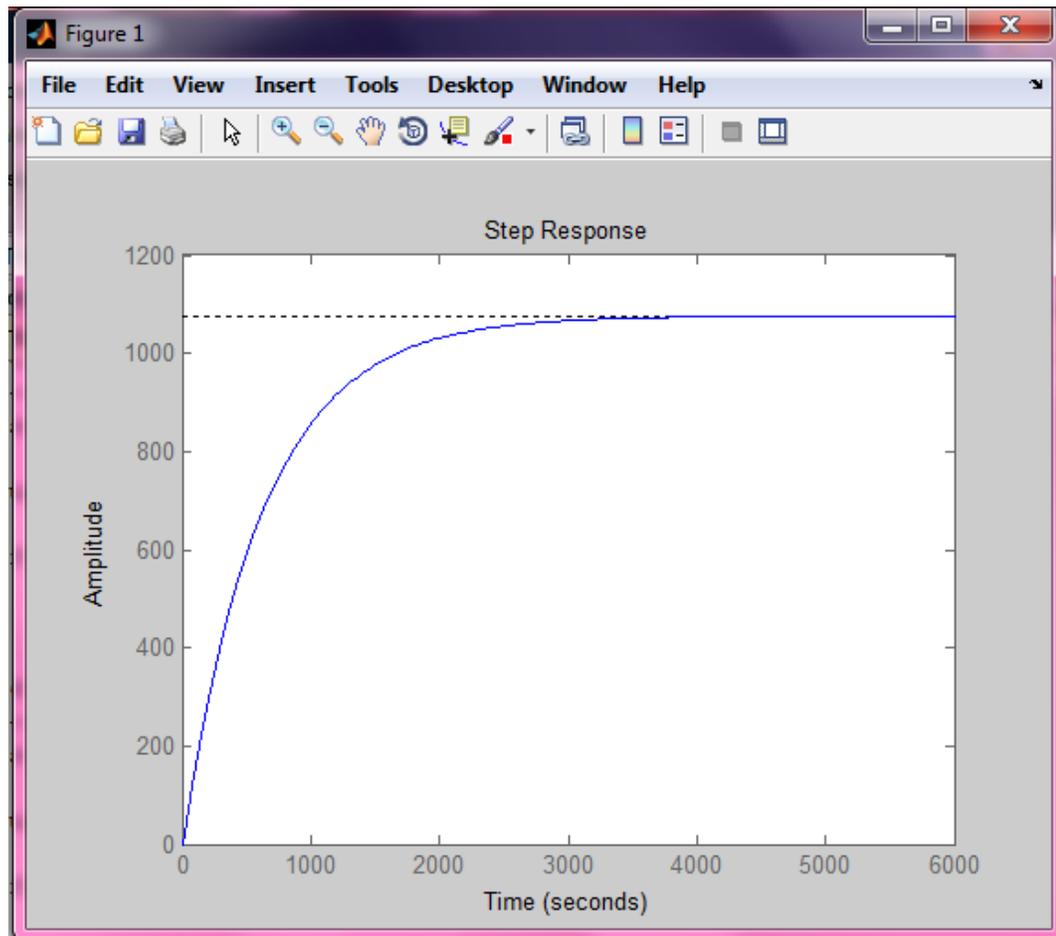
$$G(s) = \frac{1075.9128}{1 + 630.8019s}$$

La Figura 45 presenta una gráfica del modelo obtenido para el sistema de acuerdo a los datos ingresados.

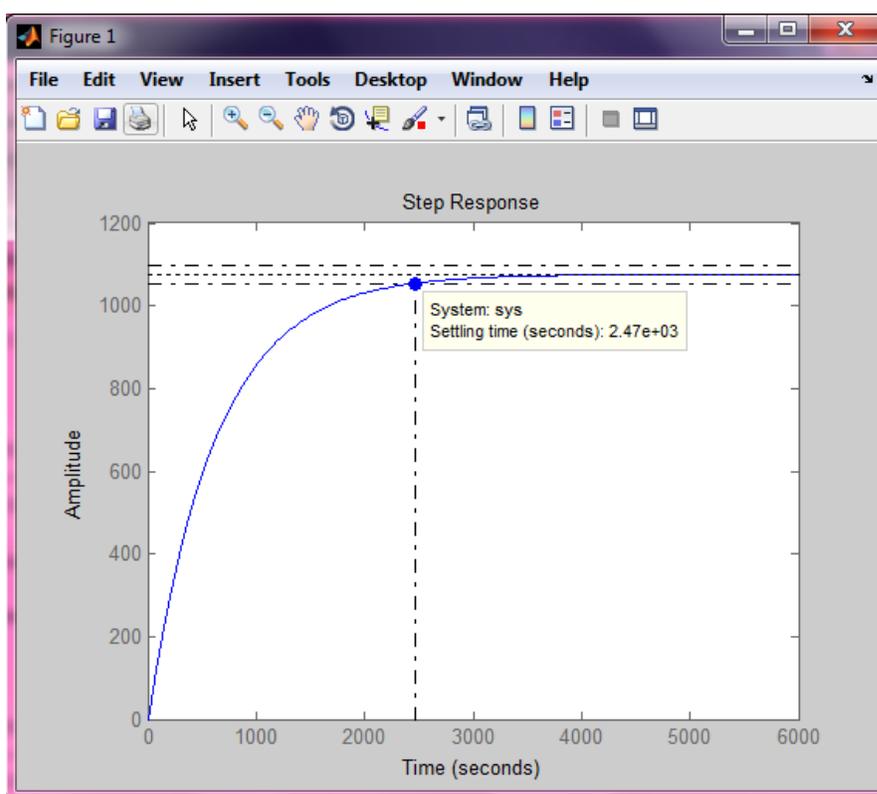


**Figura 43 Gráfica del modelo obtenido vs gráfica de los datos adquiridos**

La respuesta de la planta obtenida frente a entrada escalón se presenta en la Figura 46 y el tiempo de establecimiento en la Figura 47.



**Figura 44** Respuesta de la planta frente a entrada escalón



**Figura 45** Tiempo se establecimiento de la planta

### 3.4.3. Diseño del controlador del actuador

Se realiza el control del sistema para melt-electrospinning tomando como actuador una resistencia eléctrica tipo abrazadera, misma que se encarga de fundir los polímeros a las temperaturas indicadas en la Tabla 21.

**Tabla 21**  
Temperaturas de fusión a emplearse

Polímeros	Temperatura
Polipropileno Atáctico (APP)	170°C
Polipropileno Isotáctico (IPP)	220°C
Polietileno de baja densidad (LDPE)	200°C

**Fuente:** Melt Electrospinning of thermoplastic polymers, Möller M. Böker A.,2012.

Diseño controlador PI:

Una vez obtenida la función de transferencia, se tiene que el tiempo de estabilización dado por la misma es de 2470 seg (40 min) como se puede observar en la Figura 47 el mismo que se debe reducir a un tiempo  $t_s \leq 6$  min; por tanto se establecen las siguientes condiciones de diseño:

- Error estático 0%
- Tiempo de estabilidad 300 [seg].

El modelo de la planta es:

$$G(s) = \frac{1.7056}{s + 0.001585}$$

Forma del controlador:

$$G_C(s) = kp + \frac{ki}{s} \quad (13)$$

$$G_C(s) = \frac{kp \left( s + \frac{ki}{kp} \right)}{s}$$

Forma general de la planta:

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

Se debe tener  $\tau = 300$ seg:

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

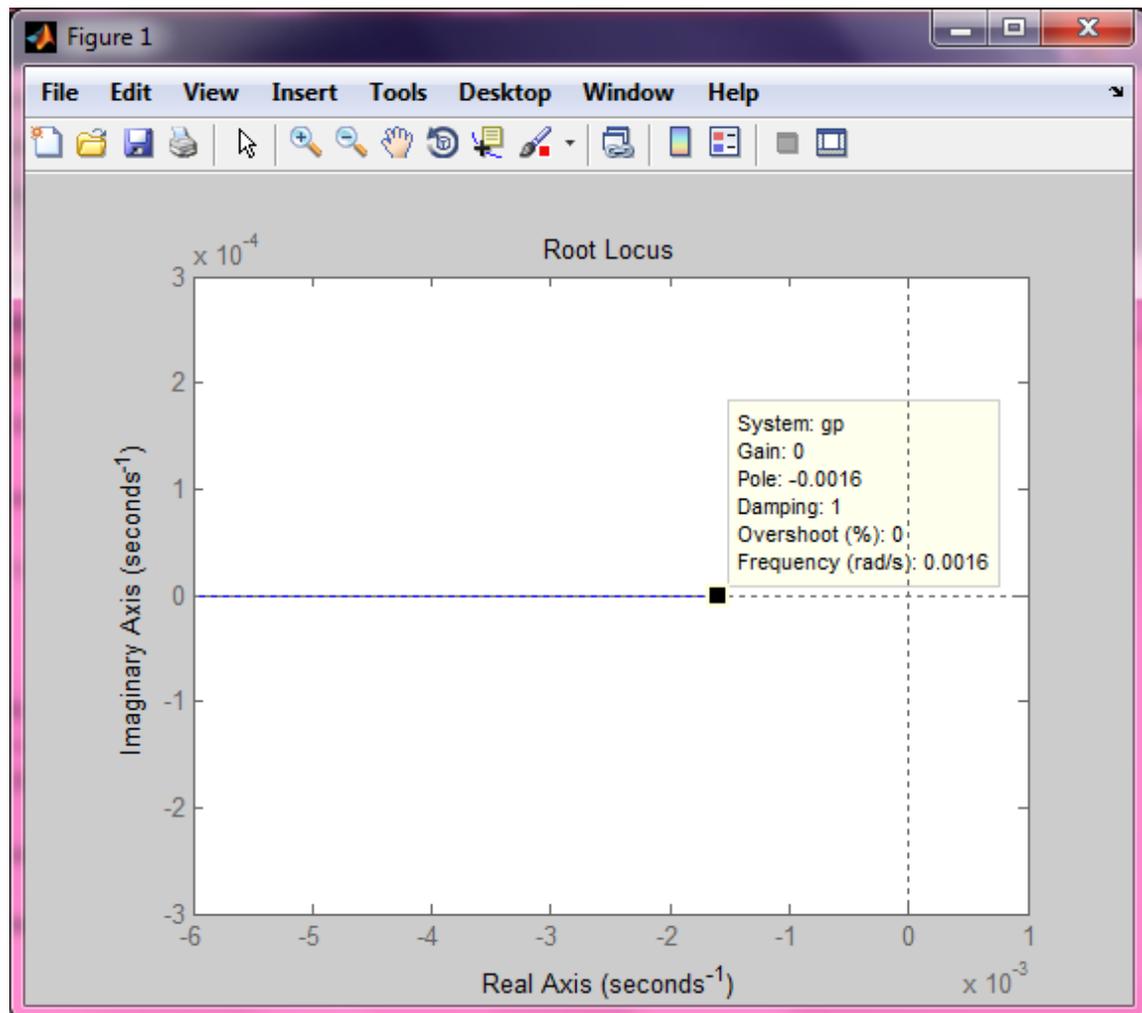
$$300s + 1 = 0$$

$$s = -1/300$$

Por tanto, el polo deseado debe ser:

$$s = -0.00333$$

El lugar de las raíces de la planta se observa en la Figura 48.



**Figura 46 Lugar de las raíces de la planta**

Se anula un polo con un cero, ambos iguales, para que la función tenga el polo deseado.

$$\frac{1.7056}{s + 0.001585} \left( \frac{kp \left( s + \frac{ki}{kp} \right)}{s} \right)$$

Por lo tanto se tiene:

$$\frac{ki}{kp} = 0.001585 \quad (14)$$

Se verifica que cumpla con la condición de magnitud del lugar de las raíces

$$|1 + G_c * G|_{s=-0.0033} = 0$$

$$\left| 1 + \frac{kp (s + 0.001585)}{s} * \frac{1.7056}{s + 0.001585} \right|_{s=-0.0033} = 0$$

$$\left| 1 + \frac{1.7056 * kp}{s} \right|_{s=-0.0033} = 0$$

Se obtiene:

$$kp = 0.007659$$

Utilizando la ecuación (19) se tiene el valor de  $ki$

$$ki = 0.001585 * kp$$

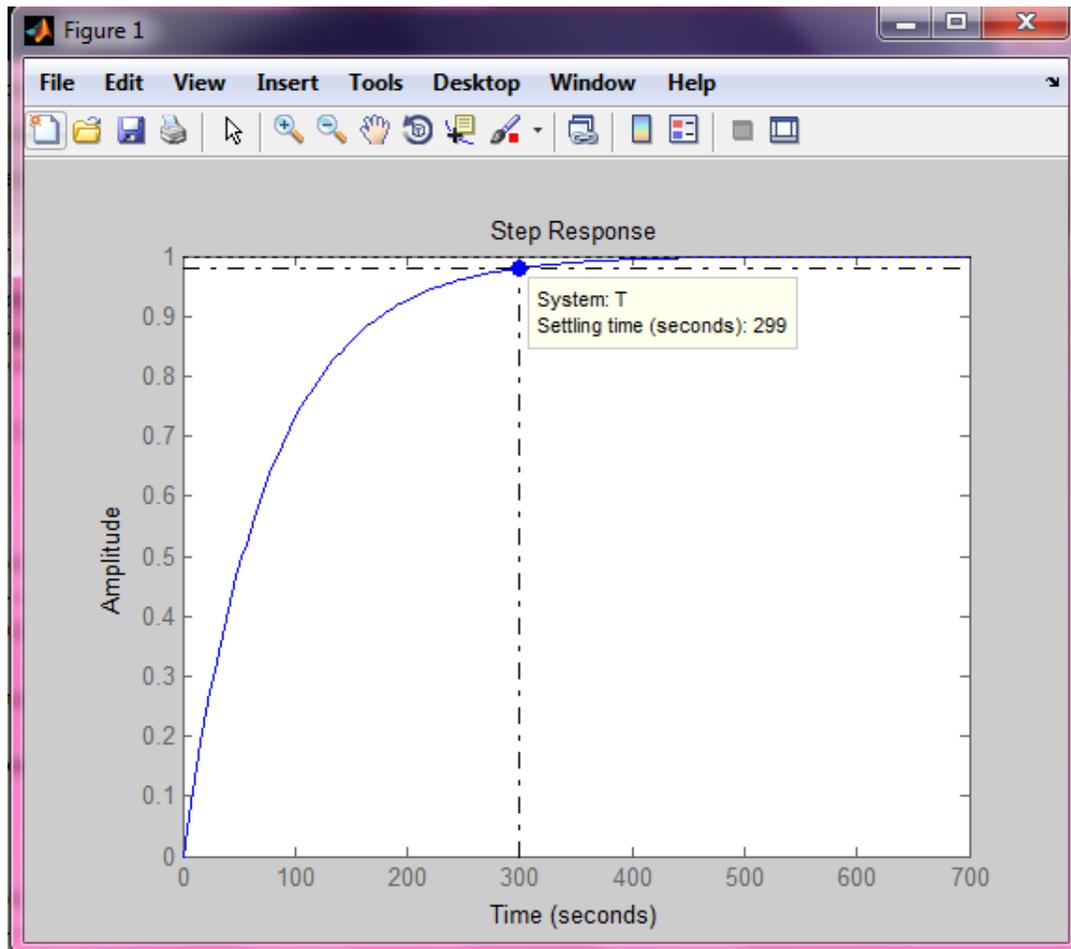
$$ki = 0.001585 * 0.007659$$

$$ki = 0.00001214$$

Finalmente, el modelo del control PI es el siguiente:

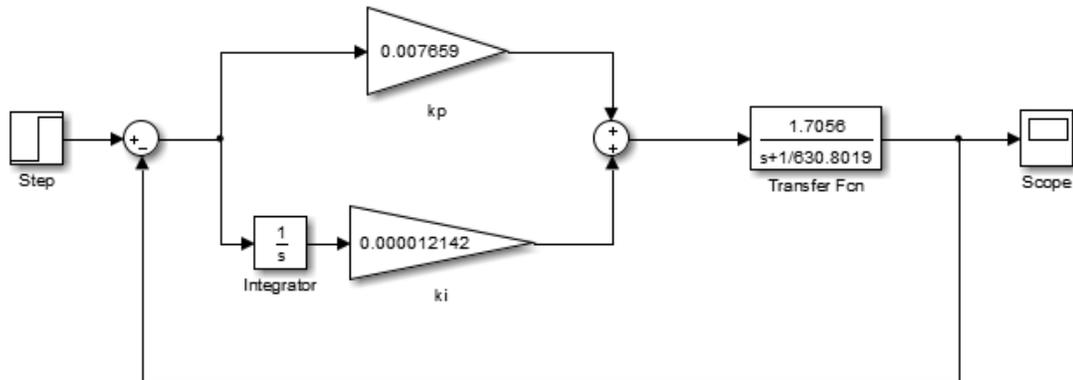
$$G_c(s) = \frac{0.007659 (s + 0.001585)}{s}$$

Como se observa en la Figura 49, se tiene un error de estado estable de cero, con un tiempo de estabilización de aproximadamente 300s cumpliendo así con las condiciones de diseño establecidas.



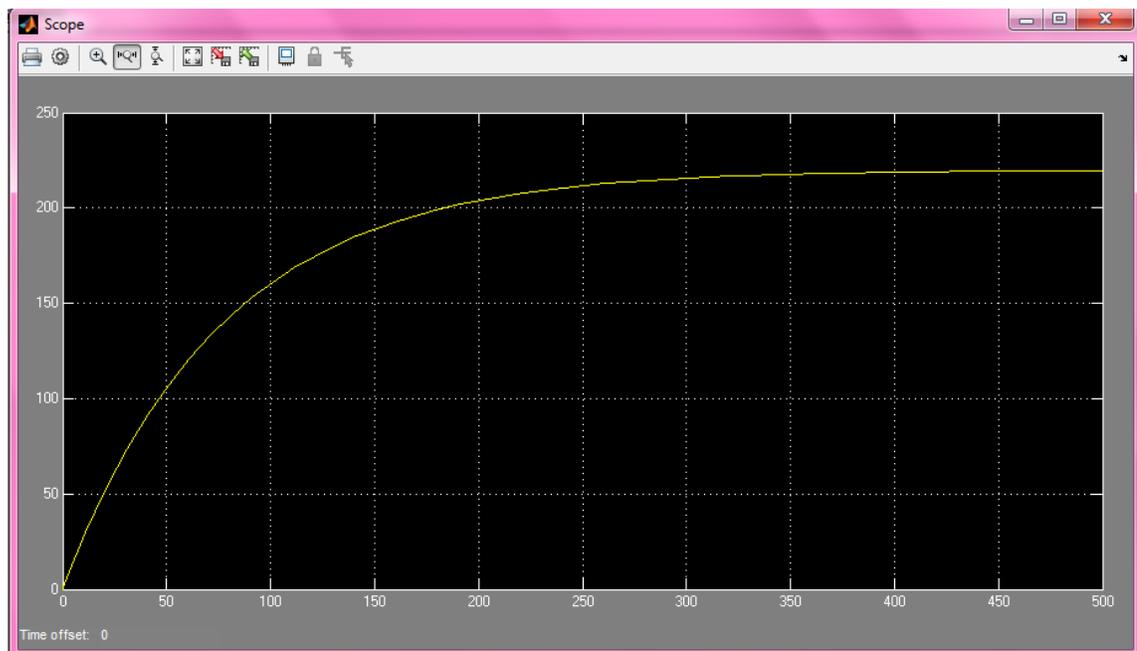
**Figura 47 Tiempo de establecimiento de la planta controlada**

Adicionalmente se realizó una simulación de la planta con la herramienta Simulink, como se observa en la Figura 50 misma que permite visualizar los lazos de control y las respuestas en el tiempo de la planta.

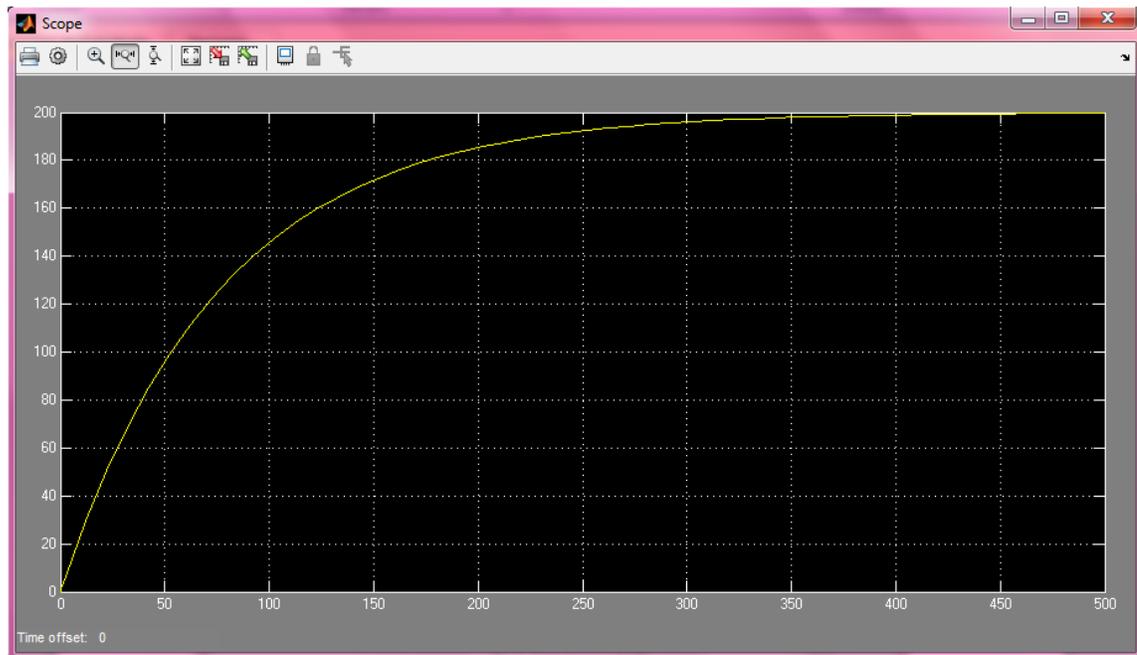


**Figura 48 Sistema de control de lazo cerrado**

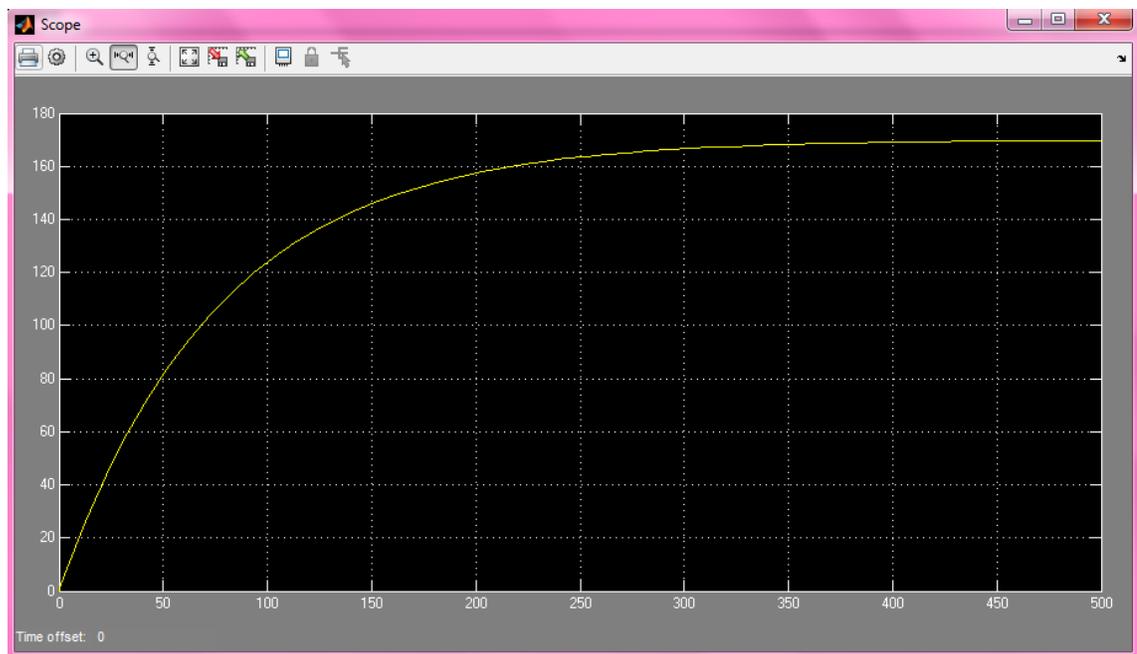
En las Figuras 51 a 53 se puede observar la respuesta de la planta frente a cada temperatura requerida para la extrusión de los termoplásticos.



**Figura 49 Respuesta de la planta con Set Point de 220°C (IPP)**



**Figura 50 Respuesta de la planta con Set Point de 200°C (LDPE)**



**Figura 51 Respuesta de la planta con Set Point de 170°C (APP)**

### **3.5. Diseño de software**

#### **3.5.1. Diseño en software del HMI**

Una interfaz “amigable” entre el módulo y el usuario es muy importante para que este se vuelva fácil de utilizar, es por esto que se procede a realizar una HMI en la cual se puede visualizar la respuesta que presenta el controlador y a su vez permita elegir el tipo de material a ser extruido; puesto que cada material se funde a diferentes temperaturas.

Para realizar este tipo de interfaz se ha decidido utilizar el software LabView desarrollado por National Instruments, debido a que presenta mayor facilidad en el desarrollo de aplicaciones, es didáctico e intuitivo y permite una solución ideal para el manejo de los usuarios.

Para realizar el control y monitoreo de temperatura del proceso de extrusión de los polímeros se debe conocer de manera precisa la señal eléctrica que entrega el sensor de temperatura (termocupla), procesar esta señal y así poder enviar las acciones necesarias a la resistencia calefactora.

Para el diseño de la Interfaz Humano Máquina se utilizó la metodología propuesta por la guía ergonómica de diseño de interfaces de supervisión (GEDIS). Ésta se utiliza debido a que está orientada a su empleo en ambientes industriales tales como salas de supervisión. La guía contiene un esquema en donde se citan los elementos de la interfaz, desde lo general a lo particular.

La guía indica que entre los parámetros a tomar en cuenta se debe establecer en primer lugar la arquitectura y navegación de la interfaz, así como la distribución de los elementos en dicha pantalla. Adicionalmente presenta una descripción de parámetros como el color, el texto y tablas.

### Arquitectura:

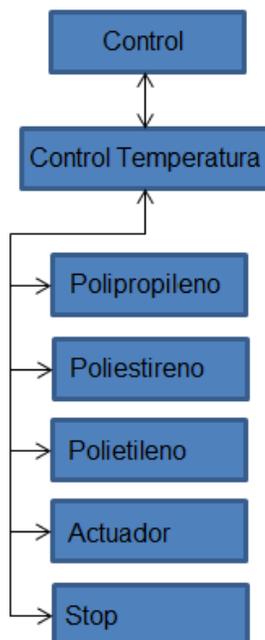
La arquitectura de la HMI presenta las diferentes pantallas con las cuales contará el usuario para interactuar con el sistema. Ésta se muestra en la Figura 54.



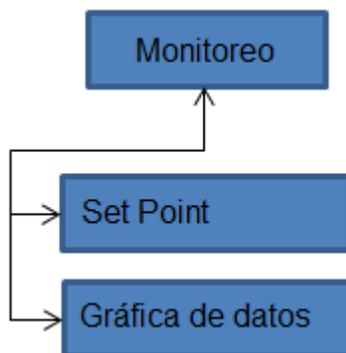
**Figura 52 Arquitectura HMI**

### Navegación:

Una vez definida la arquitectura, se procede a indicar cómo el operador navega dentro del sistema. Para la navegación se toma en cuenta las pantallas anteriormente definidas en la arquitectura de la HMI. La Figura 55 y Figura 56 muestran la navegación establecida para las pantallas tanto de control como de monitoreo.



**Figura 53 Navegación sección Control**



**Figura 54 Navegación sección Monitoreo**

Conociendo la arquitectura y la navegación de cada sección se diseña la HMI, tomando en cuenta los parámetros de la guía GEDIS. Para la pantalla de portada (Figura 57) se toma en cuenta la posición de las imágenes y los colores de los elementos. La guía detalla que las imágenes de presentación deben ir de manera centrada en la parte superior, el fondo de pantalla de color gris, y el texto de color azul marino.

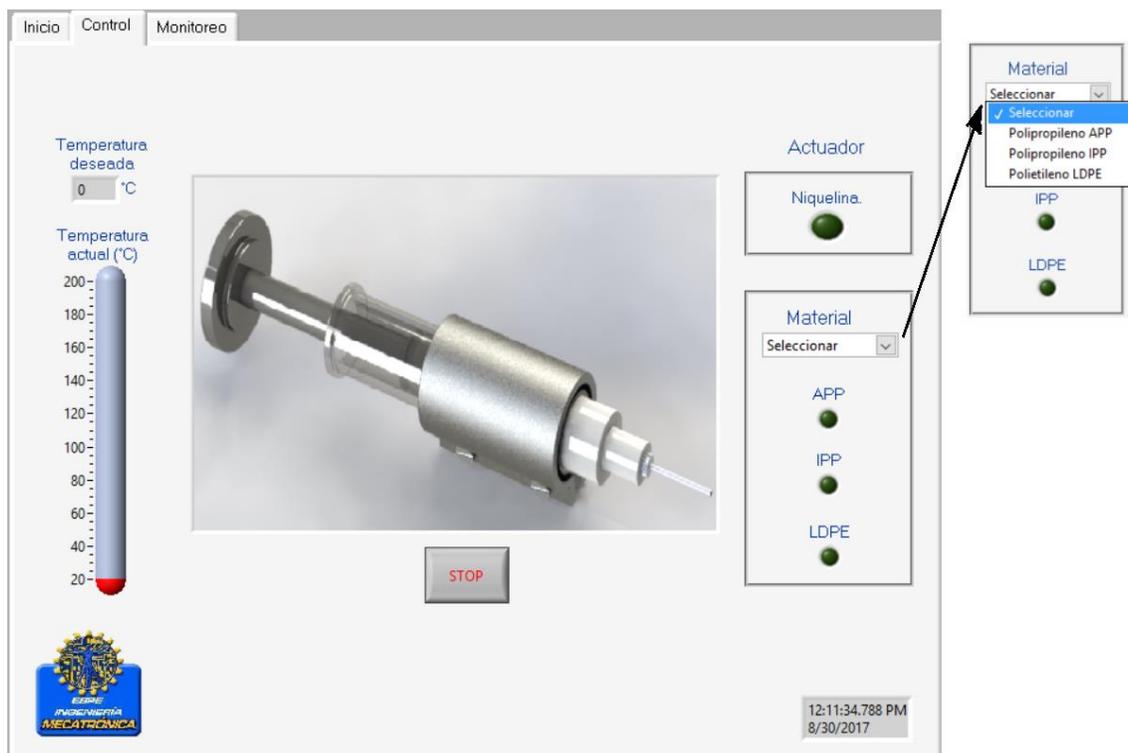


**Figura 55 HMI sección portada**

Por otro lado, en la ventana de Control (Figura 58), se observa el encendido y apagado de la niquelina, producido mediante la selección de cada uno de los materiales a ser extruidos; además de indicadores visuales de la temperatura del sistema.

Una vez que se selecciona el material deseado en el menú, la temperatura del sistema empieza a subir de acuerdo a los requerimientos configurados para cada material.

La guía detalla que el fondo de pantalla debe ser de color gris, el texto general de color azul marino y los indicadores de accionamiento de color verde.

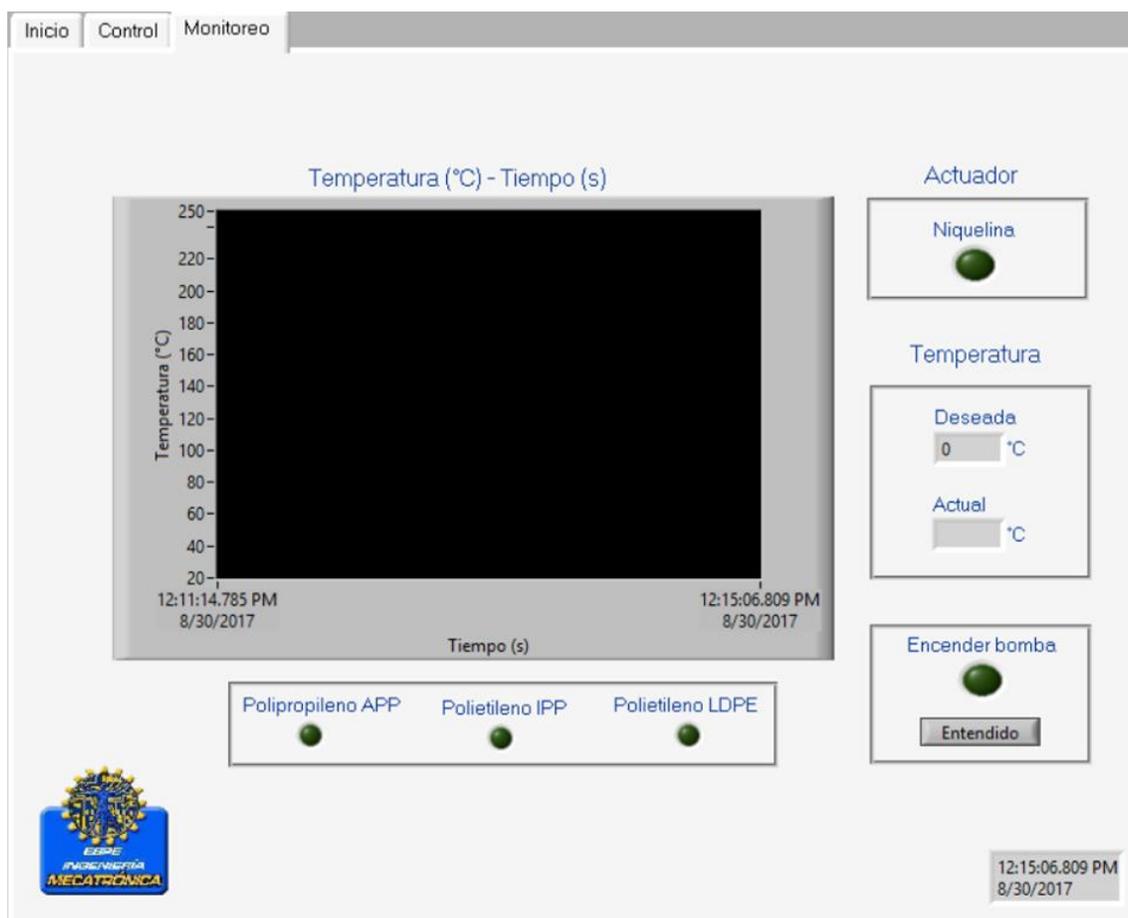


**Figura 56 HMI sección control**

En la ventana de Monitoreo (Figura 59) se muestran los datos de temperatura deseada y la actual; indicadores del material elegido así como el estado del actuador y un gráfico de la variación de la temperatura con respecto al tiempo (temperatura medida con el sensor).

Adicionalmente se muestra el indicador *Encender Bomba*, mismo que informa al usuario que se debe realizar el accionamiento manual de la bomba para proceder a la extrusión del material; el indicador se apagará al presionar el botón *Entendido*.

La guía detalla que el fondo de pantalla debe ser de color gris, el texto general de color azul marino y el accionamiento de color verde.



**Figura 57 HMI sección Monitoreo**

### 3.6. Implementación

#### 3.6.1. Implementación de los componentes mecánicos.

El extrusor diseñado se debe acoplar a la bomba de jeringa encargada de empujar el émbolo para que el material fundido pase a través de la aguja y cree microfibras en el colector.

En el diseño mecánico se determinaron tres piezas principales para el extrusor: émbolo, cilindro y acople. Para el elemento calefactor se utiliza una resistencia tipo abrazadera; mientras que para la obtención de fibras se emplea

una aguja con roscado en una de sus terminaciones. En las Figura 60 y 61 se muestra el ensamble del conjunto realizado en Software CAD.



**Figura 58 Ensamble general del extrusor realizado en Software CAD**



**Figura 59 Vista explotada de los elementos que conforman el extrusor**

En las Figuras 62 y 63 se muestra el ensamble de los elementos terminados.



**Figura 60 Ensamble general del extrusor**



**Figura 61 Acople con la aguja**

Para la adaptación de la jeringa a la bomba es necesario colocar un aislante térmico entre ambos; puesto que el sistema estará sometido a elevadas temperaturas y el soporte de la bomba es de material plástico. Por tanto para evitar el desgaste de éste, se idearon e implementaron unas láminas de papel aluminio como se observa en la Figura 64, cuyo interior presenta un relleno uniforme de fibra de vidrio, misma que actúa como aislante térmico y ayuda a que el soporte no se derrita debido a la temperatura de la jeringa.



**Figura 62 Lámina aislante de fibra de vidrio**

En la Figura 65 y Figura 66 se muestra la adaptación del sistema diseñado con la bomba de extrusión disponible en el laboratorio.



**Figura 63 Adaptación de la jeringa con la bomba**



**Figura 64 Vista frontal de la jeringa con la abrazadera**

Para realizar el proceso de Melt-Electrospinning es necesario someter la jeringa a alto voltaje; razón por la cual es necesario aislar la misma de la resistencia eléctrica, evitando así inconvenientes con el funcionamiento del sistema. Es por ello que se optó por utilizar una cinta aislante que soporta altas temperaturas y a su vez no permite la conducción eléctrica de la jeringa a la resistencia, ésta se coloca en la sección en donde entran en contacto ambos elementos como se muestra en la Figura 67.



**Figura 65 Implementación de la cinta aislante**

Adicionalmente, como medida de seguridad y para evitar el contacto directo entre los usuarios y la resistencia, se desarrolló una caja que cubre la resistencia y a su vez impide el flujo de aire externo, evitando además pérdidas de calor (Figura 68).



**Figura 66 Implementación de la caja de seguridad**

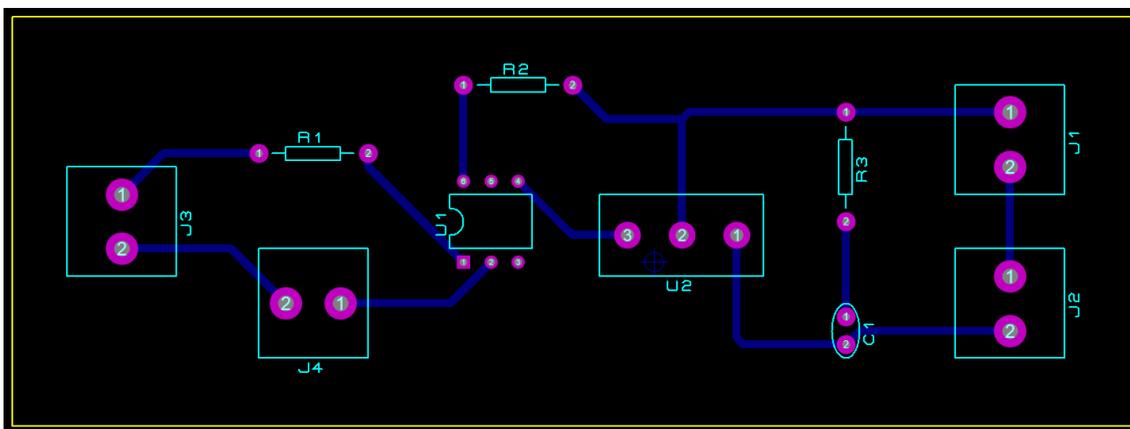
### **3.6.2. Implementación de los componentes eléctricos y/o electrónicos.**

En la Figura 69 se muestra la implementación del circuito de control diseñado, comprobando su correcto funcionamiento.

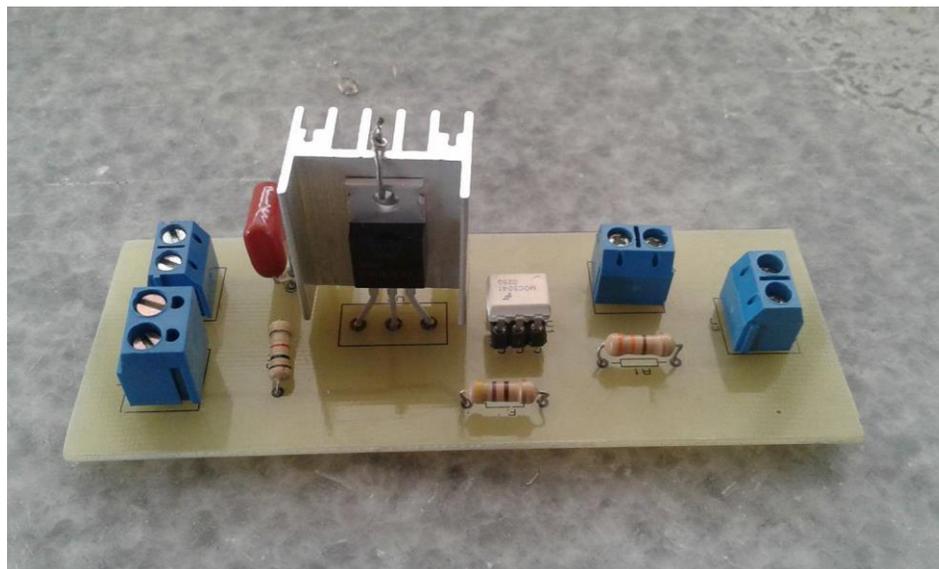


**Figura 67 Comprobación del funcionamiento del circuito de potencia**

Una vez comprobado el funcionamiento del circuito de potencia para el actuador, se procede a diseñar la placa de control mostrado en las Figuras 70 y 71.



**Figura 68 Diseño en placa del circuito de potencia**



**Figura 69 Placa del circuito de potencia**

Finalmente, se integra cada elemento descrito que conforma el sistema de extrusión de polímeros APP, IPP y LDPE como se observa en la Figura 72.



**Figura 70 Implementación del sistema extrusor**

### **3.6.3. Implementación del sistema de control.**

Para el control del circuito diseñado se realizó la programación empleando los programas Arduino en donde se lleva a cabo el código del controlador PI y LabView en donde se realiza la lectura del sensor y el envío de parámetros correspondientes para cada polímero.

La programación correspondiente en ambos programas se muestra en el Anexo F.

El diagrama de flujo de todo el proceso se presenta en la Figura 73

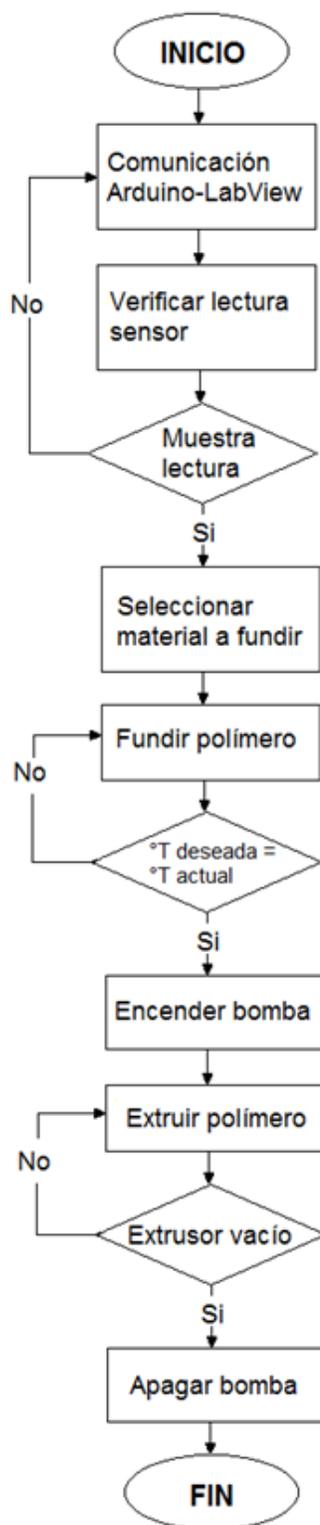


Figura 71 Diagrama de flujo proceso de extrusión

## CAPÍTULO 4

### PRUEBAS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se describen los resultados obtenidos de la implementación de la jeringa extrusora de termopolímeros tanto de su comportamiento frente al control de temperatura y el análisis de fibras obtenido por un microscopio de barrido.

#### 5.1. Pruebas y resultados del módulo de control de temperatura.

Al terminar la fase de implementación se realizaron pruebas para examinar si la jeringa extruye de manera correcta los materiales.

El equipo que permite realizar electrospinning se encuentra en el laboratorio de Reología y cuenta con las siguientes partes:

- Fuente de alto voltaje: de 0 a 30kV; la cual se muestra en la Figura 74



Figura 72 Fuente de alto voltaje

- Plato colector



**Figura 73 Colector**

- Lámpara



**Figura 74 Lámpara**

- Cámara de visualización del cono de Taylor



**Figura 75 Cámara**

- Bomba de jeringa: Velocidad de infusión de 0,73  $\mu\text{L/h}$  (jeringuilla de 1 ml) a 2100 ml/h (jeringa de 60 ml).



**Figura 76 Bomba de jeringa**

### 5.1.1. Análisis termográfico del sistema

Se utilizó una cámara termográfica marca FLUKE Ti25 para observar la distribución de calor en el extrusor, lo cual permite saber si la temperatura del material al final de la aguja es la indicada para una fácil realización del cono de Taylor, de manera que no se solidifique antes de tiempo ni produzca taponamiento. En la Figura 79 se puede apreciar la distribución de temperatura

en la resistencia y la aguja, existiendo una diferencia térmica significativa entre las mismas. Por tal razón, se optó por colocar una vela, misma que se encarga de suministrar mayor cantidad de calor al final de la aguja, disminuyendo así el delta térmico como se puede apreciar en la Figura 80.

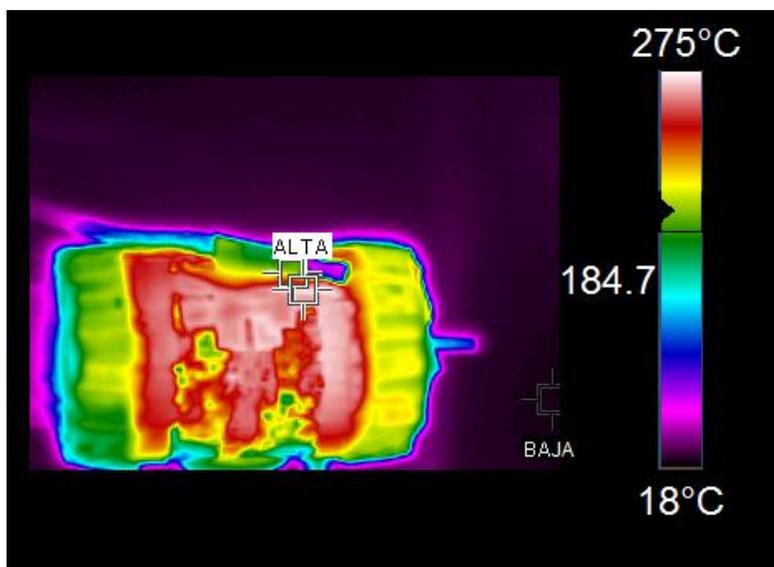


Figura 77 Distribución térmica del sistema

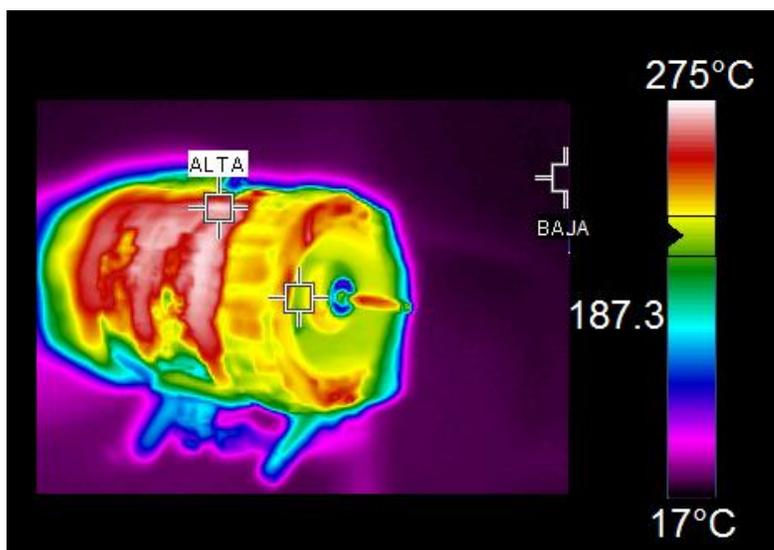
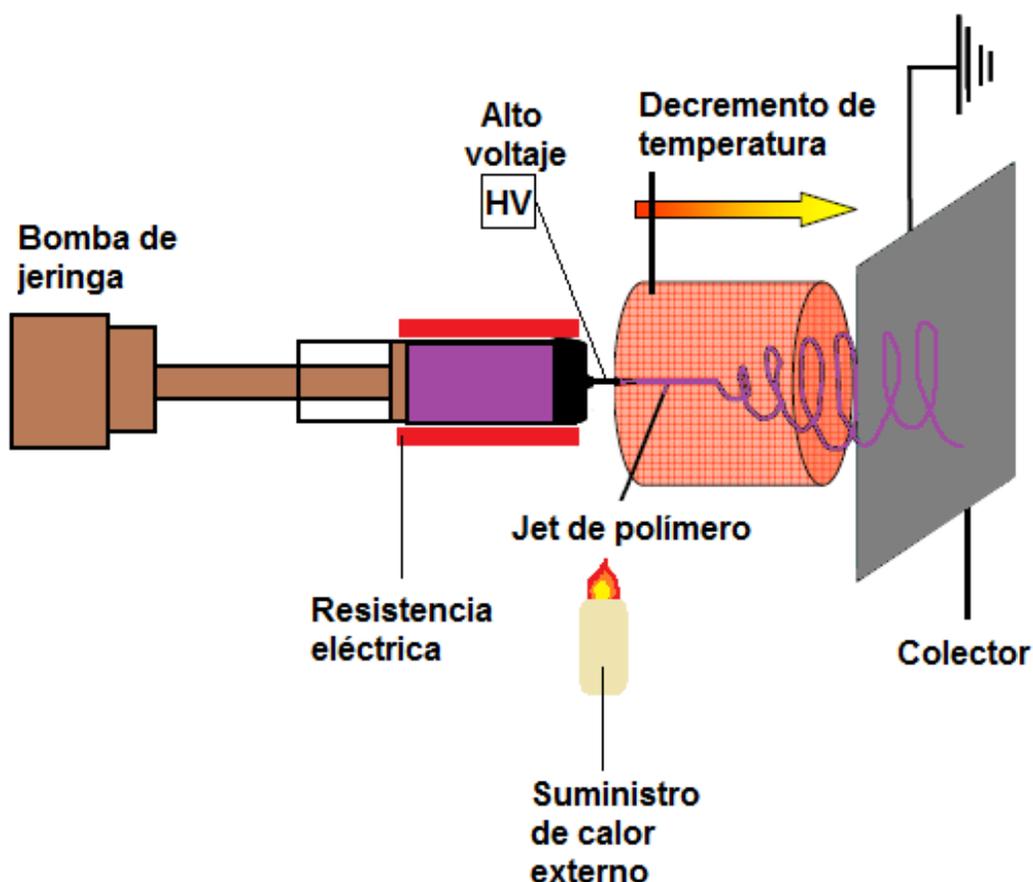


Figura 78 Distribución térmica del sistema con la implementación de una vela

Para iniciar el método de electrospinning es necesario haber llegado a la temperatura deseada, después se procede a encender la bomba para que comience el proceso de extrusión aplicando alto voltaje en la aguja, siguiendo el esquema representado en la Figura 81 para la obtención microfibras.



**Figura 79** Esquema de la configuración del dispositivo de melt-electrospinning

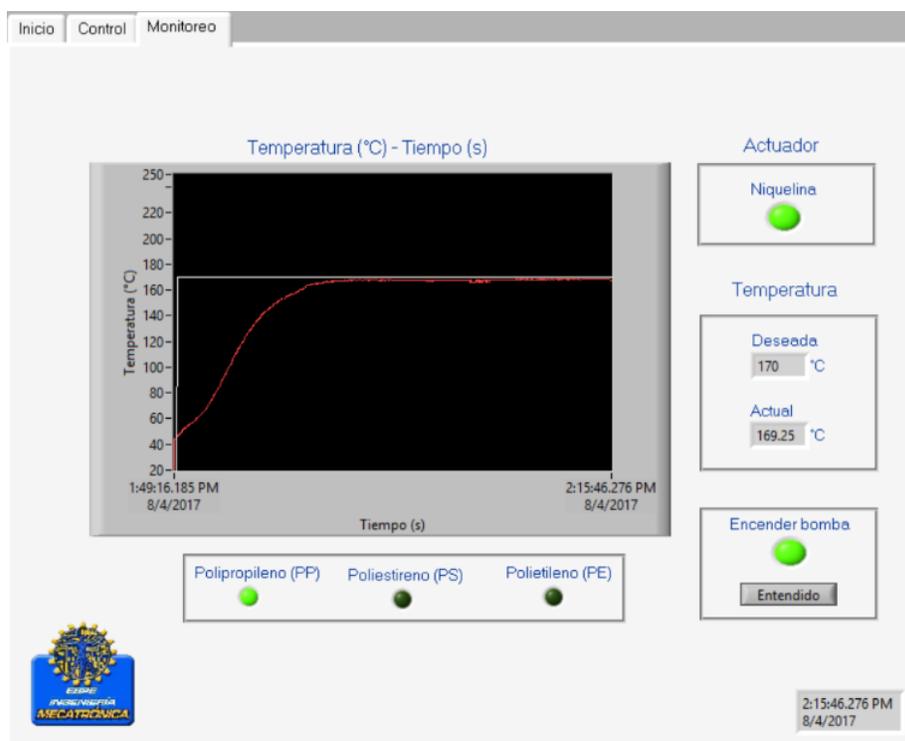
### 5.1.2. Prueba con el material APP

Para la primera prueba se utilizó Polipropileno Atáctico (APP) que tiene una temperatura de fundición de 170°C, el cual se lo encuentra en forma granulada o pellets como se observa en la Figura 82. Este material se coloca dentro del cilindro y se ejerce una presión con el émbolo a través de la bomba para que la cámara de extrusión sea más compacta y exista menos aire en el interior.



**Figura 80 APP a ser fundido**

En la Figura 83 se presenta la pantalla de monitoreo del HMI la cual muestra la respuesta de la planta frente al control, teniendo como resultado la temperatura deseada de 170 °C.



**Figura 81 Respuesta obtenida para control de temperatura de APP**

Al alcanzar la temperatura deseada se aplica alto voltaje en la aguja y se procede a extruir las fibras, los resultados se pueden apreciar en las Figuras 84 a 87.



**Figura 82 Proceso de electrospinning con APP**

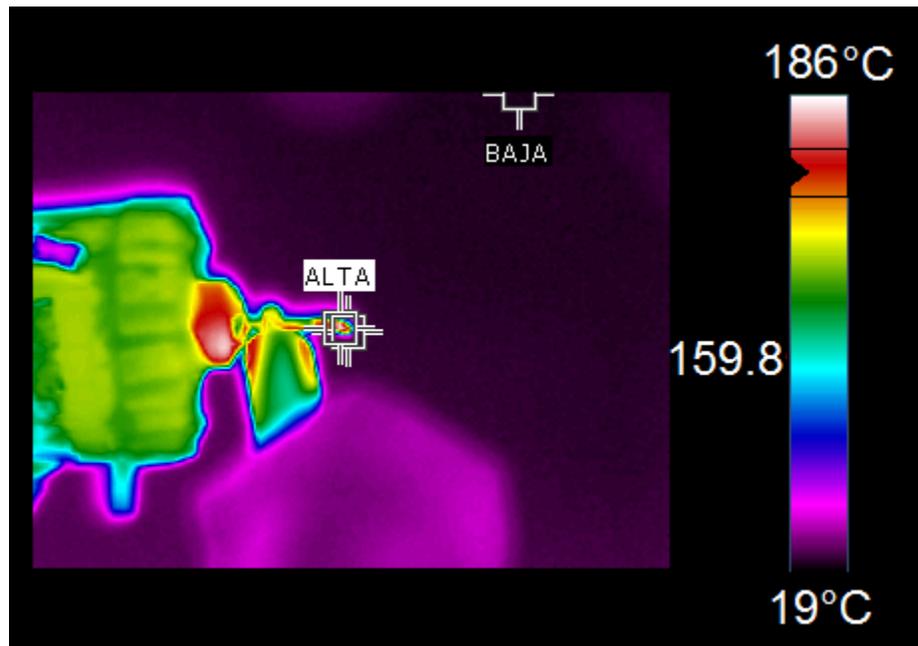


Figura 83 Distribución térmica en el cono de Taylor



Figura 84 Cono de Taylor formado con APP



**Figura 85 Fibras de APP obtenidas**

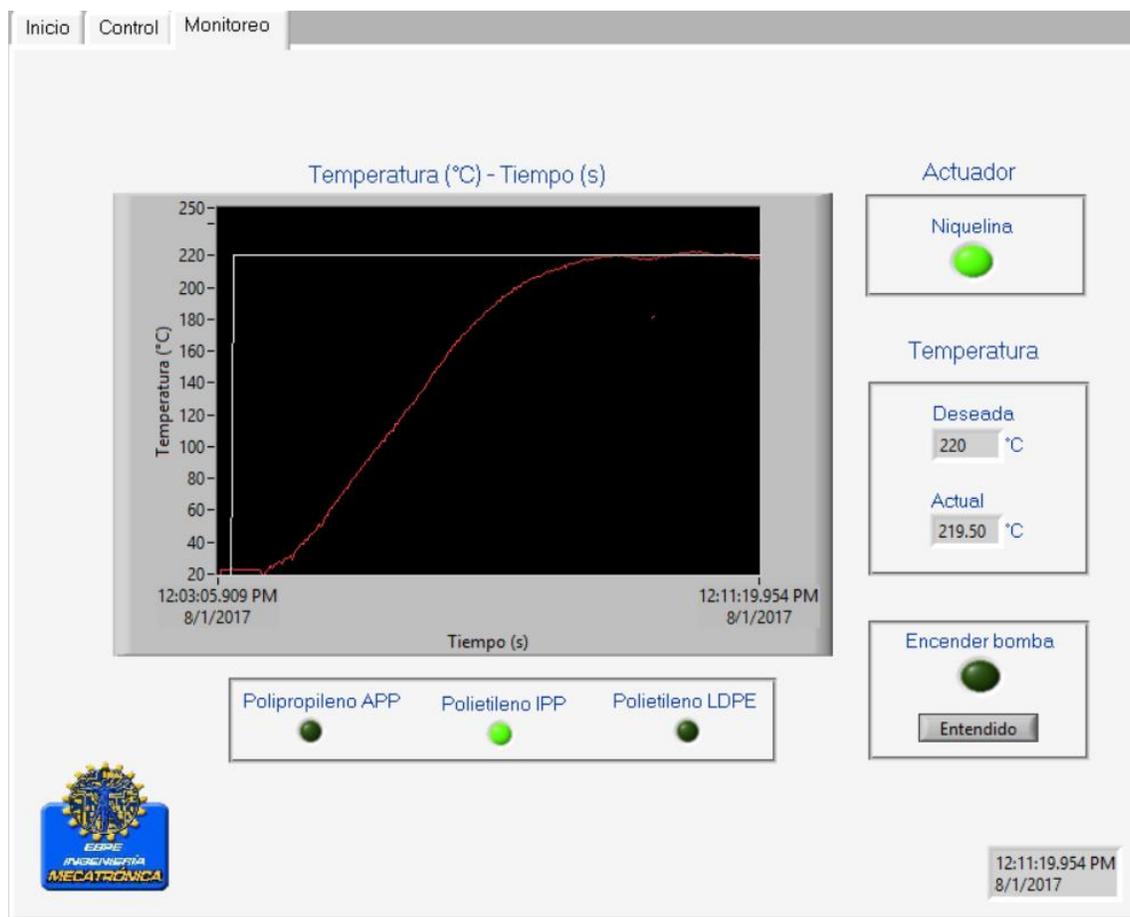
### **5.1.3. Prueba con el material IPP**

Se utilizó Polipropileno Isotáctico (IPP) que tiene una temperatura de fundición de 220°C, el cual se lo encuentra en forma granulada como se observa en la Figura 88.



**Figura 86 IPP a ser fundido**

En la Figura 89 se presenta la pantalla de monitoreo del HMI la cual muestra la respuesta de la planta frente al control, teniendo como resultado la temperatura deseada de 220 °C.



**Figura 87 Respuesta obtenida para control de temperatura de IPP**

Al alcanzar la temperatura deseada se aplica alto voltaje en la aguja y se procede a extruir las fibras, los resultados se pueden apreciar en las Figuras 90 a 92.



**Figura 88** Proceso de electrospinning con IPP



**Figura 89** Cono de Taylor formado con IPP



**Figura 90 Fibras de IPP obtenidas**

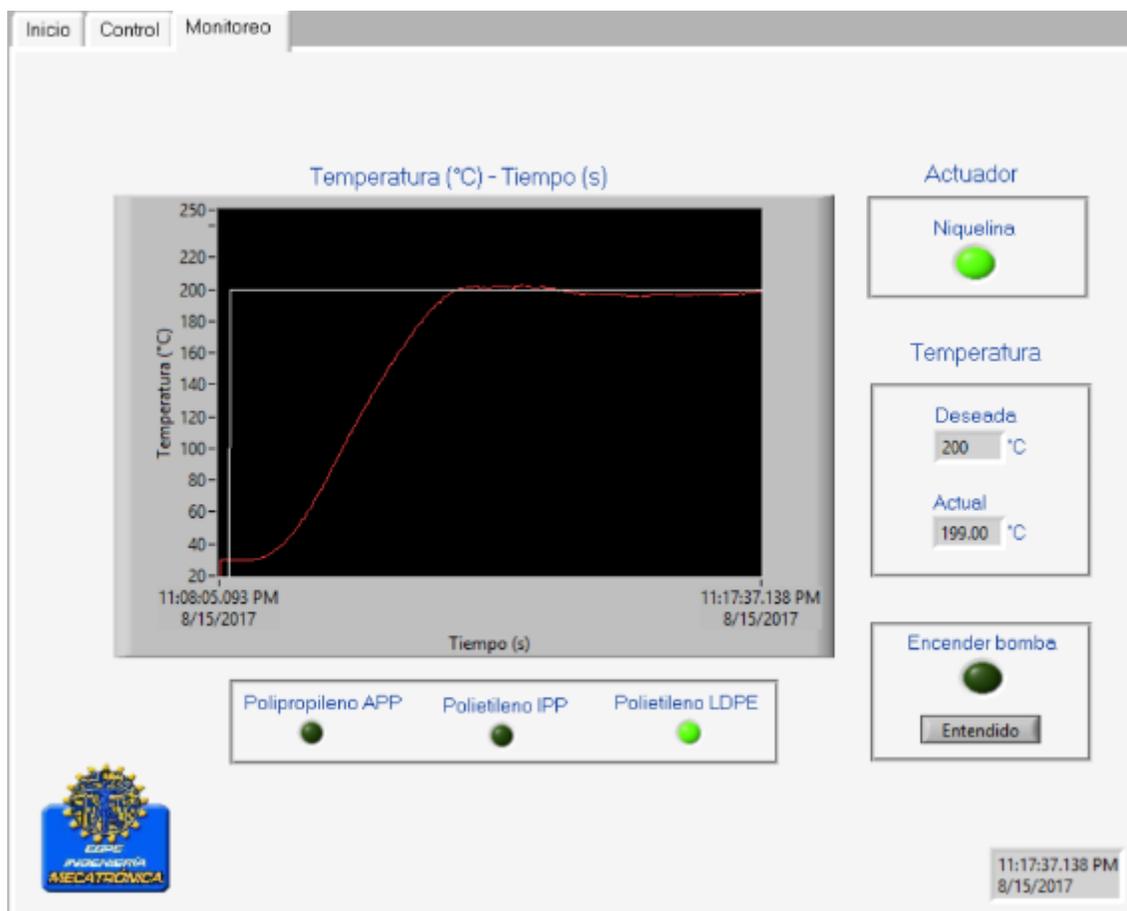
#### **5.1.4. Prueba con el material LDPE**

Se utilizó Polietileno de baja densidad (LDPE) que tiene una temperatura de fundición de 200°C, el cual se lo encuentra en forma granulada como se observa en la Figura 93.



**Figura 91 LDPE a ser fundido**

En la Figura 94 se presenta la pantalla de monitoreo del HMI la cual muestra la respuesta de la planta frente al control, teniendo como resultado la temperatura deseada de 200 °C.

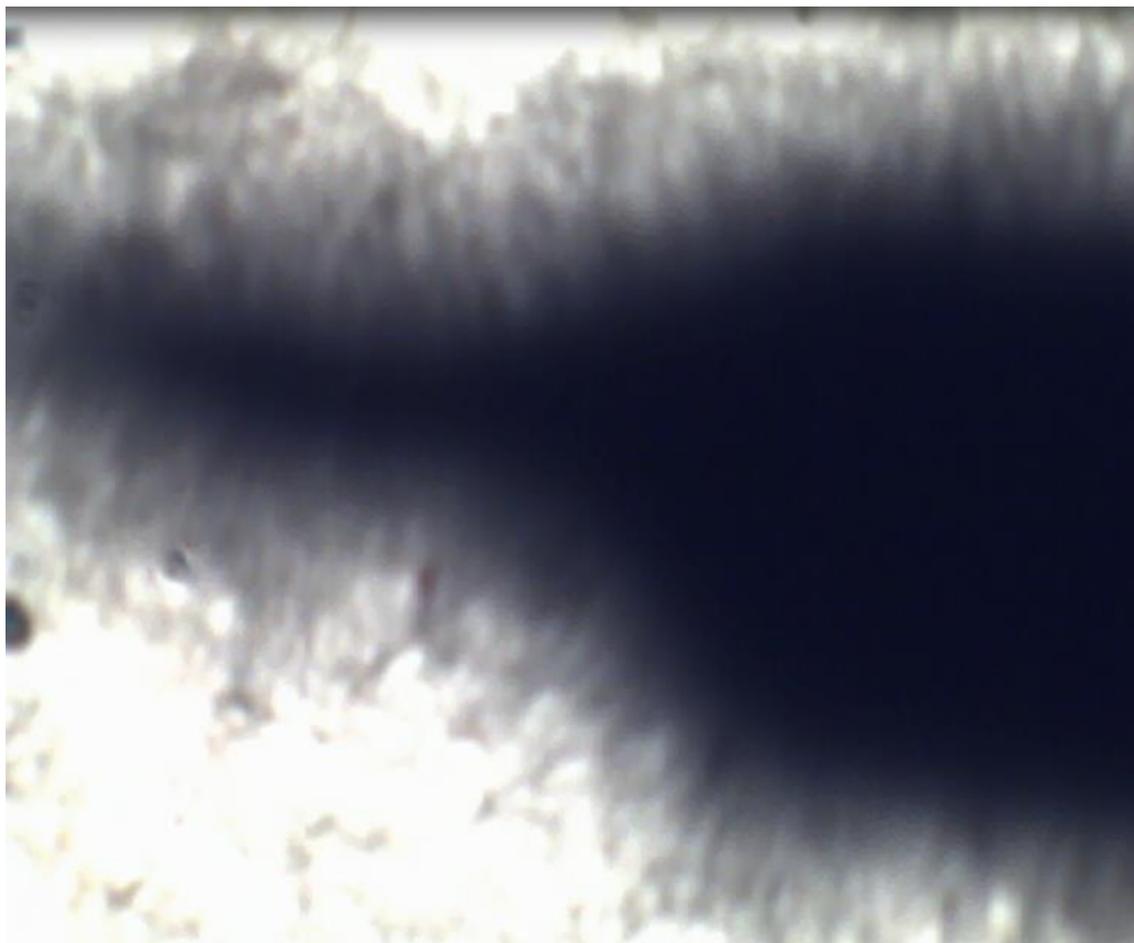


**Figura 92 Respuesta obtenida para control de temperatura de LDPE**

Al alcanzar la temperatura deseada se aplica alto voltaje en la aguja y se procede a extruir las fibras, los resultados se pueden apreciar en las Figuras 95 a 97.



**Figura 93** Proceso de electrospinning con LDPE



**Figura 94 Cono de Taylor formado con LDPE**



**Figura 95 Fibras de LDPE obtenidas**

## **5.2. Desarrollo del protocolo de pruebas.**

### **5.2.1. Microscopio Electrónico de Barrido**

El microscopio electrónico de barrido o SEM (Scanning Electron Microscope) TESCAN MIRA 3XM, utilizado para las pruebas se encuentra ubicado en la universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en el laboratorio de Microscopía en el centro de Nanociencia y Nanotecnología (CENCINAT), cuenta con una resolución de 1.2nm a 30kV, 2.5nm a 3kV; permitiendo una fácil obtención de imágenes, mediciones y análisis de las fibras gracias a sus altas propiedades ópticas.

En la Figura 98 se puede apreciar el microscopio de barrido el cual posee las siguientes características:

- Resolución en modo alto vacío (SE): 1.2nm a 30kV; 2.5nm a 3kV
- EN SE-Beam (opcional): 1nm a 30 kV; 2nm a 3kV
- Modo de BD (opcional): 1.5nm a 3kV

- Detector de STEM (opcional): 0.8nm a 30kV
- Resolución en el modo de bajo vacío (LVSTD): 1.5nm a 30kV;3nm a 3kV
- Resolución de la EEB: 2nm a 30kV
- Aumento: a 30kV, 1x-1'000 000x



**Figura 96 Microscopio electrónico de barrido**

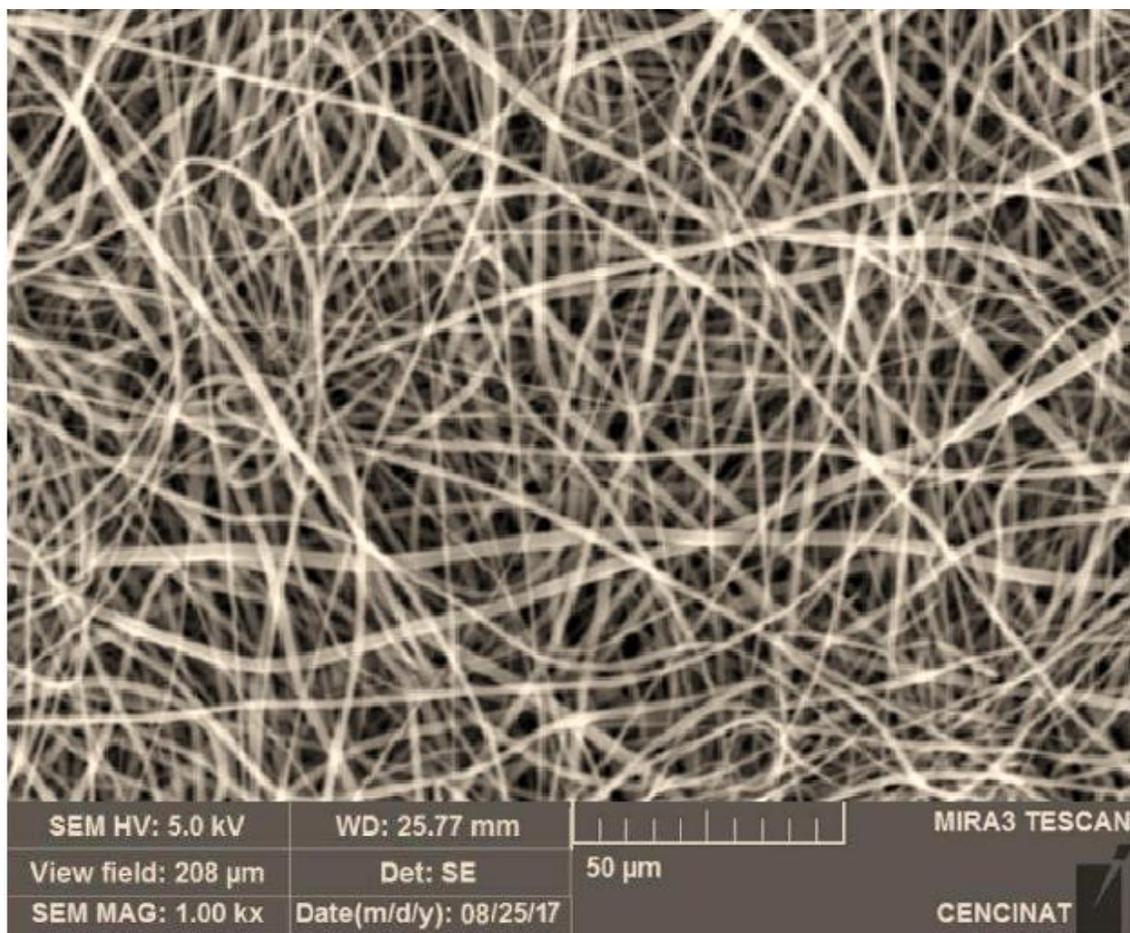
**Fuente:** TESCAN, 2016

Se utiliza en el microscopio de barrido para la caracterización de las fibras puesto que se tiene como finalidad determinar el diámetro de las fibras y la morfología para comprobar si existen porosidades en las mismas.

#### **5.2.1.1. Análisis de fibras de material APP**

Se aplicaron los siguientes parámetros en el proceso:  $Q=10$  [ $\mu$ l/min];  $d=8$ cm;  $V=9$  [kV], se obtiene una formación de fibras homogéneas como se muestra en

la Figura 99. Las fibras presentan un diámetro entre 13.35 y 11.94 [ $\mu\text{m}$ ]. Se formaron fibras largas gracias a su propiedad gomosa, lo cual le permitía un gran alargamiento sin presentar rotura. Se recomienda cambiar lo datos de voltaje y distancia del colector para cambiar los diámetros de las fibras.

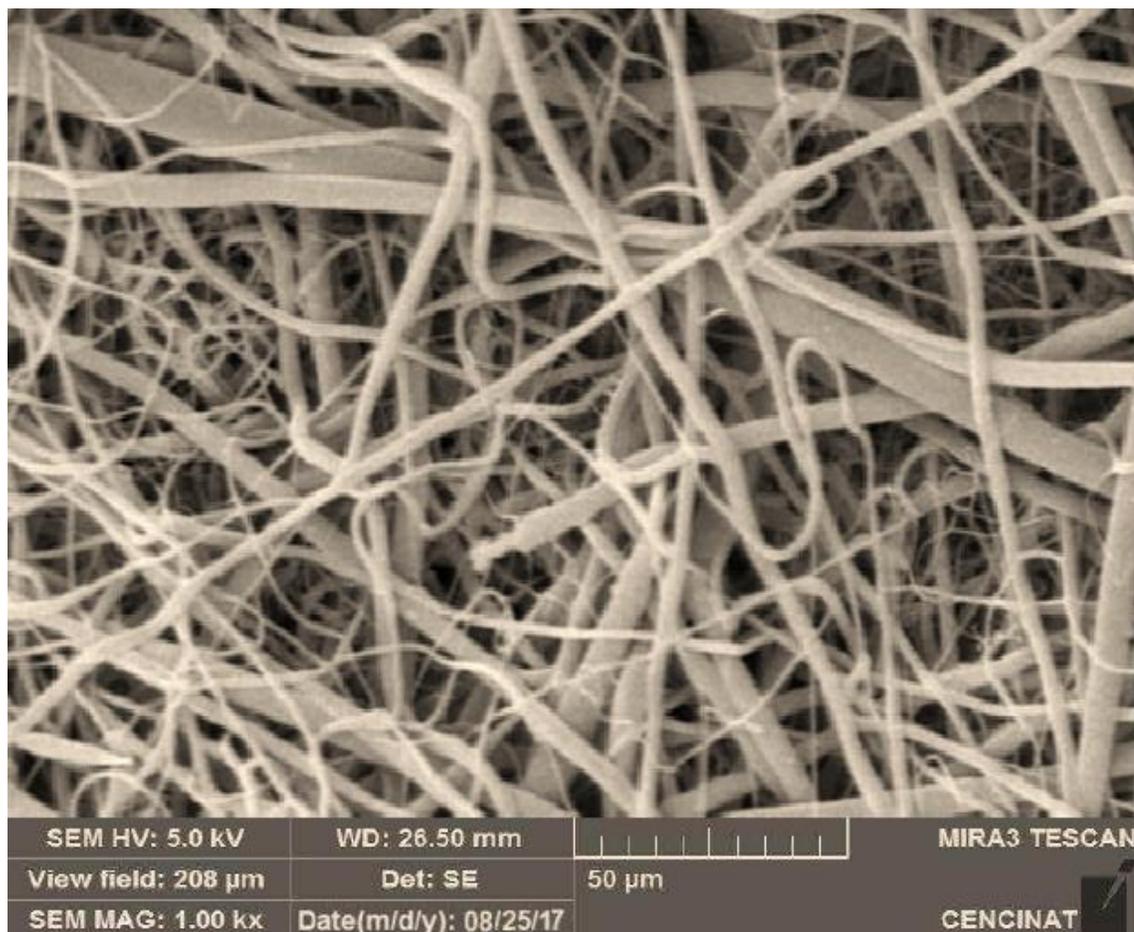


**Figura 97 Microscopia SEM de APP a un zoom de 1000x**

#### 5.2.1.2. Análisis de fibras de material IPP

Aplicando los siguientes parámetros en el proceso:  $Q=10$  [ $\mu\text{l}/\text{min}$ ];  $d=8\text{cm}$ ;  $V=8.3$  [kV], se obtiene una formación de fibras con una gran cantidad de diferentes diámetros. Una de las razones puede ser que al no emplear un material virgen no permite la formación de fibras largas, sino que éstas tienden a romperse rápidamente y formaban fibras más gruesas al llegar al colector como se muestra

en la Figura 100. Las fibras presentan un diámetro entre 17.85 a 12.53  $[\mu\text{m}]$ . Se recomienda cambiar los datos de voltaje y distancia del colector para cambiar los diámetros de las fibras.

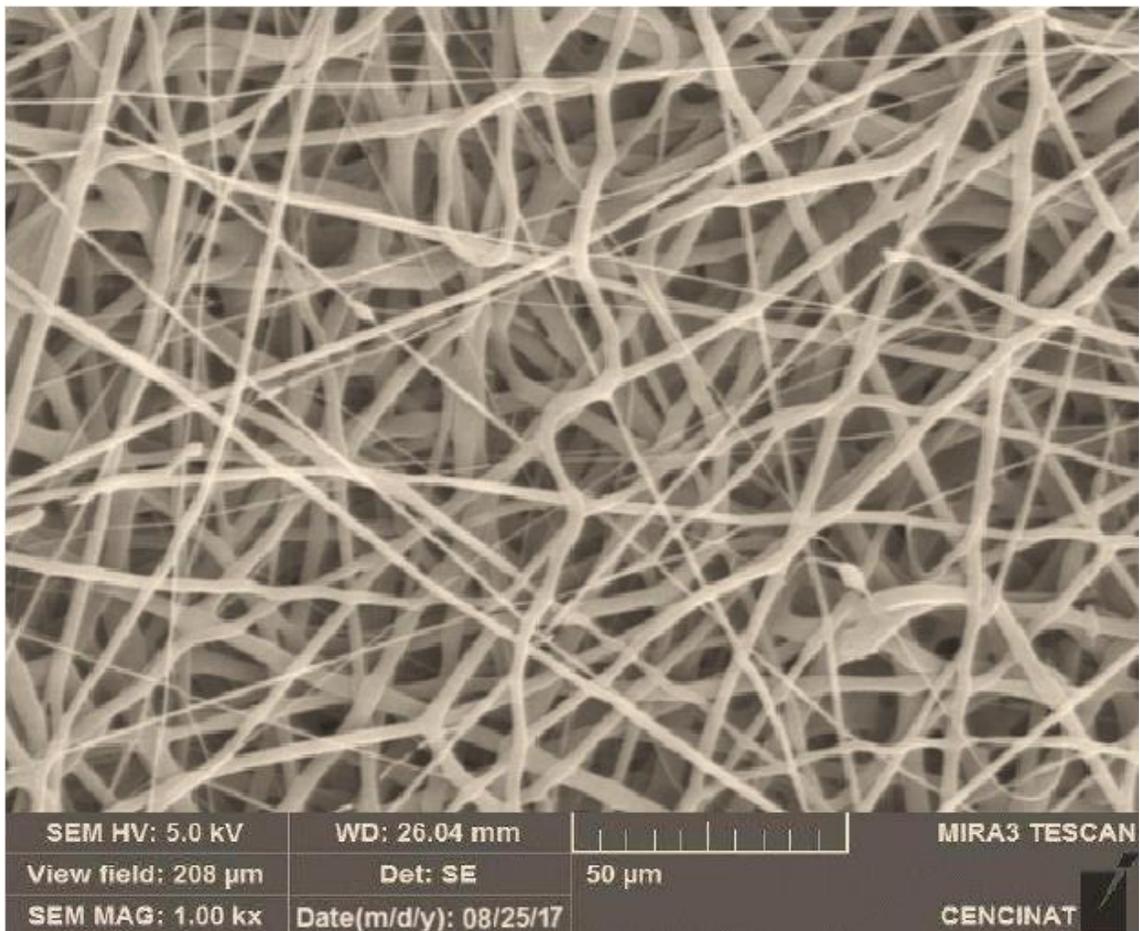


**Figura 98 Microscopia SEM de IPP a un zoom de 1000x**

### 5.2.1.3. Análisis de fibras de material LDPE

Aplicando los siguientes parámetros en el proceso:  $Q=10$   $[\mu\text{l}/\text{min}]$ ;  $d=8\text{cm}$ ;  $V=6.5$   $[\text{kV}]$ , se obtiene una formación de fibras como se muestra en la Figura 101. Las fibras presentan un diámetro promedio de 13.23 a 10.31  $[\mu\text{m}]$ . Estos resultados varían en comparación a las fibras de APP, puesto que para este experimento se utilizó material reciclado, se recomienda utilizar materiales

vírgenes, cambiar los datos de voltaje y distancia del colector para variar los diámetros de las fibras.



**Figura 99 Microscopia SEM de LDPE a un zoom de 1000x**

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se diseñó, construyó e implementó un módulo de control de temperatura y extrusora de termopolímeros adaptable a la maquina Yflow Star-Up ubicada en el laboratorio de fluidos e hidráulica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, para la obtención de microfibras a través del proceso de Melting-electrospinning.
- Se diseñó y construyó un módulo de control PI de temperatura para la extrusión de los termopolímeros: polipropileno atáctico (APP), polipropileno isotáctico (IPP) y polietileno de baja densidad (LDPE); el cual cuenta con las siguientes características: error de estado estable igual a 0, no presenta sobre picos y tiene un tiempo de estabilización de 5 min.
- Se realizó un control de temperatura aplicado a la fundición de los termopolímeros especificados, en base a una configuración determinada a través del software Labview.
- Se implementó el uso de una HMI para el control y monitoreo de las variables que intervienen en el proceso, el cual permite una mejor interacción entre el usuario y la máquina.
- Se validó el funcionamiento del módulo de control de temperatura, mediante un protocolo de pruebas llevadas a cabo para cada material.
- Se analizó y estudió la morfología de las fibras a través de imágenes micrométricas obtenidas con el microscopio de barrido; las cuales presentan las siguientes características: Las fibras de APP presentan un diámetro entre 13.35 a 11.94 [ $\mu m$ ] y forman fibras largas y homogéneas, con IPP las fibras presentan diámetros diversos puesto que las fibras obtenidas tendían a romperse con facilidad, los diámetros van de 17.85 a 12.53 [ $\mu m$ ]; finalmente con el LDPE las fibras fueron más ordenadas y presentaron diámetros de 13.23 a 10.31 [ $\mu m$ ].

- El proceso de melt-electrospinning permite la fabricación de fibras poliméricas finas en ausencia de disolventes, esto proporciona varios beneficios los cuales incluyen: el proceso de una nueva variedad de polímeros que no son solubles en disolventes lo cual evita problemas de toxicidad que puedan afectar a la salud y a las muestras finales; a la vez elimina la costosa y peligrosa necesidad de tratar los disolventes, reciclarlos o desecharlos y finalmente permite una preparación de material más rápida y menos complicada lo cual presenta un rendimiento más alto y es un proceso más rentable.
- Para trabajos futuros se recomienda estudiar las características y propiedades de los materiales utilizados en esta tesis variando los parámetros de voltaje, caudal y distancia del colector, así como con otros termopolímeros para abrir nuevos campos de investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

- Afshari, M. (2016). *Electrospun nanofibers*. Amsterdam: The Textile Institute.
- Aguirre, P. A. (2005). *Manual para usuarios inexpertos*. Chile.
- Angammana, C. &. (2016). *Fundamentals of Electrospinning and Processing Technologies*. Taylor & Francis.
- Benigno, L. (1989). *Control de temperatura de sólidos mediante la utilización de termocuplas*. Quito.
- Bentley, J. (2005). *Principles of measurement systems*. England: Pearson.
- Burger, C. H. (2006). Nanofibrous materials and their applications. *Annual Review of Materials Research*, 333-368.
- C. Betancor, J. C. (2008). *Diseño de un sistema de control de temperatura*. Universidad de Las Palmas de G.C.
- CIRC. (2009). Tecnología del polipropileno.
- Copodata. (2016). Obtenido de <https://www.copodata.com/es-mx/soluciones-hmi-scada/interfaz-hombre-maquina-hmi/>
- Dalton, D. B. (2016). Melt Electrospinning Today: An Opportune Time for an. *Progress in Polymer Science*.
- Derch R, S. M. (2005). *Nanoprocessing of Polymers: Applications in Medicine, Sensors, Catalysis Photonics*. Polym. Adv. Technol.
- Dorf, & Sadiku. (2006). *Circuitos electricos*. Mexico: Alfaomega.
- Echeverrya, L. (2005). *INSDECEN*. Obtenido de INSTRUMENTACION MECANICA Y MECATRONICA: <http://insdecem.com/archivos/Instrumenta.pdf>
- ECOPLAS. (2011). Poliestireno: características y ventajas.
- Electrospin Tech.* (2016). Obtenido de <http://electrospintech.com/meltspin.html#.WGVyIVPhDIU>
- Fernández, J. (2015). Manual de prácticas CAD utilizando el programa SolidWorks.
- Formhals. (1934). *Patente nº 1975504*. US.
- Herrera, L. (2005). *Procesos de transferencia de calor*. España: Santillana.

- Huang ZM, Z. Y. (2003). *A Review on Polymer Nanofibers by Electrospinning and Their Applications in Nanocomposites*. Sci. Technol.
- Hutmacher DW, D. P. (2011). Melt electrospinning. *Chem Asian* , 44-56.
- Incropera, F. (15 de 01 de 2015). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. Prentice Hall.  
Recuperado el 2016 de 11 de 05, de  
<http://www.auditoresycontadores.com/tributacion/15-tipos-de-empresas-en-ecuador>
- Jia, J. (2010). *Melt spinning of continuous filaments by cold air*. Georgia Institute of Technology.
- K., B. R. (s.f.). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. México: McGraw-Hill.
- Kelvin, G. (2014). *Melt electrospinning and its technologization in tissue engineering*. Australia: Pubmed.
- Khil MS, B. S. (2005). *Novel Fabricated Matrix Via Electrospinning for Tissue Engineering*. Biomed. Mater. Res.
- Larrondo L, S. J. (1981). Electrostatic fiber spinning from polymer melts. II. Examination of the flow field in an electrically driven jet. *J Polym Sci Polym Phys*, 21-32.
- Larrondo L, S. J. (1981). Electrostatic fiber spinning from polymer melts. I. Experimental observations on fiber formation and properties. *J Polym Sci Polym Phys*, 09-20.
- Larrondo L, S. J. (1981). Electrostatic fiber spinning from polymer melts. III. Electrostatic deformation of a pendant drop of polymer melt. *J Polym Sci Polym Phys* , 33-40.
- Leonel, F. (2013). Máquina extrusora para reciclaje de plástico.
- Lett, M. (2012). *A Review on electrospinning desing assemblies*.
- Li W, C. E. (2002). *Electrospun Nanofibrous Structure a Novel Scaffold for Tissue Engineering*. Biomed. Mater. Res.
- Lyons J, L. C. (2004). Melt-electrospinning part I: processing parameters and geometric properties. *Polymer*, 597-603.
- Lyons J, P. C. (2003). Developments in melt-electrospinning of thermoplastic polymers. *Polym Prepr*, 2-3.

- Maldonado, X., & Vega, F. (2010). *Diseño y construcción de un equipo de moldeo por termopresión de desechos plásticos*. Sangolquí.
- Mathworks. (s.f.). *Matlabcentral*. Obtenido de <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/32374-matlab-support-for-arduino--aka-arduinoio-package->
- Micolita, E. (2013). *Circuito de disparo en potencia*. Corporación Universitaria Autónoma del Cauca.
- National Instruments. (2013). LabVIEW.
- Norton, C. (1936). *Patente nº US 2048651*. Massachusetts.
- Ogata, K. (2003). *Ingeniería de Control Moderna*. Prentice Hall.
- Pallás Areny, R. (s.f.). *Sensores y Acondicionadores de señal*. Marcombo.
- Pinto, F. M. (2006). *Procesamiento y propiedades de algunas poliolefinas*. Venezuela: Departamento de Química. Facultad de Ciencias. Universidad de Los Andes.
- Sadiku. (2006). *Fundamentos de circuitos eléctricos*. Mc Graw Hill.
- SIEMENS. (2016). *CAD: Diseño asistido por computadora*.
- Smith LA, M. P. (2004). *Nano-Fibrous Scaffolds for Tissue Engineering*. Colloids Surf B. Biointerfaces.
- Suárez, J. (2015). *Proyecto de máquina extrusora, para creación de hilos de poli etilén tereftalato*. México: INstituto Politécnico Nacional.
- Tecnología del plástico. (2011). Reciclaje PET.
- Transferencia de calor*. (s.f.). Recuperado el 29 de 5 de 2017, de Wikipedia, la enciclopedia libre: [http://es.wikipedia.org/wiki/Transferencia\\_de\\_calor](http://es.wikipedia.org/wiki/Transferencia_de_calor)
- Wente, V. (1956). Superfine thermoplastic fibers. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1342-1346.
- Yu Dong, X. Q. (2010). *Electrospinning: Currents Status and Future trends*.
- Zhmayev E, C. D. (2010). Modeling of melt electrospinning for semi-crystalline polymers. *Polymer*, 74-90.

Zhou, H. (2007). *Electrospun fibers from both solution and melt: processing, structure and property*. New York.