



**SEP**  
SECRETARÍA DE  
EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Hermosillo

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MÁQUINA EXTRUSORA DE  
FILAMENTOS POLIMÉRICOS PARA MANUFACTURA ADITIVA**

**T E S I S**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

POR:  
**JESÚS GERARDO PEREZMORENO**

**DIRECTOR DE TESIS**  
RODOLFO ULISES RIVERA LANDAVERDE

HERMOSILLO, SONORA

ENERO 2019



Av. Tecnológico S/N Col. El Sahuaro C.P. 83170 Hermosillo, Sonora  
Tel. 01 (662) 2-606500, Ext. 136 e-mail: [depi\\_hermosillo@tecnm.mx](mailto:depi_hermosillo@tecnm.mx)

[www.tecnm.mx](http://www.tecnm.mx) | [www.ith.mx](http://www.ith.mx)



**ISO 9001:2015**  
Sistema de Gestión de Calidad Certificado

(Página dejada intencionalmente en blanco)

## **CARTA DE AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN DE TESIS**

(No lleva numeración de página)

## DEDICATORIA

A mi familia, siempre a mi lado.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis profesores, en especial a Germán y Ulises, ya que sin su guía este trabajo no habría sido posible.

A mi padre, siempre alentándonos a seguir formándonos en lo que más nos gusta.

A mi madre que, aunque no me abrazará como maestro, sé que observa desde el infinito.

## RESUMEN

Este trabajo presenta el desarrollo de una máquina de extrusión. Como se podrá ver, la extrusión de polímeros es el método de manufactura de estos, más antiguo. Sin embargo, no significa que no se renueve o se actualice de acuerdo con las investigaciones más novedosas de materiales o métodos de fabricación.

Como parte de la investigación de este proyecto, se podrá observar algo del estado del arte de los métodos propuestos. De forma similar de los productos obtenidos de este tipo de máquinas. Siempre se observaron las normas actuales que prevén, en este caso, la extrusión de un polímero conocido como ABS, cuyos componentes principales son Acronitrilo, Butadieno y Estireno.

La metodología que se siguió considera los pasos de desarrollo de un producto hasta su etapa de modelo de producción. Se inicia con el establecimiento de necesidades que se convertirán en especificaciones, mismas que se analizaron bajo las perspectivas de varios equipos similares. Después, se propone un concepto del diseño mismo que, aunado a las especificaciones establecidas, se debió traducir en el diseño de cada parte o componente. Finalmente, se fabricaron las piezas diseñadas, al tiempo que se programaban los elementos electrónicos y de control con los que se automatizó la máquina.

## **ABSTRACT**

This work presents the development of an extrusion prototype. As you will see, the extrusion of polymers is the oldest manufacturing method for them. However, it does not mean that it is not renewed or updated according to the latest research of materials or manufacturing methods.

As part of the investigation of this project, some of the state of the art of the proposed methods can be observed. In a similar way of the products obtained from this type of machines. The current standards that foresee, in this case, the extrusion of a polymer known as ABS, whose main components are Acronitrile, Butadiene and Styrene, were always observed.

The methodology that was followed considers the steps of developing a product until its prototype stage. It begins with the establishment of needs that will become specifications, which were analyzed under the perspectives of several similar teams. Then a concept of the design itself is proposed which, together with the established specifications, should be translated into the design of each part or component.

Finally, the designed parts were manufactured, while the electronic and control elements were programmed with which the prototype was automated.

# Índice

ÍNDICE DE FIGURAS .....	x
ÍNDICE DE TABLAS .....	xii
Capítulo 1. Introducción .....	1
1.1 Contexto y Antecedentes de la problemática .....	2
1.2 Definición de la problemática .....	3
1.3 Preguntas de Investigación .....	3
1.4 Objetivo General .....	4
1.5 Objetivos Particulares .....	4
1.6 Justificación.....	4
1.7 Alcances y limitaciones .....	5
Capítulo 2. Marco Teórico.....	8
2.1 El proceso de extrusión de polímeros .....	12
2.2 Máquinas de extrusión .....	14
2.2.1 Extrusor de un tornillo.....	14
2.2.2 Monitoreo del proceso .....	17
2.3 Maquinado convencional.....	20
2.4 Control numérico computarizado .....	22
2.5 Norma ISO 19062-1:2015 .....	24
2.6 Diseño y desarrollo de productos .....	25
2.6.1 Fase de Planeación .....	25
2.6.2 Fase de Desarrollo de Concepto .....	25
2.6.3 Fase de Diseño a Nivel de Sistema.....	26
2.6.4 Fase de Diseño de Detalle .....	26
2.6.5 Fase de Pruebas y Refinamiento.....	27
2.6.6 Fase de Inicio de Producción .....	27
Capítulo 3. Materiales y Métodos.....	30
3.1 Metodología .....	30
3.1.1 Planeación.....	30
3.1.2 Definición de especificaciones.....	31
3.1.3 Conceptualización .....	32
3.1.4 Definición de arquitectura .....	32
3.1.5 Definición de materiales .....	33
3.1.6 Construcción.....	33
3.2 Materiales.....	34
3.2.1 Herramientas informáticas.....	34
3.2.2 Maquinaria y equipo .....	34
3.2.3 Partes y componentes de la máquina.....	35
3.2.4 Herramienta adicional y personal .....	36
Capítulo 4. Análisis de Resultados .....	37
4.1 Definición de las especificaciones.....	37
4.2 Selección.....	39
4.3 Conceptualización .....	42
4.4 Arquitectura.....	45
4.5 Construcción .....	45

4.5.1	Diseño .....	45
4.5.2	Manufactura.....	48
4.5.3	Ensamble.....	50
Capítulo 5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	57
Bibliografía		59
ANEXOS		61
Anexo I	.....	62
Anexo II	.....	63
Anexo III	.....	64
Anexo IV	.....	65
Anexo V	.....	68
Anexo VI	.....	69

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Mapa general del Instituto Tecnológico de Hermosillo.....	2
Figura 2-1 metodología utilizada, con base en (Kang et al., 2016) .....	8
Figura 2-2 Conocimientos relacionados con el proyecto .....	12
Figura 2-3 Diagrama de una extrusora de tornillo sencillo (Lafleur & Vergenes, 2014) .....	13
Figura 2-4 Esquema de una máquina de extrusión de un tornillo (Lafleur & Vergenes, 2014).....	15
Figura 2-5 Extrusor “transfermix” (Rauwendaal, 2014) .....	16
Figura 2-6 (a) secciones funcionales; (b) secciones geométricas (Lafleur & Vergenes, 2014).....	17
Figura 2-7 ubicación de sensores térmicos en boquilla extrusora.....	19
Figura 2-8 Contacto de una herramienta de corte con una pieza de trabajo, generando viruta (El-Hofy, 2014) .....	20
Figura 2-9 Movimiento general en un torno (El-Hofy, 2014).....	21
Figura 2-10 Ejemplo de rectificadora de superficies (El-Hofy, 2014).....	21
Figura 2-11 Fresadora universal y mecanismo divisor .....	22
Figura 2-12 Mejora de un proceso de maquinado CNC 5 ejes (a) rugosidad inicial (b) rugosidad prueba 2 (c) rugosidad optimizada (d) ángulo de herramienta óptimo (e) posturas de herramientas en prueba 2 y óptimo (f) desplazamiento de ejes (g) Tiempos de manufactura inicial, prueba 2 y óptimo (Tunc et al., 2016) .....	23
Figura 2-13 Torno de control numérico de 9 ejes de trabajo (Copyright © 2005 Qsine Corporation) .....	24
Figura 2-14 Fases del desarrollo de proyectos (Ulrich & Eppinger, 2013) .....	25
Figura 2-15 Ejemplo de Matriz de Pugh (Ulrich & Eppinger, 2013) .....	26
Figura 2-16 Fases de QFD (Alcaide-Marzal, Diego-Más, & Artacho-Ramírez, 2004) .....	28
Figura 3-1 Fases aplicadas en el desarrollo del proyecto .....	30
Figura 3-2 Etapas para la fase de construcción del equipo.....	33
Figura 4-1 Fase I de análisis QFD.....	43
Figura 4-2 Clasificación de concepto (a): selección de fuente térmica (b): flujo de energía en el proceso de extrusión (c): proceso térmico. (de Ulrich & Eppinger, 2013).....	44
Figura 4-3 Arquitectura de la máquina de extrusión.....	45
Figura 4-4 Modelado del tornillo extrusor mediante <b>Solid Works</b> .....	46
Figura 4-5 Plano de la máquina de extrusión .....	47
Figura 4-6 Barril extrusor terminado.....	48
Figura 4-7 Ensamble barril – boquilla extrusora .....	48
Figura 4-8 Tornillo de extrusión.....	49
Figura 4-9 Fabricación de tornillo extrusor, fresadora universal.....	49
Figura 4-10 Pruebas de movimiento de ensamble tornillo - barril .....	50

Figura 4-11 Máquina extrusora ensamblado: A) Motor principal; B) Base de Motor; C) Base de cuerpo; D) Tolva de material; E) Ensamble tornillo – barril con protección; F) Boquilla de extrusión (Rosas, 2018)F) .....	51
Figura 4-12 Máquina extrusora ensamblado: A) Motor principal; B) Base de Motor; C) Base de cuerpo; D) Tolva de material; E) Ensamble tornillo – barril con protección; F) Boquilla de extrusión (Rosas, 2018).....	51
Figura 4-13 Unidad de control y elementos electrónicos (previo a instalación).....	52
Figura 4-14 Lógica de programación para las resistencias eléctricas .....	53
Figura 4-15 Pruebas de circuito de control (Ledgard-Gonzalez et al., 2018) .....	54
Figura 4-16 Costo mín-máx de una extrusora comercial con capacidades similares .....	56

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Resultados de búsquedas individualizadas de palabras clave (fuente: Web Of Science) .....	9
Tabla 2-2 Resultados de búsquedas en pares de palabras clave (fuente: Web Of Science) .....	10
Tabla 2-3 Resultados de búsqueda agrupada de palabras clave (fuente: Web Of Science) .....	11
Tabla 2-4 Mejoras en los sistemas de tornillo- barril (Lafleur & Vergenes, 2014) .	16
Tabla 3-1 Declaración de la misión de una solución (Ulrich & Eppinger, 2013) ....	31
Tabla 3-2 Necesidades iniciales del cliente (Ulrich & Eppinger, 2013).....	31
Tabla 3-3 Especificaciones técnicas para una solución (Ulrich & Eppinger, 2013)	32
Tabla 3-4 Formato de análisis QFD, fase II.....	32
Tabla 3-5 Formato para la definición de materiales (Ulrich & Eppinger, 2013) .....	33
Tabla 3-6 Calendarización para la etapa de construcción del equipo .....	33
Tabla 3-7 Herramientas de informática .....	34
Tabla 3-8 Maquinaria y equipo seleccionado .....	35
Tabla 3-9 partes principales de la máquina.....	35
Tabla 3-10 Herramienta adicional y personal.....	36
Tabla 4-1 Definición de las necesidades del cliente en base a (Ulrich & Eppinger, 2013) .....	37
Tabla 4-2 Definición de las especificaciones técnicas con base a (Ulrich & Eppinger, 2013).....	39
Tabla 4-3 Matriz de Pugh para análisis comparativo de extrusoras .....	41
Tabla 4-4 Resumen de costos para el desarrollo de máquina de extrusión de polímeros .....	55

# Capítulo 1. Introducción

En el presente, se hace referencia al problema existente en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Hermosillo. En la actualidad, en este centro, se trabaja en la caracterización de materiales utilizados en la manufactura aditiva, es decir, en obtener las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en impresión 3D. Para este fin, la División obtuvo una impresora 3D, a base de polímeros.

El Instituto Tecnológico de Hermosillo abre sus puertas en 1974, iniciando labores docentes en octubre del siguiente año, para nivel de ingeniería. A lo largo de las dos primeras décadas, fue ampliando su oferta educativa, así como su planta docente. Hoy en día cuenta, además, con la División de Estudios de Posgrado e Investigación (DEPI).

La organización del Instituto se da a nivel nacional, en la que, se depende de una subdirección académica, llamada Tecnológico Nacional de México, dependiente de la Secretaría de Educación Pública. Aún cuando hay tareas administrativas exclusivas del Tecnológico Nacional, cada Instituto tiene autonomía de operación. En el caso del Instituto Tecnológico de Hermosillo, la estructura organizacional se divide en un director de plantel, apoyado por los diferentes departamentos administrativos, todos a su vez en apoyo del área académica, misma que cuenta con dirección de departamentos y coordinación de carreras. Por su parte, la División de Estudios de Posgrado e Investigación, cuenta con una coordinación de Maestría y otra de Doctorado, ambas dependientes de una Jefatura de División; ambas con equipos de profesores investigadores adscritos a los diferentes programas de posgrado.

Por otra parte, el espacio físico ocupado por el Instituto en la ciudad de Hermosillo, Sonora es como se muestra en la Figura 1-1. Cuenta con 31 edificios

para los servicios académicos, administrativos, servicios y actividades culturales que se llevan a cabo por todos quienes lo conforman. Por su parte, la División de Estudios de Posgrado e Investigación se ubica en el edificio P1, en el sector oriente del Instituto.



Figura 1-1 Mapa general del Instituto Tecnológico de Hermosillo

## 1.1 Contexto y Antecedentes de la problemática

Como parte de las actividades de investigación, la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Hermosillo se tiene como objetivo el realizar trabajos bajo distintas líneas de investigación. Entonces, un grupo de investigadores que conforman el Cuerpo Académico “Organización Industrial y Sistemas de Producción”, se han dado a la tarea de estudiar las propiedades mecánicas de materiales utilizados en manufactura aditiva.

La manufactura aditiva consta de fabricar partes o componentes a partir de añadir material que adquiere su forma final gracias a un equipo automatizado. Esto difiere de métodos como el mecanizado que, por el contrario, retira material de una pieza para tomar su forma final, también difiere de procesos como el moldeo, ya que, en este tipo de manufactura, no se requieren moldes, no se trabaja con presión y las temperaturas utilizadas son menores. Para una de las siete técnicas de

manufactura aditiva, conocida como impresión 3D, se necesita un equipo automático que imprime o rellena material polimérico, basado en un dibujo computarizado que un *software* traduce a capas de material que se van añadiendo una encima de otra. Para realizar la caracterización mecánica de este tipo de materiales, un equipo de investigación organizará un proyecto que consta de imprimir piezas normalizadas para, posteriormente realizar las pruebas destructivas que identifiquen las capacidades del material.

## **1.2 Definición de la problemática**

Al realizar los estudios en las probetas de prueba impresas, el equipo encargado observó que existían variaciones en algunos resultados, mismas que no permitían el análisis de éstos. Al revisar el proceso, observaron que las muestras provenían de materia prima diferente. Si bien se trataba del mismo polímero, la materia prima tenía variación en color y proveedor.

Lo anterior representa un problema dado que, para poder analizar las probetas de muestra deben ser consistentes en densidad del material. De lo contrario, habrá probetas que tengan mayor masa que otras y, por lo tanto, serán más resistentes a las fuerzas aplicadas durante las pruebas de caracterización. La opción, es convertirse en proveedor propio de este material. Para ello, se plantearon las preguntas de investigación que dieron pie a la conformación de un proyecto de investigación, referente a la fabricación de este tipo de polímeros.

## **1.3 Preguntas de Investigación**

Al definirse la problemática, surgieron algunas incógnitas que dieron pie al inicio del proyecto. Estas preguntas fueron la guía principal para esta investigación acerca de las técnicas y métodos de fabricación de filamentos poliméricos, así como los equipos y maquinaria utilizada para este propósito.

¿Qué ventajas y desventajas presentan las opciones de proveedores de material?

¿Cómo se puede comprobar la calidad de los filamentos para la impresora 3D?

¿Cómo se produce un filamento?

¿Qué se controla en el proceso para controlar la calidad de los filamentos?

¿Qué tipo de máquinas de extrusión existen en el mercado?

¿Cuál es el costo relativo de las extrusoras comerciales-industriales?

## **1.4 Objetivo General**

Elaborar una máquina de extrusión mediante el análisis, diseño y técnicas de manufactura, para la elaboración de filamentos de polímero utilizados en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Hermosillo, para investigación de la caracterización de material polimérico utilizado en la fabricación aditiva a través de impresión en 3D.

## **1.5 Objetivos Particulares**

A partir del objetivo general, se desglosaron objetivos particulares, mismos que aunados a las preguntas de investigación, dieron pie a investigaciones documentales particulares. De forma similar se estableció de la metodología a seguir para el desarrollo de una máquina extrusora, considerando las técnicas de Ingeniería Industrial, de diseño y manufactura.

- Investigar las características del polímero para la impresión en 3D, para determinar los requerimientos dimensionales y mecánicos del filamento.
- Determinar las necesidades del equipo de investigación encargado de la caracterización de polímeros.
- Diseño de la máquina a partir de las características solicitadas por la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Hermosillo.
- Los filamentos producidos, serán de ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) de 1.65 mm de diámetro.

## **1.6 Justificación**

En la actualidad, la extrusión de polímeros está enfocada a la industria manufacturera. Los principales productos se refieren a envases, láminas, barras, pellets para moldeo, filamentos, entre otros. En el caso de los filamentos, los

materiales utilizados para impresión 3D, resultan costos, debido a las características y tolerancias que se deben cumplir. Además, debido a la disponibilidad, podrían presentarse cambios en las propiedades de los filamentos, es por esto por lo que se debe tener un producto controlado. Para evitar cambios en los proveedores, o especificaciones de un proveedor, se presenta la posibilidad de producir el propio material, de manera que se tenga un producto controlado y con mayor seguridad que no presente variaciones.

Para lo anterior, es necesario fabricar una máquina de extrusión para la producción de los filamentos que utilizarán las impresoras 3D disponibles en la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Hermosillo. La principal justificación para fabricar esta máquina es el costo que el Instituto se ahorraría a mediano plazo. De forma similar, se podrán obtener materiales poliméricos con las especificaciones que se deseen cubrir. Se podrá incluso, hacer mezclas para otros experimentos de materiales o productos. Por otra parte, se podrá formar capital humano con experiencia en este tipo de equipo, sumando al esfuerzo por capacitar de forma práctica a los estudiantes de la Institución.

## **1.7 Alcances y limitaciones**

El proyecto tendrá como alcances la elaboración de una máquina de extrusión polimérica, en sus etapas de diseño y fabricación. En base al análisis del estado del arte, se definirán las posiciones de elementos de calentamiento, velocidades de extrusión, así como los sensores que aportarán datos para el control de proceso.

El proyecto se limitará a una máquina para la producción de filamentos del polímero ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) con diámetro de 1.65 mm. La construcción también será limitada a la de una extrusora, por lo tanto, las partes, componentes y ensamblajes contarán con la calidad suficiente para ser funcionales, sin observar estética ni tolerancias en componentes no críticos. Las especificaciones técnicas y de calidad, serán definidas por el usuario final, así como

la norma ISO 19062-1:2015 de extrusión y moldeo de ABS (Acronitrilo-butadieno-estireno).

Teniendo definidos los alcances, limitaciones y objetivos, se definió como proyecto de investigación el desarrollo de un equipo de extrusión de polímeros. Lo anterior con el fin de que la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Hermosillo pueda avanzar en la búsqueda de conocimientos. De esta forma, se avanzará en la caracterización de materiales que a su vez sirva de apoyo a la industria enfocada en estos materiales. En los próximos capítulos se presenta el desarrollo de este proyecto. Para iniciar, el capítulo 2: Marco teórico, no solo contiene información de referencia del proyecto, sino también, información del estado del arte de diferentes técnicas, procedimientos y maquinaria, derivados de investigaciones científicas recientes. Si bien algunas teorías datan de décadas, no significa que no hayan sufrido modificaciones dados los avances tecnológicos actuales. Este capítulo se inicia haciendo referencia a una técnica que apoya en la selección de palabras dedicadas a la investigación, mismas que servirán de guía en la búsqueda de información referente al tema del proyecto y actualizada en los términos de investigación que va de 5 a 10 años, dependiendo del tipo de publicación.

Seguidamente el capítulo 3, aborda la metodología utilizada en el desarrollo del proyecto. En este capítulo se trabaja principalmente con la teoría de diseño de productos, misma que se detalla en el capítulo 2. Gracias a esta teoría, se tiene una guía para el desarrollo de cualquier proyecto y que fue de gran utilidad para el desarrollo de una máquina de extrusión. Para esta metodología se implementarán herramientas que se observarán en distintas tablas que llevarán el propósito de visualizar los resultados detalladamente. Además de la teoría, se propondrán los materiales con los que se ha de trabajar en el diseño y construcción de la máquina. Aún cuando la sección lleva por nombre “materiales”, se proponen además herramientas y personal que se verá involucrado en el desarrollo del proyecto.

Posteriormente, en el capítulo 4 se podrán observar los resultados obtenidos al implementar los métodos propuestos. Los resultados van desde la implementación

de una herramienta metodológica como una tabla, una declaración de misión entre otras, hasta la implementación de técnicas propias de la fabricación y ensamble para la construcción de la extrusora. Así mismo, se utilizarán diferentes paquetes informáticos como herramientas de planeación y diseño de los componentes.

Por último, el capítulo 5 tendrá las conclusiones a las que se lleguen al final del proyecto. Se discernirá si se alcanzaron o no los objetivos planteados en este primer capítulo, acompañados de su propia evidencia.

## Capítulo 2. Marco Teórico

Previo a describir los conceptos y estado del arte, se definió una metodología para la búsqueda de información. Al tomar como ejemplo a (Kang et al., 2016), como primera instancia se definieron las palabras clave que, con mayor frecuencia, describen el proyecto. Se agruparon y clasificaron las palabras clave, a fin de acortar la búsqueda de los conocimientos generales a los conocimientos específicos y de interés para el proyecto. Finalmente, se procedió al análisis de los resultados de las búsquedas, para determinar específicamente los elementos que aportan conocimiento o técnicas al proyecto, con el fin de que éste sea innovador. La metodología se resume en la Figura 2-1.



Figura 2-1 metodología utilizada, con base en (Kang et al., 2016)

Por otra parte, como resultado de este análisis, se pueden graficar los datos obtenidos de las búsquedas, dependiendo de la selección de palabras clave y de los grupos que se formaron, con el fin de observar de forma clara las correspondencias y pertinencia del proyecto. A continuación, se muestran los resultados obtenidos de estas búsquedas. Se destaca que los datos se obtuvieron del sitio de *Web of Science*, mismo que se dedica a la compilación y divulgación de conocimiento científico de distintas editoriales.

Para direccionar los resultados de las búsquedas y no tomar resultados generales de palabras como “diseño”, se acotaron las búsquedas a tópicos de ingeniería, materiales, mecánica, automatización, polímeros y caracterización. Entonces, la primera búsqueda arroja los resultados de la Tabla 2-1, en la que se buscan las palabras de forma individual. Como se puede observar, esta primera búsqueda dio como resultado un total de más de 230,000 entradas en *Web Of Science*, siendo ésta, la primera búsqueda, los resultados arrojados son demasiados para ser revisados por completo. Además, no se tienen detalles del contenido específico, por lo tanto, no se puede afirmar que el tema de investigación está abordado en todas estas referencias encontradas. De aquí es que se procede a agrupar las palabras clave para acotar la búsqueda a temas más pertinentes a la investigación.

*Tabla 2-1 Resultados de búsquedas individualizadas de palabras clave (fuente: Web Of Science)*

<b>Palabra clave</b>				
<b>Año</b>	<b>Diseño</b>	<b>Máquina</b>	<b>Extrusión</b>	<b>Polímeros</b>
<b>2010</b>	10,115	555	881	9,749
<b>2011</b>	11,623	575	913	10,389
<b>2012</b>	12,652	592	1,007	10,786
<b>2013</b>	15,039	754	1,137	11,616
<b>2014</b>	17,056	810	1,232	11,084
<b>2015</b>	19,633	901	1,227	11,278
<b>2016</b>	22,677	1,081	1,184	11,506
<b>2017</b>	22,729	1,031	1,144	10,415
<b>2018</b>	292	21	25	184
<b>Totales</b>	131,816	6,320	8,750	87,007

En la Tabla 2-2, se presentan los resultados, en esta ocasión agrupando palabras clave por pares, con el fin de reducir la búsqueda a los temas de mayor interés y relevancia con el proyecto, de éstos, se pueden considerar algunos para ser consultados. Sin embargo, se nos presentan alrededor de 11,000 resultados, mismos que no pueden ser revisados en su totalidad. Para acotar de forma definitiva las palabras que se deben buscar, se debe hacer una última combinación de ellas, con el propósito de acotar de forma tal que las entradas resultantes puedan al menos ser consultadas de forma rápida para juzgar su pertinencia y relevancia al

proyecto de la extrusora. De esta búsqueda se encontraron algunas entradas que podrían resultar relevantes de la combinación diseño-extrusión. Siendo éste, uno de los temas más abordados a lo largo del proyecto.

*Tabla 2-2 Resultados de búsquedas en pares de palabras clave (fuente: Web Of Science)*

<b>Grupos</b>			
<b>Año</b>	<b>Diseño, máquina</b>	<b>Diseño, extrusión</b>	<b>Extrusión, polímero</b>
	<b>Grupo 1</b>	<b>Grupo 2</b>	<b>Grupo 3</b>
<b>2010</b>	855	49	176
<b>2011</b>	855	55	171
<b>2012</b>	877	55	200
<b>2013</b>	1,087	55	192
<b>2014</b>	1,212	75	208
<b>2015</b>	1,234	71	206
<b>2016</b>	1,544	70	183
<b>2017</b>	1,382	73	151
<b>2018</b>	1	1	2
<b>Totales</b>	9,047	504	1,489

Por último, en la Tabla 2-3, se hicieron algunos intentos para agrupar la mayor cantidad de palabras con resultados que favorecieran al proyecto, la agrupación que brindó resultados que aplicaron directamente al proyecto, es la que se muestra. La última agrupación arrojó un total de 239 resultados, mismos que resultan posibles de clasificar, dependiendo de la información contenida como útiles o no para el desarrollo de una máquina de extrusión. De esta clasificación, se tomaron los artículos de estado del arte considerados como los más pertinentes y que mejor podrán apoyar al proyecto. Aunado a esto, se toman algunas teorías y normas que se deben considerar en los procesos de extrusión de polímeros.

Tabla 2-3 Resultados de búsqueda agrupada de palabras clave (fuente: *Web Of Science*)

<b>Año</b>	<b>Diseño, máquina, extrusión, polímero</b>
	Grupo 4
<b>2010</b>	9
<b>2011</b>	16
<b>2012</b>	16
<b>2013</b>	24
<b>2014</b>	23
<b>2015</b>	31
<b>2016</b>	54
<b>2017</b>	66
<b>2018</b>	0
<b>Totales</b>	239

A continuación, se abordan los temas de las palabras clave con el fin de conceptualizar los temas que son incluidos en el proyecto actual. De forma similar, se tiene una idea del estado del arte de estos temas, asegurando que el proyecto se encuentra en la vanguardia del conocimiento y de la técnica contemporáneos. Los conceptos no se limitan a las palabras clave, pero si a los conocimientos relacionados con la máquina, como se muestra en la Figura 2-2. Este tipo de clasificación se tomó como convergencia del conocimiento en la cual, se toman temas de gran amplitud de los que se extraen temas más específicos, hasta llegar a los que aplican directamente al proyecto.

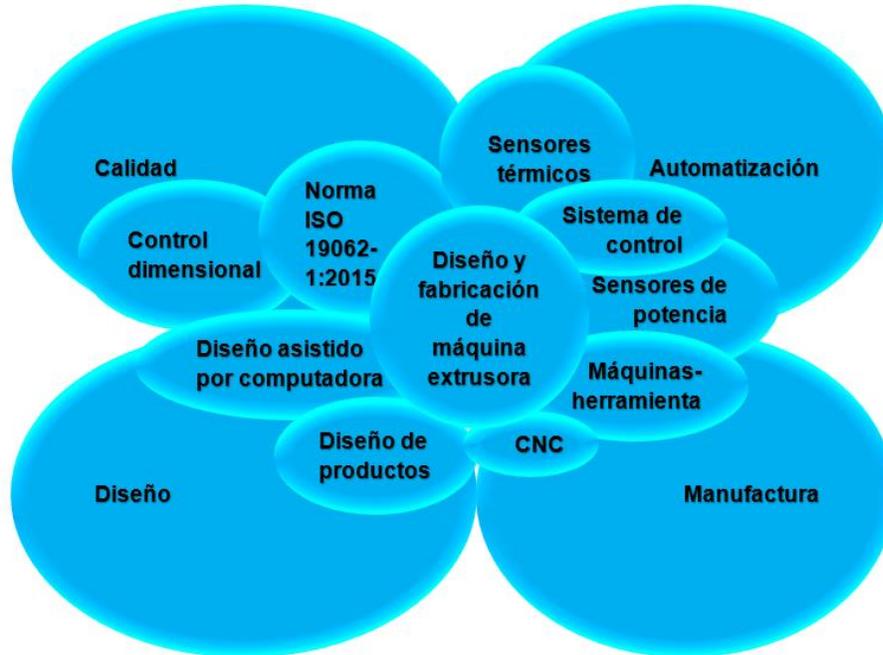


Figura 2-2 Conocimientos relacionados con el proyecto

## 2.1 El proceso de extrusión de polímeros

Extruir un material, se refiere a forzar un material a través de una apertura con alguna forma preestablecida. Generalmente se hace referencia a la extrusión, como el proceso más importante y más antiguo en los procesos de formado de polímeros, (Rauwendaal, 2014). El proceso en general es sencillo, tomando en cuenta el estado del material y la presión que debe ser aplicada, la maquinaria ha variado poco desde su creación. Lo anterior no significa que el proceso no se haya mejorado a lo largo del tiempo, por el contrario, con la aplicación de nuevas tecnologías, es posible producir materiales con un alto índice de control de proceso, (Lafleur & Vergenes, 2014). A continuación, se muestra una imagen (Figura 2-3) de un equipo de extrusión básico. Como se puede observar en la Figura, los elementos de un equipo de extrusión son un motor- reductor, que regula la velocidad de los tornillos de extrusión y, por lo tanto, la presión de salida. La unidad de control, donde se encuentran interconectados los dispositivos sensoriales, así como los elementos de salida, en conjunto con la interfaz de usuario. Los ejes acanalados, soportan los tornillos de extrusión por los que fluye el material en estado líquido o moldeable. La tolva receptora es la que recibe la materia prima que será derretida en el interior del barril por medio de resistencias eléctricas que generan calor de forma controlada.

Por último, el dado de salida, que puede contener un elemento de corte, dependiendo del tipo de producto que se obtendrá.

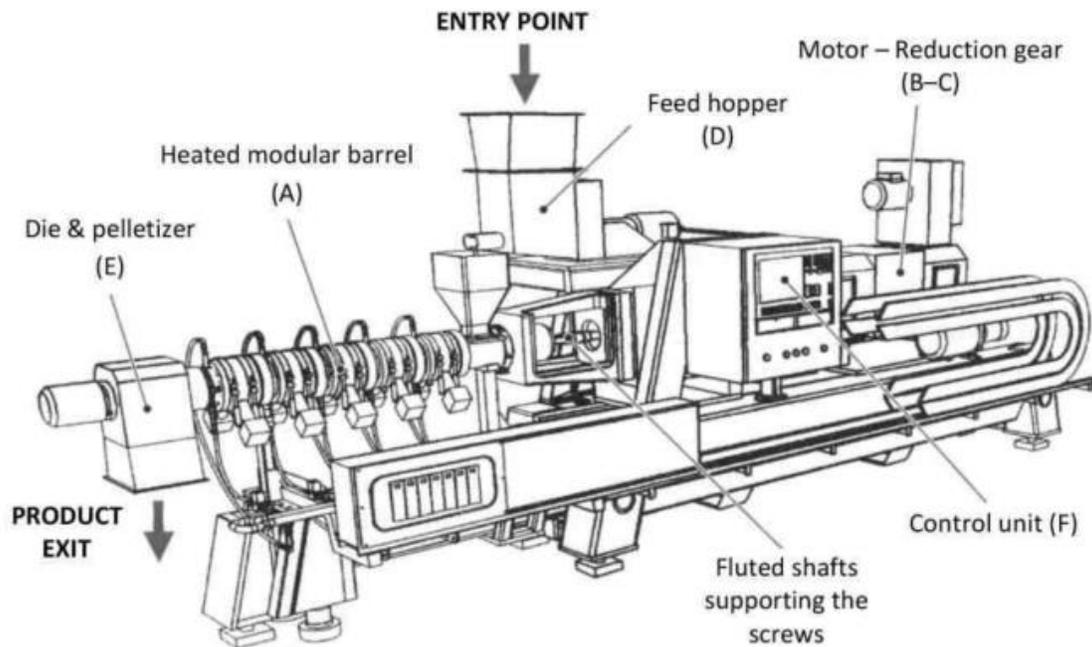


Figura 2-3 Diagrama de una extrusora de tornillo sencillo (Lafleur & Vergenes, 2014)

En el ejemplo, la máquina señalada es de doble tornillo, sin embargo, existen varios tipos de máquinas que varían con respecto a los requerimientos técnicos de extrusión necesarios.

Por otra parte, existe una gran variedad de polímeros que pueden ser extruidos. La selección de estos materiales debe ser basada en las propiedades del propio polímero, así como en las necesidades que se pretendan satisfacer. Existen polímeros de resistencia mecánica, sea esta dureza o tenacidad; resistencia térmica para aplicaciones a diferentes temperaturas; biodegradables para aplicaciones temporales, entre otros. El polímero que se ha considerado para este proyecto es ABS (Acronitrilo-butadieno-estireno), mismo que, en el trabajo de (Kar, Biswas, & Bose, 2016) ha sido analizado mediante la implementación de Rayos X, con el fin de comprobar que la extrusión proporcione cristalización y movimiento estabilizado durante el proceso.

Mientras tanto, (Parikh, Gupta, Meena, & Serajuddin, 2014) centran su trabajo en las propiedades viscoelásticas de los polímeros extruidos, con el fin de determinar si todos los componentes del polímero son aptos para ser extruidos. Esta propiedad es de relevancia ya que un componente de un polímero que presenta mayor viscosidad que otro componente, no debería ser mezclado para formar un polímero. Esto debido a que, durante el proceso, los materiales tenderán a fluir a velocidades diferentes, provocando mezclas heterogéneas.

## **2.2 Máquinas de extrusión**

### **2.2.1 Extrusor de un tornillo**

La máquina de extrusión básica es la que contiene un tornillo. Esto se refiere al mecanismo que produce la presión sobre el polímero a lo largo de un barril que contiene los elementos de calentamiento. El movimiento continuo de este tornillo empuja el material en un solo sentido y provoca la extrusión. La Figura 2-4, muestra un diagrama de este tipo de mecanismo. Como se puede observar, la extrusión se basa en un movimiento mecánico que, al girar, atrapa y presiona los materiales que serán fundidos por el incremento de temperatura de los elementos de calentamiento. Serán entonces el tipo de material y proceso, los que definan los niveles de temperatura conforme avanza el producto por el tornillo. Por otra parte, cuenta con una tolva alimentadora, por la que se deposita la materia prima. En operación constante, se debe asegurar que siempre contenga material para evitar que el producto se interrumpa. Cuenta, además con un depósito generalmente conteniendo agua, con el fin de que el calentamiento del material no afecte los demás componentes y que las personas a cargo no corran riesgo por las altas temperaturas. Adicionalmente, una parte del agua contenida puede ser utilizada para hidratar el material durante el proceso. Esto dependerá de las especificaciones del propio material.

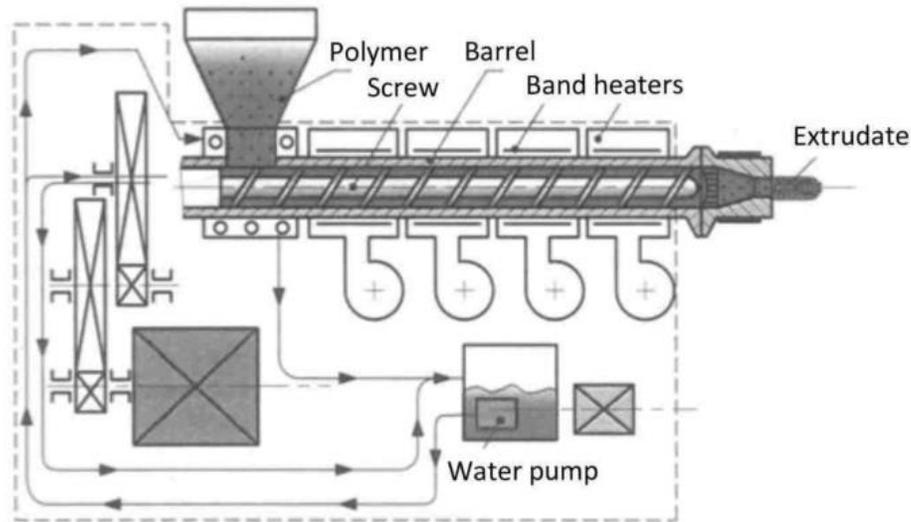


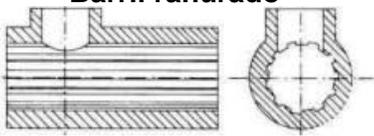
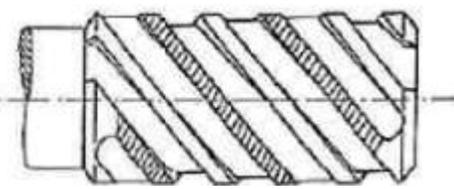
Figura 2-4 Esquema de una máquina de extrusión de un tornillo (Lafleur & Vergenes, 2014)

(Abeykoon, 2016) propone en su trabajo, una metodología de análisis de este tipo de extrusoras, con el fin de ampliar los panoramas de estas máquinas para así proponer futuras mejoras al proceso de extrusión en una máquina de un tornillo. Sus resultados son basados también en investigaciones previas en las que, precisamente propone mejoras en áreas específicas del proceso de extrusión de polímeros. Estos trabajos serán referenciados en secciones posteriores.

### 2.2.1.1 Tornillo Extrusor

El tornillo extrusor, es uno de los componentes principales de las máquinas de extrusión de polímeros. Esencialmente, es un mecanismo diseñado para que el material que se funde avance de forma continua en un solo sentido. Su diseño parecería ser sencillo, sin embargo, existen variaciones, dependiendo los cambios durante el proceso que se deseen. (Lafleur & Vergenes, 2014) muestran algunas mejoras en el sistema de los tornillos (Tabla 2-4). Por su parte, (Rauwendaal, 2014) propone unas variantes en el diseño que se utilizan en procesos que requieren mezclas más homogéneas, pero que resultan ser de costo elevado debido a servicios o reparaciones. Se explica que la variación del diámetro del tornillo a lo largo del barril y la inclusión de ventilación permite aun mayor flujo forzado, permitiendo así, una mezcla homogénea (Figura 2-5).

Tabla 2-4 Mejoras en los sistemas de tornillo- barril (Lafleur & Vergenes, 2014)

Innovación	Objetivo	Mecanismo
<p><b>Barril ranurado</b></p> 	Aumentar la capacidad de movimiento de partículas sólidas.	Aumentar la adherencia de partículas a la pared del barril.
<p><b>Tornillo de barrera</b></p> 	Aumentar la capacidad de fundición.	Aumentar la superficie de contacto entre la fase sólida y el barril.
<p><b>Tornillo de barrera con descarga</b></p> 	Aumentar la capacidad de fundición.	Disminuir el espesor de la capa de polímero fundido entre la fase sólida y el barril.
<p><b>Mezcladores</b></p> 	Mejorar el desempeño de mezclado.	Dividir y recombinar el flujo. Aumentar cortes.

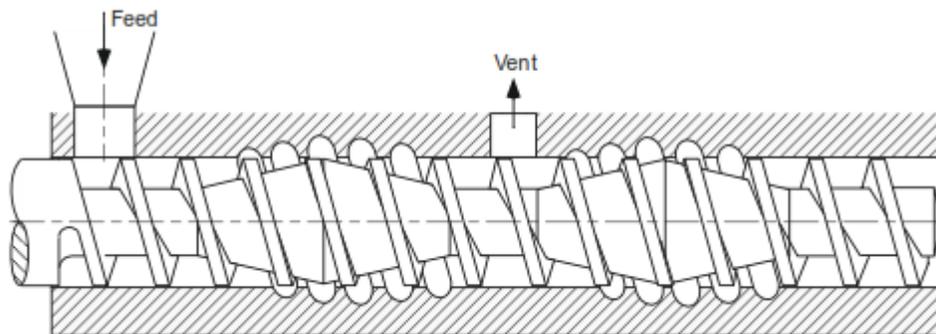


Figura 2-5 Extrusor "transfermix" (Rauwendaal, 2014)

### 2.2.1.2 Sistema tornillo- barril

El sistema en el interior de una máquina de extrusión de un tornillo consta de dos elementos principales; el tornillo extrusor y el barril. El barril es en esencia, un cilindro que contiene el tornillo y por el cual fluirá el polímero que se pretende extruir. El sistema se divide en secciones funcionales, o en secciones geométricas. La primera, se refiere a la etapa del proceso de extrusión en relación con el estado del

material; la segunda, se refiere a la propia geometría del tornillo. En ambos casos, son tres secciones. En la Figura 2-6 (a), se puede observar que conforme avanza el material dentro del sistema, cambia el estado del material, con esto se puede hacer referencia a la colocación de los elementos de calentamiento a lo largo del barril. Mientras que en la Figura 2-6 (b), se detalla solo la geometría del tornillo que, en la primera sección tiene un diámetro constante, en la segunda sección, el diámetro se incrementa gradualmente y, por último, de nuevo permanece un diámetro constante, mayor que la primera sección.

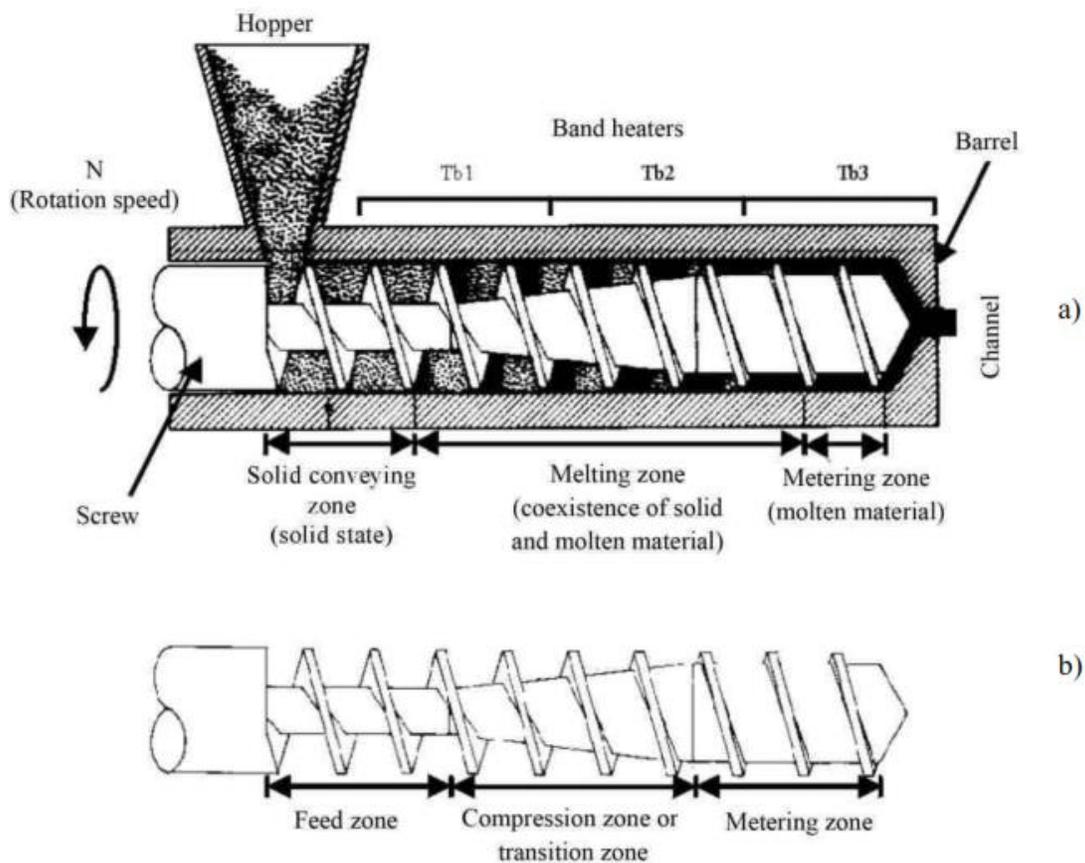


Figura 2-6 (a) secciones funcionales; (b) secciones geométricas (Lafleur & Vergenes, 2014)

## 2.2.2 Monitoreo del proceso

### 2.2.2.1 Monitoreo basado en consumo de energía

Como se ha mencionado en secciones anteriores, en el proceso de extrusión de polímeros, se deben monitorear dos variables: presión y temperatura. La presión se puede controlar de forma eficiente, al medir el consumo de energía en el motor que

alimenta al movimiento del tornillo extrusor (Deng et al., 2014). La carga de energía está relacionada con el nivel de fluidez que tiene el polímero dentro del sistema de extrusión, de esta forma, se da una lectura de variaciones en tiempo real, sin necesidad de implementar sensores de presión dentro del barril, mismos que deben tener propiedades que los hacen más costosos. De forma similar, el control del consumo también representa la calidad de la fusión del polímero, misma que se puede corroborar por el control y monitoreo de la temperatura en las secciones del sistema (Abeykoon et al., 2014). Con la implementación de ambos controles, además de asegurar el control del proceso, también se traduce en menor consumo de energía. En la máquina utilizada por (Deng et al., 2014), *Killion KTS-100* se instalan 7 calentadores que son monitoreados con un sensor cada uno, además de la implementación de un sensor de consumo eléctrico en el motor principal del equipo.

De forma similar, (Jensen & Christiansen, 2008) realizan una medición del estrés en el material cuando se inicia un proceso de extrusión. En este caso, se relaciona la medición de torque (consumo) en el motor con el estrés inicial que sufre el material, antes de alcanzar la temperatura nominal del proceso. En esta etapa el material se deforma y quiebra por la presión del sistema. En el experimento, se utilizaron dos tipos de cabezal extrusor: dos platos y cono- plato, resultando el cabezal de cono-plato con menor estrés y menor tiempo de estabilización de proceso.

#### **2.2.2.2 Monitoreo basado en medición óptica**

Debido a las variaciones que puede tener el proceso, algunos investigadores han recurrido a los sensores de tipo óptico, mediante micro fotometría, tal y como lo hacen (Stephan, Große, Stintz, & Blankschein, 2006), quienes proponen un arreglo de sensores ópticos en la etapa de fusión del proceso de extrusión. El arreglo de sensores es con el fin de detectar cualquier elemento que provoque heterogeneidad en la mezcla de polímeros, aunque con ciertas limitaciones, sobretodo en la velocidad máxima soportada por los sensores. En sus resultados obtuvieron

estadísticas en la variación de calidad del polímero extruido en tiempo real, capaces de detectar puntos negros, gel, burbujas y sólidos de hasta  $20\mu\text{m}$ .

### 2.2.2.3 Mejoras a las boquillas de extrusión

Uno de los componentes más importantes de una máquina de extrusión de polímeros es la boquilla de extrusión. Esta parte es la que proporciona la forma y tamaño final del polímero que se formará. (Abeykoon, Kelly, Martin, & Li, 2013) proponen una metodología de monitoreo dinámico enfocado en una boquilla extrusora. Sus resultados prevén diseños específicos de boquillas, considerando ciertas longitudes como apoyo para el control de temperatura del polímero.

Por otra parte, (Vera-Sorroche et al., 2013) proponen también, alternativas de diseño de boquillas de extrusión, considerando añadir sensores de monitoreo en áreas específicas de una boquilla, con el fin de incrementar la precisión en el control automático de una máquina de extrusión (Figura 2-7).

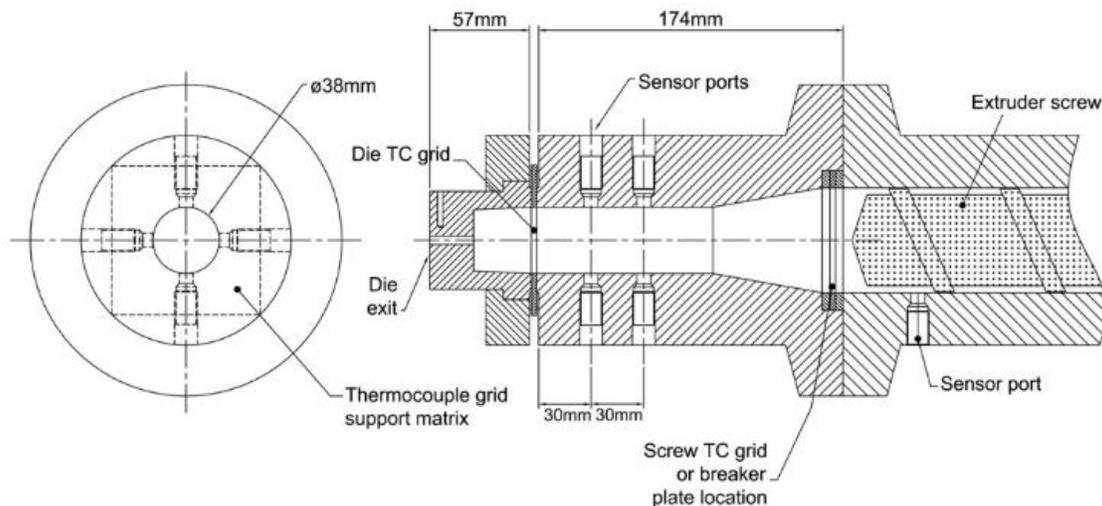


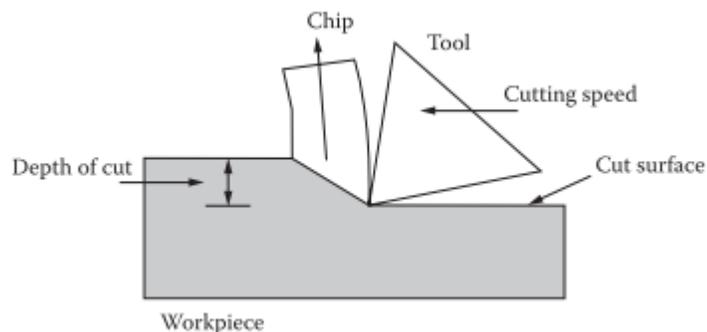
Figura 2-7 ubicación de sensores térmicos en boquilla extrusora

(Dryden, 2011) analiza el estrés dentro de una boquilla de extrusión. En sus resultados, se denotan las áreas con mayor acumulación de estos esfuerzos mecánicos en una boquilla. De aquí que proponen alternativas de diseño, con el propósito de reducir el estrés y provocar que el polímero que fluye dentro de una boquilla lo haga de modo que se reduzca la recirculación y la turbulencia del polímero líquido.

## 2.3 Maquinado convencional

En las siguientes secciones se abordan los temas relacionados con el desarrollo de la máquina extrusora, comenzando con el control numérico computarizado (CNC). La razón por la cual se incluye es debido a su utilización dentro del proceso de desarrollo del proyecto, mismo que fue de utilidad en la fabricación de algunos de los componentes del equipo.

Según (El-Hofy, 2014) “El maquinado es la remoción de material no deseado de una pieza de trabajo para obtener un producto terminado con forma tamaño y calidad superficial deseada”. En la práctica, hay quienes le llaman mecanizado y se refieren a lo mismo. También se hace referencia al desprendimiento o arranque de viruta (Figura 2-8), ya que el material que es retirado de la pieza de trabajo se retira en porciones pequeñas, cuyo tamaño depende del material y el tipo de herramienta. Según el autor, las soluciones de manufactura por medio de maquinado se dan principalmente debido a las tolerancias que permite, la calidad superficial, las formas o figuras que se pueden producir, así como el costo que implica este tipo de manufactura. En la actualidad se han desarrollado diferentes versiones de las máquinas que se utilizan para el mecanizado de piezas, clasificándose principalmente por su precisión o su forma de control, manual o automático.



*Figura 2-8 Contacto de una herramienta de corte con una pieza de trabajo, generando viruta (El-Hofy, 2014)*

En cuanto al maquinado convencional, las principales máquinas-herramientas utilizadas son el torno, la fresadora y la rectificadora de superficies, entrando esta última en la clasificación de máquinas abrasivas. Cada equipo utiliza diferentes métodos para la remoción de material. En el caso del torno, se trabaja

principalmente con piezas cilíndricas y son éstas las que se ensamblan en un soporte giratorio. Este soporte conocido como herramental de sujeción o *chuck*, pone a girar la pieza a una velocidad definida al tiempo que se aproxima una herramienta fija que, al hacer contacto, retira el material de la pieza de trabajo (Figura 2-9).

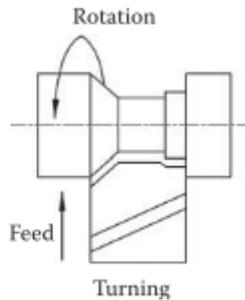


Figura 2-9 Movimiento general en un torno (El-Hofy, 2014)

Por otra parte, una fresadora sostiene la pieza de trabajo en una posición relativamente fija, mientras que la herramienta gira y se desplaza por los contornos de la pieza que se deben retirar. De forma similar, una rectificadora consta de una herramienta abrasiva que gira y retira material de una pieza de trabajo, al aproximarla a ésta (Figura 2-10).

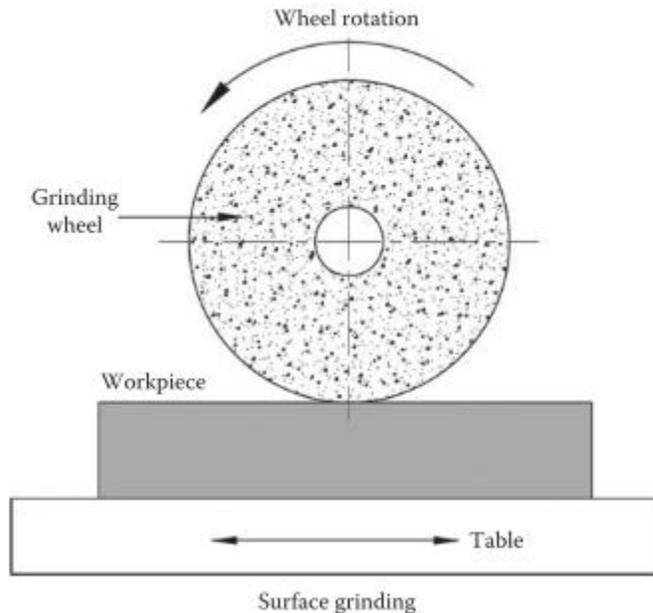


Figura 2-10 Ejemplo de rectificadora de superficies (El-Hofy, 2014)

Específicamente, la fresadora utilizada para este proyecto fue una fresadora universal semiautomática, utilizada entre otras cosas, para la fabricación de engranes. Con este tipo de máquina, se pueden lograr movimientos en hasta 4 ejes simultáneamente que proporcionan las posiciones suficientes para la forma, tamaño y acabado requeridos. En la Figura 2-11 se observa una máquina de este tipo, con el mecanismo que se utiliza para poder generar movimientos controlados en más de tres ejes.



*Figura 2-11 Fresadora universal y mecanismo divisor*

Con respecto a los equipos de tipo convencional utilizados en el proyecto para el desarrollo de la máquina extrusora, estos son los más relevantes. En adelante, se hace énfasis en equipos que clasifican como automáticos puesto que, para el nivel de precisión requerido, fue necesaria su implementación en algunas estrategias de fabricación.

## **2.4 Control numérico computarizado**

En el área del mecanizado de materiales por arranque de viruta, existen algunas clasificaciones de procesos, dependiendo el tipo de maquinaria que se utilice en los procesos. La principal clasificación es el maquinado convencional, el maquinado por control numérico y el maquinado no convencional. Profundizando en CNC, el control numérico “en esencia, es programación punto a punto, que obliga al cortador a moverse de un punto a otro” (Harvey, 2015). Las máquinas, como tales se subdividen en centros de torneado de dos, o más ejes y centros de maquinado de tres, o más ejes. Para el proyecto, fue necesario el uso de centro de maquinado

vertical, de cuatro ejes, debido a los movimientos necesarios de las herramientas, en la producción del tornillo extrusor.

En cuanto al estado del arte de maquinado multi-ejes, (Tunc, Budak, Bilgen, & Zatarain, 2016) proponen el análisis de las posiciones de las herramientas durante el maquinado, con el fin de optimizar el acabado de los materiales, sin sacrificar tiempos de mecanizado. En la Figura 2-12, se muestra la evidencia de sus resultados. Si bien no se implementó este tipo de estrategia, es necesario conocer los alcances de un equipo para poder definir la estrategia que se utilizará. Para el proyecto, los equipos utilizados no excedieron los 4 ejes de trabajo o ejes de libertad con los que puede operar una máquina CNC.

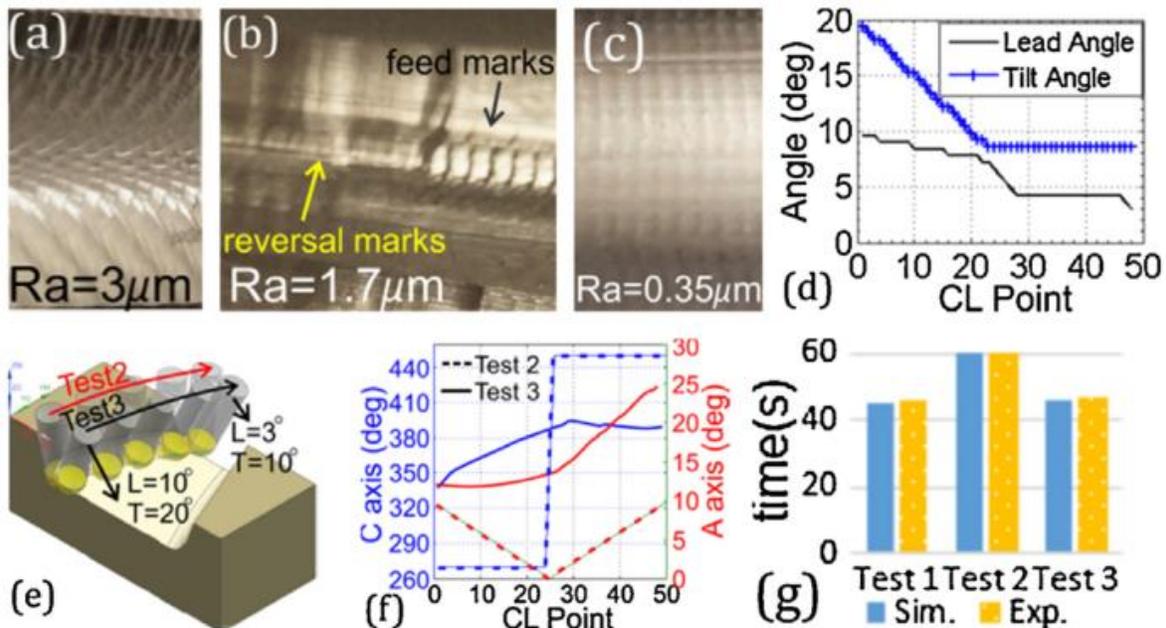


Figura 2-12 Mejora de un proceso de maquinado CNC 5 ejes (a) rugosidad inicial (b) rugosidad prueba 2 (c) rugosidad optimizada (d) ángulo de herramienta óptimo (e) posturas de herramientas en prueba 2 y óptimo (f) desplazamiento de ejes (g) Tiempos de manufactura inicial, prueba 2 y óptimo (Tunc et al., 2016)

En el mercado, sobretodo de la industria aeroespacial, se utilizan equipos de 9 ejes de trabajo que se pueden utilizar simultáneamente en el mecanizado de piezas. Sin embargo, las figuras y precisión que alcanzan son propios de este tipo de industria. A este tipo de máquinas de control numérico se les conoce como tornos multi-ejes o tornos de herramienta viva. Como su nombre lo indica, las piezas de

trabajo pueden girar a velocidad controlada como en cualquier torno, sin embargo, también se puede controlar la posición que toman con respecto a su propio eje. Mientras tanto, las herramientas pueden ser las propias de un torno o las que comúnmente se utilizan en una fresadora, que giran para remover material (Figura 2-13).

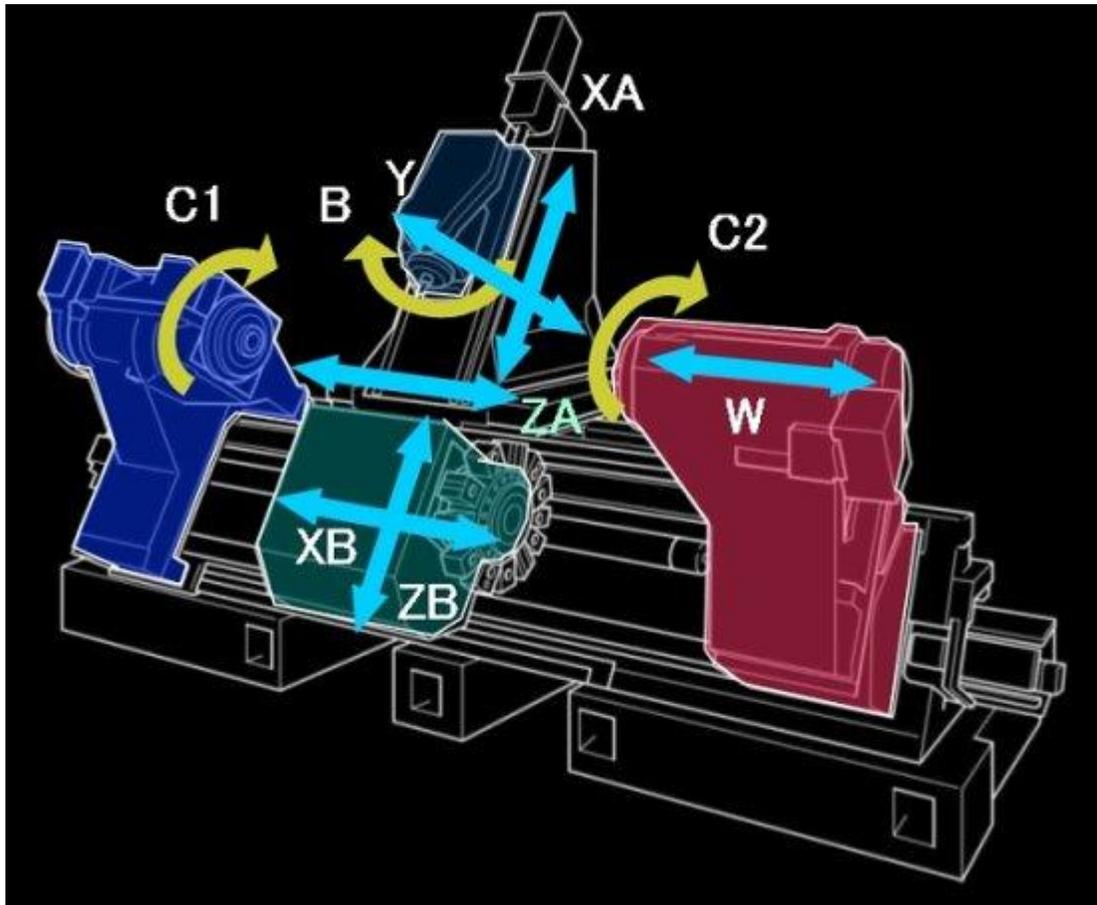


Figura 2-13 Torno de control numérico de 9 ejes de trabajo  
(Copyright © 2005 Qsine Corporation)

## 2.5 Norma ISO 19062-1:2015

(ISO/TC 61/SC 9, 2015) establece la designación de sistema y bases para especificaciones del moldeo y extrusión del polímero Acronitrilo–Butadieno–Estireno (ABS). Este polímero es el que la máquina extrusora desarrollada en este proyecto deberá ser capaz de extruir para fabricar un filamento que luego se utilizara en impresión 3D. La propia norma limita la información específica que se puede publicar al respecto, sin embargo, de forma general establece las temperaturas de

trabajo y velocidades de extrusión para el cumplimiento de esta. De forma similar, define el tipo de pruebas que se deben realizar a los productos extruidos para el aseguramiento de la calidad.

## 2.6 Diseño y desarrollo de productos

Para las etapas de diseño de la extrusora de polímeros, se trabajó fundamentalmente con la teoría propuesta por (Ulrich & Eppinger, 2013). Como se muestra en la Figura 2-14, se establecen las fases del desarrollo de productos, de las cuales fue extraída la metodología implementada en el proyecto.



Figura 2-14 Fases del desarrollo de proyectos (Ulrich & Eppinger, 2013)

### 2.6.1 Fase de Planeación

Durante esta fase, se define la solución que se dará a algún problema específico, mediante la implementación de un proyecto o producto. La solución deberá brindar alguna mejora en tiempos, métodos o formas de producción, mismas que se desarrollan al analizar la situación. Además, en esta etapa se debe autorizar el proyecto o producto a través de una declaración de misión. Posteriormente se deben definir tiempos y participantes del proyecto.

### 2.6.2 Fase de Desarrollo de Concepto

Durante el desarrollo de un concepto de la solución, se deben analizar opciones, basados en las necesidades de los llamados clientes. Los clientes pueden ser compradores, usuarios finales o personas dentro de una misma organización. Inicialmente se eligen las soluciones que mejor cumplan con estas necesidades, mismas que se deben comparar de forma objetiva mediante técnicas como Matrices de Pugh. En la (Figura 2-15) se puede observar un ejemplo de esta técnica. Se analizan cuatro soluciones, considerando 7 necesidades establecidas por un cliente. A cada necesidad o criterio se le asigna un peso, dependiendo de la relevancia de cada uno. Cada solución se califica en cada criterio, basado en pruebas de funcionamiento, comentarios de otros clientes, entre otros.

		Concepto							
		A (Referencia) Cilindro maestro		DF Tope de palanca		E Anillo amortiguador		G+ Tornillo del selector+	
Criterios de selección	Peso	Califi- cación	Evaluación ponderada	Califi- cación	Evaluación ponderada	Califi- cación	Evaluación ponderada	Califi- cación	Evaluación ponderada
Facilidad de manejo	5%	<b>3</b>	0.15	3	0.15	4	0.2	4	0.2
Facilidad de uso	15%	<b>3</b>	0.45	4	0.6	4	0.6	3	0.45
Facilidad de lectura de ajustes de dosis	10%	2	0.2	<b>3</b>	0.3	5	0.5	5	0.5
Precisión en medición de dosis	25%	<b>3</b>	0.75	3	0.75	2	0.5	3	0.75
Durabilidad	15%	2	0.3	5	0.75	4	0.6	<b>3</b>	0.45
Facilidad de manufactura	20%	<b>3</b>	0.6	3	0.6	2	0.4	2	0.4
Portabilidad	10%	<b>3</b>	0.3	3	0.3	3	0.3	3	0.3
Total puntos			2.75	3.45	3.10		3.05		
Lugar			4	1	2		3		
¿Continuar?		No		Desarrollar		No		No	

Figura 2-15 Ejemplo de Matriz de Pugh (Ulrich & Eppinger, 2013)

Al final, se debe contar con un concepto claro del producto que se desea obtener, mismo que puede estar representado de forma gráfica en diagrama de flujo, bloques, o similares. Este resultado no debe contener detalles como dimensiones, tolerancias o materiales, sólo es una representación modular gráfica del producto final.

### 2.6.3 Fase de Diseño a Nivel de Sistema

En esta etapa el producto final se divide en sistemas funcionales con el propósito de simplificar el diseño final de la solución. Por ejemplo, el diseño de un vehículo se puede dividir en sistemas de: tren motriz, chasis, electrónica, interiores, exteriores, accesorios. De esta forma cada sistema se puede clasificar por especialidades y así, asignar al personal más apropiado para el diseño de cada componente.

### 2.6.4 Fase de Diseño de Detalle

En la etapa de diseño de detalle, es en la que se consideran todas las necesidades y limitaciones establecidas como especificaciones técnicas. En esta etapa se pueden utilizar paquetes de diseño por computadora, mismos que en la actualidad facilitan la definición de tolerancias, ajustes, materiales, alternativas de componentes y piezas prediseñadas como sujetadores mecánicos. El resultado final de esta fase deberá ser el dibujo detallado de los componentes de cada sistema, anexando los planos de detalle o fabricación, según se requiera. También en casos necesarios, se debe especificar alguna norma que se debe respetar.

Para obtener los resultados mediante la implementación de un paquete de computadora de diseño, se hace referencia al paquete *Solidworks*, mismo que fue seleccionado para el proyecto. El diseño asistido por computadora consta de técnicas aplicadas a paquetes específicos que siguen las mismas reglas de diseño mediante algoritmos propios de cada *software*. Por lo anterior, se debe conocer el programa a ser utilizado ya sea mediante cursos, tutoriales o literatura como la propuesta por (Howard, 2017).

### **2.6.5 Fase de Pruebas y Refinamiento**

Al tener un diseño final, el producto se debe fabricar y/o ensamblar con el fin de probar su funcionamiento. Al igual que el diseño, el funcionamiento debe cumplir con las especificaciones, necesidades y normas establecidas. Se debe diseñar un protocolo de pruebas para verificar que el producto es funcional mediante evidencia estadística. Cualquier discrepancia con los resultados esperados, debe ser corregida o mejorada para dar cumplimiento a las expectativas.

### **2.6.6 Fase de Inicio de Producción**

Por último, en caso de ser un producto para ser manufacturado en serie, o un servicio para producción continua, se debe monitorear. Una vez establecidos los parámetros óptimos de operación, se hace entrega del proyecto completo a los usuarios finales o clientes. Esta entrega deberá contener las evidencias de la fase 4, así como los planos necesarios para producir o dar servicio. De forma similar, se debe proponer alguna fecha de revisión o actualización del producto.

### **2.6.7 *Quality Function Deployment* (QFD)**

El *Quality Function Deployment* es una herramienta esencialmente de calidad, utilizada en el desarrollo de productos. Consta de cuatro fases (Figura 2-16), mismas que sirven como apoyo en la toma de decisiones desde la selección de un proceso o producto que se pretende diseñar, hasta las etapas de producción y control. Las funciones de estas fases, según (Alcaide-Marzal, Diego-Más, & Artacho-Ramírez, 2004), son:

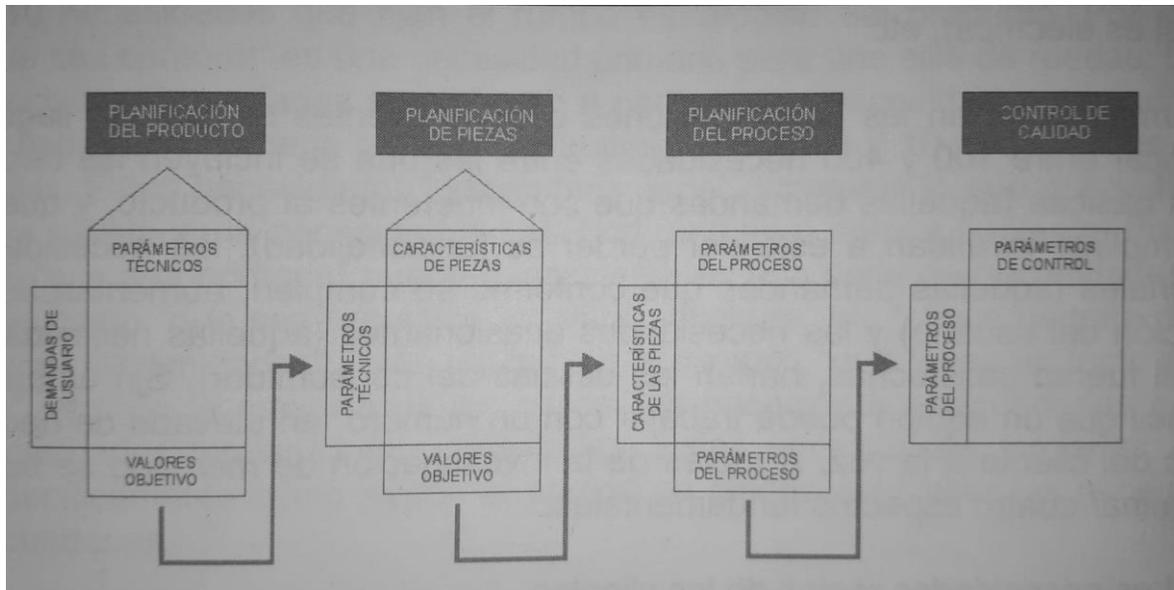


Figura 2-16 Fases de QFD (Alcaide-Marzal, Diego-Más, & Artacho-Ramírez, 2004)

### 2.6.7.1 Fase I

Se realiza un comparativo entre varios productos o servicios, considerando características de relevancia para los clientes. De forma similar, se asigna un grado de importancia de cada característica. El comparativo se realiza basándose en calificaciones hechas por dueños o usuarios de los productos que se comparan. Con la información obtenida de estos resultados, se seleccionan al menos dos productos que serán sometidos a análisis posteriores para seleccionar el producto final que se desarrollará.

### 2.6.7.2 Fase II

Una vez que se establecen las calificaciones para cada característica de los productos, éstas se ordenan no por la importancia que representan para el cliente, sino con respecto al valor obtenido en la fase I. Estos pesos relativos, luego son asignados a cada característica o métrico con el que se medirá un requerimiento del cliente. Entonces, se comparan en función de las partes o componentes que deberá tener el producto final. El objetivo de esta fase es obtener las características o variables principales de un producto. Estas características deben ser medibles y comparables con otro producto similar, salvo si se trata de un proyecto de innovación. Estos resultados se usan principalmente para definir un diseño conceptual o un esquema de sistemas que estarán contenidos en el producto.

### **2.6.7.3 Fase III**

La fase tres principalmente es una herramienta de plan de producción. Los resultados anteriores referencian las características de las partes y componentes del producto con parámetros de un proceso productivo. Estos parámetros son medibles tal y como distancia, acabado superficial, consumo de energía o cualquier otro parámetro que se pueda comparar con un estándar. Similar a las fases anteriores, el objetivo es establecer calificaciones de los parámetros de proceso, con el fin de definir componentes críticos que contendrá el producto final y que, por lo tanto, serán prioridad de calidad.

### **2.6.7.4 Fase IV**

En la última fase de QFD, se definen los parámetros y métricos de control que servirán para monitorear los procesos productivos. Estos controles tienen la finalidad de asegurar que las necesidades y especificaciones de cliente sean alcanzadas, con base en los resultados de estos análisis. Además, para asegurar el cumplimiento, se deben cumplir con normas aplicables según el modelo de negocio.

Teniendo todos estos elementos definidos, se concluye con la sección de marco teórico. A continuación, se describe la metodología que será implementada para el cumplimiento de los objetivos del proyecto.

# Capítulo 3. Materiales y Métodos

## 3.1 Metodología

Con el fin de comenzar el proyecto de tesis, será necesario seguir algunos pasos, tanto para la planeación y la ejecución del mismo. Al establecer una metodología y selección de materiales y participantes, se utilizará la teoría propuesta por (Ulrich & Eppinger, 2013) en la que se establecen los pasos a seguir en el desarrollo de un proyecto o producto de forma detallada y documentada. Si bien no se incluirán todas las fases, tal y como se muestran, la metodología en general tiene su fundamento en ellas. Las fases que se contemplarán durante el desarrollo del proyecto son como se muestran en la Figura 3-1, en donde se aprecian las variaciones en cuanto al método anteriormente mencionado.



Figura 3-1 Fases aplicadas en el desarrollo del proyecto

### 3.1.1 Planeación

Como paso primordial, propio de la máquina, se deberán establecer los tiempos de ejecución de las actividades para su desarrollo. Además, se establecerán las fases del desarrollo previo a la propia construcción del equipo. Estas fases ayudaron a establecer las necesidades de quienes harán uso de la extrusora, las necesidades técnicas del mismo que se conjugan para establecer la arquitectura que se deberá desarrollar durante el diseño. De forma similar, con esta documentación se establecerán costos de los materiales y posible personal técnico involucrado.

Primero, con base en las necesidades de quienes llamaremos “clientes”, que son quienes necesitan la máquina con fines de investigación, se establecerá una declaración de misión, con las generalidades que deben integrarse en la extrusora

de ABS. Como se muestra en la Tabla 3-1, se propone de manera general, las funciones del equipo terminado, así como de quienes se verán involucrados en el desarrollo de este.

*Tabla 3-1 Declaración de la misión de una solución (Ulrich & Eppinger, 2013)*

<b>Declaración de la misión</b>	
<b>Descripción del producto</b>	
<b>Propuesta de valor</b>	
<b>Objetivos clave de negocio</b>	
<b>Mercado primario</b>	
<b>Mercados secundarios</b>	
<b>Suposiciones y restricciones</b>	
<b>Involucrados</b>	

### **3.1.2 Definición de especificaciones**

Para definir las especificaciones técnicas de la extrusora, será necesario el contacto con los clientes y, en primera instancia presentar sus necesidades y clasificarlas por nivel de importancia, para ello, se utilizará el formato en la Tabla 3-2.

*Tabla 3-2 Necesidades iniciales del cliente (Ulrich & Eppinger, 2013)*

<b>Necesidades del cliente</b>		<b>Importancia</b>	<b>Calif. De 1-5 (5 es mayor relevancia)</b>
<b>1</b>			
<b>2</b>			

Estas necesidades se deberán traducir en variables medibles que evidencien el funcionamiento del equipo. Como señala la Tabla 3-3, las columnas representarán cada necesidad, acompañadas de una variable, misma que deberá calificarse. Además de las especificaciones, deberán considerarse los lineamientos y normas internacionales que apliquen, como normas ISO que, entre otros, rige el proceso de extrusión propio del polímero ABS: ISO 19062-1:2015 (International Organization for Standardization,2015).



de forma general. Se podrá entonces, plasmar de forma gráfica en dos o tres dimensiones, con el fin de obtener una idea general de la constitución del aparato.

### 3.1.5 Definición de materiales

Una vez definidas las especificaciones y la arquitectura del equipo, se podrán proponer los materiales que se utilizarán. En este caso, como se propone por la teoría de diseño (Ulrich & Eppinger, 2013), los materiales no solo serán las partes y componentes que formarán parte de la extrusora, sino de las herramientas, máquinas e incluso personas que se involucrarán con el desarrollo del proyecto. Para esta etapa se utilizó el formato de la Tabla 3-5.

Tabla 3-5 Formato para la definición de materiales (Ulrich & Eppinger, 2013)

Descripción	Características	

### 3.1.6 Construcción

Finalmente, para la etapa de construcción, la propuesta será trabajar con nueve pasos debido a la complejidad de una extrusora (Figura 3-2). Además, se deberá trabajar bajo una calendarización de estos pasos (Tabla 3-6).

Tabla 3-6 Calendarización para la etapa de construcción del equipo

	Enero	Febrero	Marzo	Abril
Diseño	██████████			
Selección		██████████		
Programa			██████████	
Manuf.		██████████		
Compras		██████████		
Ensamble			██████████	
Automatización			██████████	
Arranque				██████████
Muestras				██████████
Resultados				██████████



Figura 3-2 Etapas para la fase de construcción del equipo

## 3.2 Materiales

La sección de materiales deberá incluir materiales, equipos, herramientas y personal necesario para el cumplimiento de los objetivos. A continuación, se detallan los materiales propuestos para el desarrollo de la máquina de extrusión de polímeros.

### 3.2.1 Herramientas informáticas

En primera instancia, se deberán seleccionar las herramientas informáticas. Fue necesario *software* para la generación de documentos e información, además de *software* de diseño asistido por computadora (CAD). Debido a este último, se requirió de una computadora de alta tecnología, por lo que se seleccionó una cuyas características fueran al menos las recomendadas por el fabricante del CAD (Tabla 3-7).

Tabla 3-7 Herramientas de informática

Descripción	Características	
Computadora personal	Sistema operativo	Microsoft © Windows 10 Home
	Gráficos	NVIDIA © GeForce® GTX 960M 4GB
	Capacidad memoria RAM	16 GB
	Capacidad de almacenamiento	1 TB
	USB 2.0	1
	USB 3.0	2
	Lector de tarjetas	4-in-1
	Procesador	Intel® Core i7-6700HQ
	Resolución	1920 x 1080
	Wi-Fi	Sí
	Bluetooth	Sí
	Unidad lectora de discos	External 9.5mm Bluray/Rambo
	Tamaño de pantalla	17.3"
Paquetes de software	Microsoft © Excel 360	Paquete de hojas de cálculo
	Microsoft © Word 360	Paquete de procesador de palabras
	Microsoft © Power Point 360	Paquete de presentación con diapositivas
	Dassault Systemes® SolidWorks	Paquete de diseño asistido por computadora

### 3.2.2 Maquinaria y equipo

En este caso la selección deberá ser más especializada, debido a la planeación de los detalles de la construcción del equipo extrusor. Primero, será necesario una fresadora universal semi automática de cuatro ejes. El cuarto eje principalmente, para la elaboración del tornillo extrusor, ya que su geometría no se podría terminar con un centro de torneado ni con un centro de maquinado de tres ejes (Tabla 3-8).

Por otra parte, la maquinaria adicional, se considerará para los pasos posteriores de ensamble y pruebas tanto del equipo, como del polímero extruido.

*Tabla 3-8 Maquinaria y equipo seleccionado*

Descripción	Características	
<b>Fresadora Universal</b>	Controlador	HEIDENHAIN Control
	Estructura de control	Box Way
	Mesa de Trabajo	(W x L): 800 x 1500mm
	Carga	3,500kg (7,700 lbs.)
	Desplazamiento de Ejes X, Y, Z, A	2,200 x 1,000 x 1,000mm; 360°
	Velocidad del Husillo	40~10,000rpm
	Cambiador de Herramienta	Arm Type
<b>Maquinaria y equipo adicional</b>	Soldadora	
	Pie de rey	
	Densímetro	
	Multímetro	
	Tacómetro	

### 3.2.3 Partes y componentes de la máquina

En la Tabla 3-9 se proponen los componentes principales que deberá contener la extrusora de polímeros. En algunos casos, como se muestra, se deberá proponer si el componente será fabricado o adquirido de algún catálogo industrial. Como se puede observar, se inició con un motor eléctrico, mismo que proporcionará el movimiento principal al tornillo extrusor. Por otra parte, se tienen tres partes que se fabricarán con el uso de máquinas-herramienta: tornillo, barril y cabezal extrusor. Los elementos de calentamiento, a su vez, se refieren a las resistencias eléctricas que proporcionarán el calor necesario para fundir el polímero.

*Tabla 3-9 partes principales de la máquina*

Descripción	Características	
<b>Partes principales del equipo de extrusión</b>	Motorreductor CD,12VCD,HP1/30,rpm Nom	\$5,524.00
	Tornillo extrusor	A ser fabricado a partir de acero D2
	Barril de extrusión	A ser fabricado a partir de acero D2
	Tolva de material	\$204.00 USD
	Cabezal de extrusión	ser fabricado con diámetro de salida de 1.65mm
	Bases del equipo	
	Elementos de calentamiento	A elegir
	Controlador electrónico	
	Interfaz de usuario	
	Arnés eléctrico	
Celda de enfriamiento		

### 3.2.4 Herramienta adicional y personal

Además de la maquinaria especializada, será necesario ensamblar todos los componentes, para ello se utilizará herramienta manual para diferentes tipos de ensambles. Además, se propone contar con la colaboración de personas con diferentes especialidades en apoyo a la realización del proyecto.

Entre estas personas destacan un Ingeniero de Calidad, quien es experto en el área de moldeo y extrusión. Su apoyo será como asesor en la selección de materiales y la definición de la arquitectura de la máquina. El responsable del Centro Avanzado de Manufactura Aditiva es el cliente del proyecto y dará la pauta y las necesidades generales del polímero necesario. Por otra parte, en la fabricación propia del equipo se propondrá la participación, un Ingeniero Metalmecánico, así como un Técnico Superior Universitario en Mecatrónica. Ellos apoyarán en la fabricación de los componentes que necesitarán de equipo especializado y para la automatización del equipo, respectivamente (Tabla 3-10).

*Tabla 3-10 Herramienta adicional y personal*

Descripción	Características	
<b>Herramienta Manual Diversa</b>	Juego de llaves de combinación	
	Juego de llaves hexagonales	
	Juego de destornilladores	
	Pinzas mecánicas	
	Pinzas de presión	
	Pinzas de electrónica	
	Torquímetro	
<b>Personal</b>	Ing. de calidad	Asesor experto en extrusión
	Responsable de centro avanzado de manuf. aditiva	Usuario final de prototipo
	Ing. metal-mecánico	Experto en mecanizado, encargado de fabricación
	TSU mecatrónica	Encargado de automatización

Ahora que se cuenta con una propuesta de metodología y de materiales, herramientas y personal, se comenzará con la obtención de los resultados. Será necesario apegarse a esta guía y documentar cada resultado que derive del trabajo a realizar. A continuación, se explicarán estos resultados con su respectiva evidencia.

## Capítulo 4. Análisis de Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología propuesta, considerando lo establecido en el capítulo anterior. Partiendo de la base de (Ulrich & Eppinger, 2013) se procedió a la planificación y establecimiento de todos los elementos necesarios para la fabricación de la máquina, así como las necesidades de los usuarios finales para establecer los requerimientos técnicos. Después, se trabajó en la fabricación de partes y componentes, así como en los ensambles de los sistemas que componen el equipo final.

### 4.1 Definición de las especificaciones

Como el primer paso después de la planeación del proyecto, se trabajó en conjunto con los usuarios finales del equipo, con el fin de establecer las especificaciones y requerimientos de este. Como se muestra en la Tabla 4-1, la retroalimentación de los llamados clientes dio como resultado las bases para las especificaciones, tomando en consideración las necesidades que se debían cumplir para la operación de la extrusora.

*Tabla 4-1 Definición de las necesidades del cliente en base a (Ulrich & Eppinger, 2013)*

Necesidades del cliente		Importancia
1	Producto extruido debe ser resistente	2
2	Debe tener forma uniforme	5
3	No debe tener huecos	4
4	No debe tener residuos	4
5	El color debe ser uniforme	3
6	Fácil de manipular en una impresora 3D	3
7	Debe funcionar para una impresora 3D	4
8	La máquina debe ser fácil de mover	3
9	Fácil de operar	5
10	Los mantenimientos se deben realizar en tiempos cortos	3
11	Fácil de desarmar	4
12	Refacciones comunes (fáciles de encontrar)	4
13	Puede extruir diferentes polímeros	3
14	Puede extruir diferentes productos	4
15	Debe extruir con rapidez	5

En la primera columna, sólo se enumeran los datos obtenidos. En la segunda, se menciona la necesidad que el equipo de extrusión debe cumplir, mientras que, en la tercera, se fija un nivel de importancia según el usuario final. Las características seleccionadas con mayor relevancia y que se debieron cumplir con la fabricación de la máquina son: que el polímero extruído debe tener una forma uniforme, la máquina debe ser fácil de operar y se debe extruir con rapidez. De estos puntos, dos se definieron como subjetivos, ya que la facilidad de operación y la rapidez son relativos y se debe contar con un punto de comparación. Sin embargo, ambos puntos se pueden trasladar a características medibles como se demostró en la siguiente sección. Los puntos de segunda importancia con 4 de nivel de relevancia, tienen puntos de comparación y también se trasladaron a especificaciones medibles, mismas que pueden cumplir con una o más necesidades.

Como se muestra en la Tabla 4-2, todas las necesidades se transformaron en especificaciones técnicas que la extrusora debe cumplir. La característica principal de las especificaciones es que el enfoque principal deben ser las características medibles. De esta manera, todas las especificaciones deben ser comparables con base en alguna unidad de medición física. Aunque las variables subjetivas aún aparecen, y se les asigna un grado de relevancia, la construcción del equipo se debe basar en las variables medibles, mismas que al final harán que se cumplan las variables subjetivas a criterio del cliente. En este caso, las principales se enfocaron en el producto que la máquina debe fabricar, así como en características mecánicas de los componentes del equipo como la dureza y la capacidad de calentamiento.

Tabla 4-2 Definición de las especificaciones técnicas con base a (Ulrich & Eppinger, 2013)

<b>Especificaciones</b>			
<b>Necesidad de cliente</b>	<b>Métrica</b>	<b>Importancia</b>	<b>Unidad</b>
1, 3	Fuerza de tensión	2	TF
2, 3	Diámetro del producto	5	mm
3, 4	Densidad del producto	4	g/cm <sup>3</sup>
5	Deltas (diferencias entre colores perceptibles)	3	$\Delta(L-A-B)$
6, 7	Manipulación en entorno de impresora 3D	3	subjetivo
8	Peso máximo	3	kg.
8	Dimensiones máximas	3	m
9	Fácil de operar	5	subjetivo
10	Tiempo de mantenimiento	3	h
11	Tiempo de armado-desarmado	5	h
12	Lista de partes	4	Lista
13	Capacidad térmica	4	kW
13	Dureza de componentes	4	<i>Rockwell</i>
13	Carga de materiales	3	Lista
14	Boquillas con formas variadas	3	Lista
15	Velocidad del husillo	5	RPM

## 4.2 Selección

Para la selección del equipo a ser utilizado, se implementó un método propuesto por (Ulrich & Eppinger, 2013) mediante la aplicación de comparaciones a tres equipos diferentes. Se desarrolló una matriz de Pugh, misma que apoyó de forma objetiva, a la visualización de las opciones presentadas.

La metodología que señala una matriz de Pugh permitió que las opciones se autoexcluyeran al asignar calificaciones reales a los equipos, basados principalmente en las necesidades de los usuarios finales, mismas que se convirtieron en las especificaciones técnicas que el equipo debe cumplir. Se analizaron como opciones, máquinas extrusoras comerciales, elegidas al llevar una vigilancia tecnológica de diferentes marcas comerciales industriales de extrusoras de polímeros. En segundo término, se analizó la opción de comprar elementos de refacción de una extrusora para ensamblar una máquina similar a la primera opción. Por último, se analizó la opción de construir los elementos principales de una extrusora, totalmente a partir de un diseño propio.

Las marcas de las máquinas analizadas se caracterizan por ser consideradas como líderes en su campo por las empresas dedicadas a productos de extrusión. En la Tabla 4-3, se observa a detalle el proceso; primero fue necesario incluir todos los equipos que se tomaron en cuenta para evaluar. Se extraen calificaciones a partir de comentarios de otros clientes, publicados en los sitios de compras. Todos los puntos indicados con “+”, fueron puntos positivos; los puntos indicados con “-”, fueron puntos negativos; los puntos indicados con “0”, se consideraron neutrales y no afectaron la suma/resta de los demás. Para la siguiente etapa se consideraron los siguientes resultados: una suma de 0 significa que la extrusora fue potencialmente utilizable y en este caso, se pudo combinar con otro resultado de 0. Una suma positiva significa que el equipo fue considerado utilizable y avanzó a la siguiente etapa sin ser combinado con otro. Por último, una suma negativa significa que el equipo fue descartado. En cuanto a la combinación se refiere, se tomó un equipo prediseñado en combinación con uno comercial, mismos que al combinarse, significa que algunos de los componentes podrían ser adquiridos como refacciones o se consideraron otros similares, con adecuaciones para cumplir con los usuarios finales.

Tabla 4-3 Matriz de Pugh para análisis comparativo de extrusoras

Concepto	Matrices de Pugh																			
Prototipo											Evaluaciones realizadas tomando valores de 1 al 5 donde el 5 es el mejor									
Haitian																				
Milacron																				
JBD																				
	Conceptos					Conceptos						Conceptos								
Requerimientos del Cliente	Prototipo	Haitian	Milacron	JBD		Requerimientos del Cliente	Peso	Prototipo/ Haitian		Milacron		Lugar	Lugar							
								Calif.	Evalua	Calif.	Evalua		Calif.	Evalua	Calif.	Evalua				
Producto extruido debe ser resistente	0	0	+	-		Producto extruido debe ser resistente	5%	3	0.15	4	0.2									
Debe tener forma uniforme	0	0	0	0		Debe tener forma uniforme	3%	3	0.09	3	0.09									
No debe tener huecos	0	0	+	0		No debe tener huecos	3%	3	0.09	4	0.12									
No debe tener residuos	0	0	0	0		No debe tener residuos	2%	3	0.06	3	0.06									
El color debe ser uniforme	0	0	0	-		El color debe ser uniforme	2%	3	0.06	3	0.06									
Fácil de manipular en una impresora 3D	0	0	+	+		Fácil de manipular en una impresora 3D	3%	3	0.09	3	0.09									
Debe funcionar para una impresora 3D	0	0	+	0		Debe funcionar para una impresora 3D	2%	3	0.06	3	0.06									
La máquina debe ser fácil de mover	+	0	-	-		La máquina debe ser fácil de mover	15%	5	0.75	1	0.15									
Fácil de operar	0	0	0	-		Fácil de operar	5%	3	0.15	3	0.15									
Los mantenimientos se deben realizar en tiempos	+	0	-	0		Los mantenimientos se deben realizar en tiempos	15%	5	0.75	1	0.15									
Fácil de desarmar	+	0	0	0		Fácil de desarmar	10%	4	0.4	3	0.3									
Refacciones comunes (fáciles de encontrar)	0	0	0	+		Refacciones comunes (fáciles de encontrar)	10%	3	0.3	3	0.3									
Puede extruir diferentes polímeros	-	0	0	-		Puede extruir diferentes polímeros	5%	3	0.15	3	0.15									
Puede extruir diferentes productos	-	0	0	0		Puede extruir diferentes productos	10%	2	0.2	3	0.3									
Debe extruir con rapidez	-	0	0	0		Debe extruir con rapidez	10%	2	0.2	3	0.3									
Suma +	3	0	4	2		Suma	100%	48		43										
Suma 0	9	15	9	8																
Suma -	3	0	2	5		Total Puntos			3.5		2.48									
Evaluación Neta	0	0	2	-3		Lugar			1		2									
¿Continuar?	COMB	COMB	SI	NO		¿Continuar?			SI		NO									

En la segunda etapa se tomaron las dos propuestas con mayor puntaje de la primera etapa. En esta ocasión se dio un puntaje ponderado, con base en la importancia que cada elemento debía tener, según el usuario final. El puntaje final arrojó como resultado, la necesidad de desarrollar una máquina extrusora, con partes o diseños similares a una de las marcas consideradas como candidatas. A partir de este punto, se comenzó con el diseño y desarrollo del equipo, a partir de un primer concepto.

### **4.3 Conceptualización**

Como se mencionó en el capítulo anterior, fue necesaria la implementación de un análisis QFD para definir las características principales del equipo, basado en las especificaciones establecidas en la sección 4.1. La primera fase de este análisis se encuentra en la Figura 4-1, mientras que la segunda fase se puede encontrar en el Anexo I. Los resultados de este análisis señalaron a las características de resistencia eléctrica y al ensamble tornillo-barril como los principales. El resultado se obtiene al analizar los resultados de la etapa anterior de selección, comparando en este caso, la opción de compra de una extrusora vs la fabricación de una propia con elementos adquiridos. Una vez seleccionada la extrusora a desarrollar, se obtiene mediante la segunda fase, las características primordiales que debe cubrir, traducidas a especificaciones que se deben cumplir.

Como se señaló en el capítulo 3, solo se incluyeron las dos primeras fases del análisis QFD, dado que la máquina fue construida de forma unitaria para ser utilizada por un solo usuario. Como se determinó en los alcances de este proyecto, no se realizaron los análisis de producción ni de necesidades de materiales o almacenamiento de los mismos, entre otras consideraciones de las fases 3 y 4.

QFD Fase I		Despliegue de la Función de Calidad (Quality Function Deployment)											Códigos de Colores							
Producto	Prototipo extrusor																			
Desarrollado por	Jesús Gerardo																			
Fecha	5/ octubre/ 2017																			
Fuerza de tensión (ABS)	0	Áreas a llenar											<b>Codigos Correlación</b> 2 Muy Positivo 1 Positivo -1 Negativo -2 Muy Negativo							
Diámetro del producto	1	0	= Cálculos automáticos o información ligada (estas celdas no deben llenarse)																	
Densidad del producto	1	1	0																	
Deltas (diferencias entre colores)	0	0	-1	0																
Peso máximo	0	0	0	0	0															
Dimensiones máximas	0	0	0	0	-1	0														
Tiempo de mantenimiento	0	0	0	0	1	0	0													
Tiempo de armado- desarmado	0	0	0	0	1	0	2	0												
Lista de partes	0	0	0	0	-1	-1	2	2	0											
Capacidad térmica	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0										
Dureza de componentes	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	2	0									
Carga de materiales	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0								
Velocidad del husillo	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0							
<b>Métricos de Ingeniería</b>													<b>Percepción del Cliente</b>							
<b>Requerimientos del Cliente</b>	<b>Importancia para el cliente</b>	Fuerza de tensión (ABS)	Diámetro del producto	Densidad del producto	Deltas (diferencias entre colores)	Peso máximo	Dimensiones máximas	Tiempo de mantenimiento	Tiempo de armado desarmado	Lista de partes	Capacidad térmica	Dureza de componentes	Carga de materiales	Velocidad del husillo	<b>1 Peor</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5 Mejor</b>	
Producto resistente	2	9	5	5									5	3						B A
forma uniforme	5	6	9	5	2									3						A B
No debe tener huecos	4	7	5	9	3								2	3						B A
No debe tener residuos	4	5	2		9						3		9							A B
El color debe ser uniforme	3				9						5		5							A B
manipular en una impresora 3D	3	3	9										3							B A
funcionar para impresora 3D	4	3	5										3							B A
máquina fácil de mover	3				9	7	3	3				2								B A
Fácil de operar	5						2							2						B A
mantenimientos tiempos cortos	3				3	3	9	9	5	2	3									B A
Fácil de desarmar	4				3	3	5	9	7	3	3									B A
Refacciones comunes	4				2		9	2	5	5	5			2						B A
extruir diferentes polímeros	3									9	9	5	5							A B
variedad de productos	4									9	9	5	5							A B
rapidez	5									9	5	3	9							A B
<b>Objetivos Técnicos</b>		TF	mm	g/cm <sup>3</sup>	Δ(L-A-B)	kg.	m	h	h	Lista	kW	Rockwell	Lista	RPM						
<b>Benchmarking Técnico</b>	Mejor 5	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A B	B	B						
	4	B	B	B	B	B	B	B	B	B	A		B	A						
	3																			
	2													A						
	Peor 1					B	B	B	B	B										
<b>Puntuación</b>		117	130	71	85	56	42	102	80	63	173	135	140	131						
<b>Peso Relativo</b>		9%	10%	5%	6%	4%	3%	8%	6%	5%	13%	10%	11%	10%						

Figura 4-1 Fase I de análisis QFD

Dado que la puntuación obtenida en el análisis QFD, señala las resistencias como primero, al control de temperatura se generó un árbol de clasificación de conceptos como el de la Figura 4-2, con el que se obtiene el proceso principal a partir de diversas fuentes, cómo se transforma y a partir de dónde se obtiene, así como su flujo. En este caso se inició con análisis de fuentes de calor para la fusión de materiales poliméricos. Se consideró el proceso de extrusión y procesos

similares como el moldeo, se seleccionó la energía eléctrica en forma de corriente alterna, principalmente por su eficiencia y propiedad medioambiental.

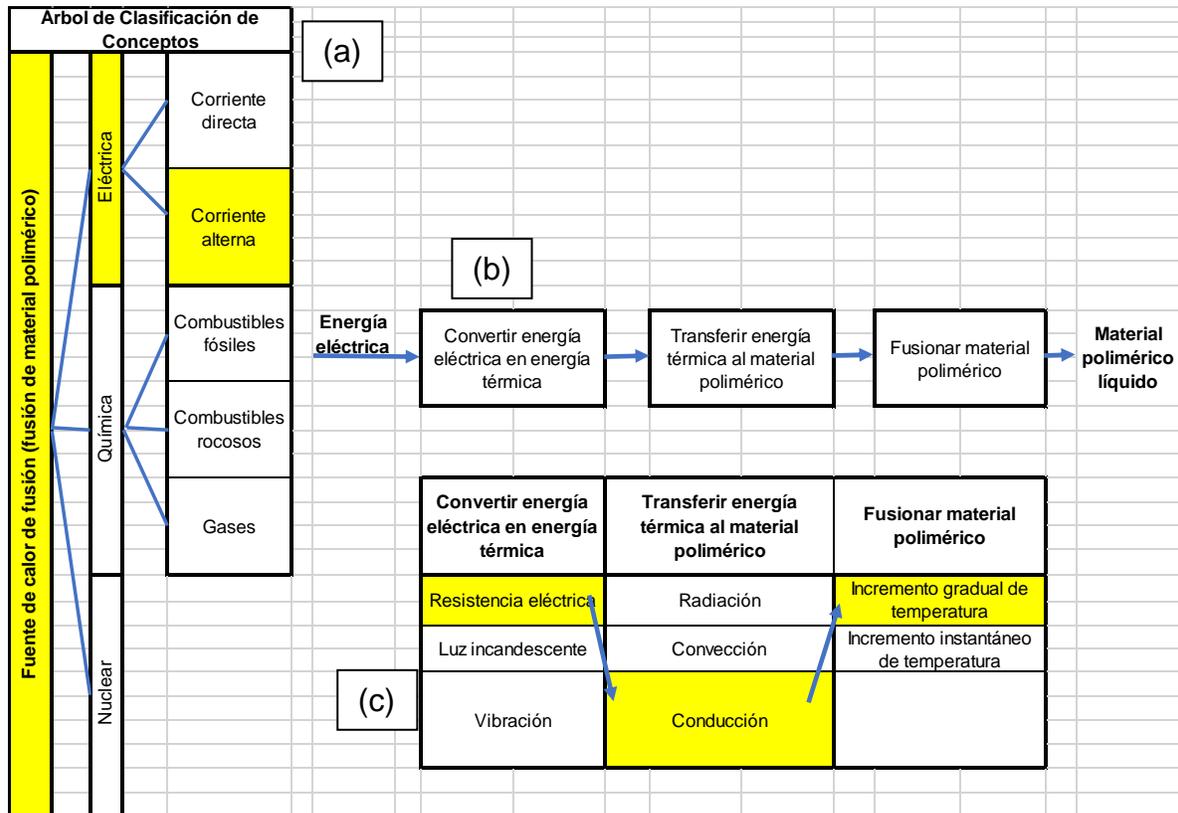


Figura 4-2 Clasificación de concepto (a): selección de fuente térmica (b): flujo de energía en el proceso de extrusión (c): proceso térmico. (de Ulrich & Eppinger, 2013)

Seguidamente, se analizó el proceso térmico que tendría como resultado la fusión del polímero, partiendo de la fuente de energía. A manera de diagrama de flujo, la energía eléctrica se debe transformar en energía térmica para después transferir la temperatura obtenida al polímero. De esta forma, se fusiona el material y se obtiene un polímero en estado líquido al que se puede dar forma. Finalmente, para cada paso del proceso térmico, se debió establecer de qué forma se llevaría a cabo: la forma de convertir energía eléctrica en térmica es mediante resistencias eléctricas; para transferir la temperatura al polímero, se logró mediante conducción del material metálico del barril extrusor; para lograr fusionar el material, se debió incrementar gradualmente la temperatura y presión, mediante los controles electrónicos de las resistencias y de la velocidad de giro del tornillo extrusor. Una vez definido el concepto, fue posible comenzar con las etapas de diseño.

## 4.4 Arquitectura

En este caso en particular, se definió la arquitectura de la máquina extrusora a partir de figuras cuadradas en dos dimensiones, ya que su composición general es lineal y no requiere una visualización en tres dimensiones. Si bien no existe un formato como tal, en este caso la arquitectura visual del equipo es similar a la de un diagrama de flujo. Como se observa en la Figura 4-3, el flujo general del polímero en el equipo será de izquierda a derecha. Se puntualizan los componentes principales del equipo, todos necesarios para cumplir con los requerimientos técnicos anteriormente establecidos. Del tal modo, el motor proporcionará el movimiento general y la fuerza de éste con el fin de controlar la presión del polímero al ser extruído. La interfaz de usuario se transforma en la unidad de control y proporcionará la facilidad de operación del equipo, un requerimiento subjetivo. En el área de transformación, se encuentran los componentes principales del equipo de extrusión, mismos que proporcionan movimiento y temperatura necesarios para la extrusión del polímero. Por su parte, la boquilla de esta área dará la forma final al filamento. La sección de manejo de material consta de accesorios externos y su uso será el de proporcionar embalaje al polímero extruído.

Motor principal controlado	Tolva de material	Elemento temperatura	Elemento temperatura	Elemento temperatura	Elemento temperatura						
	Barril de extrusión					Boquilla	Enfriamiento	Corte	Enderezamiento	Embobinado	
Interfaz de usuario	Tornillo de extrusión										Manejo de producto
	Soporte principal										
Unidad de control	Bancada										

Figura 4-3 Arquitectura de la máquina de extrusión

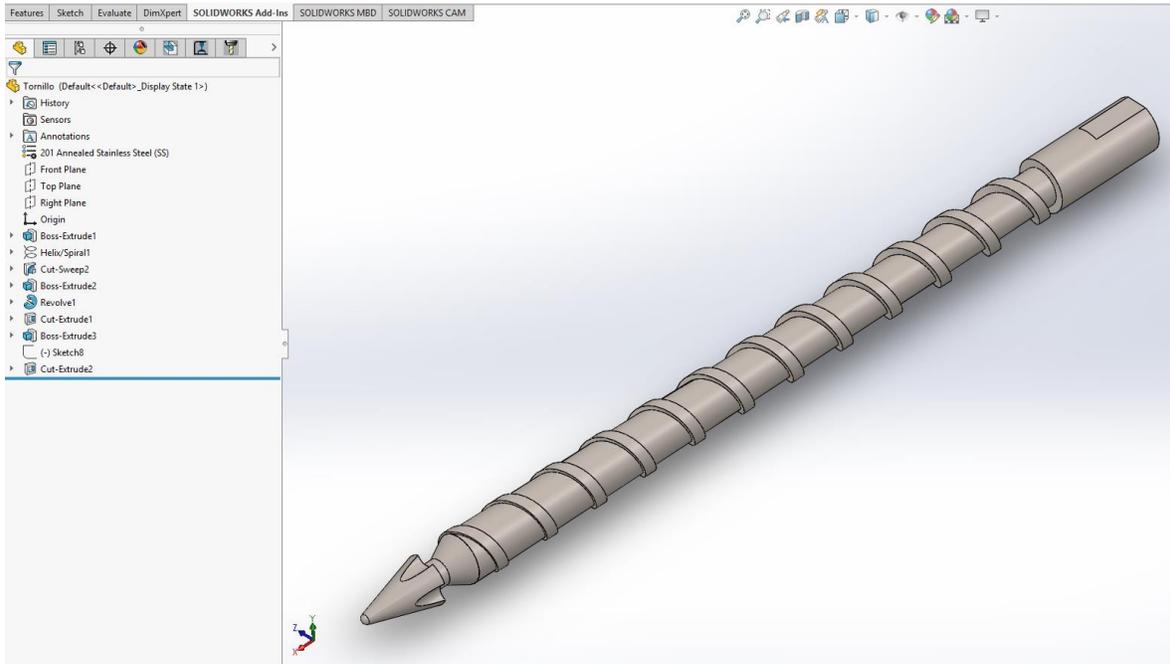
## 4.5 Construcción

Como se vio anteriormente, la etapa de construcción fue dividida en pasos más detallados con el fin de organizar la construcción de la máquina y asegurar que se incluyan los detalles, procesos y personas en cada etapa.

### 4.5.1 Diseño

Definido como parte de los materiales a utilizar, el *software Solid Works* fue utilizado para todo lo referente a diseño de la extrusora. Debido a la existencia de

componentes críticos, se comenzó por los diseños del tornillo, barril y boquilla extrusora. En la Figura 4-4 se muestra el modelado del tornillo extrusor, mientras que en la , se muestra el plano del ensamble completo de la extrusora. El resto de los planos se encuentran en los Anexos II, III y IV.



*Figura 4-4 Modelado del tornillo extrusor mediante **Solid Works***

Para la realización de los diseños, se tomaron en cuenta las características mecánicas de los componentes de la extrusora. El espacio libre entre el perímetro exterior del tornillo y el perímetro interno del barril debió ser suficiente para permitir el libre movimiento del tornillo y, a su vez, no permitir fugas del polímero líquido con el fin de generar presión. Al mismo tiempo, estos componentes debieron ser fabricados a partir de materiales cuyo coeficiente de dilatación permita mantener los ajustes mecánicos de movimiento. El diámetro de salida de la boquilla de extrusión debe ser consistente con el diámetro requerido del filamento, en este caso de 1.65 mm, además de ser del mismo material del barril.

Por su parte, la tolva de material y la base de la máquina también se fabricaron, sin embargo, no requirieron los mismos niveles de tolerancias. El material utilizado fue lámina de acero rolando en frío ya que, además, las propiedades térmicas de estos componentes no son críticas (Figura 4-5).

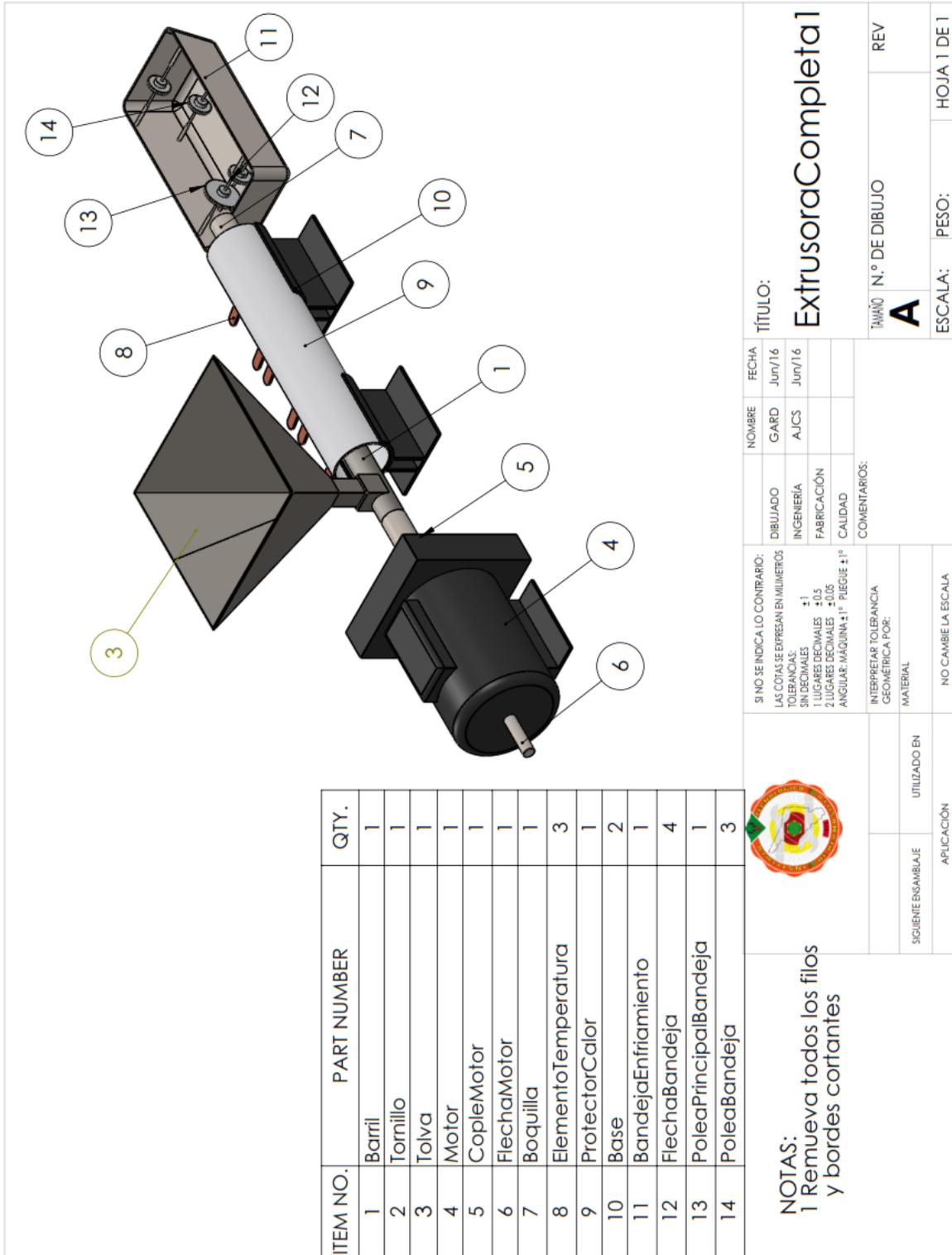


Figura 4-5 Plano de la máquina de extrusión

### 4.5.2 Manufactura

Una vez que se concluyeron los diseños con sus planos respectivos, se procedió a la compra de materiales para manufactura y la compra de componentes necesarios. Los componentes críticos que fueron fabricados fueron el tornillo extrusor, el barril y la boquilla formadora. Cada componente se fabricó con piezas adicionales, necesarias para el ensamble. Por otra parte, los componentes no críticos fabricados fueron la tolva de material, las bases de la máquina y los protectores del barril. (Rosas-Gonzalez, 2018) tuvo como objetivo la fabricación de los componentes mecánicos de la extrusora. En su Memoria Técnica de estadía: “Fabricación de Tornillo Extrusor y Cilindro” se desarrolla el proceso de manufactura del tornillo, barril y boquilla de extrusión. Para estos componentes de la máquina de extrusión se utilizaron máquinas-herramientas convencionales: torno y fresadora universal. Para ello se basó en los planos, tolerancias y ajustes establecidos en la etapa de diseño. En la Figura 4-6, se muestra el subensamble que fue requerido para la fabricación del barril de extrusión. Mientras que en la Figura 4-7, fue ensamblada la boquilla de salida al propio barril. Por otra parte, la Figura 4-8, corresponde al tornillo extrusor.



*Figura 4-6 Barril extrusor terminado*



*Figura 4-7 Ensamble barril – boquilla extrusora*



*Figura 4-8 Tornillo de extrusión*

Los componentes fueron fabricados en un taller de máquinas–herramientas convencionales. Principalmente, se utilizó un torno para para formar la figura básica de cada componente, respetando las tolerancias y, sobre todo los ajustes mecánicos para permitir el movimiento. Adicionalmente, para el tornillo extrusor fue necesaria la aplicación de una fresadora universal semi–automática. (Figura 4-9) Este tipo de maquinaria permite los movimientos necesarios para producir la cuerda del tornillo que, además, cuenta con un ángulo de inclinación.



*Figura 4-9 Fabricación de tornillo extrusor, fresadora universal*

Además de los componentes críticos, fue necesario fabricar la tolva de materiales, las bases de la máquina y las cubiertas de seguridad. Las tres piezas fueron fabricadas a partir de lámina de acero rolado en frío. La función de la tolva es la alimentación del polímero hacia el proceso de extrusión. La función de la base es proporcionar el soporte y alineación mecánica del motor con el área de extrusión. Por último, la cubierta de seguridad es para proveer seguridad a los usuarios ante la posibilidad de daños por quemaduras. De igual manera, provee protección a los elementos de temperatura de la máquina ante daños que pueda sufrir por manipulación. Una vez que se fabricaron o adquirieron los componentes, se procedió al ensamble de la extrusora, mismo que incluye los componentes electrónicos.

### 4.5.3 Ensamble

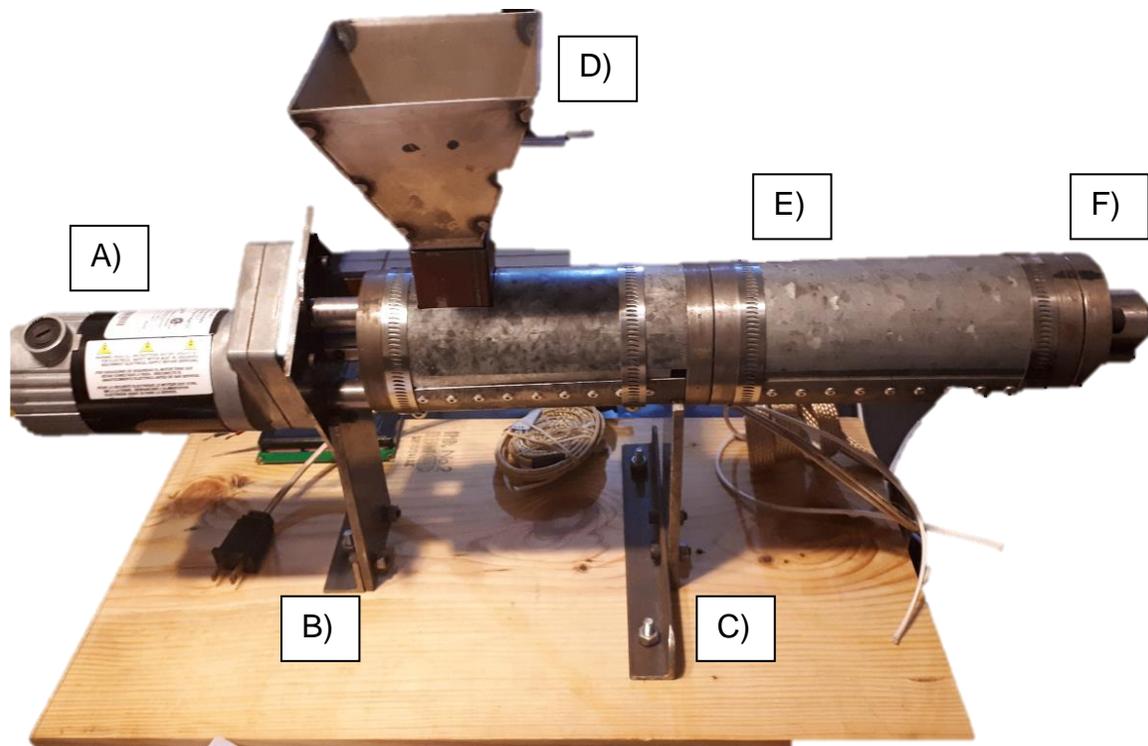
El ensamble de la extrusora comenzó por las partes críticas, mismas que formaron el cuerpo general de la máquina. Para iniciar, el subensamble de barril con boquilla se probó con el tornillo de extrusión. Se comprobó el ajuste mecánico que brinda movimiento, al mismo tiempo que permite que se genere presión.

Se prosiguió al ensamble del motor en la parte posterior del tornillo para poder generar el movimiento. Sin embargo, al mismo tiempo se debió ensamblar la base del motor al ensamble del barril, con el objetivo de tener la base firme, (Figura 4-10). Un segundo soporte fue agregado al cuerpo del barril. De esta forma, se tiene una base firme, con el movimiento giratorio en el centro del equipo. Una vez más, se comprobó la alineación y el movimiento según el ajuste mecánico entre las partes.



*Figura 4-10 Pruebas de movimiento de ensamble tornillo - barril*

La fuente de calor principal, las resistencias eléctricas se debieron colocar envolviendo al barril de extrusión, (Figura 4-12). Como se mencionó anteriormente, por razones de eficiencia y seguridad, las resistencias se instalaron fuera del alcance inmediato, por ello, fue necesario añadir una cubierta de lámina como protección para estos elementos. A pesar de esto, la temperatura exterior de la máquina podría alcanzar niveles de temperatura suficientes para causar daños al personal que se aproxime demasiado al equipo. Por lo tanto, se instalaron alertas visuales de riesgo por quemadura. Se añadieron espacios para los sensores de temperatura, cuya función es proveer retroalimentación al sistema electrónico de control y la interfaz de usuario de la extrusora.



*Figura 4-12 Máquina extrusora ensamblado: A) Motor principal; B) Base de Motor; C) Base de cuerpo; D) Tolva de material; E) Ensamble tornillo – barril con protección; F) Boquilla de extrusión (Rosas, 2018)*

Una vez terminado, se procedió a la interconexión de los elementos electrónicos: sensores, motor y resistencias eléctricas a la unidad de control, (Figura 4-13). (Ledgard-Gonzalez, Lopez-Nevarez, & Mungarro-Hernandez, 2018) tuvieron como objetivo principal el desarrollo de esta unidad, considerando las variables y necesidades de calidad del producto. En su Memoria Técnica de estadía: “Control de Temperatura Para Extrusora de Filamentos Poliméricos” se detallan entre otros: Se programó el controlador (Figura 4-14), para variar la velocidad del tornillo extrusor y generar una presión constante en el polímero fundido. Como se mencionó en capítulos anteriores, la temperatura deberá generarse al transformar energía eléctrica en energía térmica mediante resistencias. El flujo de ABS se obtiene del incremento de temperatura, hasta el punto de fusión de éste. La temperatura debió ser controlada, tomando en consideración las fases de extrusión: precalentamiento, fase de fusión, líquido y preenfriamiento. La última de estas fases es la de mayor importancia y, por lo tanto, se añadieron sensores adicionales para monitorear esta

temperatura. Además, se debieron realizar pruebas al sistema de control e interfaz de usuario previo a instalar los en la máquina, (Figura 4-15). Teniendo esto, se procedió al ensamble final de la extrusora.



*Figura 4-13 Unidad de control y elementos electrónicos (previo a instalación)*

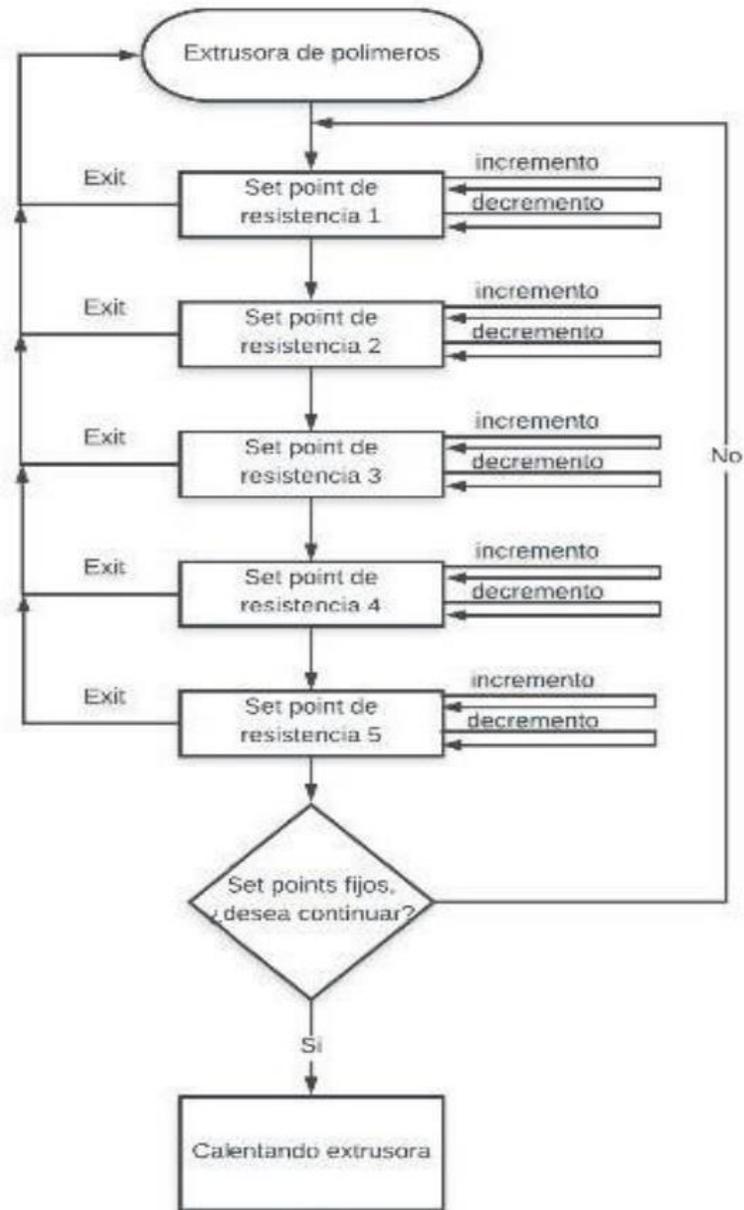
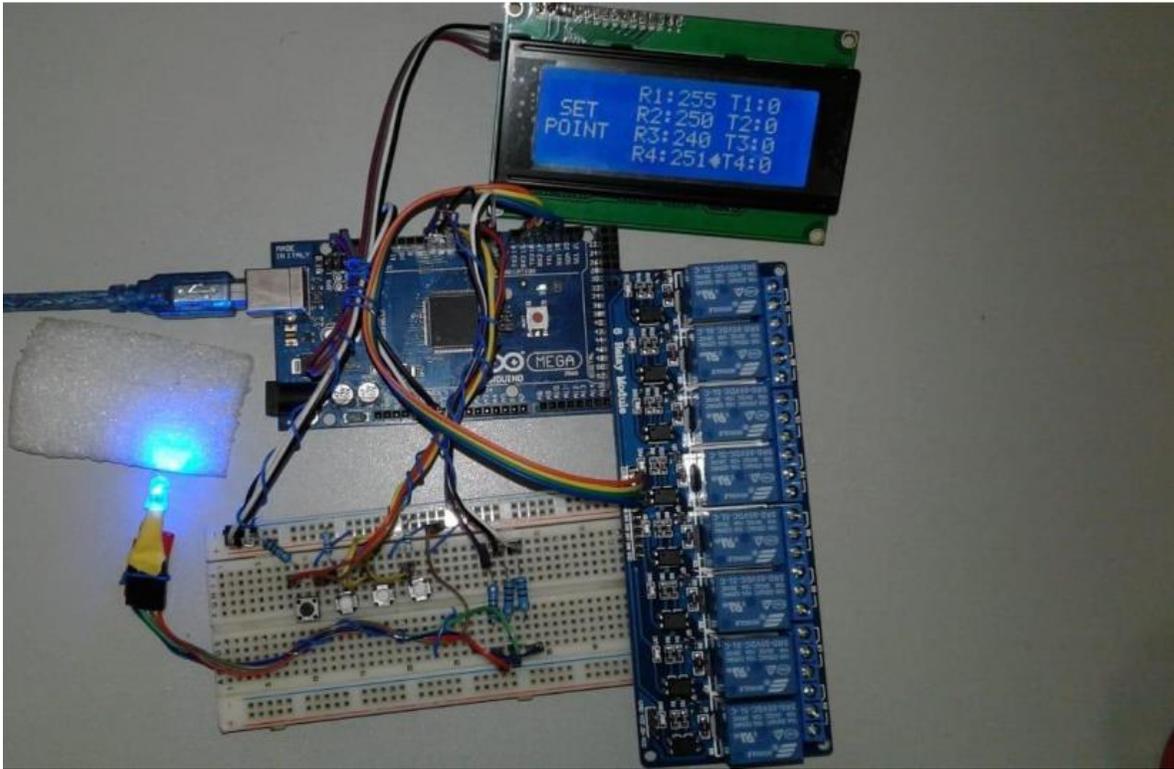


Figura 4-14 Lógica de programación para las resistencias eléctricas



*Figura 4-15 Pruebas de circuito de control (Ledgard-Gonzalez et al., 2018)*

Terminado el ensamble y la automatización de la máquina de extrusión de polímeros, se podrá proceder a realizar las pruebas de arranque y movimientos generales del equipo antes de comenzar con alguna prueba de manufactura. La puesta en marcha se programará una vez que se compruebe que las piezas y ensamble están dentro de las tolerancias definidas al inicio del proyecto. Se deberá verificar la calibración de los sensores y resistencias de acuerdo a las normas previstas para una extrusora.

En resumen, la construcción de la máquina de extrusión se terminó cumpliendo con las necesidades del cliente, una de las cuales fue el costo del equipo. En la Tabla 4-4, se detallan los costos que se debieron cubrir para la culminación del proyecto. Los totales considerados, se tomaron a nivel de sistema, es decir, se detalla el costo de la unidad de control, soporte, extrusión, manejo de producto y embobinado. Lo anterior con el fin de organizar la información de cada componente.

Por su parte, las partes que componen cada sistema, debieron ser buscadas y cotizadas ya sea para su adquisición o fabricación. Cabe señalar que los componentes que fueron cotizados, se obtuvo su valor mediante cotizadores automáticos en línea, debido a que, como lo indican las propias necesidades del equipo, éstos deben ser fáciles de encontrar en caso de requerir reemplazos, (Anexo V, VI). Para los componentes fabricados, fue necesario cotizar la materia prima y la mano de obra necesarias para cada componente. En estos casos, en caso de requerir alguna reparación o reemplazo, se deberá tomar en cuenta al personal que fabricará los componentes, puesto que los costos son variables y se deben pactar por cada trabajo. Si se comparan estos costos con los presentados en la Figura 4-16, que corresponden a una extrusora similar, hecha a medida, podemos observar los beneficios económicos que llevó el desarrollar el equipo. A continuación, se detallan las conclusiones del proyecto.

*Tabla 4-4 Resumen de costos para el desarrollo de máquina de extrusión de polímeros*

Componente	Parte	Materiales comprados	Procesar: Mecanizar + mano de obra	Ensamble	Costo variable	Herramientas	Vida de Htas.	Costo fijo	Total
Unidad de control	Interfaz	\$3,000.00			\$3,000.00		1	\$0.00	\$3,000.00
	Motor	\$5,000.00			\$5,000.00		1	\$0.00	\$5,000.00
	Sensores	\$2,000.00			\$2,000.00		1	\$0.00	\$2,000.00
SopORTE	Bancada	\$1,000.00			\$1,000.00		1	\$0.00	\$1,000.00
Extrusión	Tolva	\$500.00			\$500.00		1	\$0.00	\$500.00
	Barril	\$3,000.00	\$500.00		\$3,500.00	\$250.00	0.5	\$500.00	\$4,000.00
	Tornillo	\$0.00	\$500.00		\$500.00	\$250.00	0.25	\$1,000.00	\$1,500.00
	Boquilla	\$300.00	\$500.00		\$800.00	\$200.00	0.3	\$666.67	\$1,466.67
	Resistencia 1	\$500.00			\$500.00		1	\$0.00	\$500.00
	Resistencia 2	\$500.00			\$500.00		1	\$0.00	\$500.00
	Resistencia 3	\$500.00			\$500.00		1	\$0.00	\$500.00
	Resistencia 4	\$500.00			\$500.00		1	\$0.00	\$500.00
Manejo de producto	Enfriamiento	\$500.00			\$500.00		1	\$0.00	\$500.00
	Cortador	\$750.00			\$750.00		1	\$0.00	\$750.00
	Enderezador	\$500.00			\$500.00		1	\$0.00	\$500.00
Embobinado	Motor	\$750.00			\$750.00		1	\$0.00	\$750.00
	Guía	\$200.00			\$200.00		1	\$0.00	\$200.00
<b>Costo total</b>								<b>\$23,166.67</b>	



**Front and Rear Co-Extrusion Single Screw Extruder**

[Get Latest Price >](#)

Min. Order / Reference FOB Price

1 Piece	<b>US \$10,000-30,000/ Piece</b>
---------	----------------------------------

Port: Ningbo, China 📍

Transport Package: Wood Case

Payment Terms: L/C, T/T

---

Type: Pipe Extruder

Plastic Processed: PE

Product Type: Extrusion Molding Machine

Feeding Mode: One Feed

Screw: Single-Screw

Exhaust: Exhaust

*Figura 4-16 Costo mín-máx de una extrusora comercial con capacidades similares*

Terminados todos los trabajos de diseño, manufactura, ensamble y análisis de costos, se da por terminada la etapa de obtención de resultados. A continuación, se presentan las conclusiones generales del proyecto.

## Capítulo 5. Conclusiones y Recomendaciones

Al analizar los alcances de este proyecto, se concluye que la máquina extrusora de filamentos poliméricos ha concluido sus etapas de diseño y fabricación, dado que se logró concluir con todas las etapas propuestas por (Ulrich & Eppinger, 2013) previas a manufactura en serie o puesta en marcha de un equipo de producción. Los diseños se concluyeron con base a los resultados de conceptualización, tomando en consideración las necesidades de los usuarios finales y requerimientos técnicos establecidos. De forma similar, la manufactura de las piezas y componentes se realizó dentro de las dimensiones tolerancias de los planos generados. Además, se tomó en consideración la norma ISO 19062-1:2015, que define ciertas características y variables de fabricación para un equipo extrusor de ABS.

De las seis fases propuestas en el capítulo 2, se concluyeron 5, dado que la máquina extrusora no será puesta en producción ni en venta. La etapa de planeación se llevó a cabo en conjunto con los usuarios finales o clientes del equipo, se definieron los pasos a seguir para el desarrollo completo. En seguida, una de las etapas de mayor duración fue el desarrollo del concepto. En esta etapa se realizaron las investigaciones necesarias y suficientes para considerar las opciones de solución. De aquí que se establecieron las necesidades del cliente y posteriormente, las especificaciones técnicas con las que se deben contar. Al concluir esta fase, se tenía una visión clara de lo que debería ser la máquina de extrusión.

En las fases 2 y 3, se desarrollaron los diseños de la extrusora. En estas etapas no sólo se implementó el *software* de diseño y los diseños finales sino que, para el diseño se deben incluir los análisis de especificaciones, materiales e incluso las técnicas de manufactura que se implementaron. Se debieron establecer los sistemas con los que cuenta la máquina con el fin de separar y organizar la información. Fue hasta la fase de diseño de detalle en que se consideraron los

aspectos mecánicos como materiales, tolerancias y ajustes, tomando en cuenta variables como dilatación, entre otros. Concluidos los diseños, fue posible comprar, manufacturar y ensamblar las partes, componentes y sistemas de la extrusora.

A partir de este punto, se comenzará con las pruebas iniciales que darán fe de lo realizado en este proyecto. Se recomienda seguir los protocolos de arranque para una extrusora. Primero, se deben comprobar todos los movimientos posibles. Segundo, se debe comprobar la funcionalidad del sistema de control. Tercero, se debe probar el control de temperatura, cotejando con instrumentos de medición calibrados. Cuarto, previo a cualquier carga de material, se debe precalentar la extrusora. Quinto, la primera corrida se debe realizar con la velocidad de extrusión a un 25% de la recomendada para asegurar que el material se está fundiendo y que no existe ningún impedimento mecánico para la continua operación del equipo. Por último, se debe comprobar la funcionalidad total del equipo y la calidad del producto extruido.

## Bibliografía

- Abeykoon, C. (2016). Single screw extrusion control: A comprehensive review and directions for improvements. *Control Engineering Practice*, 51, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2016.03.008>
- Abeykoon, C., Kelly, A. L., Martin, P. J., & Li, K. (2013). Dynamic modelling of die melt temperature profile in polymer extrusion. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, 38(4), 2550–2555. <https://doi.org/10.1109/CDC.2013.6760264>
- Abeykoon, C., Kelly, A. L., Vera-Sorroche, J., Brown, E. C., Coates, P. D., Deng, J., ... Price, M. (2014). Process efficiency in polymer extrusion: Correlation between the energy demand and melt thermal stability. *Applied Energy*, 135, 560–571. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.086>
- Alcaide-Marzal, J., Diego-Más, J. A., & Artacho-Ramírez, M. Á. (2004). *Diseño de Producto, Métodos y Técnicas*. México: Alfaomega.
- Deng, J., Li, K., Harkin-Jones, E., Price, M., Fei, M., Kelly, A., ... Brown, E. (2014). Low-cost process monitoring for polymer extrusion. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 36(3), 382–390. <https://doi.org/10.1177/0142331213502696>
- Dryden, J. (2011). Stress concentration in polymer extrusion dies. *Acta Mechanica*, 219(3–4), 269–279. <https://doi.org/10.1007/s00707-011-0450-x>
- El-Hofy, H. (2014). *Fundamentals of machining processes \_ conventional and nonconventional processes*. London, New York: Taylor & Francis Group.
- Harvey, J. A. (2015). *Machine shop trade secrets : a guide to manufacturing machine shop practices*.
- Howard, W. E. (2017). *Introduction to Solid Modeling Using SolidWorks 2017*.
- ISO/TC 61/SC 9. (2015). *International Organization for Standardization*. Obtenido de <https://www.iso.org/standard/63846.html>
- Jensen, E. A., & Christiansen, J. de C. (2008). Measurements of first and second normal stress differences in a polymer melt. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 148(1–3), 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2007.04.011>
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., ... Noh, S. Do. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 3(1), 111–128. <https://doi.org/10.1007/s40684-016-0015-5>
- Kar, G. P., Biswas, S., & Bose, S. (2016). X-ray micro computed tomography, segmental relaxation and crystallization kinetics in interfacial stabilized co-continuous immiscible PVDF/ABS blends. *Polymer (United Kingdom)*, 101, 291–304. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2016.08.071>
- Lafleur, P. G., & Vergenes, B. (2014). *Polymer Extrusion*. (Z. Reveley, Ed.). London: ISTE Ltd, John Wiley & Sons Inc.
- Ledgard-Gonzalez, S., Lopez-Nevarez, F., & Mungarro-Hernandez, M. (2018). *Control de Temperatura para Extrusora de Filamento de Polímeros*.

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE HERMOSILLO, SONORA.

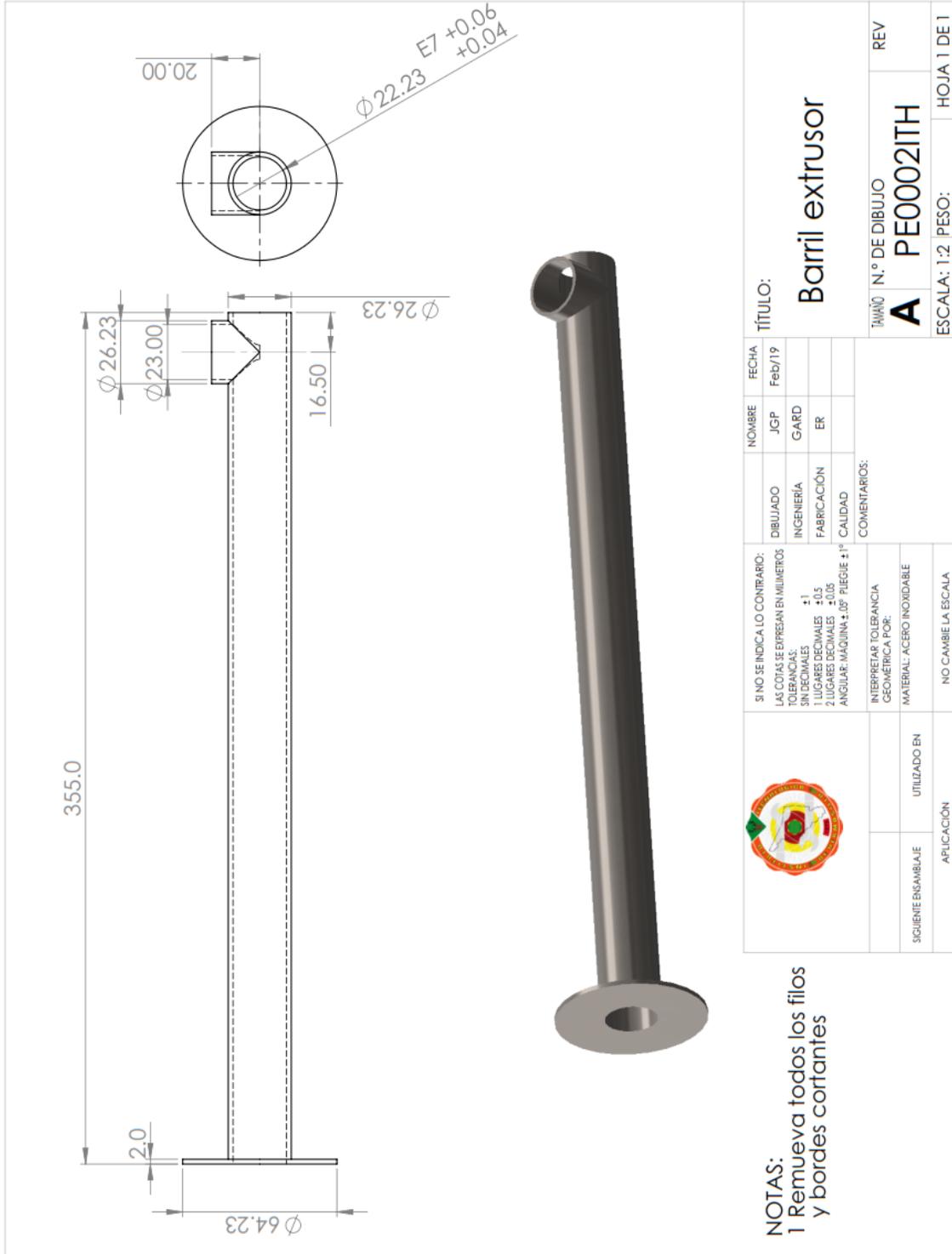
- Parikh, T., Gupta, S. S., Meena, A., & Serajuddin, A. T. M. (2014). Investigation of Thermal and Viscoelastic Properties of Polymers Relevant to Hot Melt Extrusion - III: Polymethacrylates and polymethacrylic acid based polymers. *Journal of Excipients and Food Chemistry*, 5(1), 56–64. <https://doi.org/10.1208/s12249-015-0426-6>
- Rauwendaal, C. (2014). *Polymer extrusion: Fifth edition. Polymer Extrusion: Fifth Edition*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.3139/9781569905395.003>
- Rosas-Gonzalez, E. (2018). *Fabricación de tornillo extrusor y cilindro*. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE HERMOSILLO, SONORA.
- Stephan, M., Große, S., Stintz, M., & Blankschein, U. (2006). Real time detection of particulate heterogeneities in polymer extrusion processes using microphotometric measuring method. *Plastics, Rubber and Composites*, 35(10), 432–438. <https://doi.org/10.1179/174328906X149736>
- Tunc, L. T., Budak, E., Bilgen, S., & Zatarain, M. (2016). Process simulation integrated tool axis selection for 5-axis tool path generation. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 65(1), 381–384. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.113>
- Ulrich, K. T. (University of P., & Eppinger, S. D. (Massachusetts I. of T. (2013). *Diseño y Desarrollo de Productos* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Vera-Sorroche, J., Kelly, A., Brown, E., Coates, P., Karnachi, N., Harkin-Jones, E., ... Deng, J. (2013). Thermal optimisation of polymer extrusion using in-process monitoring techniques. *Applied Thermal Engineering*, 53(2), 405–413. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.04.013>

# ANEXOS

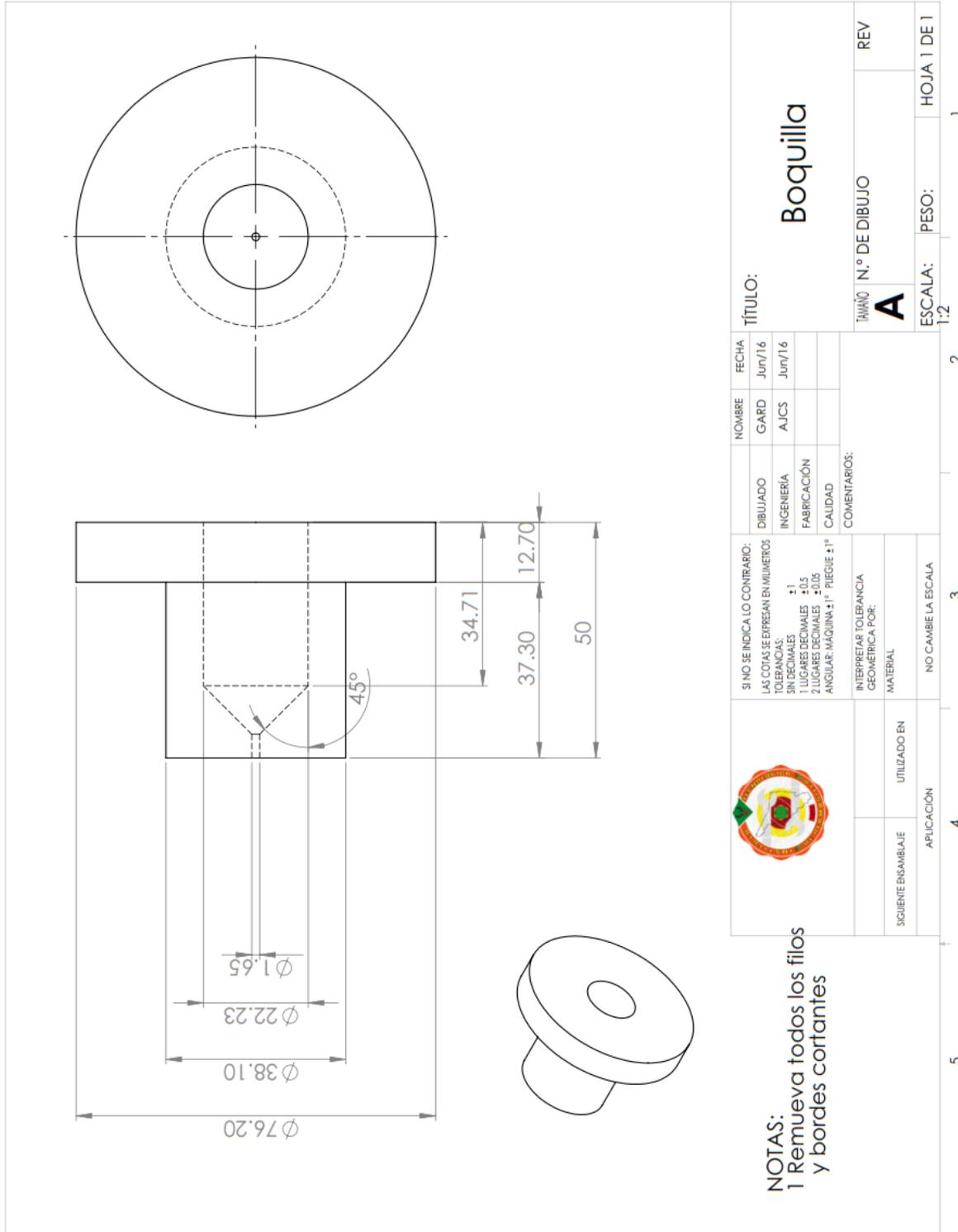
# Anexo I: Fase II de análisis QFD

QFD Fase II		Despliegue de la Función de Calidad (Quality Function Deployment)															
QFD Fase II																	
Producto	Prototipo	Códigos de Colores															
Desarrollado por	Jesús Gerardo	Áreas a llenar															
Fecha	5/ octubre/	= Cálculos automáticos o información ligada (estas celdas no deben llenarse)															
<b>Características de Partes</b>																	
	<b>Pesos Relativos Fase I</b>	Tolva de material	Barril de extrusión	Tomillo de extrusión	Motor del husillo	Boquilla	Imán de tolva	Resistencias	Cables	Tomillos	Sensores térmicos	Sensores de potencia	Controlador	Interface	Estación de enfriamiento	Cortador	Embobinador
<b>Métricos de Ingeniería</b>																	
Fuerza de tensión (ABS)	0.09		2	2		2		3			9		2		5	2	3
Diámetro del producto	0.10			2		9		2			2		2		5	2	3
Densidad del producto	0.05		2			5	5	5			5	5			5		
Deltas (diferencias entre colores)	0.06			2		2	2	2									
Peso máximo	0.04	2	2	2	5		2			2							
Dimensiones máximas	0.03		2	2											5	2	5
Tiempo de mantenimiento	0.08	2	2	2	2				2	5	2		2	2			
Tiempo de armado- desarmado	0.06	2	2	2	2	2			2	5	2						
Lista de partes	0.05	2	2	2	2	2			2	2	2	2	2	2			
Capacidad térmica	0.13		5	5				9	9		5	5	5	5	2		
Dureza de componentes	0.10		9	9		5		5			2						
Carga de materiales	0.11	2	5	5	5	2		9									
Velocidad del husillo	0.00			3	9				5			9	5	5			
<b>Puntuación</b>		0.67	2.90	3.12	1.11	2.39	0.48	3.49	1.54	0.87	2.49	1.02	1.27	0.90	1.62	0.44	0.72
<b>Peso Relativo</b>		0.03	0.12	0.12	0.04	0.10	0.02	0.14	0.06	0.03	0.10	0.04	0.05	0.04	0.06	0.02	0.03

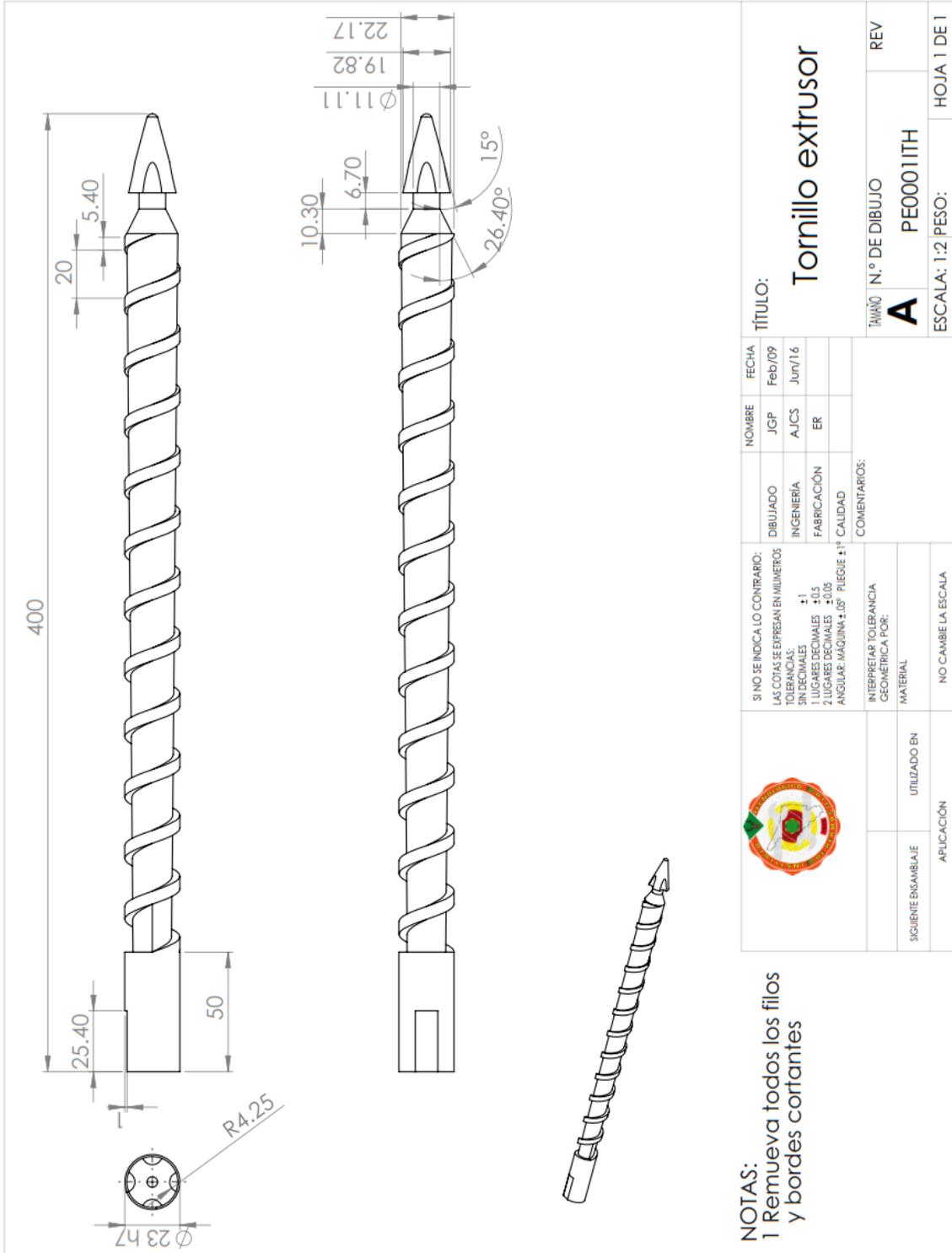
# Anexo II: Plano de Barril Extrusor



# Anexo III: Plano de Boquilla Extrusora



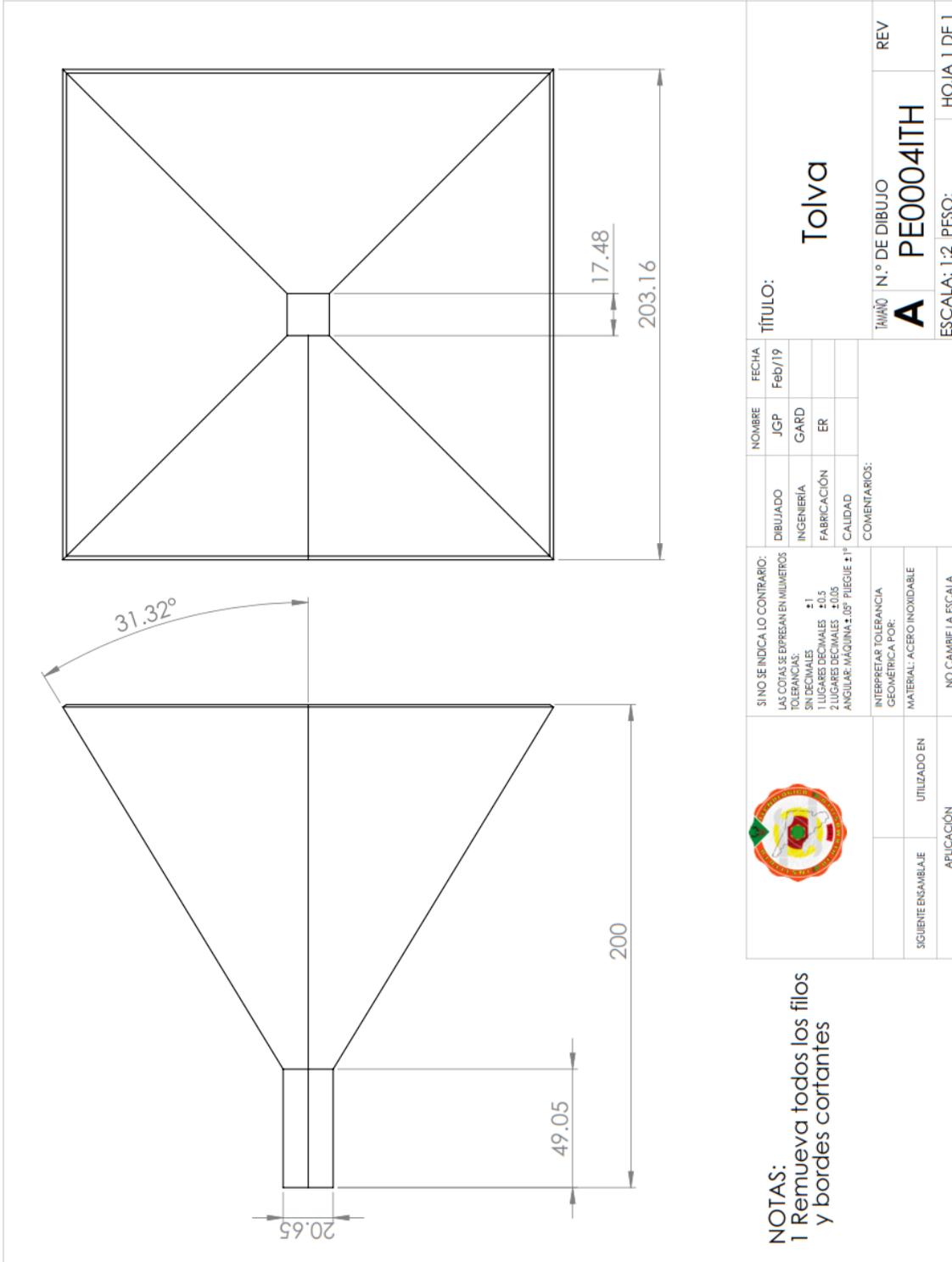
# Anexo IV: Plano de Tornillo Extrusor



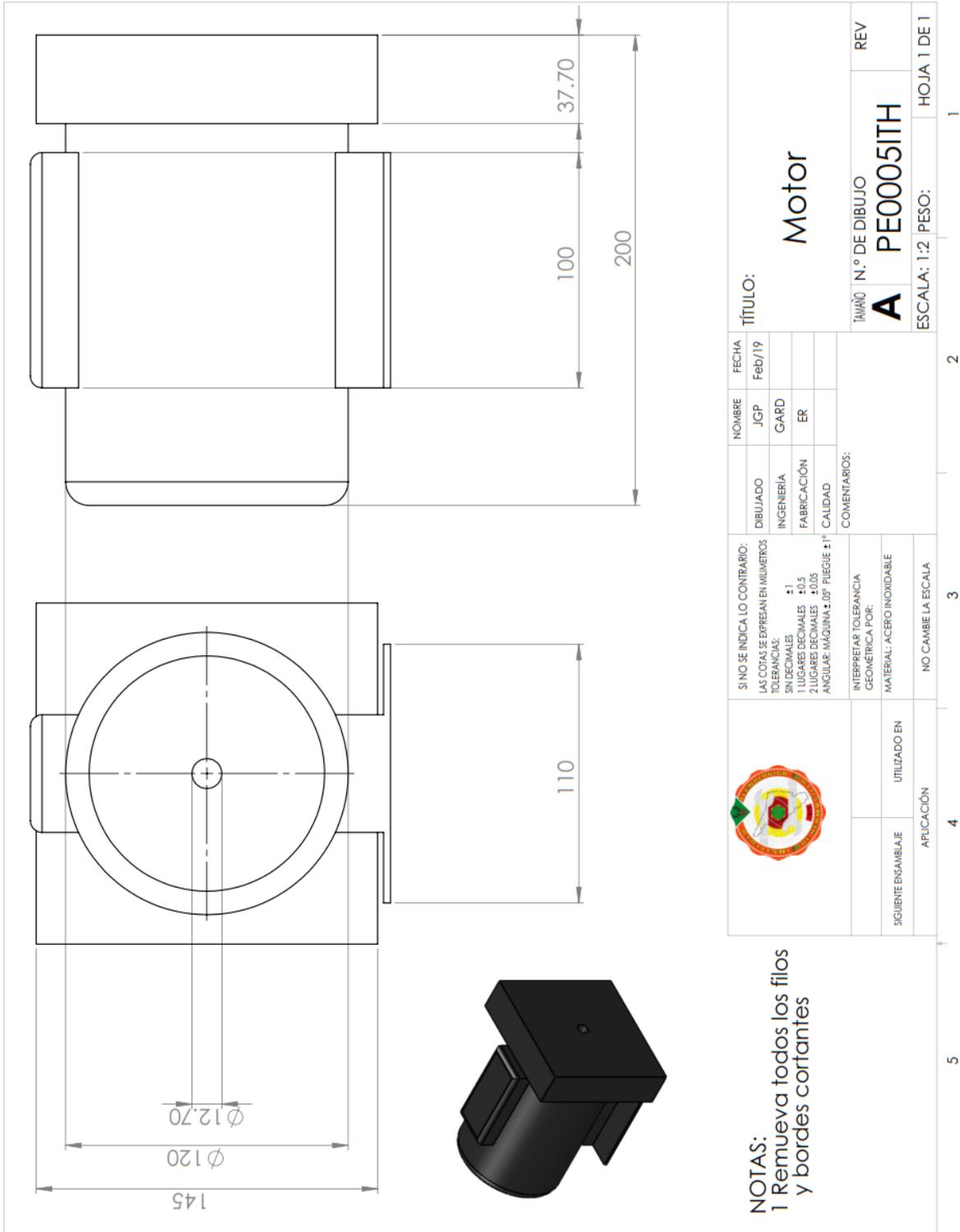
**NOTAS:**  
1 Remueva todos los filos y bordes cortantes

		SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE ESPRESAN EN MILIMETROS TOLERANCIAS: 1 LUGARES DECIMALES ±0.05 2 LUGARES DECIMALES ±0.05 ANGULAR: MAQUINA ±0.05° PLEGUE ±1°		DIBUJADO	NOMBRE	FECHA	<b>TÍTULO:</b> Tornillo extrusor
		INGENIERIA	JGP	Feb/09			
INTERPRETAR TOLERANCIA GEOMETRICA POR: MATERIAL		FABRICACIÓN ER		COMENTARIOS:		TAMAÑO N.º DE DIBUJO <b>A</b> PE0001ITH	REV
SIGUIENTE ENSAMBLAJE UTILIZADO EN		NO CAMBIE LA ESCALA		ESCALA: 1:2 PESO:		HOJA 1 DE 1	

# Anexo V: Plano de tolva



# Anexo V: Plano de motor



## Anexo VII: Búsqueda de costos de resistencias

### Samox Heating Tapes



**BWH Series** high-temperature Samox® heating tape offers exceptional flexibility and durability. The Samox® outer sheath provides electrical insulation for safe use with electrically conductive surfaces. With rapid thermal response, it helps to provide accurate heat when you need it. Use with laboratory heating applications for apparatus, gas tubing, temporary heat, valves, and more. Safe for use with glass and electrically conductive metal surfaces. Temperature controllers are required for safe operation.

**BWO Series** Samox® heating tapes are knitted and braided to help provide excellent flexibility, and exceptional durability. They are suitable for non-conductive electrical surfaces, such as glass. They include high-temperature tie-downs for easy installation.

Brands

BRISKHEAT

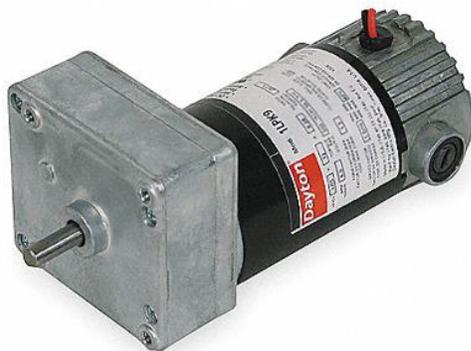
Temp. Range (C) ▲	Includes Controller	Length	Width	Voltage	Wattage	Item #	Price
<b>Series: BWH</b>							
0 Degrees to 760 Degrees	No	4 ft.	.5"	120	313	13P781	\$63.88 / each
0 Degrees to 760 Degrees	No	4 ft.	1"	120	627	13P786	\$87.60 / each
0 Degrees to 760 Degrees	No	6 ft.	.5"	120	470	13P782	\$79.00 / each
0 Degrees to 760 Degrees	No	6 ft.	1"	120	940	13P787	\$94.29 / each
0 Degrees to 760 Degrees	No	8 ft.	.5"	120	627	13P783	\$95.47 / each
0 Degrees to 760 Degrees	No	8 ft.	1"	120	1248	13P788	\$118.52 / each
0 Degrees to 760 Degrees	No	10 ft.	.5"	120	783	13P784	\$116.85 / each
0 Degrees to 760 Degrees	No	24"	.5"	120	156	13P780	\$55.77 / each
0 Degrees to 760 Degrees	No	24"	1"	120	313	13P785	\$70.77 / each

[https://www.grainger.com/category/lab-supplies-lab-ovens-heating-and-refrigeration-lab-heating-blankets-tapes-and-cords/ecatalog/N-1c2c/Ntt-heat+element?sst=subset&ts\\_optout=true](https://www.grainger.com/category/lab-supplies-lab-ovens-heating-and-refrigeration-lab-heating-blankets-tapes-and-cords/ecatalog/N-1c2c/Ntt-heat+element?sst=subset&ts_optout=true)

## Anexo VIII: Búsqueda de costos de motores

### Motorreductor CD,12VCD,HP1/30,rpm Nom 39

DAYTON # Grainger: 1LPV4 # Fabricante: 1LPV4 Pág. de catálogo: 191 Peso de envío: 4.72 lbs



Las imágenes son ilustrativas. ⓘ



Precio IVA incluido:

**\$5,878.30** / pieza

Si tu compañía tiene convenio con Grainger México inicia sesión o regístrate para ver tu precio.

¡Envío GRATIS en este producto!

a Domicilio  Sucursal

Enviar a

1

[Agregar a una lista](#)

[Ver más detalles del producto](#)

<https://www.grainger.com.mx/producto/DAYTON-Motorreductor-CD%2C12VCD%2CHP1-30%2Crpm-Nom-39/p/1LPV4>