



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”**

**DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SISTEMA DE
PRODUCCIÓN DE MATERIAL REIMPRIMIBLE EN
FORMA DE FILAMENTO UTILIZANDO POLÍMEROS
ESPECÍFICOS Y RECICLADOS (ABS Y PLA)**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
MECÁNICA**

PRESENTA:

ING. RICARDO REGIS AGUILAR

DIRECTORES DE TESIS:

**DR. JUAN ALFONSO BELTRÁN FERNÁNDEZ
DR. LUIS HÉCTOR HERNÁNDEZ GÓMEZ**



CIUDAD DE MÉXICO, 2017

Resumen

El siguiente trabajo escrito presenta el proceso de diseño y de fabricación de un prototipo funcional utilizado para la producción de material reimprimible en forma de filamento (extrusor), el cual se fabricó mayoritariamente mediante el uso de materiales reciclados, esto con la finalidad de reducir el costo final de dicha máquina, el filamento se fabricará mediante el uso de polímeros específicos y reciclados (ABS y PLA), los cuales son materiales comúnmente utilizados para la impresión en 3D.

En el documento se encuentran desde la identificación del problema, la justificación, el objetivo general, objetivos específicos y metas alcanzadas con la realización de dicho proyecto.

También se puede apreciar, dentro del documento, el plan de trabajo que se siguió para el desarrollo tanto de la máquina extrusora como del sistema de arrastre, enfriamiento y enrollado, los cuales son necesarios en la producción de los filamentos que se utilizarán para nuevas impresiones en 3D, los materiales a utilizar son polímeros reciclados de impresiones fallidas, los cuales se encuentran en forma de pellets.

De igual manera se presenta una breve historia del procesamiento de plásticos, máquinas de extrusión y de un marco de referencia con las bases teóricas necesarias para sobrellevar el proyecto.

Se puede encontrar la evolución que sufrió el proyecto, desde la idea principal hasta las diferentes etapas que conllevó el mismo. Al igual que un estudio económico en el cual se presentan los precios y costos de los diferentes materiales utilizados para el proyecto.

Los planos y especificaciones no están incluidos para proteger al sistema fabricado debido a que se planea tramitar una marca y patente del mismo, al final del documento se encuentran los anexos con los cuales apoyarse para tener un mejor entendimiento del proyecto.

Abstract

The following written work shows the process of design and manufacturing of a working prototype used for production of re-printable material with filament shaped (extruder), which was mainly manufactured by using recycled materials, this with the purpose of reducing the final cost of the machine, the filament will be manufacture by using specific and recycled polymers (ABS and PLA), which are materials commonly used for 3D printing.

The problem identification, justification, the general objective, specific objectives and goals achieved with the completion of the project are included in the document.

It is also possible to see, within the document, the work plan that was followed for the development of the extruder, the drag system, the cooling and the winding system, which are necessary in the production of the filaments that will be used for new 3D impressions, the materials to be used are recycled polymers of failed impressions, which are in the form of pellets.

A brief history of the plastics processing, extrusion machines and a frame of reference with the theoretical bases necessary to cope with the project is presented.

Similarly can be found the evolution of the project from the main idea to the different stages that led to it. As an economic study in which prices and costs of the different materials used for the project are presented.

The plans and specifications are not included to protect the system manufactured because it is planned to process a trademark and patent of the same, at the end of the document the annexes can be found to support a better understanding of the project.

Agradecimientos

Primero y como más importante, agradezco a DIOS por darme la oportunidad de alcanzar otra meta establecida en mi vida.

A mis padres, por el apoyo incondicional y por enseñarme a no darme por vencido, cada día los admiro y quiero más.

A mis hermanos por todos sus buenos consejos.

Agradezco a todos mis amigos y compañeros de la maestría.

De igual manera quiero agradecer al taller de hidroneumática avanzada, en especial a mis compañeros Carlos y David, por todas las enseñanzas y consejos, sin ustedes esto no hubiera sido posible.

Agradezco al Dr. Juan Alfonso Beltrán Fernández y al Dr. Luis Héctor Hernández Gómez por darme la confianza y la oportunidad de sobrellevar este proyecto.

Al CONACYT, IPN, y a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Zacatenco.

Contenido General

Resumen	I
Abstract	II
Agradecimientos	III
Contenido General.....	IV
Planteamiento del Problema e Hipótesis	XV
Objetivo General	XV
Objetivos Específicos.....	XV
Metas.....	XV
Justificación.....	XVI
Introducción.....	XVII
CAPÍTULO 1	1
1. Estado del arte	2
1.1 Introducción a los plásticos	2
1.2 Historia del procesamiento de los plásticos y los elastómeros.....	3
1.3 Historia de la extrusión de polímeros	10
1.4 Historia de la impresión en 3D	16
1.4.1 ¿Qué es la impresión 3D?.....	16
1.4.2 Tipos de impresoras 3D	18
1.4.3 Impresoras 3D robóticas	20
1.4.4 Movimiento RepRap	20
1.4.5 Habilitación de tecnología	22
1.4.5.1 El Arduino	22
1.4.5.2 Repositorios de código de fuente abierta.....	22
1.5 Historia de los materiales utilizados para la impresión en 3D	23
1.6 Sumario.....	26
1.7 Referencias	27
CAPÍTULO 2	28
2. Marco Teórico	29
2.1 Extrusión.....	29
2.2 Maquinaria de extrusión	30
2.2.1 ¿Qué es una extrusora?.....	30
2.2.2 Diferentes tipos de extrusores.....	31
2.2.2.1 Extrusores de tornillo simple.....	31

2.2.2.2 Extrusores de doble tornillo.....	32
2.2.2.2.1 Extrusores de doble tornillo co-rotacionales	32
2.2.2.2.2 Extrusores de doble tornillo contra-rotacionales	33
2.2.2.3 Extrusores de pistón	34
2.2.3 Componentes de un extrusor	35
2.2.3.1 Tornillo extrusor	35
2.2.3.1.1 Tornillo extrusor estándar	36
2.2.3.2 Cañón extrusor.....	38
2.2.3.3 Garganta de alimentación	38
2.2.3.4 Tolva de alimentación	39
2.2.3.5 Calentamiento y enfriamiento del cañón	40
2.2.3.5.1 Métodos de calentamiento	40
2.2.3.5.2 Métodos de enfriamiento	41
2.2.3.5.3 Temperatura del barril contra temperatura del plástico.....	42
2.2.3.6 Calentamiento y enfriamiento del tornillo.....	43
2.2.3.7 Plato rompedor	43
2.2.3.8 Paquete de filtros	44
2.2.3.8.1 Cambiadores de filtros.....	45
2.2.3.9 Boquilla de extrusión.....	46
2.2.3.9.1 Boquillas de coextrusión	48
2.2.3.10 La unidad extrusora	49
2.2.3.10.1 Acoplamiento entre el motor y la caja de cambios.....	50
2.2.3.11 Reductor de velocidad	51
2.2.3.11.1 Conjunto de cojinetes de empuje.....	52
2.2.3.12 Bomba de engranajes.....	53
2.3 Instrumentación y Control	54
2.3.1 Instrumentación	54
2.3.2 Parámetros más importantes.....	54
2.3.2.1 Presión de fusión	55
2.3.2.2 Transductores de presión	56
2.3.2.3 Medición de temperatura	58
2.3.2.4 Medición de la temperatura de fusión	59
2.3.2.5 Medición de la temperatura del barril.....	60
2.3.3 Control de temperatura	62
2.3.3.1 On-Off control	62
2.3.3.2 Control proporcional.....	63
2.3.3.3 Control de lógica difusa.....	65

2.4 Líneas Completas de Extrusión	65
2.4.1 Líneas de extrusión de tubos y tuberías.....	66
2.4.2 Líneas de extrusión de películas y láminas	67
2.4.3 Líneas de película utilizando rodillos de enfriamiento.....	69
2.4.4 Combinación de materiales	70
2.4.4.1 Coextrusión.....	70
2.4.4.2 Revestimiento por extrusión.....	71
2.4.4.3 Laminación por extrusión.....	72
2.4.5 Líneas de película soplada.....	73
2.4.6 Líneas compuestas de extrusión	74
2.4.7 Líneas de extrusión de perfiles	75
2.5 Plásticos y sus propiedades importantes en la extrusión	76
2.5.1 Termoplásticos y termoestables	76
2.5.2 Plásticos amorfos y semi-cristalinos.....	77
2.5.3 Plásticos líquidos cristalinos (LCPs)	80
2.5.4 Elastómeros	81
2.5.5 Comportamiento del flujo de plásticos fundidos.....	82
2.5.6 Índice de fusión	83
2.5.7 Efecto de cizallamiento	84
2.5.8 Dilución por cizallamiento o comportamiento pseudoplástico	84
2.5.9 Efecto de la temperatura en la viscosidad	86
2.5.10 Generación de calor viscoso	86
2.5.11 Propiedades térmicas	87
2.5.11.1 Conductividad térmica.....	87
2.5.11.2 Calor específico y entalpía	88
2.5.11.3 Estabilidad térmica y tiempo de inducción.....	89
2.5.11.4 Densidad	91
2.5.11.5 Punto de fusión	92
2.5.11.6 Temperatura de transición vítrea	92
2.6 Sumario.....	94
2.7 Referencias.....	95
CAPÍTULO 3	96
3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN.....	97
3.1 Proceso de diseño	97
3.1.1 Diseño del producto.....	98
3.1.2 Consideraciones de diseño.....	99

3.1.3 Características clave de las mejores prácticas del diseño.....	100
3.1.4 Vida del producto	101
3.1.5 Soluciones a problemas de diseño	103
3.1.5.1 Acciones básicas para la solución del problema	105
3.1.6 Diseño para la sustentabilidad	105
3.1.7 Fases del proceso del diseño mecánico	106
3.1.7.1 Descubrimiento del producto	107
3.1.7.2 Proyecto de planeación	107
3.1.7.3 Definición de producto	108
3.1.7.4 Diseño conceptual	110
3.1.7.5 Desarrollo del producto	111
3.1.7.6 Soporte técnico del producto	112
3.2 Análisis SWOT.....	113
3.2.1 Fortalezas (Strengths).....	113
3.2.2 Debilidades (Weaknesses).....	113
3.2.3 Oportunidades (Opportunities).....	114
3.2.4 Amenazas (Threats).....	114
3.3 Comprensión del problema y desarrollo de especificaciones de ingeniería.....	114
3.3.1 QFD	115
3.3.1.1 Identificación de los clientes (¿Quiénes son?)	115
3.3.1.2 Determinación de los requerimientos de los clientes (¿Qué quieren los clientes?).....	116
3.3.1.3 Determinación de la importancia relativa de los requerimientos (¿Quién contra qué?)	116
3.3.1.4 Identificación y Evaluación de la competencia (¿Qué tan satisfechos están los clientes en la actualidad?)	118
3.3.1.5 Generación de especificaciones de ingeniería (¿Cómo pueden ser medidos los requerimientos de los clientes?	121
3.3.1.6 Relación de los requerimientos de los clientes con las especificaciones de ingeniería (¿Cómo medir los qué?)	122
3.3.1.7 Establecimiento de los objetivos para las especificaciones de ingeniería y su importancia (¿Cuánto es lo suficientemente bueno?)	124
3.3.1.8 Relación entre las especificaciones de ingeniería (¿Qué tanto dependen los unos de los otros?)	125
3.4 Análisis final de la propuesta de solución	127
3.5 Sumario.....	129
3.6 Referencias	130

CAPÍTULO 4	131
4. Generación de productos	132
4.1 Generación de forma	133
4.1.1 Comprensión de las limitaciones espaciales.....	133
4.1.2 Configuración de componentes	133
4.1.3 Desarrollo de conexiones: Crear y Refinar Interfaces para Funciones	134
4.1.4 Desarrollo de componentes	134
4.2 Selección de materiales y procesos	134
4.3 Fabricación del prototipo funcional.....	134
4.3.1 Sistema de Extrusión	135
4.3.1.1 Tornillo extrusor.....	135
4.3.1.2 Cañón extrusor.....	137
4.3.1.3 Soportes cañón extrusor.....	138
4.3.1.4 Boquilla Mayor.....	139
4.3.1.5 Boquillas diametrales	141
4.3.1.6 Tolva.....	142
4.3.1.7 Base Tolva	144
4.3.1.8 Motor eléctrico	145
4.3.1.9 Reductor	145
4.3.1.10 Acople (Reductor Husillo).....	146
4.3.1.11 Base soporte del sistema en general	147
4.3.1.12 Instrumentación y control del sistema de extrusión	147
4.3.2 Sistema de enfriamiento	152
4.3.2.1 Canal de enfriamiento.....	152
4.3.2.2 Tina de enfriamiento.....	153
4.3.3 Sistema de arrastre.....	154
4.3.3.1 Base de rodillos	154
4.3.3.2 Rodillos de presión (superior e inferior)	155
4.3.4 Sistema de enrollado.....	157
4.3.4.1 Bases eje carrete	157
4.3.4.2 Eje carrete	158
4.3.4.3 Acople motor-reductor juego de poleas	159
4.3.4.4 Juego de poleas	159
4.3.4.5 Base soporte sistema de enfriamiento, arrastre y enrollado	160
4.3.5 Instrumentación y control del sistema de enfriamiento, arrastre y enrollado	161
4.4 Sumario.....	162

4.5 Referencias	163
CAPÍTULO 5	164
5. Resultados y discusión	165
5.1 Línea de extrusión	165
5.2 Análisis de Resultados Filamentos ABS	166
5.2.1 Ensayo de tensión	166
5.2.2 Ensayos de compresión	170
5.3 Sumario.....	173
5.4 Referencias	173
CAPÍTULO 6	174
6. Eficacia y Eficiencia del diseño.....	175
6.1 Satisfacción del cliente	179
6.1.1 Requerimientos básicos	179
6.1.2 Requerimientos de rendimiento.....	179
6.1.3 Requerimientos atractivos	180
6.2 Sumario.....	181
6.3 Referencias	181
Conclusiones	182
ANEXOS	184
A. 1 Diagrama de actividades.....	185
A. 2 QFD (QUALITY FUNCTION DIAGRAM)	186
A. 3 Diagrama de Funciones	187
A4. Manual de operación Sistema de producción de filamentos termoplásticos	188
A5. Diagramas conexiones Sistema de extrusión.....	196
A6. Diagramas conexión sistemas enfriamiento, arrastre y enrollado	197
A7. Prensa para filamentos	198
A8. Procesos de Manufactura.....	199
A8.1 Maneras de definir manufactura: a) proceso técnico, b) proceso económico..	199
A8.2 Clasificación de los procesos de manufactura	200
A8.3	200
A.9 Procesamiento de polímeros	201
A.10 Manual de operación controlador de temperatura	202
A.11 Maquinaria utilizada para la fabricación de las piezas	203
A.12 Análisis costos línea de extrusión.....	205

Índice de figuras

Capítulo 1

Figura 1. 1 Látex extraído de árboles	2
Figura 1. 2 Obtención de chicle del árbol chicozapote.....	3
Figura 1. 3 Fabricación de neumáticos de caucho.....	4
Figura 1. 4 Ejemplo de dirigible utilizado en la Primera Guerra Mundial.....	5
Figura 1. 5 Paracaídas fabricados por Du Pont	7
Figura 1. 6 Proceso de obtención del polímero biodegradable PLA.....	9
Figura 1. 7 Tornillo de Arquímedes utilizado para bombear agua.....	11
Figura 1. 8 Máquina de producción de cereales	12
Figura 1. 9 Sistema manual de fabricación de pasta.....	13
Figura 1. 10 Tornillo extrusor convencional	13
Figura 1. 11 Extrusora de doble tornillo.....	13
Figura 1. 12 Proceso de extrusión de una mezcla plástica dentro de un molde cerrado	14
Figura 1. 13 Proceso completo de extrusión.....	15
Figura 1. 14 Representación esquemática típica de una extrusora de doble husillo farmacéutica.....	15
Figura 1. 15 Pared de ladrillo	16
Figura 1. 16 Conchas marinas producto natural “Impresión 3D”	17
Figura 1. 17 Ejemplo natural de impresión 3D en el Valle de la Cueva, Parque Nacional Zion.....	17
Figura 1. 18 Prototipo de impresora SLS	19
Figura 1. 19 Versión RepRap 1.0 “Darwin”.....	21
Figura 1. 20 Versión RepRap 2.0 “Mendel”	21
Figura 1. 21 Impresora cartesiana 3D típica.....	23
Figura 1. 22 Carretes de Nylon y PLA	24
Figura 1. 23 Filamento Laybrick	25
Figura 1. 24 Filamento Laywood	25
Figura 1. 25 Presentación de rollos de filamentos para impresoras 3D típica.....	26

Capítulo 2

Figura 2. 1 Extrusor de un solo husillo.....	31
Figura 2. 2 Extrusor de doble husillo co-rotacional	32
Figura 2. 3 Extrusor de doble tornillo cónico.....	33
Figura 2. 4 a) husillos contra-rotacionales completamente interdentados, b) husillos contra-rotacionales parcialmente interdentados, c) husillos contra-rotacionales no interdentados.....	34
Figura 2. 5 Esquema de un extrusor de pistón.....	34
Figura 2. 6 Tornillo extrusor simple.....	36
Figura 2. 7 Barril extrusor ventilado con tornillo de dos etapas.....	38
Figura 2. 8 Geometría preferida para la abertura de alimentación en la garganta de alimentación.....	39
Figura 2. 9 Diseño adecuado de la tolva (izquierda) y diseño no adecuado de la toma (derecha).....	40
Figura 2. 10 Ejemplo de un alimentador Crammer	40
Figura 2. 11 Extrusor con calentadores y sopladores para enfriamiento.....	42

Figura 2. 12 Circulación de un fluido de transferencia de calor a través del husillo	43
Figura 2. 13 Ejemplo de un plato rompedor	44
Figura 2. 14 (Micron-rating contra el valor de malla para pantallas de malla de alambre)	44
Figura 2. 15 Cambiador de pantalla de placa deslizante típica	46
Figura 2. 16 Los tres elementos principales de una boquilla de extrusión	47
Figura 2. 17 Ejemplo de tubo en línea o tubería.....	47
Figura 2. 18 Ejemplo de un sistema de bloque de alimentación	48
Figura 2. 19 Ejemplo de un extrusor con un manejo directo.....	50
Figura 2. 20 Ejemplo de un extrusor con un manejo indirecto.....	51
Figura 2. 21 Ejemplo de un conjunto de cojinetes de empuje.....	52
Figura 2. 22 La bomba de engranajes.....	53
Figura 2. 23 Presión, rendimiento, y dimensión en función del tiempo.....	56
Figura 2. 24 Principio de un transductor con calibrador de tensión	57
Figura 2. 25 Principio del termopar.....	58
Figura 2. 26 Diferentes tipos de sondas de temperatura de fusión	60
Figura 2. 27 Sensor de temperatura de barril con muelle.....	60
Figura 2. 28 Temperatura indicada contra profundidad del termopar.....	61
Figura 2. 29 Temperatura indicada contra velocidad del aire	61
Figura 2. 30 Temperatura y energía contra el tiempo en el control on-off.....	62
Figura 2. 31 Temperatura y energía control el tiempo en el control proporcional.....	63
Figura 2. 32 Efecto de la resistencia térmica en control de temperatura P.....	64
Figura 2. 33 Efecto de la resistencia térmica en un control de temperatura PI	64
Figura 2. 34 Componentes de línea de extrusión de tubos típica	66
Figura 2. 35 Medidor de espesor de pared ultrasónico.....	67
Figura 2. 36 Componentes de una línea de extrusión para láminas o películas planas..	68
Figura 2. 37 Componentes de una línea de extrusión de películas moldeadas.....	70
Figura 2. 38 Ejemplo de una boquilla multi-colectora para láminas o películas.....	71
Figura 2. 39 Esquema de una operación de revestimiento por extrusión	72
Figura 2. 40 Esquema de laminación por extrusión	72
Figura 2. 41 Esquema de una línea de película soplada	73
Figura 2. 42 Línea de extrusión de mezcla típica	75
Figura 2. 43 Línea de extrusión de mezcla con formado en línea	75
Figura 2. 44 Componentes de línea de extrusión de perfiles.....	76
Figura 2. 45 Representación del polietileno	76
Figura 2. 46 Representación de la estructura de plásticos amorfos.....	78
Figura 2. 47 Representación de la estructura de plásticos semi-cristalinos.....	78
Figura 2. 48 Representación de la estructura de plásticos líquidos cristalinos	80
Figura 2. 49 Principales tipos de elastómeros	81
Figura 2. 50 Diferentes tipos de plásticos sintéticos	81
Figura 2. 51 Aparato de índice de fusión.....	83
Figura 2. 52 Cizallamiento de un fluido entre dos placas paralelas	84
Figura 2. 53 Viscosidad contra aproximación de la tasa de participación y aproximación de ley de potencia	85
Figura 2. 54 Efecto de la temperatura en la viscosidad de fusión	86
Figura 2. 55 Efecto de temperaturas de fusión no uniformes en la extrusión de láminas o películas.....	88
Figura 2. 56 Curvas de entalpía/temperatura para seis plásticos diferentes	89
Figura 2. 57 Tiempo de inducción para HDPE y EAA contra temperatura	90
Figura 2. 58 Volumen específico del HDPE contra la temperatura a varias presiones..	92

Capítulo 3

Figura 3. 1 Fases del proceso de diseño con múltiples retroalimentaciones e iteraciones	97
Figura 3. 2 Variables controlables en el desarrollo de un producto	98
Figura 3. 3 Vida de un producto	101
Figura 3. 4 Gestión del ciclo de vida del producto (PLM)	103
Figura 3. 5 Diferentes resultados del proceso de diseño	104
Figura 3. 6 Proceso de diseño mecánico.....	106
Figura 3. 7 Fase de descubrimiento del proceso de diseño mecánico	107
Figura 3. 8 Fase de planificación del proyecto del diseño mecánico	108
Figura 3. 9 Fase de la definición del producto del diseño mecánico.....	109
Figura 3. 10 Fase de diseño conceptual del proceso de diseño mecánico	110
Figura 3. 11 Fase del desarrollo de producto del proceso de diseño mecánico.....	111
Figura 3. 12 Fase del soporte técnico del producto en el proceso de diseño mecánico	112
Figura 3. 13 Filabot	118
Figura 3. 14 FilaFab	118
Figura 3. 15 Assembled Wee Filament Extruder	119
Figura 3. 16 Relación de las especificaciones de ingeniería	126

Capítulo 4

Figura 4. 1 Elementos básicos del diseño del producto.....	132
Figura 4. 2 Representación de los valores de medición de un tornillo extrusor.....	136
Figura 4. 3 Alternativa utilizada como tornillo extrusor	137
Figura 4. 4 Buen diseño (lado izquierdo) y mal diseño (lado derecho) de un tornillo extrusor	137
Figura 4. 5 Cañón del prototipo funcional (extrusor).....	138
Figura 4. 6 Soporte trasero y delantero del cañón extrusor	139
Figura 4. 7 Boquilla Mayor del sistema de extrusión.....	140
Figura 4. 8 Boquilla mayor para material ABS	140
Figura 4. 9 Tornillo canal recto utilizado como boquilla	141
Figura 4. 10 Segundo diseño boquillas diametrales	142
Figura 4. 11 Boquillas diametrales finales	142
Figura 4. 12 (a) Tolva soldada al cañón, (b) Problemas de alimentación de la tolva al cañón.....	143
Figura 4. 13 Conicidad base de tolva para una alimentación constante de material	143
Figura 4. 14 Unión tolva-base tolva	144
Figura 4. 15 Base tolva.....	144
Figura 4. 16 Motor eléctrico (Unidad extrusora).....	145
Figura 4. 17 Reductor de velocidad (29:1)	146
Figura 4. 18 Acople (reductor-husillo)	147
Figura 4. 19 Riel (Soporte del sistema de extrusión)	147
Figura 4. 20 Resistencias eléctricas tipo banda	148
Figura 4. 21 Cable de alta temperatura.....	148
Figura 4. 22 Controlador de temperatura (ON-OFF)	149
Figura 4. 23 Relé de potencia	149

Figura 4. 24 Conexión cambio de giro del motor.....	150
Figura 4. 25 Caja de controles	150
Figura 4. 26 Termopar tipo J	151
Figura 4. 27 Sistema de extrusión de termoplásticos	151
Figura 4. 28 Canal de enfriamiento	152
Figura 4. 29 Inclinación del canal de enfriamiento	153
Figura 4. 30 Tina de enfriamiento	154
Figura 4. 31 Base rodillos de presión	155
Figura 4. 32 Ejes rodillos de presión	156
Figura 4. 33 Rodillos de poliuretano	156
Figura 4. 34 Bases eje carrete.....	157
Figura 4. 35 Ajuste carrete para filamentos.....	158
Figura 4. 36 Eje carrete.....	158
Figura 4. 37 Acople motor-reductor juego de poleas	159
Figura 4. 38 Juego de poleas	160
Figura 4. 39 Soportes sistemas de enfriamiento, arrastre y enrollado.....	160
Figura 4. 40 Caja de controles del sistema de enfriamiento, arrastre y enrollado.....	161
Figura 4. 41 Circuito de variación de velocidad motor-reductor	161
Figura 4. 42 Sistemas de enfriamiento, arrastre y enrollado	162

Capítulo 5

Figura 5. 1 Moteado de los filamentos	167
Figura 5. 2 Filamentos colocados en la prensa.....	168
Figura 5. 3 Prensa para filamentos	168
Figura 5. 4 Sujeción de los filamentos en prensa fabricada	169
Figura 5. 5 Deformación máxima material fabricado.....	170
Figura 5. 6 Deformación máxima material comprado.....	170
Figura 5. 7 Probetas cilíndricas	171
Figura 5. 8 Cilindros moteados	171

Capítulo 6

Figura 6. 1 Determinación del costo de un producto.....	177
Figura 6. 2 Requerimientos básicos.....	179
Figura 6. 3 Requerimientos de rendimiento	180
Figura 6. 4 Requerimientos atractivos	180

Índice de Tablas

Capítulo 2

Tabla 2. 1 Tamaño de extrusora (diámetro del husillo).....	31
Tabla 2. 2 Componentes de un extrusor	35
Tabla 2. 3 Características generales de un tornillo extrusor estándar	36
Tabla 2. 4 Comparación de los diferentes filtros.....	45
Tabla 2. 5 Variaciones de velocidad de tornillo en diferentes velocidades de tornillo ..	49
Tabla 2. 6 Comparación de varios transductores de presión	57
Tabla 2. 7 Viscosidad de varios materiales	82
Tabla 2. 8 Valores de densidad para plásticos varios	91
Tabla 2. 9 Temperatura de transición vítrea y punto de fusión para varios plásticos	93

Capítulo 3

Tabla 3. 1 Consideraciones de diseño	99
Tabla 3. 2 Ponderación de los requerimientos del cliente	117
Tabla 3. 3 Análisis de la competencia	119
Tabla 3. 4 Comparación entre la competencia y nosotros	121
Tabla 3. 5 Especificaciones de ingeniería	122
Tabla 3. 6 Medición de los requerimientos contra las especificaciones de ingeniería.	123
Tabla 3. 7 Obtención de valores de importancia	125

Capítulo 5

Tabla 5. 1 Consumo energético extrusora	165
Tabla 5. 2 Consumo energético sistemas de enfriamiento y enrollado	166
Tabla 5. 3 Condiciones Iniciales Pruebas Compresión	171
Tabla 5. 4 Longitudes finales cilindros	172
Tabla 5. 5 Deformación cilindros	172
Tabla 5. 6 Módulo de rigidez promedio cilindros	172

Planteamiento del Problema e Hipótesis

Considerando que en el grupo de trabajo de Biomecánica de la SEPI unidad ESIME Zacatenco se desarrollan prótesis para seres humanos y animales basados en prototipos plásticos por impresión 3D, y que el principal material que utilizan estas impresoras 3D son rollos de filamento de ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y PLA (Ácido Poliláctido).

El presente trabajo considera que el costo de los rollos de 1 kilogramo de estos materiales que van desde los \$500 hasta los \$1500 pesos mexicanos dependiendo del proveedor es bastante elevado, como tal, 600 gramos de material equivalen aproximadamente a 240 metros de filamento, representando en un ejemplo de un cráneo a calidad estándar (capa a capa, 300 micras por capa) utiliza alrededor de 180 metros, lo cual representa una alta inversión la impresión de las diferentes piezas. Sin mencionar el tiempo de espera del surtido de los cartuchos de material.

Objetivo General

- Diseñar y fabricar un prototipo funcional para la producción de material reimprimible para su uso en impresoras 3D.

Objetivos Específicos

- Producir el material reimprimible en forma de filamento.
- Obtener filamentos con diferentes diámetros: 1.5, 1.75 y 3mm.
- Entregar el material reimprimible en forma de filamento en rollos de 1 kilogramo.

Metas

- Investigar los diferentes procesos de transformación de plásticos.
- Diseñar y fabricar un sistema de extrusión de termoplásticos.
- Diseñar y fabricar diferentes boquillas para obtener los diámetros solicitados.
- Incluir un sistema de enfriamiento y enrollado de los filamentos.



- Ofrecer un sistema de fácil uso y mantenimiento.
- Realizar el prototipo funcional a un bajo costo.

Justificación

De acuerdo a las problemáticas antes mencionadas y de que los costos de los sistemas de producción de estos materiales en forma de filamento que existen en el mercado son bastante elevados, y no cumplen satisfactoriamente con los requisitos del cliente se ha decidido elaborar un sistema que las resuelva.

Introducción

Los polímeros son considerados los materiales más importantes en el mercado, esto debido al tonelaje de producción y los productos que generan, el consumo mundial de plásticos en el año 2004 fue de aproximadamente 210 millones de toneladas y ha ido creciendo con el paso de los años.

Los podemos encontrar en diversas aplicaciones de la vida moderna, como en la industria automotriz, la industria de aparatos eléctricos, electrónicos, electrodomésticos, en la industria farmacéutica y agrícola, y en general, la industria manufacturera. Los polímeros tienen una amplia gama de propiedades, es considerado un material de diseño, su principal característica es la versatilidad.

Compite con el acero, el vidrio, la madera y muchos otros materiales.

La producción excesiva de estos materiales representa un problema para el medio ambiente, ya que no todos se reciclan. El sistema de producción diseñado y fabricado en este proyecto, tiene como fin reciclar polímeros para su nuevo uso en otras aplicaciones. El procesamiento de los polímeros implica operaciones similares a las utilizadas en el formado de metales y en los procesos para darles forma, pero, a diferencia de los metales, requieren mucha menor fuerza y energía para ser procesados.

Los polímeros se dividen en termoplásticos, termoestables y elastómeros, el sistema de producción que se muestra en el trabajo procesa termoplásticos, los cuales se pueden fundir y suavizar convirtiéndolos en un fluido.

El procesamiento de los termoplásticos se realiza mediante la extrusión. En la extrusión, que produce el mayor volumen de plásticos, las materias primas en forma de pellet, partículas o polvos termoplásticos se colocan en una tolva y se introducen en el barril de un extrusor de tornillo. El procesamiento se detalla más adelante dentro del contenido del trabajo.

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes de los polímeros, así como su evolución histórica.

De igual manera se presenta la evolución de su procesamiento mediante la extrusión y sus aplicaciones. También se puede observar la evolución de la maquinaria de extrusión a través del tiempo y de los materiales termoplásticos que procesan.

En el capítulo 2 se presentan las bases teóricas necesarias para sobrellevar el proyecto. Se muestra el proceso de extrusión de materiales termoplásticos, los componentes de una

maquinaria de extrusión, incluyendo recomendaciones y parámetros a considerar para realizar un buen diseño de la misma.

En el capítulo 3 se presenta el proceso de diseño mecánico, las fases del proceso de diseño mecánico aplicadas hacia el sistema de producción de material reimprimible, y los resultados obtenidos para su fabricación.

En el capítulo 4 se muestra la evolución de la fabricación del sistema de producción de material reimprimible, así como una breve descripción de cada elemento que conforma al sistema.

En el capítulo 5 se muestran los resultados obtenidos con la elaboración del proyecto, así como un análisis comparativo de las propiedades del filamento producido por nuestro sistema diseñado y fabricado, contra material fabricado por la competencia.

En el capítulo 6 se muestra que tan efectivo es el sistema de producción de materiales reimprimibles, esto en comparación con las especificaciones ingenieriles, que son los requerimientos del cliente.

También se muestran las conclusiones de este trabajo.

CAPÍTULO 1



1. Estado del arte

1.1 Introducción a los plásticos

Antes de que recibieran un nombre en específico, un grupo de compuestos químicos conocidos como plásticos eran ya conocidos desde la antigüedad. Algunos materiales como el asfalto, ámbar y la masilla de goma se mencionan en los registros iniciales de cada civilización [1.1].

En 1000 a.C., los olmecas encontraron diferentes aplicaciones del hule, que se extraía de árboles (Castillo elástica, según los españoles), que en forma de resina lechosa (látex, ver Figura 1.1), se utilizaba para impermeabilizar telas y canoas; también se empleaba como adhesivo, para preservar objetos, en emplastos para curaciones, como combustible para antorchas, y en la elaboración de pelotas.

Por su parte los rarámuris, una etnia del norte de México, manufacturaban pelotas de hule, material que extraían del guayule; el tratamiento que le daban a las pelotas era similar al que se da hoy a los materiales vulcanizados.



Figura 1. 1 Látex extraído de árboles

Posteriormente, los mayas y después los aztecas, lo utilizaban de la misma manera que los olmecas. Los aztecas lo conocían como ulli, que significa movimiento.

Los conquistadores de este pueblo, los españoles, lo llevaron a Europa, en donde no pasó de ser visto como mera curiosidad; y no fue sino hasta que llega a los ingleses cuando se le dio un uso práctico.

Otro material de importancia ofrecido por la cultura de nuestros antepasados a la humanidad fue el chicle (extraído del árbol chicozapote, ver Figura 1.2). En la Inglaterra de 1770, Priestley bautizó al hule como rubber por su propiedad de borrar los trazos de carbón que se hacían en el papel; mientras en Brasil, los naturales de la región lo conocían como cahutchu; y en Francia se le dio el nombre de caucho.

En otras civilizaciones se conocían resinas como el betún, la goma laca, el ámbar y la gutapercha. Quizá el primer plástico reforzado del que se tiene noticia fue el que se utilizó para fabricar cestas (de juncos calafateados de betún y pez) [1.2].



Figura 1. 2 Obtención de chicle del árbol chicozapote

1.2 Historia del procesamiento de los plásticos y los elastómeros

En 1845 Robert William Thomson patentó la idea inflar el caucho vulcanizado con aire pero su idea no produjo ningún impacto significativo durante su época y no fue sino hasta 1888 que John Dunlop produjo el neumático inflado con aire, lo cual fue un invento que llamó la atención del público y se comenzó a comercializar en grandes cantidades como se observa en la Figura 1.3.

En 1859, el inglés Joule demostró los principios termodinámicos de la elasticidad del hule.

El inventor inglés Alexander Parkes obtuvo un plástico semi-sintético al cual llamó parkesina, esto mediante la reacción de desperdicios de algodón (con alto contenido de celulosa) con ácido nítrico y sulfúrico, que mezclada con aceite de ricino y colorantes se puede moldear en cualquier forma, pero debido a su flamabilidad, no tuvo éxito comercial.



Figura 1. 3 Fabricación de neumáticos de caucho

En 1870, John Wesley Hyatt descubrió el celuloide, polímero basado en la celulosa, con el que fabricó bolas de billar.

La primera hipótesis de la existencia de macromoléculas fue desarrollada en 1877 por Friedrich A. Kekulé, quien indicó la posibilidad de que estas sustancias orgánicas naturales podrían estar constituidas por moléculas muy grandes y tener propiedades especiales [1.4].

Con base en esta hipótesis, en 1893, Emil Fisher sugirió que la estructura de la celulosa natural podría estar formada por cadenas constituidas por unidades de glucosa, mientras que los poli-péptidos serían largas cadenas de poli-aminoácidos asociadas, unidas.

El término polímero se utilizó por primera vez en 1886 por Marcellin Berthelot.

En 1894, Charles Frederick Cross y Edward John Bevan, patentaron el proceso para fabricar acetato celulosa, mientras en 1899, el químico Frederick Stanley Kipling estudió los compuestos órgano-silicio y sentó las bases para el desarrollo de los polímeros de silicón, trabajos que a la postre se verían reflejados en las labores de la empresa Dow

Corning, que en 1943 manufacturó polímeros de silicón. En esos mismos años, Arthur Smith patentó la resina de fenol-formaldehído para aislantes eléctricos [1.5].

En 1907, Leo H Baekeland perfeccionó el proceso de producción de la resina fenol-formaldehído, desarrollada años antes por Adolf von Baeyer (Premio Nobel de Química en 1905), y creó “la baquelita”, el primer plástico calificado como termofijo o termoestable, el cual puede ser fundido y moldeado mientras esté caliente, pero que no puede ser ablandado por el calor y moldeado de nuevo una vez que se haya fraguado.

Sergei Vasiljevich Lebedev fue el primero en estudiar la polimerización de los dienos; sintetizó en butadieno en 1910, y en 1914 estudió la polimerización de monómeros de etileno, desarrollo diversos métodos industriales para fabricar el hule (caucho) mutilo y poliisobutileno, que se convirtió en la referencia clave para todos los estudios sobre hule sintético. El ruso I. Ostromislensky patentó la polimerización del cloruro de vinilo para obtener PVC; ya en 1913 Fritz Klatte descubrió el acetato de polivinilo.

En la Primera Guerra Mundial (1914-1918), se intensificó el uso de celuloide y sus derivados, como el acetato de celulosa, que permitió aplicaciones a los vehículos aéreos militares del momento (dirigibles y la incipiente aviación). Un ejemplo de dirigible se observa en la Figura 1.4.



Figura 1. 4 Ejemplo de dirigible utilizado en la Primera Guerra Mundial

En 1918, Hans Johns desarrolló la reacción de la urea con el formaldehído, thiourea o resinas de melanina, y creó los termoestables mejor conocidos como aminoplastos.

En 1920, se crearon lacas para automóviles a partir del nitrato de celulosa; además, se utilizaron por primera vez los plásticos biodegradables, el poli-b-hi-droxibutirato (PHB). Descrito por primera vez por Maurice Lemoigne en 1923.

El alemán Hermann Staudinger formuló en 1924 la hipótesis de que el poliéster y el hule natural se constituían de estructuras químicas lineales, independientes y muy largas, a las que denominó macromoléculas.

Durante los años treinta, inició el desarrollo de la tecnología de los plásticos. En marzo de 1933, los químicos ingleses Reginald Gibson y Eric Fawcett, de la ICI, llevaron a cabo un experimento para reaccionar etileno con benzaldehído; el equipo básico utilizado manejó presiones de hasta 2000 atmósferas a 170 °C, y se creó un termoplástico al que llamaron poliestireno (PE). También se desarrolló en PVC, hules polisulfuros, fibras de acetato de celulosa, resinas alquidálicas, resinas de urea formaldehído, hules estireno-butadieno (SBR), etc.

En 1932, Rowland Hill y John Crawford, cada uno por su parte, desarrollaron el polimetacrilato de metilo (PMMA), y en 1933, Henkel patentó melanina para la fabricación del polímero melamina-formaldehído.

En 1936, Pierre Castan produjo un color ámbar, de baja fusión sólida, a partir de la reacción del bisfenol A con epiclorohidrina (la resina epoxi), que podía ser termoestable por reacción con anhídrido phtálico.

Otro de los plásticos desarrollados en Alemania durante la década de 1930, fue el poliestireno (PS), un material muy transparente comúnmente utilizado para vasos. Por su parte, el poliestireno expandido (EPS), una espuma blanca y rígida, se usa básicamente para embalaje y aislante térmico.

Du Pont creó la primera fibra artificial, el nylon; su descubridor fue el químico Julian Werner Hill. Hill descubrió que dos sustancias químicas como el hexametildiamina y el ácido adípico podían formar un polímero que bombeado a través de agujeros y estirados podían formar hilos que podían tejerse. Su primera aplicación fue en la fabricación de paracaídas (Figura 1.5) para las fuerzas armadas estadounidenses durante la Segunda Guerra Mundial, y se extendió rápidamente en la industria textil en la manufactura de medias y otros tejidos combinados con algodón o lana.

En 1931, Carothers generalizó el concepto de que la polimerización es una reacción que posee funcionalidad, capaz de procesos indefinidos, y describió los polímeros en relación con la repetición de sus unidades estructurales.



Figura 1. 5 Paracaídas fabricados por Du Pont

Al nylon le siguieron otras fibras sintéticas, como el orlón y el acrilán. El grupo de investigación de Carothers desarrolló el policloropreno (neopreno), poliésteres y poliamidas.

En 1939, Flory propuso el mecanismo de polimerización por reacción en cadena y explicó el mecanismo para producir ramificaciones en polímeros de vinilo lineales.

Entre 1930 y 1940, los alemanes Kunh, Guth y Mark derivaron modelos matemáticos para la configuración de los polímeros, y se desarrolló la teoría de la elasticidad del hule. Igualmente, Debye y Flory analizan en forma sistemática a los polímeros; Parkings desarrolla la teoría de polimerización en emulsión, y Weissenberg estudia esfuerzos normales en el flujo de los polímeros. En 1940, Du Pont presenta el poliacrilonitrilo (PAN) y Whitfield y Dickson sintetizan el polietilentereftalato (PET).

Después de la Segunda Guerra Mundial, la fabricación y la polimerización de los monómeros tuvo un gran impulso con el surgimiento de las resinas epoxi, el silicón, los polímeros fluorocarbonados, el ABS, el SBR, y con el desarrollo de los poliuretano, entre otros.

En 1941, el químico Roy J. Plunkett, investigador de Du Pont, al trabajar con refrigerantes de fluorocarbonos descubrió por accidente el politetrafluoroetileno (teflón).

Durante la década de 1950 aparece el polipropileno (PP). Otro paso significativo en el estudio de la química de polímeros ocurrió en 1953, con el descubrimiento de la polimerización estereoespecífica, por los investigadores Karl Ziegler y Giulio Natta.

Natta reconoció por primera vez la presencia de la regularidad estereoespecífica en los polímeros de vinilo.

La polimerización con catalizadores Ziegler-Natta tiene dos ventajas importantes: origina moléculas polímeras lineales y permite el control estereoquímico. En el mismo año, H. Schnell de Bayer, y D. Fox, de General Electric, produjeron de forma independiente el policarbonato (PC). Igualmente Szwarc desarrolló polímeros inteligentes y de condensación interfacial, y Norman Bier los lentes de contacto en plásticos.

En esa década, los plásticos comienzan a utilizarse en medicina, y en odontología se utilizan las prótesis dentales. En 1955, Du Pont patenta el copolímero de etileno acetato de vinilo en 1959, a instancias del trabajo de R. McDonald, lanza el poliformaldehído.

Entre 1960 y 1970 se desarrollan procesos y modelos matemáticos para las caracterizaciones de los polímeros. En la década de los sesenta, Robert Bruce Merrifield, de la universidad de Rockefeller de Nueva York, publicó los resultados de la investigación y el desarrollo del procedimiento que permitió la síntesis de grandes moléculas orgánicas (péptidos, enzimas, etc.) mediante un soporte o matriz polimérica entrecruzada.

También Du Pont utilizó poliamidas y General Electric patentó el óxido de polietileno (PPO); Unión Caribe, 3M e ICI produjeron polisulfona, polímeros de ingeniería.

Durante los años sesenta se descubrieron polímeros conjugados con propiedades semiconductoras, que antes solo se reconocían en materiales inorgánicos. Una aplicación de este desarrollo se dio en la fabricación de pantallas.

Hideki Shirakawa y Alan J. Heeger y Alan G. MacDiarmid publicaron sus resultados en materia de conductividad de polímeros orgánicos en 1977.

En 1965, Charles C. Price, de la Universidad de Pennsylvania, predijo que el éxito en la síntesis de los polímeros permitiría modificar plantas y algas para sintetizar alimentos, fibras y anticuerpos, o mejorar el crecimiento o las propiedades de plantas y animales e incluso las características del hombre mismo.

De igual manera en la década de 1970 se comenzaron a introducir los plásticos reforzados, lo que abrió camino para un rápido progreso en el uso de materiales compuestos, con propiedades y aplicaciones únicas, así como retos asociados con su producción.

En los años ochenta tuvo lugar la era dorada de los catalizadores metallocenos, los cuales solo tienen un centro activo en el que se unen entre sí las moléculas de partida, lo que permite un proceso limpio y ordenado de generación de cadenas moleculares prácticamente idénticas. Esto facilitó la mejora de las poliolefinas existentes y el desarrollo de otras nuevas. Starzewski, científico de Bayer Company, comenta que en el mundo de los polímeros los metallocenos son una auténtica revolución [1.6].

En esa misma década se dieron los polímeros biodegradables a partir de vegetales y frutos (ver Figura 1.6); y en la Universidad de Michigan se desarrolló el polihidroxibutirato (PHB). Por su parte, en el Instituto Politécnico Nacional se obtiene látex del fruto de la papaya.

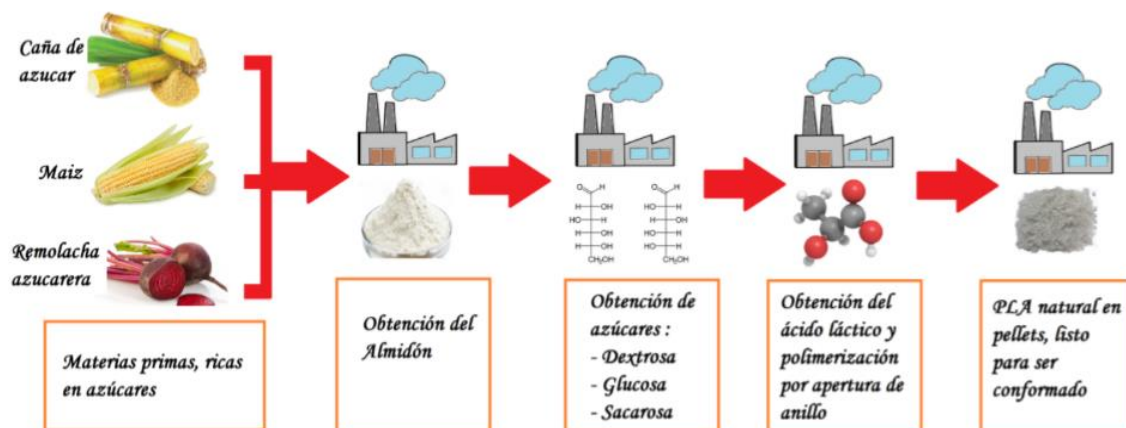


Figura 1. 6 Proceso de obtención del polímero biodegradable PLA

A principios de los años ochenta el físico Joseph Vacante y el ingeniero químico Robert Langer introdujeron la tecnología de lo que hoy se conoce como tejidos artificiales.

Al respecto, la piel artificial desarrollada en el laboratorio en estructuras formadas por largas cadenas de moléculas denominadas polímeros pueden curar las heridas de pacientes con úlceras provocadas por la falta de riego sanguíneo.

La “ciclosporina A” provocó una oleada de transplantes y sentó las bases para los grandes avances actuales en “ingeniería de tejidos”, como denominan los científicos a la construcción de órganos artificiales completos.

En la década de 1990 se utilizó la nanotecnología para el desarrollo de los polímeros. Estos materiales se usan actualmente en diferentes áreas industriales. El impacto comercial más importante se ha reflejado en el área biomédica. La nanotecnología y los polímeros biodegradables crecen en aplicaciones cada día.

En 2000, Shirakawa, Heeger y Mac Diarmid recibieron el premio Nobel de Química por el descubrimiento y el desarrollo de polímeros conductores. Antes se pensaba que por sus características, los plásticos no conducían electricidad; hoy se utilizan como aislantes de conductores eléctricos. Las principales aplicaciones incluyen su uso como materiales antiestáticos para películas fotográficas o como blindajes para pantallas de computadoras contra la radiación electromagnética.

Por su parte en el 2002, Fenn, Tanaka y Wulthrich fueron galardonados con el Premio Nobel de Química por el desarrollo de los métodos para los análisis de la identificación y de la estructura de macromoléculas biológicas; mientras en 2003, la compañía Du Pont fue premiada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés) por su innovador desarrollo tecnológico en polímeros, al utilizar materiales biodegradables, por ejemplo, con el uso de maíz con el cual se desea sustituir los procesos convencionales basados en el petróleo, el polímero desarrollado fue el sorona (PDO).

Los nuevos descubrimientos en nanotecnología promocionan materiales que sustituyen órganos del cuerpo, materiales que puedan hacer las veces de tejidos nerviosos y de tejidos musculares, entre otros. Al respecto, en 2005 se introdujeron músculos artificiales basados en nanotubos de carbono y polímeros conductores. A cargo de investigadores del Nano Tech Institute de la Universidad de Texas [1.7].

1.3 Historia de la extrusión de polímeros

El proceso más importante y de gran variedad utilizado en la actualidad es por supuesto, el que se realiza al forzar una mezcla plástica a través de un dado y el significado de esto es la extrusión.

El primer extrusor del que se tiene noticias fue desarrollado por Arquímedes (287-212 a.C.). En escrituras del siglo I antes de Cristo, Diodorus mencionó el uso del tornillo de Arquímedes (Figura 1.7) en la irrigación del delta del río Nilo [1.8].

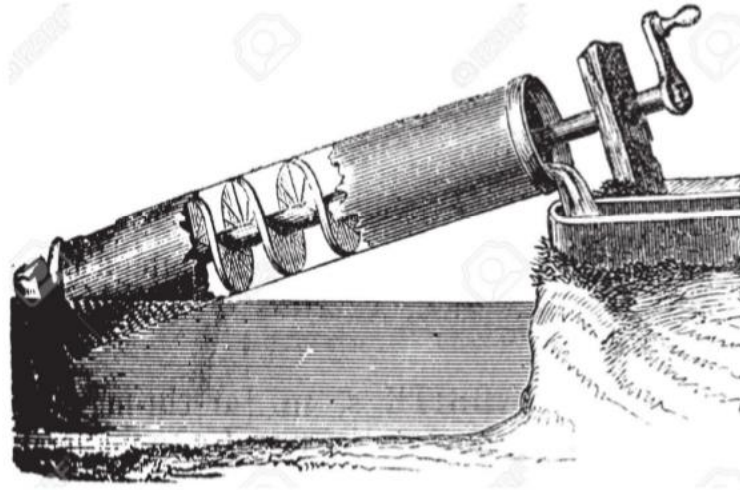


Figura 1. 7 Tornillo de Arquímedes utilizado para bombear agua

El tornillo de Arquímedes presenta 3 modelos:

1. Un cilindro lleno de agua en el cual encierra una hélice.
2. Una barra o tubo formado helicoidalmente alrededor de su eje.
3. Una hélice girando libremente dentro de un cilindro fijo.

Arquímedes, de acuerdo a la historia, ideó este tornillo para remover o bombear agua contenida en un bote (barco). Este diseño se aplica en la actualidad en varias industrias y es realmente idéntico. Hoy en día en principio bombea una mezcla plástica a través de un dado [1.9].

Inicialmente el uso de la extrusión se limitaba a mezcla y dar forma a macarrones y cereal granulado (ver Figura 1.8). En 1779 ya se empleaba un sistema manual para el procesado de pasta como se muestra a continuación en la Figura 1.9. En 1860-1863 aparecen las primeras producciones industriales de cereales en Estados Unidos.

En 1869 en Inglaterra Fellows y Baste desarrollaron el primer extrusor continuo de doble husillo conocido. Este equipo se usó inicialmente para la elaboración de productos de tipo salchicha.

En 1894 Will Keith Kellogg inventa los primeros “corn flakes” que empezaron a comercializarse de forma generalizada a partir de 1906.

En 1900-1902 se creó la primera prensa-extrusora en continuo para la obtención de aceite de linaza. En 1930 se desarrolló el primer extrusor de husillo único para la producción continua de pasta. En 1931 el alemán Heidrich elaboró el primer tornillo extrusor (ver Figura 1.10), específicamente para la transformación de termoplásticos.

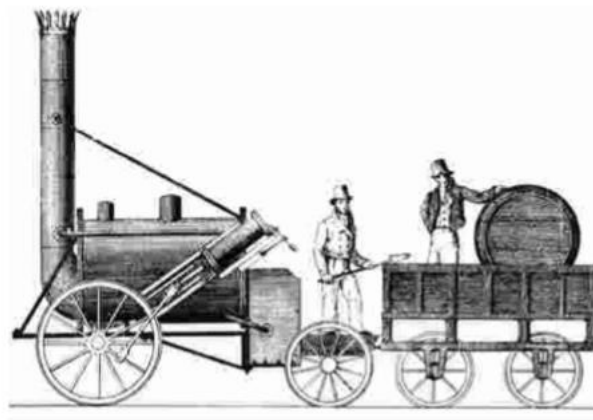


Figura 1. 8 Máquina de producción de cereales

La primera máquina para la extrusión de materiales termoplásticos fue construida alrededor de 1935 por Paul Troester en Alemania. Antes de esta fecha, las extrusoras eran principalmente usadas para la extrusión de caucho [1.10].

Después de 1935, el principio básico de extrusora de doble tornillo (ver Figura 1.11) para termoplásticos fue concebido en Italia por Roberto Colombo de LMP. Él trabajaba con Carlo Pasquetti en la mezcla de celulosa de acetato. De igual manera en 1935 Ferngren patentó el proceso de extrusión de un tubo de mezcla plástica dentro de un molde cerrado, ver Figura 1.12.

En 1937 Ferngren y Kopitke fabricaron y desarrollaron la primera práctica para el moldeo por soplado y utilizaron la inyección por pistón.

En 1938 BASF fabricó máquinas de extrusión soplado en Europa.

En 1939 PLAX opera máquinas moldeadoras por soplado para fabricar 25,000 piezas sopladas por día.



Figura 1. 9 Sistema manual de fabricación de pasta

En 1939 los primeros rizados de maíz fueron extrusionados.

A lo largo de 1940 se desarrollaron y refinaron diferentes extrusores de único husillo para la obtención de aceites a partir de semillas oleaginosas, sustituyendo muchas de las menos eficientes prensas hidráulicas obtenidas para este propósito.

En 1942 OWENS Illinois patenta un proceso de inyección por soplado con extrusores automáticos dentro de la pieza.



Figura 1. 10 Tornillo extrusor convencional

El primer análisis detallado sobre la extrusión estaba relacionado con el transporte de materiales derretidos o el proceso de bombeo. La publicación más antigua fue un artículo anónimo [1.11], el cual es erróneamente acreditado a Rowell y Finlyson, quien escribió un artículo con el mismo título en la misma revista seis años después [1.12].



Figura 1. 11 Extrusora de doble tornillo

Alrededor de 1950 estudios científicos del proceso de extrusión comenzaron a aparecer con una mayor frecuencia. A mediados de los cincuentas el primer estudio cuantitativo del transporte de sólidos fue publicado por Darnell y Mol [1.13].

Entre 1950 y 1960 se desarrollan las primeras instalaciones de comida extrusionada para animales, basada en producto de base almidón gelatinizado.

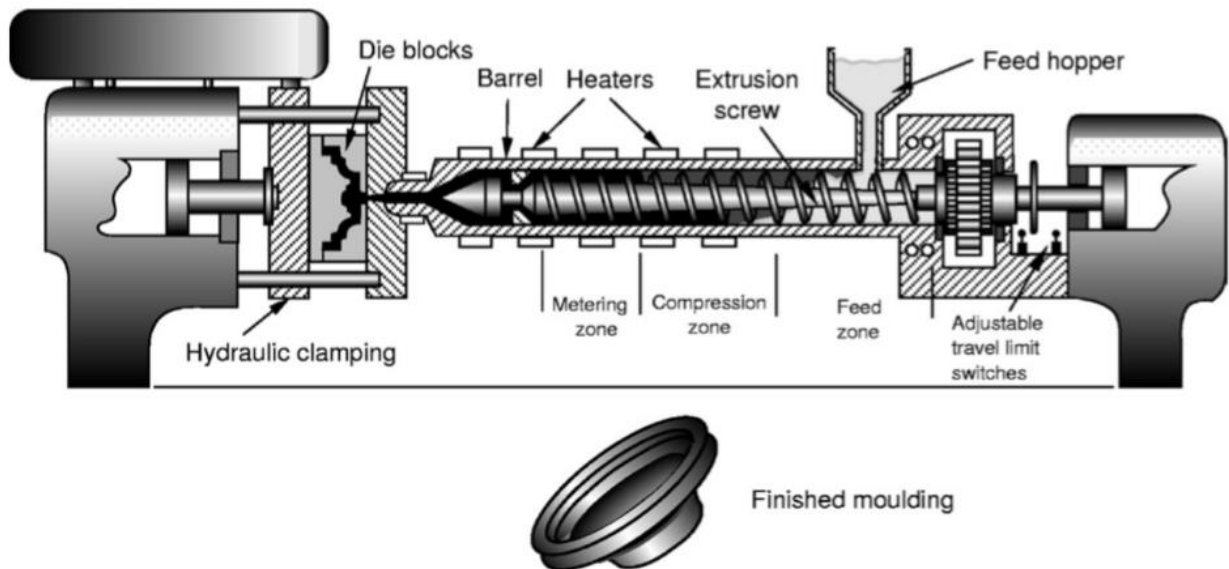


Figura 1. 12 Proceso de extrusión de una mezcla plástica dentro de un molde cerrado

En 1951 Anderson Company desarrolla un sistema de pre-prensado de semillas oleaginosas de alto contenido de aceite y diferentes extrusoras de husillo simple.

Una conferencia importante en el desarrollo de teorías fue la reunión 122 de ACS en 1953. En este simposio, miembros poliquímicos del departamento de E.I. DuPont de Nemours & Co. presentaron los últimos desarrollos en la teoría de extrusión. Estos miembros, Carley, Strub, Mallouk, McKelvey, y Jepson fueron honrados en 1983 por la SPE división de extrusión por el desarrollo original de teorías de extrusión.

A mediados de los sesentas el primer estudio cuantitativo de fundición fue publicado por Tadmor [1.14], basado en estudios más antiguos cualitativos de Maddock. Por consecuencia no fue hasta 1965 que el proceso completo de extrusión, desde la tolva de alimentación hasta el dado, pudo ser descrito cuantitativamente. (Ver Figura 1.13).

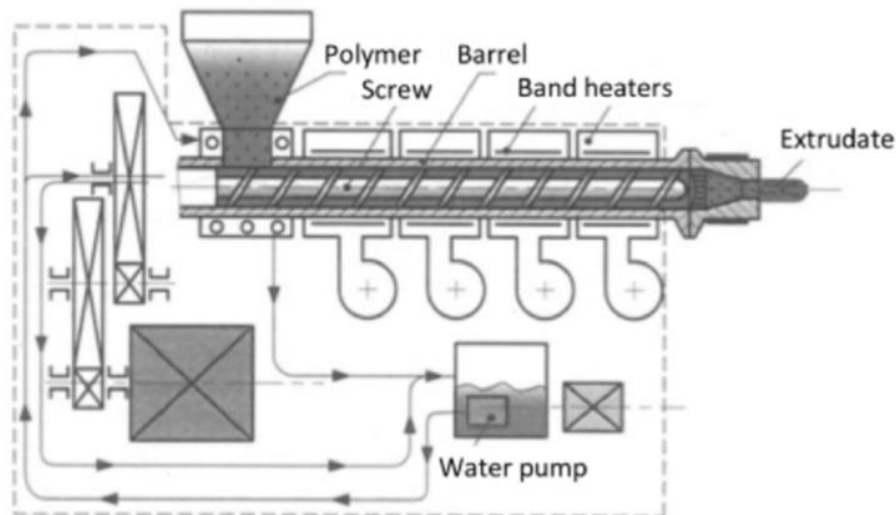


Figura 1. 13 Proceso completo de extrusión

En 1970 surgieron nuevas generaciones de extrusores de simple y doble husillo.

Otro desarrollo interesante en la tecnología de la extrusión práctica ha sido el concepto de extrusión por alimentación controlada. En este tipo de extrusión el funcionamiento es determinado por la zona de transportación de sólidos del extrusor [1.15].

A partir de los 80's las empresas estadounidenses se interesan en extrusores de doble husillo. De igual manera se da la proliferación de uso de los extrusores para estudios relacionados con biopolímeros y nutraceuticos (ver Figura 1.14).

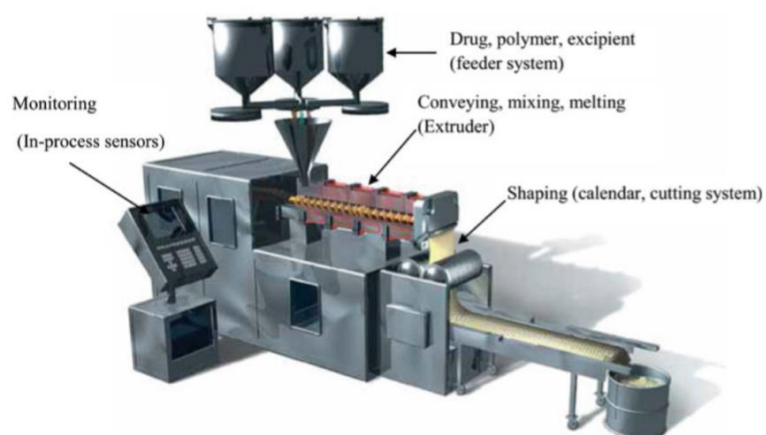


Figura 1. 14 Representación esquemática típica de una extrusora de doble husillo farmacéutica

1.4 Historia de la impresión en 3D

1.4.1 ¿Qué es la impresión 3D?

La impresión en 3D es una forma de fabricación aditiva. La fabricación aditiva comienza con nada y se acumulan partes colocando el material en una especie de plataforma de construcción. Una gran cantidad de fabricación convencional es sustractiva, lo que significa que se comienza con un bloque de material (como el metal o madera) y después se procede a cortar el material hasta que se obtenga la parte que se desea [1.16].

Algunos tipos de fabricación aditiva han existido desde hace mucho tiempo. Un ejemplo muy sencillo es la pared de ladrillo (ver Figura 1.15). Una pared de ladrillo se construye un ladrillo a la vez, con la adición de un poco de mortero, sobre la base de cualquiera de un plan formal elaborado por un arquitecto o ingeniero.

Todos los pasos que se ve en la impresión en 3D están ahí en la construcción de un muro de ladrillo: el diseño de un producto final deseado, la planificación de la forma de organizar las capas de modo que la estructura no se va a caer, mientras que se está construyendo, y luego ejecutar el producto de una sola capa a la vez. Las impresoras 3D añaden los elementos de control robótico a este proceso de construcción de un objeto de una capa a la vez.



Figura 1. 15 Pared de ladrillo

La impresión en 3D parece una tecnología avanzada, pero muchos organismos han estado haciendo el equivalente durante millones de años. Algunas de muchas impresoras 3D de la naturaleza incluyen los moluscos que nos dan conchas marinas (Figura 1.16).

A medida que se hacen más grandes, los moluscos comienzan a añadir carbonato de calcio para su capa exterior, lo que da a los animales en crecimiento más espacio en el interior. Si se observa detalladamente las conchas marinas, se logrará ver las líneas de crecimiento.



Figura 1. 16 Conchas marinas producto natural “Impresión 3D”

A medida que se hace más largo y más ancho el caparazón se vuelve más grueso, también, para que no se convierta en frágil. La cáscara se secreta y se condensa a partir de materiales en el entorno de la criatura en lugar de ser establecidas con una boquilla como las impresoras 3D convencionales.

Del mismo modo, muchas formaciones de roca en el suroeste de los Estados Unidos se establecieron cuando los antiguos océanos acumularon capas de cieno. La piedra arenisca resultante (Figura 1.17) ya se ha tallado de distancia por las raíces de viento, la lluvia y las plantas.



Figura 1. 17 Ejemplo natural de impresión 3D en el Valle de la Cueva, Parque Nacional Zion

Cuando la gente ve un proceso natural (como los resultantes de las conchas o la piedra arenisca), unos pocos podrían haber sido inspirados para crear un proceso de fabricación que funcionara de la misma manera.

El auge de la impresión en 3D actual es en realidad una evolución y convergencia de las tecnologías y técnicas que han estado alrededor por un tiempo.

Las impresoras 3D han existido desde hace unos 30 años, pero nunca se sabrá con exactitud a partir de qué momento se dio la explosión de las impresoras 3D y los usos para ellas. La impresión en 3D realmente permite algunas nuevas formas de pensar en la creación de productos, particularmente los personalizados.

Su flexibilidad y la pura magia de ver algo construido de la nada han capturado la imaginación del público, y está claro que las aplicaciones sorprendentes continuarán a aparecer en los años venideros.

Lo que es nuevo es la disponibilidad de las impresoras 3D de bajo coste (sus precios van desde unos pocos cientos a unos pocos miles de dólares). Estas máquinas de menor costo tienen la promesa de hacer la parte delantera del proceso de desarrollo de productos mucho más eficiente y permitiendo la fabricación distribuida.

1.4.2 Tipos de impresoras 3D

En términos generales, hay tres categorías de fabricación aditiva: unión selectiva, la solidificación selectiva, y la deposición selectiva. Por lo general, la gente se refiere a estas tecnologías por parte de los acrónimos SLS, SLA, y DLP.

Las tecnologías de unión selectivos hacen un objeto impreso en 3D a partir de un polvo (metal y yeso son materiales comunes) mediante la aplicación de agentes de unión o calor para fundir las partículas del polvo juntos.

Un ejemplo es SLS (sinterización selectiva por láser) en el que se utiliza un láser para fundir una capa de material en polvo a la vez. La primera capa se fusiona a una plataforma,

y luego otra capa delgada de polvo se añade por encima de la primera, y así sucesivamente conforme el modelo se construye.

El polvo actúa como un medio de soporte para la impresión, de modo que las impresiones muy complejas y delicadas pueden ser creadas. El polvo fino puede ser difícil de tratar, por lo tanto las impresoras tienden a ser caras. En la Figura 1.18 podemos observar un prototipo de impresora de sinterizado selectivo por láser que data de 1986.

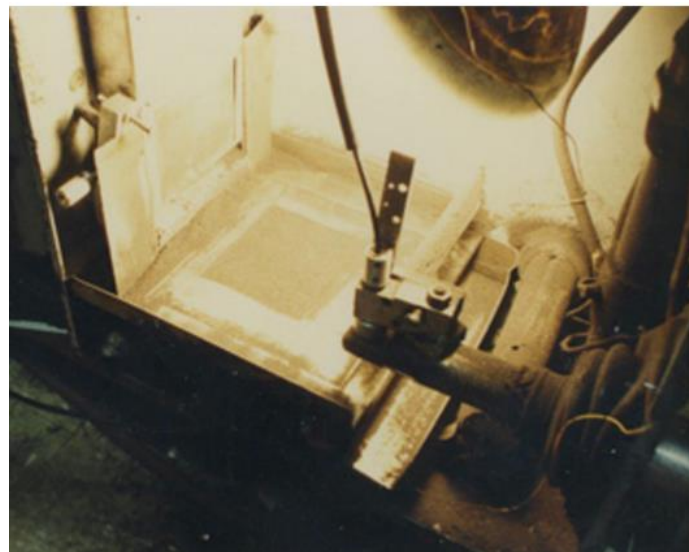


Figura 1. 18 Prototipo de impresora SLS

La solidificación selectiva hace un objeto sólido a partir de una tina de líquido mediante la aplicación selectiva de energía para solidificar el líquido una capa a la vez. Una vez más, típicamente se crea una primera capa en algún tipo de plataforma de construcción, que a continuación se mueve hacia abajo en el líquido (o, en algunos casos, una plataforma de construcción se detiene fuera del líquido).

Un ejemplo es la estereolitografía (SLA), que utiliza la luz ultravioleta para solidificar una resina con un láser, o, a veces un generador de imágenes de proyección digital de luz (DLP), para endurecer una capa entera a la vez.

De cualquier manera, el modelo a menudo necesita ser curado después, y la resina puede ser difícil de tratar. impresoras de escritorio SLA están empezando a entrar en el mercado ahora, pero son más caras que las impresoras basadas en filamentos.

Las técnicas de deposición selectiva solamente colocar el material en donde se desee. Las impresoras basadas en filamentos funcionan de esta manera, mediante la fusión de un filamento y luego la colocación del plástico fundido para crear un objeto con precisión.

1.4.3 Impresoras 3D robóticas

Charles W. (Chuck) Hull es generalmente acreditado por el desarrollo de la primera impresora 3D robótica de trabajo en 1984, que fue comercializada por 3D Systems en 1989. Estas máquinas eran sistemas SLA, y muchas grandes máquinas comerciales siguen utilizando esta tecnología. Otro trabajo temprano se estaba llevando a cabo en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) y la Universidad de Texas.

Una ráfaga de patentes siguió a principios de 1990 para diversos sistemas basados en energía. Estos sistemas rociaban un aglutinante de una manera muy precisa en la superficie de una tina de polvo para crear capas (de nuevo, con una plataforma hacia abajo en movimiento). Alternativamente, un láser puede ser usado para fundir el polvo junto (en SLS). Las patentes SLS se convirtieron en la base de Z Corp.

Mientras tanto, S. Scott y Lisa Crump patentaron el modelado por deposición fundida (FDM por sus siglas en inglés) en 1989 y co-fundaron la industria de la impresora Stratasys, Ltd. Esta tecnología (más genéricamente denominado FFF, para la fabricación de filamentos fusionados) alimenta un filamento de plástico en un extrusor calentado y después depone precisamente el material. Cuando las patentes clave expiraron en 2005, esta tecnología se convirtió en la base del movimiento RepRap.

1.4.4 Movimiento RepRap

Cuando algunas de las principales patentes expiraron en el método de impresión FDM, Adrian Bowyer, catedrático de ingeniería mecánica en la Universidad de Bath en el Reino Unido, pensó que podría ser posible construir una impresora 3D de filamento-extrusión que podría crear las piezas para más impresoras 3D (además de los componentes electrónicos de hardware y tiendas de fácil acceso.)

Por otra parte, Bowyer publicó los diseños para las partes de su impresora 3D en Internet y animó a otros a mejorarlos y a su vez a enviar las versiones mejoradas. Él llamó a este concepto de código abierto el proyecto “RepRap” y obtuvo cierta financiación inicial de Ingeniería del Reino Unido y Ciencias Físicas de Investigación.

El equipo de Bowyer llamó a su primera impresora “Darwin” la cual se puede observar en la Figura 1.19 (publicada en marzo de 2007) y a la siguiente “Mendel”, publicada en 2009, ver Figura 1.20.

En la República Checa en 2010, Josef Prusa dio a conocer un diseño que ahora se llama la Prusa Mendel. Simplificó el diseño original de Mendel, y después de eso se produjo una aceleración en los diseños de las impresoras mientras que la gente intentaba los diseños de código abierto, los modificaron, y los publicaban.

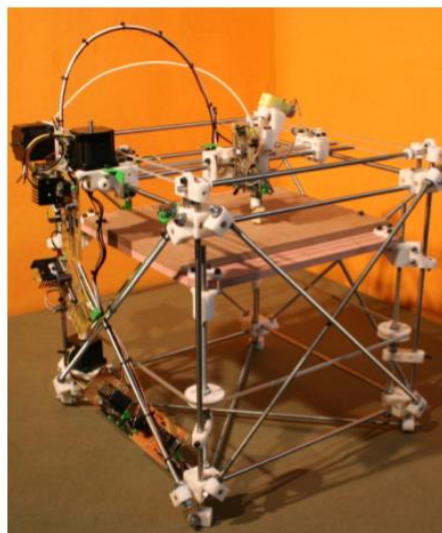


Figura 1. 19 Versión RepRap 1.0 “Darwin”

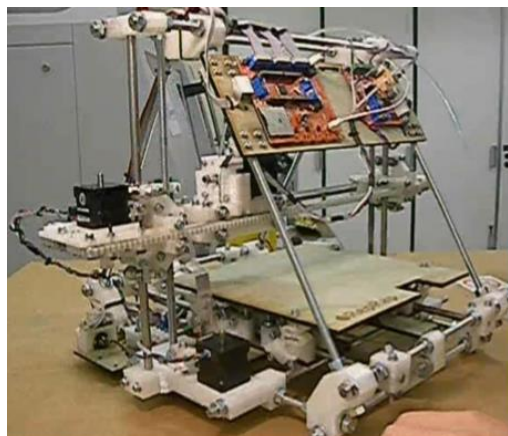


Figura 1. 20 Versión RepRap 2.0 “Mendel”

Luego hubo una transición de archivos para hacer piezas de la impresora descargables para hacer los kits enteros de impresora disponibles para la compra. Uno de los kits más conocidos fue el MakerBot magdalena CNC, que se comenzó a enviar en abril de 2009. Fue reemplazado por el MakerBot Cosa-O-Matic en 2010. Con el tiempo, MakerBot fue comprada por Stratasys en 2013.

Para el año 2009, el desarrollo de la impresora 3D-dividió en gran medida en dos bandos: los que abastecen, impresoras industriales de gran tamaño (normalmente con una tecnología patentada) y una gran red informal de personas que trabajan en RepRap de código abierto o impresoras de consumo basadas en filamentos similares.

1.4.5 Habilitación de tecnología

El Arduino y los repositorios de código de fuente abierta tuvieron un enorme impacto en el ecosistema 3D-impresión.

1.4.5.1 El Arduino

En 2005 se introdujeron el micro controlador Arduino de código abierto y su entorno de desarrollo integrado (IDE), basado en un proyecto en el Interaction Design Institute Ivrea, Italia. Los Arduinos fueron diseñados para tener entornos de hardware / software fáciles de programar para proyectos de estudiantes, aficionados, y similares. Bajo costo, código abierto, y su ecosistema de hardware asociado permitió el desarrollo de sistemas fáciles de lo que podría haber sido de otra manera los sistemas de control de máquinas prohibitivamente complejas.

1.4.5.2 Repositorios de código de fuente abierta

Github (<https://github.com>) lanzado en 2008. Se trata de una plataforma que permite a los desarrolladores de software trabajar juntos; cuentas para las personas que trabajan en proyectos de código abierto son gratuitos.

También existen muchos wikis-sitios web para el intercambio de información entre los miembros de la comunidad (incluyendo el wiki RepRap en <http://reprap.org>). La

tecnología wiki es mucho más antigua pero ha sido una parte crucial del desarrollo de la infraestructura para la impresión en 3D de los consumidores.

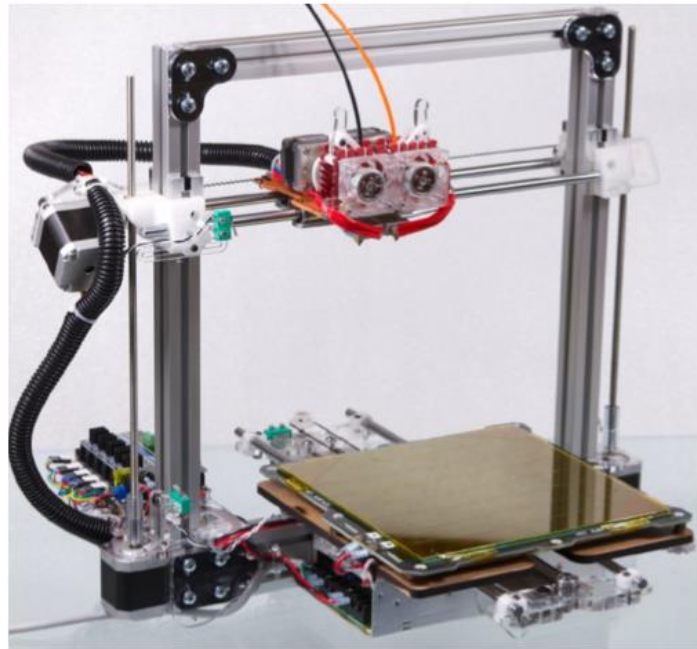


Figura 1. 21 Impresora cartesiana 3D típica

1.5 Historia de los materiales utilizados para la impresión en 3D

Los materiales comúnmente utilizados para la impresión 3D son los termoplásticos. Un material termoplástico es un plástico que, a temperaturas relativamente altas, se vuelve deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente.

Las impresoras 3D utilizan un filamento el cual es depositado en una pequeña extrusora la cual se encarga de fundir el filamento y lo deposita una capa a la vez. El filamento es un hilo grueso hecho de una variedad de materiales tales como plásticos, nylon y elastómeros, típicamente en carretes de un kilogramo (plástico) o de una libra (nylon).

La Figura 1.22 muestra un carrete de nylon de una libra en la parte superior y un carrete de un kilo de PLA en la parte inferior.

Los termoplásticos más utilizados en la impresión 3D son el ABS y el PLA. Estos dos son los materiales compatibles con casi todas las impresoras hogareñas que se venden.



Figura 1. 22 Carretes de Nylon y PLA

- **ABS:** Es el plástico que se suele encontrar en electrodomésticos y juguetes como el Lego. Es muy duro y resiste altas temperaturas. Es fácil pintar sobre él, o pegar diferentes partes. Eso sí, es más difícil de usar para un novato y además requiere que la impresora tenga una superficie capaz de calentarse a altas temperaturas.
- **PLA:** Es un termoplástico de origen natural, cuya ventaja es la gran cantidad de colores disponibles y que permite impresiones más rápidas. Además no emite gases perjudiciales al salir del extrusor (a diferencia del ABS). Es el material ideal para empezar en la impresión en 3D, y para objetos que no requieran mucha resistencia (como adornos).

Existen diferentes materiales alternativos al ABS y PLA, hay otros materiales más raros que permiten lograr texturas especiales o flexibilidad, que funcionan en la mayoría de las impresoras, algunos de ellos son:

- **Laybrick:** Es una mezcla de yeso con plástico que permite crear piezas con una textura similar a la piedra, que a simple vista no parecen plástico. Puede tener textura lisa o rugosa, y es fácil pintar sobre él. Ver Figura 1.23.

- Laywood-D3: Es una mezcla de madera con plástico para imprimir objetos que realmente se vean como de madera. Incluso simula efectos como los anillos de la madera o el olor característico. Ver Figura 1.24.



Figura 1. 23 Filamento Laybrick

- Soft PLA (Flexible PLA): Este filamento gomoso permite imprimir objetos flexibles, a los cuales se les aplica estrés y no se rompen. Por ejemplo puede usarse para imprimir calzado o ruedas de otros objetos.
- Nylon: Es una alternativa clásica al ABS y PLA, pero más resistente y flexible, además de natural y resistente al agua. Completando sus ventajas, es reutilizable.
- Bendlay: Este filamento es flexible (como el Soft PLA) pero con la particularidad de ser transparente. Es seguro para el contacto con la comida, así que puede usarse para recipientes o botellas [1.17].



Figura 1. 24 Filamento Laywood



Figura 1. 25 Presentación de rollos de filamentos para impresoras 3D típica

1.6 Sumario

Dentro del contenido de este capítulo se muestra la historia del procesamiento de los plásticos, la evolución de la maquinaria utilizada para su fabricación y de los diferentes materiales utilizados en la impresión 3D. A continuación se muestra información sobre los procesos de extrusión de plásticos y de todo el equipo de maquinaria necesario para su transformación.

1.7 Referencias

- [1.1] Griskey, R., *Polymer process engineering*, Ed. Springer, pp. 2-3, 1995.
- [1.2] Morales, J., *Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos*, Ed. Prentice Hall, pp. 35-46, 2010.
- [1.3] Kalpakjian, S., *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Ed. Pearson, pp. 494-495, 2014.
- [1.4] Benfey O.T., *August Kekulé and the Birth of the Structural Theory of Organic Chemistry in 1858*, Journal of Chemical Education, pp. 21-23, 1958.
- [1.5] Nicholson J.W., *The Chemistry of Polymers*, 3rd ed. University of Greenwich, pp. 25-33, 2006.
- [1.6] Slater, S. C.; Gerngross, T. U., *How Green are Green Plastics?*, 2000.
- [1.7] Gullapalli, S.; Wong, M.S., *Nanotechnology: A Guide to Nano-Objects, chemical engineering progress*, Ed. CEP, pp.28-32, 2011.
- [1.8] Oleson, J., *Handbook of Ancient Water Technology*, Ed. Leiden, pp. 217-302, 2000.
- [1.9] Kantert, P.J., *Manual for Archimedean Screw Pump*, Ed. Hirthammer Verlag, 2008.
- [1.10] Kaufman, M. *Plastics & polymers*, pp. 37, 1969.
- [1.11] N.N., *Engineering*, 114,606, 1922.
- [1.12] Rowell, H.S., Finlayson, D., *Engineering*, pp. 249-250, 385-387, 1928.
- [1.13] Darnell, W.H., Mol, A.J., *SPE Journal*, pp.12-20, 1956.
- [1.14] Tadmor, Z., *Polymer Engineering Science*, pp. 1-6, 1966.
- [1.15] White, J.L., *Twin Screw Extrusion. Technology and Principles*, Ed. Hanser, 1990.
- [1.16] Floyd, K., *Printing in plastic*, Ed. Technology in action, pp. 1-5, 2011.
- [1.17] Horvath, J., *Mastering 3D printing*, Ed. Apress, pp. 3-20, 77-87, 2014.

CAPÍTULO 2



2. Marco Teórico

2.1 Extrusión

Extruir significa expulsar. Cuando un material es extruído, es forzado a través de una apertura llamada dado. Por ejemplo, cuando extraemos pasta de dientes de un tubo, forzamos a la pasta a salir por un orificio más pequeño, este proceso se conoce como extrusión.

Cuando un material alimenta al extrusor por la tolva, es atrapado por el husillo y empujado a través del cilindro, donde el calor generado por la fricción y el proporcionado por las resistencias eléctricas colocadas como cinchos en la parte exterior del cañón, se plastifica lo suficiente para continuar su viaje hasta la boquilla.

De esta manera, la energía para plastificar el material proviene mayormente del motor, el cual hace girar al husillo. En la mayoría de los casos, se cubre la parte exterior del cañón para mantener la temperatura constante. El husillo o tornillo extrusor, cuando gira, trata de desenroscarse y salir del cañón hacia atrás. No puede irse porque un cojinete grande lo mantiene en su posición. De esta forma, el empuje del tornillo provoca que el material salga a través del cabezal, donde se encuentra la placa rompedora y el dado o motriz. Todo el cabezal actúa como una resistencia al flujo. El husillo debe trabajar para empujar el material (se requiere de una gran fuerza para hacer girar el tornillo).

Cuando el material plastificado sale de la boquilla (dado, matriz, etc.), toma la forma de esta, y así se obtiene el producto. Una rendija larga hace una película plana o una lámina, una abertura circular hace tubos, muchos agujeros pequeños hacen filamentos, etc. Ya fuera del cabezal, el plástico se enfría (con aire, agua o contacto con rodillos metálicos), se estira, y al fin se enrolla o se corta en las dimensiones requeridas.

En general, la extrusión es uno de los procesos continuos con los que cuenta la industria de transformación de plásticos; de esta manera, se obtienen productos acabados o semi-acabados en régimen continuo [2.1].

2.2 Maquinaria de extrusión

2.2.1 ¿Qué es una extrusora?

Una máquina que es utilizada para extruír un material es llamado extrusor. Muchos materiales pueden ser extruídos, incluyendo arcilla, cerámicos, comida, metales, y por supuesto, plásticos.

La función principal de una extrusora es desarrollar la presión suficiente en el material para forzarlo a través de un dado. La presión necesaria para forzar a un material a través de un dado o boquilla depende de la geometría del dado, las propiedades de flujo del material, y la tasa de flujo. Básicamente, una extrusora es una máquina capaz de desarrollar presión. En otras palabras una extrusora es una bomba. Una extrusora de plásticos es una bomba para materiales plásticos. Sin embargo, esto no puede ser confundido con una extrusora de plastificación, la cual es una máquina que no solo se encarga de extruír el material sino de plastificar, o de fundir, el material.

Una extrusora de plastificación es alimentada con partículas plásticas sólidas y entrega plástico fundido hacia el dado. De otra manera, una máquina que extruye plástico fundido sin derretirse es llamada extrusora de fundición-alimentación.

Las extrusoras son las máquinas más comúnmente usadas en la industria del procesamiento de plásticos. Las extrusoras no son usadas solamente en operaciones de extrusión, la mayoría de operaciones de moldeo también usan una extrusora, por ejemplo el moldeo por inyección y el moldeo por soplado. Esencialmente cada plástico ha pasado por una extrusora en un punto o en otro, en muchos casos, más de una vez [2.2].

Hanson propone siete especificaciones básicas para la selección de un extrusor:

1. Determinación de las resinas a procesar.
2. Definición del propósito final de la extrusora.
3. Requerimientos de alimentación.
4. Identificación de los elementos complementarios del proceso.
5. Identificación de los equipos auxiliares para el manejo de materias primas.

6. Especificaciones de las fuentes de alimentación de la potencia.
7. Información de los estándares de la planta [4].

2.2.2 Diferentes tipos de extrusores

En la industria de los plásticos, existen tres tipos de principales de extrusores: el tornillo extrusor, el cual es el más común, el extrusor de pistón, y el extrusor de tambor o disco, el cual es el menos común.

2.2.2.1 Extrusores de tornillo simple

En un extrusor de tornillo (ver Figura 2.1) un tornillo gira dentro de un cilindro, la rotación del tornillo crea una acción de bombeo.

Un extrusor con un tornillo es llamado extrusor de tornillo simple, es la máquina más comúnmente usada en la industria del procesamiento de plásticos.

En la Tabla 2.1 se enlistan los tamaños más comunes de extrusores de tornillo simple.

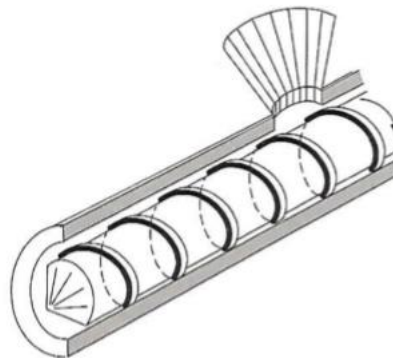


Figura 2. 1 Extrusor de un solo husillo

Tabla 2. 1 Tamaño de extrusora (diámetro del husillo).

Tamaño en milímetros	Tamaño en pulgadas
25	1
30	1 1/4
50	2

Tamaño en milímetros	Tamaño en pulgadas
60	2 1/2
80	3 1/4
110	4 1/2
150	6
200	8

Las capacidades de producción las máquinas antes mencionadas varían entre 2 Kg/hr para las máquinas de 25 mm, hasta aproximadamente 450 Kg/hr para las máquinas de 200 mm.

2.2.2.2 Extrusores de doble tornillo

Un extrusor de tornillo puede tener uno o más de un tornillo. Un extrusor con más de un tornillo es llamado extrusor multi-tornillo. El extrusor multi-tornillo más común es el de doble tornillo.

2.2.2.2.1 Extrusores de doble tornillo co-rotacionales

Existen diferentes tipos de extrusores de doble tornillo, en su mayoría los tornillos están localizados lado a lado. Si ambos tornillos giran en la misma dirección, el extrusor es llamado extrusor de doble tornillo co-rotacional.

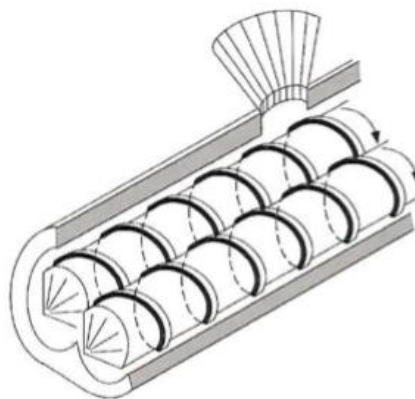


Figura 2. 2 Extrusor de doble husillo co-rotacional

2.2.2.2.2 Extrusores de doble tornillo contra-rotacionales

Si los tornillos de un extrusor de doble tornillo giran en dirección opuesta, es llamado extrusor de doble tornillo contra-rotacional.

Los extrusores de doble tornillo pueden girar a alta o baja velocidad, dependiendo de su aplicación. Los extrusores de alta velocidad giran alrededor de 200 a 500 rpm, incluso algunas veces más elevado, ellos son primariamente utilizados para la combinación de materiales. Los extrusores de baja velocidad giran alrededor de 10 a 40 rpm y son comúnmente usados en aplicaciones de extrusión de perfiles.

La mayoría de los extrusores de doble tornillo para la extrusión de perfiles son contra-rotacionales. Esto debido a que este tipo de extrusores tienden a tener mejores características de transporte que los co-rotacionales. La mayoría de los extrusores de doble tornillo tienen tornillos paralelos, pero algunos extrusores tienen tornillos cónicos, donde los tornillos no son paralelos, ver la Figura 2.3.

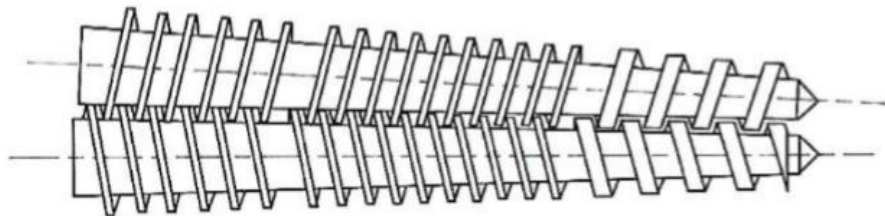


Figura 2. 3 Extrusor de doble tornillo cónico

Otra característica distintiva de los extrusores de tornillo doble es la medida en la que los tornillos se interdentan. Los tornillos pueden ser completamente, ver la Figura 2.4 (a), parcialmente, ver Figura 2.4 (b), y no interdentados, ver Figura 2.4 (c).

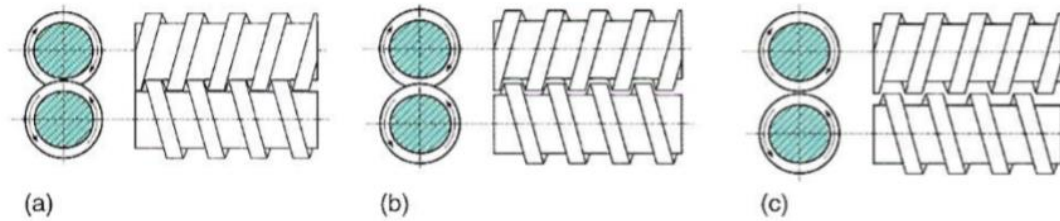


Figura 2. 4 a) husillos contra-rotacionales completamente interdentados, **b)** husillos contra-rotacionales parcialmente interdentados, **c)** husillos contra-rotacionales no interdentados

La mayoría de los extrusores de doble tornillo son interdentados. La ventaja de los extrusores no interdentados es que pueden ser muy largos evitando problemas de contacto entre metal y metal de los tornillos. La relación longitud con diámetro (L/D) puede ser 100:1 y mayor. La relación (L/D) de los extrusores de doble tornillo interdentados es generalmente limitada a valores menores a 50:1. Una desventaja de los tornillos dobles no interdentados es que ellos tienen una limitada capacidad de mezclado dispersivo.

2.2.2.3 Extrusores de pistón

En un extrusor de pistón, un pistón alternativo fuerza el material hacia y a través del dado, como se muestra en la Figura 2.5.

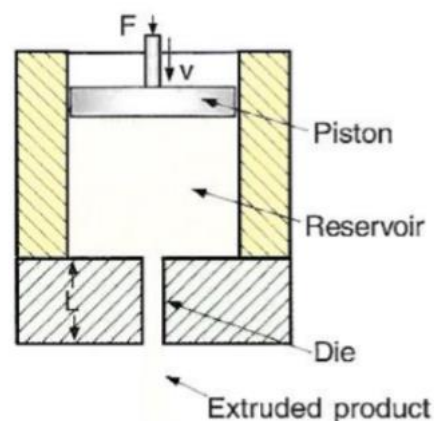


Figura 2. 5 Esquema de un extrusor de pistón

Los extrusores de pistón tienen muy buenas características de transporte y pueden desarrollar muy altas presiones. El inconveniente de los extrusores de pistón es que ellos

tienen muy baja capacidad de fundición. Por lo tanto, no son usados comúnmente utilizados para plásticos normales.

Existen algunos plásticos inusuales, sin embargo, son procesados en extrusores de pistón, tales como los llamados plásticos “intratables” que no pueden ser procesados en extrusores normales. Ejemplos de tales plásticos son PTFE (poly-tetra-fluoro-ethylene) y UHMW (ultra high molecular weight polyethylene).

Estos plásticos no se funden como plásticos normales y son formados por sinterización. Productos continuos pueden ser hechos en un extrusor de pistón, aunque las velocidades de las líneas son bastante bajas, típicamente en un rango de 25 a 75 cm por hora.

2.2.3 Componentes de un extrusor

Tabla 2. 2 Componentes de un extrusor

• Tornillo Extrusor	• Tolva de Alimentación	• Paquete de Pantalla	• Reductor
• Cañón Extrusor	• Calentamiento y enfriamiento del cañón	• Boquilla de Extrusión	• Mecanismos de Engranajes
• Garganta de Alimentación	• Plato Rompedor	• Unidad Extrusora	• Instrumentación y Control

2.2.3.1 Tornillo extrusor

El corazón del extrusor es el tornillo extrusor. Este es un cilindro largo con un filete helicoidal envuelto alrededor, ver Figura 2.6. El tornillo es muy importante porque el transporte, calentamiento, fundición, y mezclado del plástico están mayoritariamente determinados por el tornillo.

La estabilidad del proceso y la calidad del producto extruído son altamente dependientes del diseño del tornillo. El tornillo gira en un cilindro que se adapta estrechamente alrededor de este.

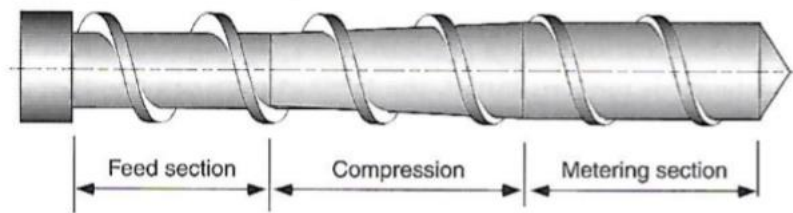


Figura 2. 6 Tornillo extrusor simple

Los tornillos tienen tres secciones distintas:

1. Sección de alimentación: transporta el material desde la tolva hasta la región central del barril.
2. Sección de fusión, también llamada sección de compresión o transición: donde el calor generado por el cizallamiento viscoso de los pellets plásticos y por los calentadores externos ubicados alrededor del barril causan el inicio de la fusión.
3. Sección de medición o de bombeo (o de plastificación): donde se producen cortes y fusiones adicionales con la elevación de la presión a la entrada del dado.

Las longitudes de estas secciones individuales se pueden cambiar para adaptarse a las características de fusión de diferentes tipos de plásticos.

2.2.3.1.1 Tornillo extrusor estándar

En muchas discusiones sobre la extrusión, se hace una referencia a un llamado tornillo extrusor estándar o convencional. En orden para definir este término más cuantitativamente, las características generales de un extrusor estándar se enlistan en la Tabla 2.3.

Tabla 2. 3 Características generales de un tornillo extrusor estándar

Longitud Total	20-30 D
Longitud de la Sección de Alimentación	4-8 D
Longitud de la Sección de Dosificación o de Bombeo	6-10D
Número de filetes paralelos	1

Paso del Filete	1D (ángulo de hélice 17.66°)
Ancho del Filete	0.1 D
Profundidad del Canal en la Sección de Alimentación	0.15-0.20 D
Profundidad del Canal	2-4 D

Estas dimensiones son aproximadas, pero es interesante que la mayoría de los tornillos extrusores que se usan hoy en día tienen las características generales mencionadas anteriormente. Para la extrusión de perfiles de PA, PC, y PBTB, Brinkschroeder y Johannaber recomiendan una profundidad de canal en la sección de alimentación de $H_f \cong 0.11 (D+25)$ y una profundidad de canal de $H_m \cong 0.04 (D+25)$, donde la profundidad del canal H y el diámetro D están expresados en mm. Basado en estas guías, la geometría de un tornillo extrusor puede ser determinada fácilmente. Basado en la metodología de diseño desarrollada con bastante precisión debe de tenerse claro que el diseño de un tornillo extrusor estándar no es un diseño óptimo. Ha sido desarrollado durante varias décadas pasadas mayoritariamente de manera empírica y trabajo razonablemente bien con muchos polímeros. Sin embargo, mejoras significativas en el funcionamiento pueden ser hechas mediante la optimización funcional utilizando la teoría en extrusión.

Es bastante sorprendente que la geometría del tornillo extrusor estándar es muy popular actualmente. Probablemente indica una falta de conciencia de las implicaciones de la teoría de extrusión en el diseño del tornillo extrusor y las mejoras que pueden ser realizadas desde la optimización funcional de la geometría del tornillo.

Los fabricantes de tornillos extrusores tienden a usar programas computacionales bastante sofisticados para optimizar la geometría del extrusor, pero con frecuencia aún terminan con un tornillo de paso cuadrado estándar. Puede ser mostrado de un análisis elemental que la geometría de paso cuadrada no es óptima para la fundición o transporte de masa fundida. Así, si el resultado de la optimización del tornillo por computadora es una geometría de paso cuadrada, esto indica que el programa de computación está incorrecto o la persona que se encuentra usando el programa no lo está utilizando correctamente [2.5].

2.2.3.2 Cañón extrusor

El cilindro es llamado cañón extrusor. El cañón es un cilindro recto usualmente equipado con una línea bimetalica, esta línea es una dura, capa integral con alta resistencia al desgaste. En la mayoría de los casos, la resistencia al desgaste del barril debe ser mejor que la resistencia del tornillo. La razón es que es mucho más fácil de reconstruir y reemplazar que el cañón. Cañones bimetalicos usualmente no pueden ser reconstruidos.

El cañón puede tener una abertura de ventilación a través de la cual volátiles pueden ser removidos del plástico, ver Figura 2.7, un proceso llamado devolatización.

Un ejemplo es la eliminación de la humedad de un plástico higroscópico. Un extrusor con una apertura de ventilación debe usar una geometría especial para mantener el plástico fundido dentro del cañón; tal tornillo es llamado “tornillo de dos etapas”.

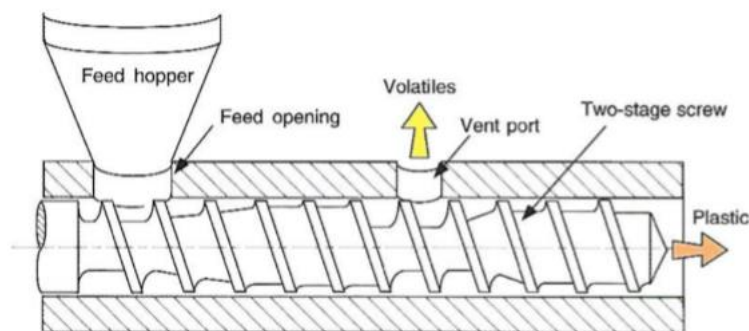


Figura 2. 7 Barril extrusor ventilado con tornillo de dos etapas

2.2.3.3 Garganta de alimentación

La garganta de alimentación está conectada al cañón, contiene la apertura de alimentación a través la cual el material plástico es introducido a la máquina extrusora.

La garganta de alimentación usualmente tiene la capacidad de refrigeración por agua, porque tenemos que ser capaces de mantener la temperatura de la garganta de alimentación lo suficientemente baja para evitar que las partículas plásticas se peguen a la pared. Para mejorar la capacidad de consumo de la garganta de alimentación, la apertura de alimentación puede ser compensada como en la Figura 2.8 y tiene una forma

elongada. La longitud de la apertura de alimentación debe ser aproximadamente 1.5 veces el diámetro de cañón y la amplitud alrededor de 0.7 veces el diámetro.

Algunos extrusores no tienen una garganta de alimentación separada, pero la apertura de alimentación es maquinada directamente en el cañón extrusor. Existen ambas ventajas y desventajas a tal disposición. Las ventajas son costos bajos, menor número de partes, y no hay problemas de alienación entre el cañón y la garganta de alimentación. Entre algunas de las desventajas se encuentra la dificultad de crear una barrera térmica entre el cañón caliente y la región de la garganta de alimentación, además de que el enfriamiento de esta región es más difícil.

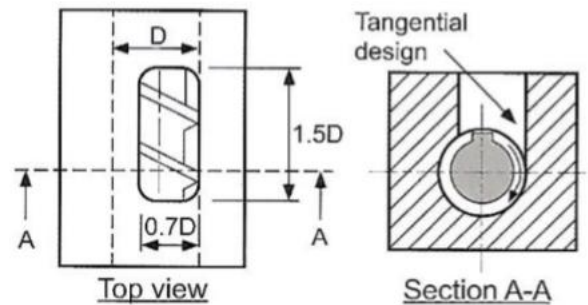


Figura 2. 8 Geometría preferida para la abertura de alimentación en la garganta de alimentación

2.2.3.4 Tolva de alimentación

La garganta de alimentación está conectada a la tolva de alimentación y al cañón extrusor. La tolva de alimentación contiene los pellets o polvo de plástico y descarga el material dentro de la garganta de alimentación.

La tolva debe ser diseñada para permitir un flujo estable de material. Un flujo estable es alcanzado con una tolva circular con una transición gradual en la sección cónica de la tolva, ver Figura 2.9.

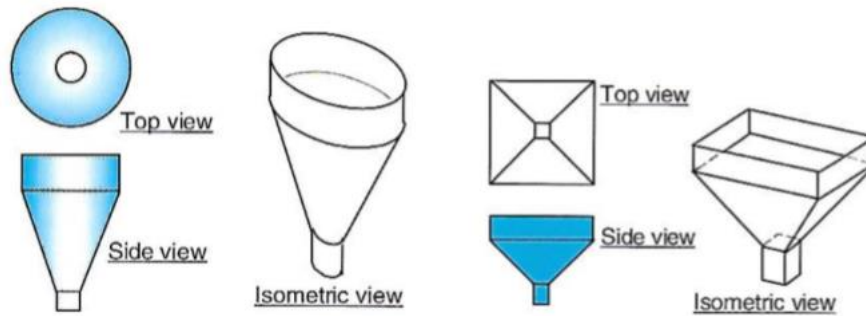


Figura 2. 9 Diseño adecuado de la tolva (izquierda) y diseño no adecuado de la toma (derecha)

Para materiales a granel difíciles, dispositivos especiales pueden ser usados para promover un flujo estable a través de la tolva, tales como almohadillas de vibración, agitadores, e incluso tornillos Crammer para forzar al material a ser descargado, ver Figura 2.10.

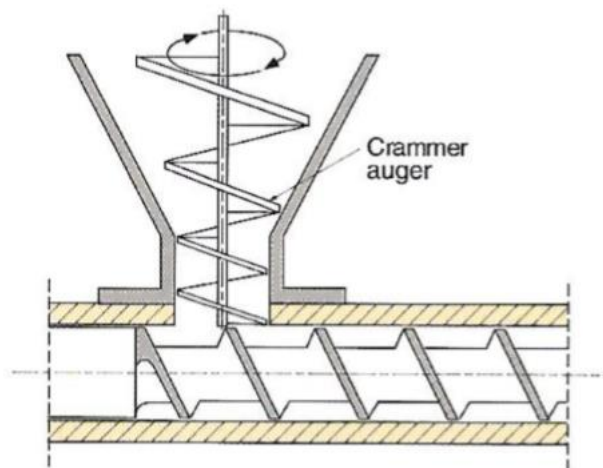


Figura 2. 10 Ejemplo de un alimentador Crammer

2.2.3.5 Calentamiento y enfriamiento del cañón

2.2.3.5.1 Métodos de calentamiento

El cañón del extrusor tiene la capacidad tanto de calentamiento como de enfriamiento. El calentamiento es usualmente realizado con bandas calentadoras eléctricas localizadas a lo largo de la longitud del extrusor. Los calentadores pueden ser calentadores de mica

aislante, calentadores cerámicos, o calentadores moldeados. En los calentadores moldeados los elementos de calentamiento están fundidos en un bloque semi-circular de aluminio o bronce.; estos calentadores proporcionan una buena transferencia de calor.

Los calentadores de aluminio calientan hasta 400°C, mientras que los calentadores de bronce tienen una operación de temperatura de 550 °C.

Otros tipos de calentamiento pueden ser usados, como el calentamiento por inducción, calentamiento por radiación, calentamiento por fluidos. El calentamiento por inducción y por radiación no son comúnmente utilizados; el calentamiento mediante fluidos es utilizado en la extrusión de caucho y en algunos extrusores de plástico viejos.

Los extrusores largos tienen al menos tres zonas de temperatura a lo largo de la longitud del barril. Los extrusores largos pueden llegar a tener ocho zonas de temperatura o más. Cada zona tiene la su propia capacidad de calentamiento y enfriamiento y al menos un sensor de temperatura para medir la temperatura de la zona. La temperatura es usualmente medida en el barril.

El dado o boquilla puede tener una o múltiples zonas de temperatura, dependiendo de su complejidad. Algunos dados tienen más de diez zonas de temperatura. Los dados tienen la capacidad de calentamiento, pero usualmente no tienen la capacidad de enfriamiento.

2.2.3.5.2 Métodos de enfriamiento

El cañón tiene que ser enfriado si la generación de calor interna en el plástico incrementa la temperatura del barril por encima del punto establecido. Esto es probable que ocurra cuando se extruyen plásticos con altas viscosidades y cuando el tornillo extrusor gira a altas velocidades.

El enfriamiento en los extrusores de tornillo simple es usualmente hecho mediante aire. Los sopladores están colocados bajo el cañón del extrusor y las zonas de temperatura están particionadas, de esta manera un soplador enfría solamente una zona de temperatura como se muestra en la Figura 2.11.

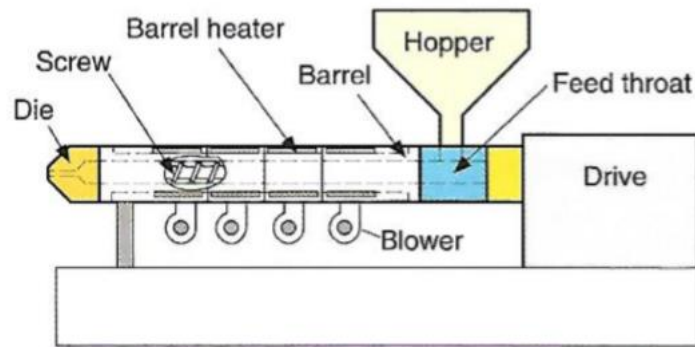


Figura 2. 11 Extrusor con calentadores y sopladores para enfriamiento

El enfriamiento mediante agua puede ser usado particularmente cuando grandes cantidades de calor deben ser removidas.

El proceso de extrusión normalmente funciona de una mejor manera cuando el tornillo extrusor proporciona la mayoría de la energía requerida en el proceso, de esta manera se requiere una menor cantidad de calentamiento y enfriamiento a través del cañón.

Debido a que el enfriamiento mediante agua elimina de una manera más rápida, puede ser más complicado mantener un buen control de temperatura mediante este método. De igual manera el enfriamiento se puede realizar mediante el uso de aceites, de hecho, el aceite puede ser usado para ambos procesos, calentamiento y enfriamiento.

2.2.3.5.3 Temperatura del barril contra temperatura del plástico

Con el enfriamiento del cañón, es importante darse cuenta que incluso si la temperatura está a su punto establecido, la temperatura real está por encima de tal punto establecido. Con el enfriamiento del cañón encendido, el calor fluye del plástico a través del cañón hacia el exterior. En esta situación, la temperatura más alta ocurre en el plástico. Incluso si la temperatura del cañón está a su punto máximo establecido, la temperatura del plástico puede ser substancialmente más alta. Por lo tanto, el enfriamiento del cañón debe ser minimizado si es posible.

2.2.3.6 Calentamiento y enfriamiento del tornillo

El tornillo de un extrusor que no es ni calentado ni enfriado es llamado “tornillo neutral”. Sin embargo, es posible tanto calentar como enfriar el tornillo mediante la extracción del corazón del tornillo (haciendo un agujero) y circulando calor mediante un líquido a través de la sección del agujero, como se muestra en la Figura 2.12.

El tornillo también puede ser calentado mediante un calentador de cartucho. La energía eléctrica del calentador puede ser suministrada por una unidad de anillo deslizante en el extremo de accionamiento del tornillo. Si el calentador de cartucho es equipado con un sensor de temperatura, la energía del calentador puede ser controlada para mantener una temperatura constante.

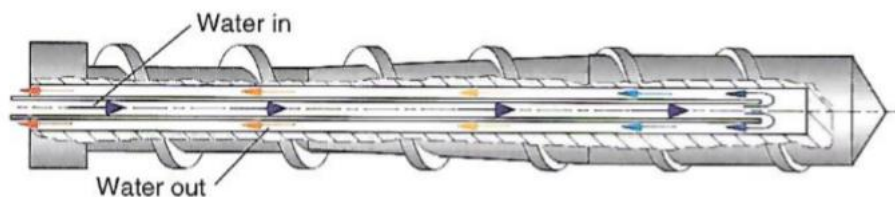


Figura 2. 12 Circulación de un fluido de transferencia de calor a través del husillo

2.2.3.7 Plato rompedor

El plato rompedor está localizado al final del cañón. Es un disco grueso de metal con agujeros espaciados estrechamente como se muestra en la Figura 2.13.

El propósito principal del plato rompedor es soportar un número de filtros, localizados justo delante del plato rompedor. Los filtros son usados para atrapar contaminantes para que estos no terminen dentro del producto extruído.

Usualmente, los filtros se colocan juntos, comenzando con un filtro grueso, seguido de filtros finos y nuevamente un filtro grueso justo contra el plato rompedor.

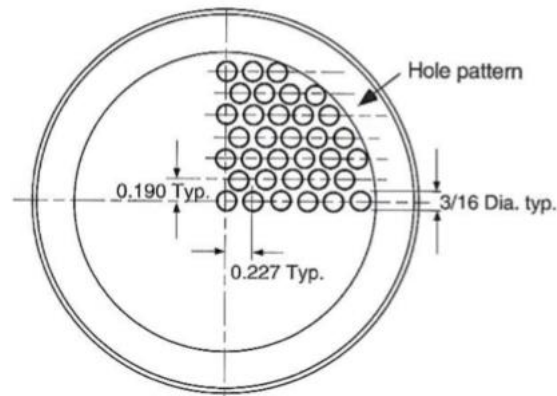


Figura 2. 13 Ejemplo de un plato rompedor

2.2.3.8 Paquete de filtros

El paquete de filtros no es solamente usado para atrapar contaminantes, en algunos casos la restricción del paquete de filtros es incrementado para incrementar la mezcla dentro del extrusor. Los filtros más comunes son los filtros de malla de alambre.

El número de malla del filtro representa el número de alambres por pulgada.

La Figura 2.14 muestra la relación entre el valor de la malla del filtro y los micrones (Micron rating). Los micrones indican el tamaño de las partículas que el filtro puede capturar.

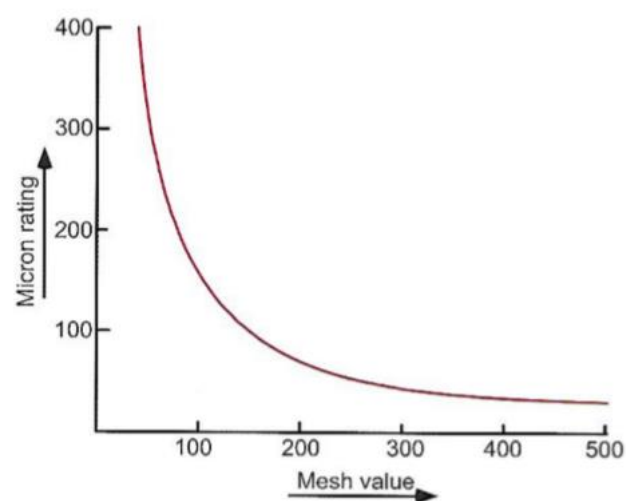


Figura 2. 14 (Micron-rating contra el valor de malla para pantallas de malla de alambre)

Existen diferentes tipos de materiales de filtros. Los filtros de alambre son los más comunes. Diferentes tipos de filtros de alambre están disponibles, como la malla cuadrada de alambre de tejido cruzado, y la malla cuadrada de alambre con sarga holandesa.

Las ventajas y desventajas de los diferentes materiales para filtros se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2. 4 Comparación de los diferentes filtros

	Wire mesh square weave	Wire mesh Dutch twill	Sintered metal powder	Random metal fibers
Captura de gel	Pobre	Justa	Buena	Muy Buena
Capacidad de contaminantes	Justa	Buena	Justa	Muy Buena
Permeabilidad	Muy Buena	Pobre	Justa	Buena
Precio	Baja	Justa	Alta	Alta

2.2.3.8.1 Cambiadores de filtros

En algunos casos, los filtros tienen que ser reemplazados en intervalos cortos, por ejemplo, cada dos horas. Esto se realiza cuando el plástico contiene un alto nivel de contaminantes. En tal situación, puede ser ventajoso usar un filtro con cambiadores de filtros, el cual es un dispositivo que permite un cambio rápido de filtros. Algunos cambiadores pueden ser automáticos o manuales.

Hay diversos tipos de cambiadores de filtros, incluyendo cambiadores manuales, cambiadores hidráulicos, cambiadores semi-continuos, cambiadores con un movimiento continuo, cambiador rotatorio.

Los cambiadores manuales son utilizados en extrusores pequeños, los cambiadores hidráulicos usan un pistón hidráulico para empujar el bloque que contiene un nuevo filtro dentro del torrente fundido, como se muestra en la Figura 2.15. Pueden ser usados con extrusores largos.

En los cambiadores de movimiento continuo una banda continua de filtros de material pasa a través del fijo fundido a una velocidad determinada por la diferencia de presión a través del filtro.

El cambiador rotatorio usa una rueda en movimiento con 10 a 16 cavidades que contienen los filtros.

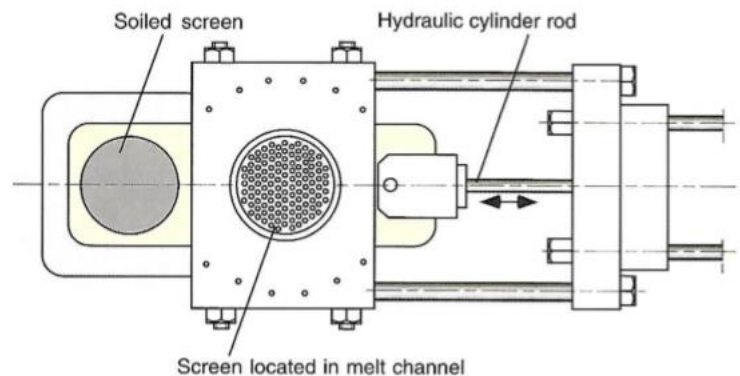


Figura 2.15 Cambiador de pantalla de placa deslizante típica

2.2.3.9 Boquilla de extrusión

La boquilla está localizada en el extremo de descarga del extrusor. Su función es moldear el flujo de plástico en la forma deseada del producto extruído. Las boquillas pueden ser categorizadas por la forma del producto que producen. Las boquillas anulares son utilizadas para la fabricación de tubos, pipas, recubrimiento de cables. Las boquillas de abertura son usadas para hacer películas y láminas planas. Las boquillas circulares son usadas para hacer fibras y barras. Las boquillas de perfil son usadas para formas diferentes a las anulares, circulares, o rectangulares.

Las boquillas son llamadas de acuerdo al producto que producen. Entonces, representando en un ejemplo tenemos: boquillas de película plana, boquillas de película soplada, etc.

El canal de entrada de la boquilla es usualmente diseñada para unir la salida del extrusor. Los tres elementos principales de la boquilla son el canal de flujo, el colector, y la región plana, observar la Figura 2.16.

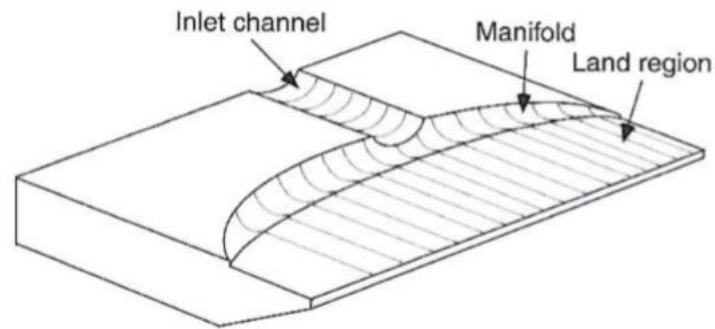


Figura 2. 16 Los tres elementos principales de una boquilla de extrusión

El canal de flujo debe de ser diseñado de tal manera que el plástico fundido alcance una velocidad uniforme a través de la salida de la boquilla. La forma de la región plana corresponde a la forma final del producto extruído.

Un ejemplo de tuberías en línea se muestra en la Figura 2.17.

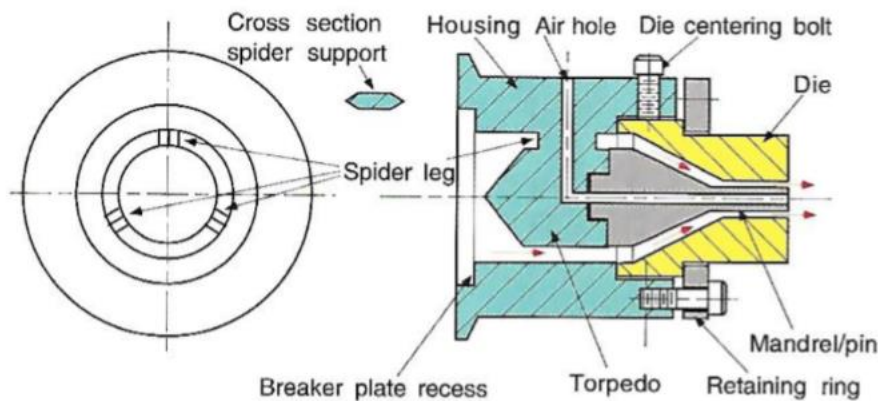


Figura 2. 17 Ejemplo de tubo en línea o tubería

El tamaño y la forma de la región plana no son exactamente las mismas que las del producto extruído. Hay varias razones por esto: arrastre, enfriamiento, expansión, relajación. Debido a las diferentes variables que afectan el tamaño y forma del plástico extruído, es muy difícil predecir exactamente cómo cambian estas propiedades una vez que sale de la boquilla.

Como resultado, de igual manera es muy difícil predecir la forma del canal de flujo para alcanzar la forma deseada del producto a extruír.

Esta es una razón importante del porqué el diseño de las boquillas está largamente basado en la experiencia en vez de cálculos ingenieriles. El diseño de las boquillas es un proceso de prueba y error.

2.2.3.9.1 Boquillas de coextrusión

Otro tipo de boquillas utilizadas en la industria son las boquillas de coextrusión. Este tipo de boquilla es utilizado para hacer productos multi-capas en un paso. Existen dos sistemas principales de coextrusión: el sistema de bloque de alimentación y el sistema de múltiples colectores. En el sistema de bloque de alimentación las diferentes corrientes de masa fundida de plástico son combinadas en un bloque de alimentación y después alimentadas en un dado colector regular, observar la Figura 2.18.

En el sistema de múltiples colectores, las diferentes corrientes de masa fundida de plástico entran en la boquilla por separado y cada material tiene su propio colector. Las diferentes corrientes de masa fundida se combinan cerca de la salida de la boquilla para producir el producto de varias capas.

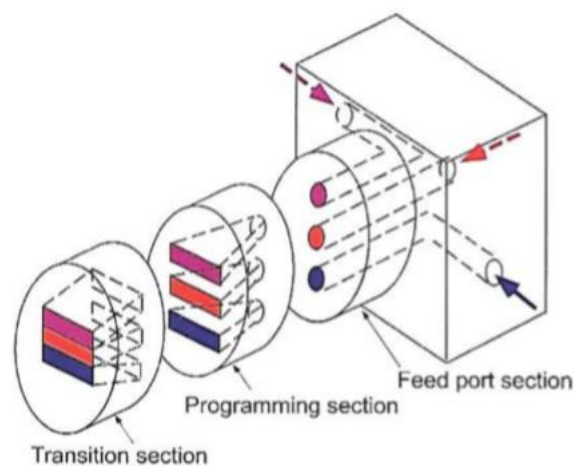


Figura 2. 18 Ejemplo de un sistema de bloque de alimentación

2.2.3.10 La unidad extrusora

La unidad de tornillo es usualmente un motor eléctrico que proporciona la energía para girar el tornillo. La velocidad nominal de un motor es generalmente 1800 rpm, mientras que la velocidad típica de un tornillo es alrededor de 100 rpm. Como resultado, un reductor de velocidad es necesitado entre el motor y el tornillo. Varios motores pueden ser utilizados para los extrusores. Los motores de CD (Corriente Directa) son los más comunes, aunque los motores de CA (Corriente Alterna) están comenzando a ser utilizados con mayor frecuencia.

Los extrusores más antiguos usualmente usan un motor de cepillo de CD con una retroalimentación de velocidad. Esto produce una regulación de la velocidad de aproximadamente 1% del total de la velocidad.

La regulación del 1% puede ser aceptable en algunos productos, pero no puede ser suficiente para operaciones de alta precisión, como tubos médicos, particularmente cuando el extrusor opera a velocidades bajas. Por ejemplo, si un extrusor tiene una máxima velocidad de tornillo de 100 rpm y un motor de cepillo de CD con una retroalimentación de velocidad, la velocidad del tornillo puede variar 1 rpm, observar la Tabla 2.5.

Tabla 2. 5 Variaciones de velocidad de tornillo en diferentes velocidades de tornillo

Velocidad de Tornillo	Variación de la Velocidad de Tornillo (rpm)	Variación de la Velocidad de Tornillo (%)
100 rpm	1 rpm	1%
10 rpm	1 rpm	10%

Sin embargo, si la velocidad del tornillo es reducida a 10 rpm, la velocidad del tornillo puede llegar a variar 1 rpm. Esta variación de 1 rpm ahora representa el 10%, esto obviamente, sería demasiado para un producto extruído de alta precisión.

2.2.3.10.1 Acoplamiento entre el motor y la caja de cambios

Cuando tenemos un acoplamiento directo entre el motor y el reductor, obtenemos un manejo directo o unidad directa del sistema. Observar la Figura 2.19.

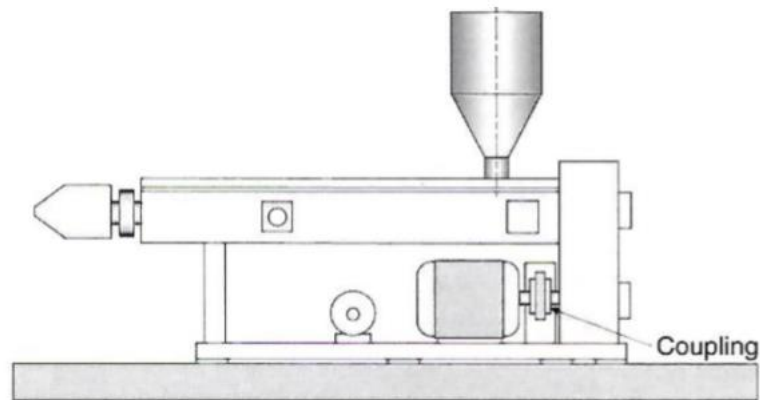


Figura 2. 19 Ejemplo de un extrusor con un manejo directo

Algunos extrusores tienen una transmisión por correa entre el motor y el reductor; estos son llamados unidades indirectas o manejo indirecto. Observar la Figura 2.20.

Algunas ventajas del manejo directo (unidades directas) son:

- Sin posibilidad de deslizamiento
- Eficiencia energética
- Menor número de partes

La desventaja de las unidades directas es que puede resultar más difícil la relación de reducción.

Algunas ventajas del manejo indirecto (unidades indirectas) son:

- Facilidad de cambio de la relación de reducción
- Mayor libertad para posicionar el motor

Las desventajas del manejo indirecto son:

- Riesgo de deslizamiento
- Pérdida de energía en las correas o bandas
- Mayor número de partes que pueden ser desgastadas y fallar

Aunque las unidades directas parecen ser más atractivas, muchos extrusores están hechos mediante unidades indirectas. Un ejemplo de un extrusor con un manejo indirecto se muestra en la Figura 2.20.

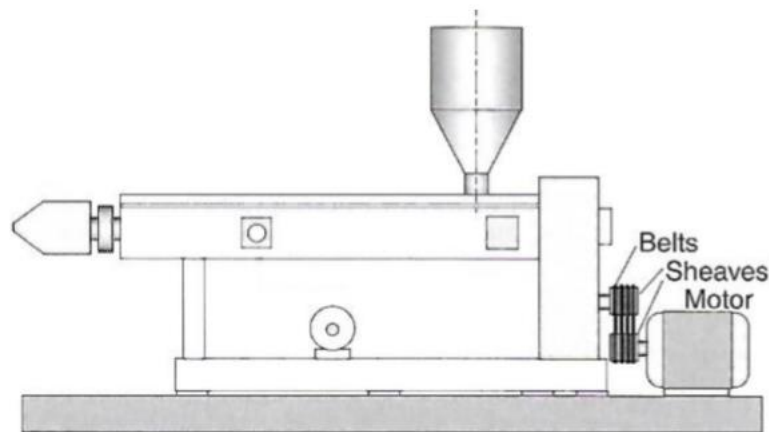


Figura 2. 20 Ejemplo de un extrusor con un manejo indirecto

2.2.3.11 Reductor de velocidad

Un reductor de velocidad es necesario porque la velocidad del motor es mucho más alta que la velocidad del tornillo. Las relaciones de reducción típicas varían de 15:1 a 20:1. Los reductores más comunes implementados en extrusores son reductores de velocidad que utilizan engranajes rectos. Un engranaje recto popular es el engranaje de espiga. El diseño de los dientes en forma de V elimina prácticamente las cargas axiales en los engranajes. Las cuestiones importantes con los reductores son la relación de reducción, la eficiencia energética, la capacidad de transmisión de energía, costo y reacción de la

caja de cambios. Si la velocidad del tornillo se mantiene constante, la reacción no es un asunto importante.

Las cajas de cambios pueden ser hechas con una disposición de engranaje de cambio rápido. Esto permite un cambio rápido y fácil de la relación de transmisión. Una disposición de engranaje de cambio rápido puede mejorar la flexibilidad y la versatilidad de la máquina de extrusión. El cambio de la relación de transmisión de una caja de cambios regular es un trabajo de precisión y requiere mucho tiempo.

2.2.3.11.1 Conjunto de cojinetes de empuje

Los cojinetes de empuje son necesarios porque el tornillo del extrusor tiende a desarrollar una presión considerable para superar la resistencia al flujo de la matriz. La presión del cabezal de matriz típica oscila entre 7 MPa a 28 MPa. La presión de fusión en el extremo del tornillo provoca una fuerza de empuje en el tornillo, empujándolo en la dirección de la unidad. Los cojinetes de empuje son necesarios para asumir la carga de empuje que actúa sobre el tornillo. Un ejemplo de un conjunto de cojinete de empuje se muestra en la Figura 2.21.

La capacidad de los cojinetes de empuje para manejar la carga de empuje en el tornillo se refleja en la vida B-10 de los cojinetes de empuje. La vida B-10 es el número de horas que 9 de cada 10 cojinetes idénticos duran una cierta carga y velocidad. La vida B-10 para los cojinetes de empuje del extrusor se da generalmente a una presión de cabeza de 35 MPa y una velocidad de tornillo de 100 rpm.

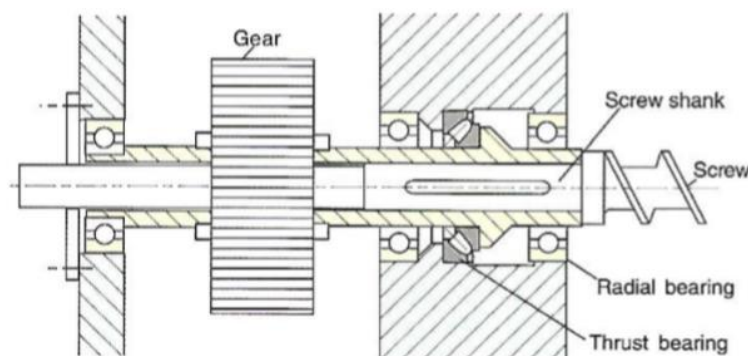


Figura 2. 21 Ejemplo de un conjunto de cojinetes de empuje

2.2.3.12 Bomba de engranajes

Los extrusores tienen algunas limitaciones, incluyendo el hecho de que la estabilidad de alto rendimiento es difícil de lograr. Esto es importante en operaciones de extrusión de alta precisión tales como el hilado de fibras o la extrusión tubos médicos. La mejor variación de salida que se puede obtener en una extrusora habitual es de aproximadamente 1%. Para mejorar la estabilidad de salida, una bomba de engranajes se puede añadir a la extrusora; se coloca entre el extrusor y la boquilla. La bomba de engranajes se compone de dos engranes contra-rotantes, véase la Figura 2.22.

El Material entrante en la bomba de engranajes está atrapado en el espacio entre dos dientes y se mueve hacia adelante en una trayectoria circular con los engranajes. En el punto donde los engranajes comienzan a engranar, la masa fundida de plástico es forzada a salir de los engranajes hacia la descarga de la bomba.

El transporte de la masa fundida de plástico en la bomba de engranajes se consigue forzando la mezcla en lugar de por medio de la fricción como es el caso en la extrusora. Hay algunas operaciones en las que el uso de bombas de engranajes puede crear problemas. Una es cuando se extruye un plástico que contiene cargas abrasivas u otros ingredientes abrasivos, causando el desgaste de la bomba de engranajes y la reducción de la precisión de bombeo.

Otro problema potencial se puede producir cuando una bomba de engranajes se utiliza con un plástico que es susceptible a la degradación [2.6].

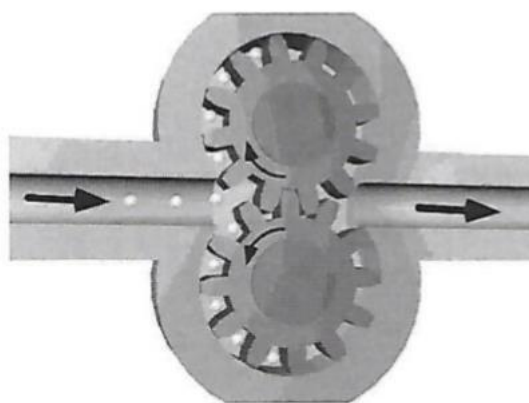


Figura 2. 22 La bomba de engranajes

2.3 Instrumentación y Control

2.3.1 Instrumentación

La instrumentación es uno de los elementos más esenciales de un extrusor. Es necesario medir importantes parámetros para saber qué está pasando en el extrusor y ser capaz de controlar el proceso. Claramente, si la temperatura del plástico fundido no es medida, es imposible controlarla. Una razón por la cual la instrumentación es realmente importante es que generalmente no es posible observar que pasa dentro del extrusor.

Sin la instrumentación del extrusor, seríamos casi completamente ignorantes hacia su comportamiento interno. La instrumentación, por lo tanto, puede ser considerada como la “ventana del proceso”.

Cuando el extrusor desarrolla un problema, somos casi dependientes de la instrumentación para determinar lo que sucede dentro del extrusor. Como resultado, la buena instrumentación es críticamente importante cuando se tiene problemas de extrusión.

2.3.2 Parámetros más importantes

Los parámetros más importantes del proceso son la presión de fusión y la temperatura. Ellos son los mejores indicadores de que tan bien o mal eso funcionando el extrusor.

Otros parámetros importantes son:

- Velocidad del tornillo
- Carga del motor
- Temperaturas del cañón
- Temperaturas de las boquillas
- Consumo de energía de los calentadores
- Velocidad de enfriamiento

- Nivel de vacío en la extrusión de ventilación

Estos parámetros están relacionados solamente al extrusor. Sin embargo, existen muchos parámetros más de las líneas enteras de extrusión y esto, por su puesto, depende en sus componentes específicos. Los parámetros importantes en las líneas de extrusión son:

- Velocidad de la línea
- Dimensiones de los productos extruídos
- Velocidad de enfriamiento o velocidad de enfriamiento de la temperatura del agua
- Tensión de la línea

Algunos factores más pueden influir en el proceso de extrusión como la temperatura del ambiente, humedad relativa, corrientes de aire alrededor del extrusor, variaciones de la planta de voltaje, entre otros.

2.3.2.1 Presión de fusión

La medición de la presión de fusión es importante por dos razones,

- Monitoreo y control del proceso
- Seguridad

La presión de la cabeza de la boquilla determina la salida de la extrusora. Es la presión necesaria para superar la resistencia de la boquilla. Cuando el cabezal de la boquilla cambia de presión con el tiempo, la salida de la extrusora correspondientemente cambia y también lo hacen las dimensiones del producto extruído. Véase la Figura 2.23.

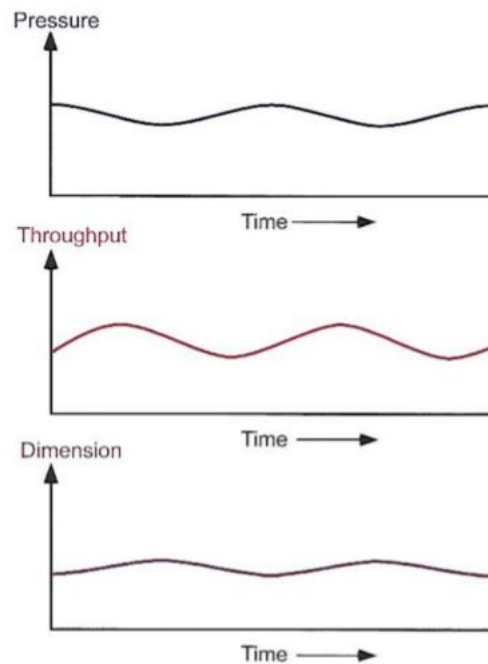


Figura 2. 23 Presión, rendimiento, y dimensión en función del tiempo

Como resultado, cuando monitoreamos como cambia la presión con el tiempo, podemos ver exactamente qué tan estable es el proceso de extrusión.

De igual manera es críticamente importante medir la presión el extrusor para prevenir serios accidentes que pueden suceder cuando se generan presiones excesivamente altas. Esto puede causar una explosión, todos los extrusores deben de tener un dispositivo de seguridad. Cuando se monitorea la presión, es una buena idea usar un cierre automático cuando la presión alcanza valores críticos.

2.3.2.2 Transductores de presión

Hay un número diferente de transductores de presión, Los más comunes en la extrusión son el transductor extensómetro y el transductor piezoeléctrico. El transductor medidor de deformación (extensómetro) puede ser o capilar o un transductor de varilla de empuje. En este tipo de transductores hay dos diafragmas, uno con el plástico fundido otro a cierta distancia del plástico caliente, véase la Figura 2.24.

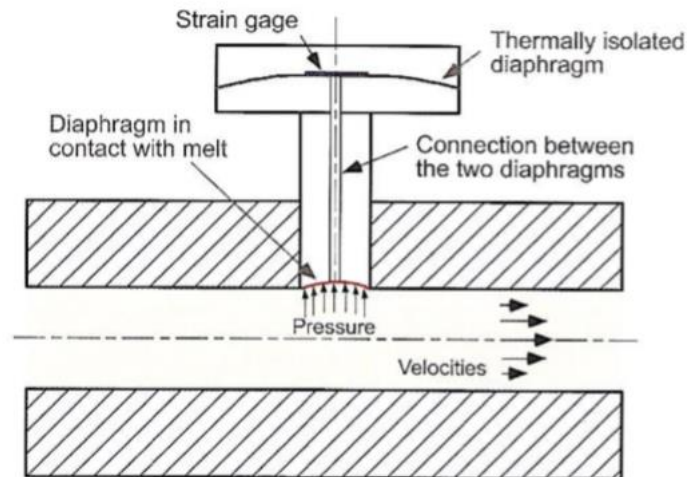


Figura 2. 24 Principio de un transductor con calibrador de tensión

La conexión entre el primer y el segundo diafragma es hidráulico en el tipo capilar y una varilla de empuje en el tipo varilla de empuje. Un medidor de deformación se fija a la segunda diafragma para medir la deflexión que puede ser relacionada con la presión en el primer diafragma. La mayoría de los transductores de capilares están llenos de mercurio. El error de medición total varía de 0,5 a 3%, dependiendo de la calidad del transductor. Una comparación de diferentes transductores de presión se muestra en la Tabla 2.6.

Tabla 2. 6 Comparación de varios transductores de presión

Tipo de Transductor	Robustez	Sensibilidad a la Temperatura	Respuesta Dinámica	Error total
Neumático	Buena	Pobre	Pobre	Alrededor del 1.5%
Extensómetro Capilar	Justa	Justa	Justa	0.5 a 3%
Extensómetro de Varilla	Justa	Pobre	Justa	Alrededor del 3%
Piezo-resistivo	Buena	Buena	Buena	0.2 a 0.5%

2.3.2.3 Medición de temperatura

La temperatura es usualmente medida con un termopar (TC) que es un tipo de sensor de temperatura. El principio del TC es que cuando dos metales diferentes están conectados y la temperatura T de la unión es diferente a la unión de referencia T_0 , hay un voltaje generado en el extremo de salida relacionado a la diferencia de temperatura $T-T_0$, observar la Figura 2.25. Dado que la medición de la temperatura se determina por la combinación exacta de los alambres de metal, es importante que se utilicen los cables correctos cuando se hacen cambios en el cableado.

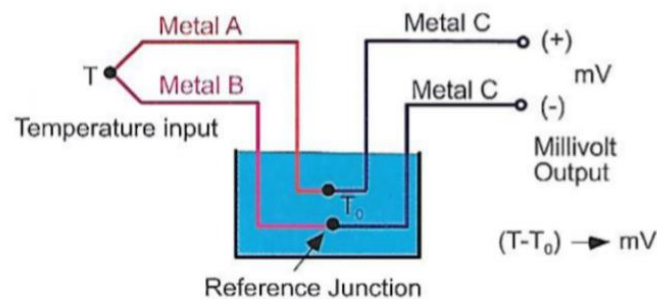


Figura 2. 25 Principio del termopar

Otro tensor de temperatura utilizado en extrusión es el detector de resistencia de temperatura o RTD (por sus siglas en inglés). El principio del RTD es que la resistencia de los metales cambia con la temperatura, entonces mediante la medición de la resistencia, la temperatura puede ser determinada.

La variación de la resistencia viene dada por la siguiente fórmula:

$$R=R_0 \cdot (1+ \alpha \cdot \Delta T)$$

Donde R_0 es la resistencia inicial.

$\Delta T= T-T_0$ es decir variación de la temperatura.

α es el coeficiente de temperatura del conductor. Debe ser alto.

Las características que deben tener los metales son un alto coeficiente de resistencia y alta resistividad para que tenga mayor sensibilidad y que haya una relación lineal entre la resistencia y la temperatura.

El platino es el metal más óptimo, ya que, además de cumplir las características, tiene un rango de temperatura mayor; pero, puesto que es muy caro, se utilizan otros como el níquel o cobre.

Los dos tipos de RTD son: bobinado que permite la contracción y dilatación del material sensible y laminado que tiene menor masa térmica, es más barato, aunque con menor estabilidad.

Las ventajas de utilizar este tipo de sensores es que tiene un margen de temperatura muy amplio; como tienen una gran sensibilidad, las medidas son dadas con mucha exactitud y repetitividad.

Un tercer tipo de medidor de temperatura usa detectores infrarrojos (IR). Este tipo de medidores se basan en el hecho de que los objetos emiten radiación que cambia con la temperatura. Así, mediante la medición de la radiación emitida por un objeto, la temperatura superficial de un objeto puede ser determinada.

La medición de temperatura por medidores infrarrojos se utiliza con frecuencia cuando se tienen que medir temperaturas sólo de forma indirecta, es decir, sin contacto. La razón para ello puede ser, por ejemplo, la alta temperatura del objeto.

Los sensores detectan la radiación infrarroja enviada por los objetos y la convierten en una señal de salida. Si la temperatura registrada supera el umbral de conmutación configurado, la salida conmuta y el estado de conmutación es indicado a través de LED. Este tipo de sensores pueden ser montados en el extrusor para medir la temperatura de fusión en la máquina. Una desventaja de este tipo de sensores es que son altamente costosos.

2.3.2.4 Medición de la temperatura de fusión

La temperatura del plástico fundido es generalmente medida con un termopar sumergido. La sonda sobresale en la masa fundida y lee la temperatura en el punto de la unión del termopar. Para evitar errores de conducción, la unión debe estar aislada térmicamente de la base de la sonda.

Una desventaja de la sonda inmersa es que cambia la velocidad en el canal y puede cambiar la temperatura actual de fundición.

Un número diferente de sondas puede ser usado como se muestra en la Figura 2.26.

Una sonda montada al ras mide la temperatura de fusión de la pared, que es generalmente la misma que la temperatura de la pared de metal. Como resultado, esta medición de la temperatura de fusión no es la más útil.

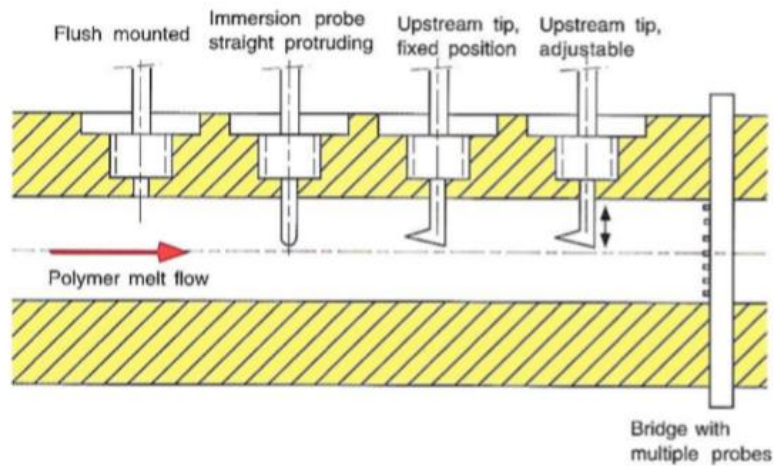


Figura 2. 26 Diferentes tipos de sondas de temperatura de fusión

2.3.2.5 Medición de la temperatura del barril

La temperatura del cañón es generalmente medida con sensores TC o RTD presionado en el cañón; los sensores son generalmente cargados por resortes, véase la Figura 2.27.

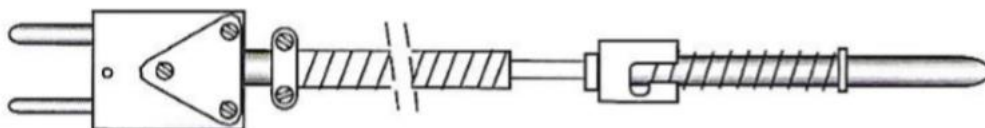


Figura 2. 27 Sensor de temperatura de barril con muelle

Muchos sensores de temperatura se construyen con un metal recubierto para obtener una resistencia mecánica suficiente. Como resultado, los errores significativos de conducción pueden ocurrir en la medición. La precisión de la medición es fuertemente dependiente de la profundidad del hueco, el tipo de sensor, y la velocidad del aire. El efecto de la profundidad del hueco TC se muestra en la Figura 2.28.

La temperatura actual mostrada en la figura es de 185 °C. Cuando la profundidad del hueco es menor que 30 mm (alrededor de una pulgada), el indicador de temperatura es considerablemente que la temperatura actual. Cuando la profundidad del hueco es más mayor a 30 mm, el error de medición con el aislamiento TC se hace muy pequeña. Con el TC no aislado, la temperatura indicada es sustancialmente menor que la temperatura real, incluso con una profundidad del hueco de 60 mm.

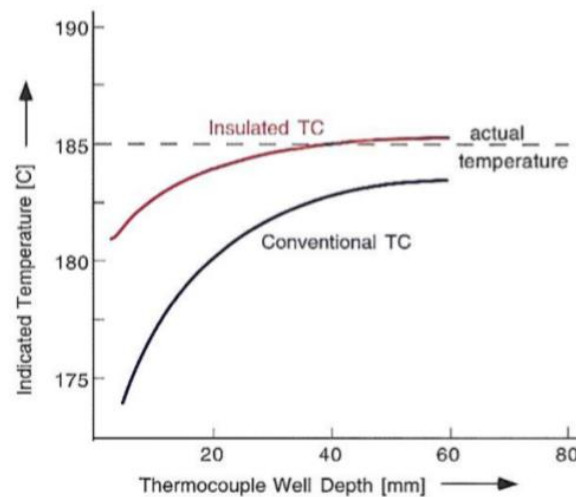


Figura 2. 28 Temperatura indicada contra profundidad del termopar

El efecto de las corrientes de aire alrededor de la máquina de extrusión en la temperatura medida se muestra en la Figura 2.29. Cuando aumenta la velocidad del aire, la temperatura indicada cae tanto como de 10 a 15 °C. La caída es más grande con el TC convencional comparado al TC aislado. El resultado práctico de esto es que corrientes de aire alrededor de la extrusora pueden causar errores de medida de temperatura sustanciales.

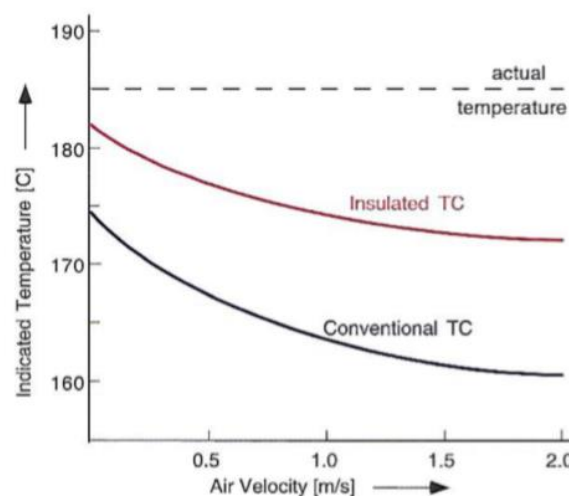


Figura 2. 29 Temperatura indicada contra velocidad del aire

2.3.3 Control de temperatura

En el proceso de extrusión, un buen control de temperatura es importante para alcanzar una buena estabilidad del proceso. Hay dos principales tipos de controladores de temperatura, on-off control (Encendido-Apagado) y el control proporcional.

2.3.3.1 On-Off control

En el on-off control, la energía está completamente encendida o totalmente apagada. La temperatura contra el tiempo para el control on-off es mostrado en la Figura 2.30; la potencia contra el tiempo se muestra también.

Cuando la temperatura medida está por debajo del punto de ajuste, la alimentación está totalmente conectada. Como resultado, la temperatura se eleva. Cuando se alcanza el punto de ajuste, la alimentación se apaga; sin embargo, la temperatura sigue aumentando durante algún tiempo, hasta varios minutos. Cuando, finalmente, la temperatura desciende por debajo del punto de ajuste, la alimentación se enciende de nuevo. Después del aumento inicial de la temperatura ambiente, la temperatura varía de una manera cíclica igual que la potencia.

La ventaja del on-off control es que es simple y que la temperatura promedio está justo en el punto de ajuste. La desventaja es que la temperatura actual siempre actúa de una manera cíclica con una variación que puede ser bastante larga, tanto como de 10 a 20 °C. Mientras más largo es el extrusor, la variación de temperatura tiende a crecer. Debido a esto, on-off control no es recomendad en extrusión, excepto para procesos no críticos.

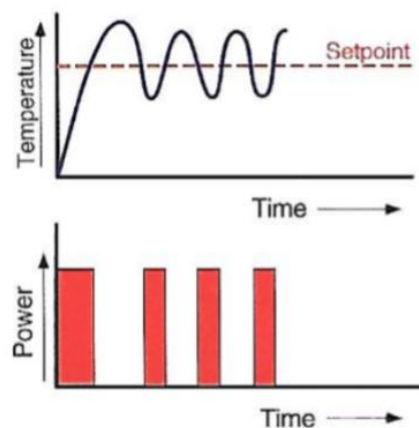


Figura 2. 30 Temperatura y energía contra el tiempo en el control on-off

2.3.3.2 Control proporcional

En el control proporcional, la energía es proporcional a la temperatura dentro de cierta región de temperatura llamada banda proporcional. La temperatura contra el tiempo para el control proporcional se muestra en la Figura 2.31; la potencia contra el tiempo se muestra de igual manera.

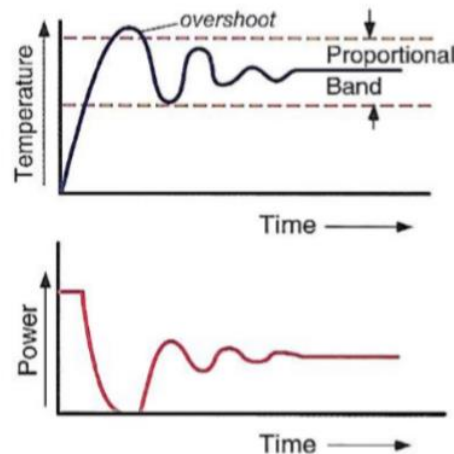


Figura 2. 31 Temperatura y energía control el tiempo en el control proporcional

Inicialmente, cuando la máquina se calienta por la temperatura ambiente, la energía está completamente encendida hasta que la temperatura alcanza la banda proporcional. Dentro de la banda proporcional, la energía disminuye conforme la temperatura se eleva. Si la temperatura excede la banda proporcional, la energía se apaga completamente. Cuando la temperatura disminuye en la banda proporcional, la energía se incrementa. La amplitud de las oscilaciones gradualmente disminuye y eventualmente la temperatura y la energía alcanzan un valor estable.

La ventaja de un control proporcional es que la temperatura puede mantenerse estable, a diferencia del on-off control. El nivel de energía puede ser ajustado exactamente al nivel que es requerido para mantener la temperatura correcta. La temperatura puede ser estable siempre y cuando las condiciones térmicas alrededor del extrusor son constantes.

Cuando hay una alteración en las condiciones térmicas, como el cambio de la temperatura ambiente, la temperatura actual cambia y el P-control (control proporcional) no es capaz de corregirlo, ver Figura 2.32. En otras palabras, en el P-control, no hay capacidad de restablecimiento.

En el control proporcional con acción integral, llamado PI-control, hay una capacidad de restablecimiento, véase la Figura 2.33.

Los controladores proporcionales pueden tener de igual manera una acción derivada. Esto significa que el controlador reacciona a los cambios en la tasa de cambio de temperatura. El control proporcional con acción derivativa es llamado PD-control; tanto con integración y acción derivativa, PID-control. PID control es comúnmente usado en extrusores.

Para que un controlador trabaje adecuadamente en un extrusor, el controlador tiene que ser programado de acuerdo a las características del extrusor.

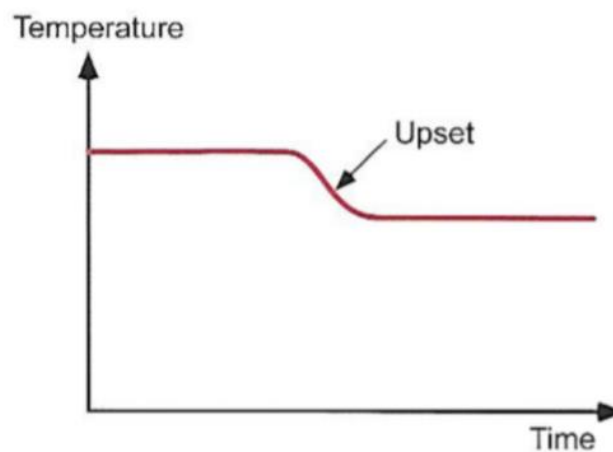


Figura 2. 32 Efecto de la resistencia térmica en control de temperatura P

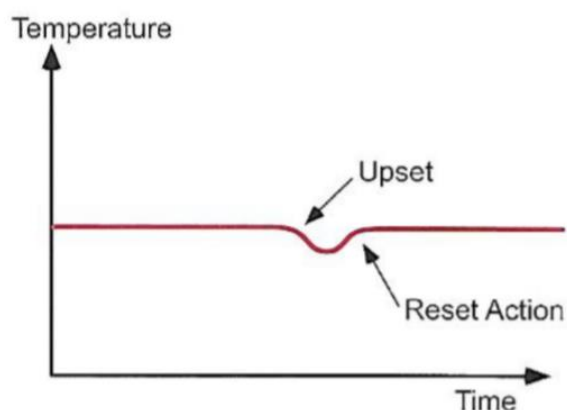


Figura 2. 33 Efecto de la resistencia térmica en un control de temperatura PI

2.3.3.3 Control de lógica difusa

Un método relativamente nuevo de control es el control de lógica difusa o FCL (por sus siglas en inglés). FCL es inteligencia artificial basada en tecnología, diseñada para simular la toma de decisiones humanas. Puede ser usado en sistemas que usen muchas variables para mejorar los procesos de control. El desarrollo de aplicaciones de lógica difusa requiere la generación de un conocimiento base; esto puede ser un proceso lento.

Implica la identificación de:

- Procesos variables que son importantes en control
- Funciones de pertenencia para cada variable, tales como alta, baja, y media.
- Reglas difusas que definan el conocimiento de qué hacer sobre una observación, basados en la experiencia de funcionamiento anterior

FLC está lentamente comenzando a ser usado en la industria del procesamiento de plásticos. Ha sido ya aplicado en diversas ocasiones en el moldeo por inyección; un menor número de aplicaciones se ha dado en la extrusión. Se ha demostrado que el FCL puede superar el control PID convencional si el conocimiento base está lo suficientemente desarrollado [2.7].

2.4 Líneas Completas de Extrusión

Es lógico que el extrusor por sí solo no es suficiente para producir un producto extruído. En adición al extrusor, necesitamos un equipo ascendente y descendente para producir un producto útil. Los elementos principales de una línea de extrusión son:

- Sistema de manipulación de resina
- Sistema de secado
- Extrusor

- Dispositivo de calibración o post-formado
- Dispositivo de enfriamiento
- Dispositivo de levantamiento
- Cortador o sierra

Los principales tipos de líneas de extrusión son:

- Líneas de extrusión de tubos y tuberías
- Líneas de extrusión de películas y láminas
- Líneas de extrusión de composición
- Líneas de extrusión de perfiles

Además de estos cuatro tipos de líneas de extrusión existen muchas más, tal como líneas de hilado de fibras, máquinas de moldeo por soplado de extrusión, láminas integradas y líneas de termoformados.

2.4.1 Líneas de extrusión de tubos y tuberías

Los tubos de diámetro pequeño (menos de 10 mm) se hacen generalmente con un proceso de extrusión libre; este es un proceso sin una unidad de calibración. La tubería y los tubos de gran diámetro se realizan con un dispositivo de acabado justo debajo de la boquilla. El propósito del calibrador es solidificar el plástico a un espesor suficiente para transferir las tensiones que actúan sobre el producto, mientras que se mantienen la forma y dimensiones deseadas. Los componentes principales de una línea típica de tubos de extrusión se muestran en la Figura 2.34.

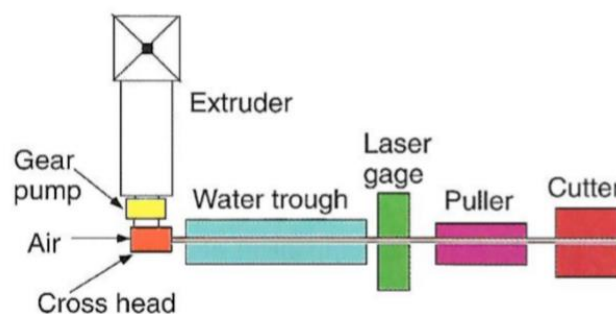


Figura 2. 34 Componentes de línea de extrusión de tubos típica

Esta línea no utiliza una unidad de dimensionamiento en consecuencia debe ser usado para tubería de diámetros pequeños. Una bomba de engranes puede o no ser usada, dependiendo de la precisión requerida en el proceso de extrusión. La presión interna del aire de la tubería es controlada para lograr los valores correctos para el diámetro de salida y el espesor de la pared. El diámetro es usualmente medido con un láser calibrador que permite un monitoreo y control muy cercano. El diámetro y el espesor de la pared son primariamente determinados por la salida del extrusor, la velocidad del jalador, y la presión interna de aire.

Los sistemas de control de bucle cerrado están disponibles para ajustar automáticamente el tornillo apropiado o la velocidad de la bomba de engranajes, la velocidad de la polea, y la presión de aire interna. Después del jalador, la tubería puede ser cortada o enrollado en un carrete. En algunas líneas, el espesor de la pared es medido directamente, esto puede ser hecho mediante sensores ultrasónicos posicionados alrededor de la circunferencia de la tubería o tubos como se muestra en la Figura 2.35.

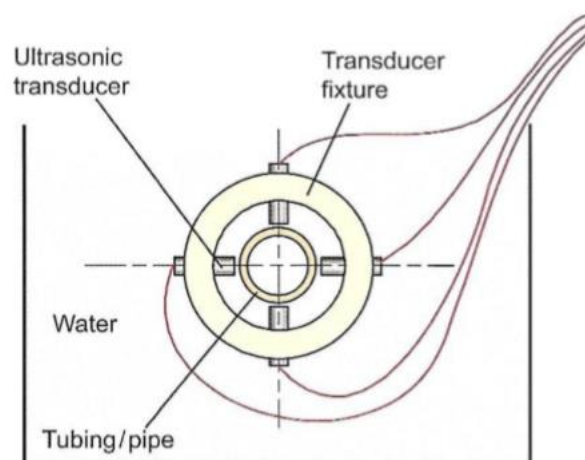


Figura 2. 35 Medidor de espesor de pared ultrasónico

2.4.2 Líneas de extrusión de películas y láminas

No hay diferencias principales entre la extrusión de películas planas y láminas. Los componentes principales de la línea de láminas son el extrusor, el conjunto de rodillos, la sección de enfriamiento, la sección de los rodillos de presión, y el enrollador, ver la Figura 2.36.

El conjunto de rodillos contiene tres rodillos que son usualmente referidos como rodillos de pulido. Son usados para ejercer presión en la lámina y de impartir las condiciones de la superficie de los rodillos a la lámina de plástico. Si se requiere de una superficie lisa, se utilizan rodillos lisos. Si se requiere una superficie texturizada, una superficie texturizada es usada en los rodillos. La textura del rodillo es la negativa de la textura requerida en la lámina. Es posible producir una lámina con una superficie texturizada y con otra lisa mediante el uso de un rodillo liso y otro texturizado uno al lado del otro.

En la figura podemos observar a la lámina de plástico subiendo a lo largo de centro del rodillo y haciendo una envoltura tipo S alrededor del rodillo central y del rodillo superior. Los rodillos no tienen que estar en una posición vertical; pueden estar en una posición horizontal o en cualquier ángulo entre vertical y horizontal. De hecho, en algunos conjuntos de rodillos, el ángulo es ajustable.

Los rodillos son usualmente huecos por lo cual la temperatura de los rodillos pueden ser controlados. Esto es hecho usualmente con la circulación de aceite caliente. Podría ser posible ajustar la temperatura de cada rodillo separadamente. La sección de enfriamiento consiste en un número de rodillos posicionados en una estructura; la lámina se desliza por arriba y por debajo de los rodillos para mantener la lámina plana.

Al final de la sección de enfriamiento se encuentran los rodillos de presión; estos son rodillos de goma que jalan la lámina del conjunto de rodillos para mantener cierta tensión en la lámina, al final la lámina es conducida al enrollador. Hay diferentes tipos de enrolladores, algunos de ellos automáticos transfieren la lámina a uno nuevo cuando se encuentran completamente llenos.

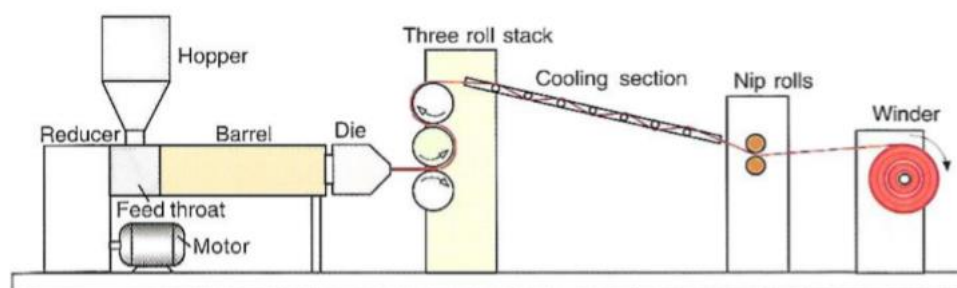


Figura 2. 36 Componentes de una línea de extrusión para láminas o películas planas

2.4.3 Líneas de película utilizando rodillos de enfriamiento

Las películas delgadas son usualmente colocadas en rodillo de enfriamiento (chill roll) en lugar de extruído en un conjunto de rodillos. Los componentes principales de una línea de películas fundidas son el extrusor, el molde para película, el rodillo enfriador, el sistema de medición de espesores, la unidad de tratamiento superficial, y el enrollador.

La película es extruída hacia abajo en el rodillo enfriador. El contacto inicial entre la película y el rodillo enfriador es establecido por el uso de un cuchillo de aire. El cuchillo de aire produce una fina corriente de aire a alta velocidad a través del ancho del rodillo enfriador, la corriente de aire empuja la película contra la superficie como se muestra en la Figura 2.37.

De la unidad del rodillo enfriador la película es conducida a unidad de medición de espesores donde el espesor de la película es medida a lo largo del ancho de la película. Después de la unidad de medición de espesores, la película pasa por una unidad de tratamiento. Tal unidad es incorporada si la superficie de tratamiento de la película es requerida. Esto es hecho usualmente para mejorar la adhesión, por ejemplo, por una operación subsecuente de impresión o laminación. Los parámetros más importantes de los promotores de la adhesión son:

- Tratamiento con llama
- Tratamiento de descarga de corona
- Tratamiento con ozono
- Cebadores

De la unidad de tratamiento, la película es conducida a la unidad de enrollado. Justo como en la extrusión de láminas, existen diversos tipos de enrolladores.

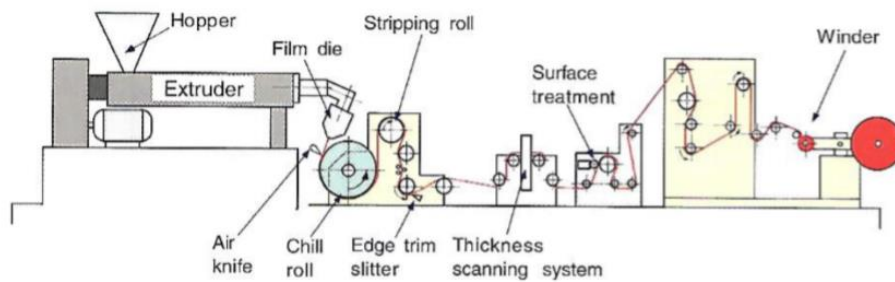


Figura 2. 37 Componentes de una línea de extrusión de películas moldeadas

2.4.4 Combinación de materiales

Los requerimientos de muchos productos, particularmente en aplicaciones de envasado, son tales que un solo plástico no puede cumplir con todos ellos. Para conocer los requerimientos, muchas veces dos o más materiales tienen que ser combinados. Existen un número de técnicas para combinar materiales diferentes; algunos de los más importantes son coextrusión, revestimiento, y laminación.

2.4.4.1 Coextrusión

La coextrusión es una técnica comúnmente usada para combinar dos o más plásticos que pasan a través de una sola boquilla de extrusión. Existen dos técnicas mayores de coextrusión, el sistema de bloques de alimentación y el sistema múltiple colector. En el sistema de bloques de alimentación los diferentes plásticos son combinados en el módulo del bloque de alimentación, como se mostró en la Figura 2.18, y después entra en una boquilla regular de extrusión con una entrada simple, colector y salida.

La ventaja del sistema de bloques de alimentación es que es simple, económico, y permite que varias capas sean combinadas. La principal desventaja es que el flujo de las propiedades de los diferentes plásticos tiene que ser bastante similar para evitar la distorsión de interfaz. Esto limita la selección de materiales que pueden ser combinados a través del bloque de alimentación.

En el sistema multicolector, cada plástico tiene su propia entrada y se colectan en la boquilla de coextrusión. Las diferentes corrientes de masa fundida se combinan justo

antes de que salgan de la boquilla, de modo que se produzca una mínima distorsión. La ventaja del sistema multicolector es que plásticos con una amplia diferencia de propiedades de flujo pueden ser combinados. Como resultado, existe una amplia opción de materiales que pueden ser combinados a través de esta técnica de extrusión. La desventaja es que el diseño de la boquilla es más complicada y por lo tanto más cara.

La Figura 2.38 muestra una boquilla multicolectora para lámina o película. Esta boquilla tiene dos entradas, dos colectores, y una salida. Los dos plásticos se combinan en la entrada de la región plana, esta es la última sección paralela del canal de flujo de la boquilla.

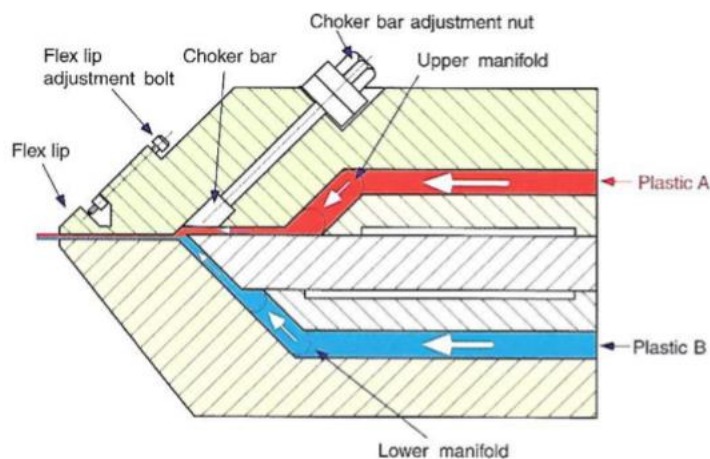


Figura 2. 38 Ejemplo de una boquilla multi-colectora para láminas o películas

2.4.4.2 Revestimiento por extrusión

En el revestimiento por extrusión, una capa fundida de plástico es combinada con una red sólida o un sustrato en movimiento. El sustrato puede ser papel, cartón, papel aluminio, película plástica, tela. El sustrato puede ser igualmente un producto multicapas. Un esquema de revestimiento por extrusión se muestra en la Figura 2.39.

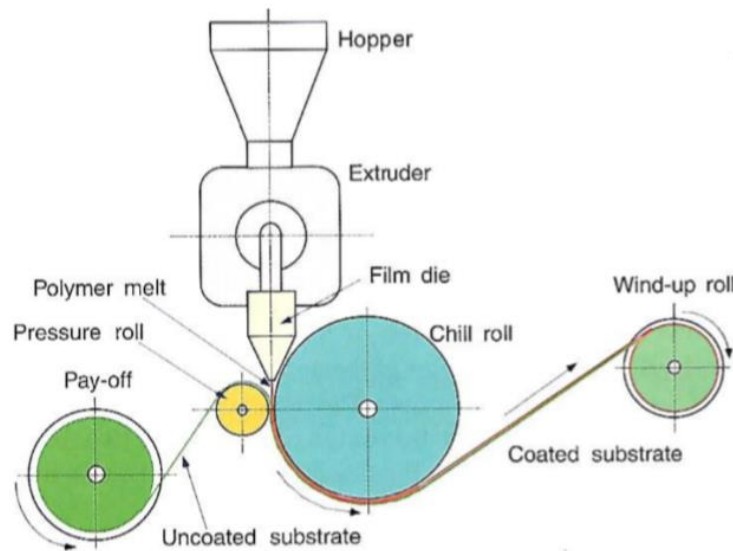


Figura 2. 39 Esquema de una operación de revestimiento por extrusión

2.4.4.3 Laminación por extrusión

La laminación por extrusión implica la combinación de dos o más sustratos, tales como papel, papel aluminio, mediante el uso de películas plásticas como adhesivo entre los dos sustratos, ver Figura 2.40. Las telas o redes pueden ser precalentadas o tratadas superficialmente para mejorar la unión con la película plástica.

La lámina o película extruída pueden ser laminadas con una película sobre un lado o en ambos. El laminado puede ser papel, papel aluminio, malla, o un número de otros materiales. Con la laminación muchas estructuras diferentes de lámina o película pueden ser hechas.

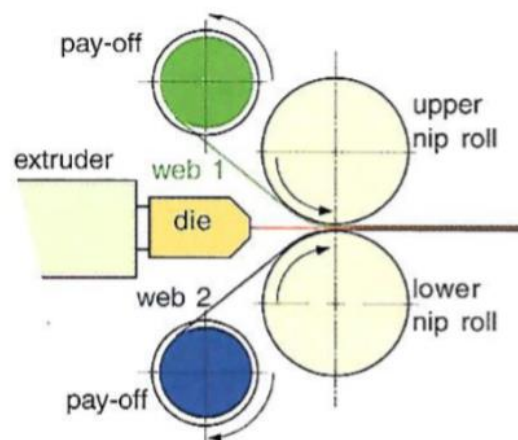


Figura 2. 40 Esquema de laminación por extrusión

2.4.5 Líneas de película soplada

Una línea de película soplada es bastante diferente de una línea de película plana. En una línea de película soplada, una película tubular es extruída verticalmente hacia arriba como se muestra en la Figura 2.41. Aire es introducido al interior del tubo, como resultado, el tubo se expande a una burbuja con un diámetro más largo que el de la boquilla. La relación del diámetro de la burbuja con el diámetro de la boquilla es llamada proporción de soplado.

Típicamente, la relación de expansión entre la boquilla y el tubo de soplado de película sería de 1,5 a 4 veces el diámetro de la boquilla. La reducción entre el espesor de pared en estado fundido y el espesor de película enfriada se produce en ambas direcciones radiales y longitudinales y se controla fácilmente cambiando el volumen de aire dentro de la burbuja y por la alteración de la distancia de la velocidad.

Una ventaja de este proceso es que puede producir no solo productos tubulares (bolsas) sino que también películas planas. Simplemente mediante la abertura del tubo. En algunas ocasiones el plástico es extruído para producir películas con propiedades especiales.

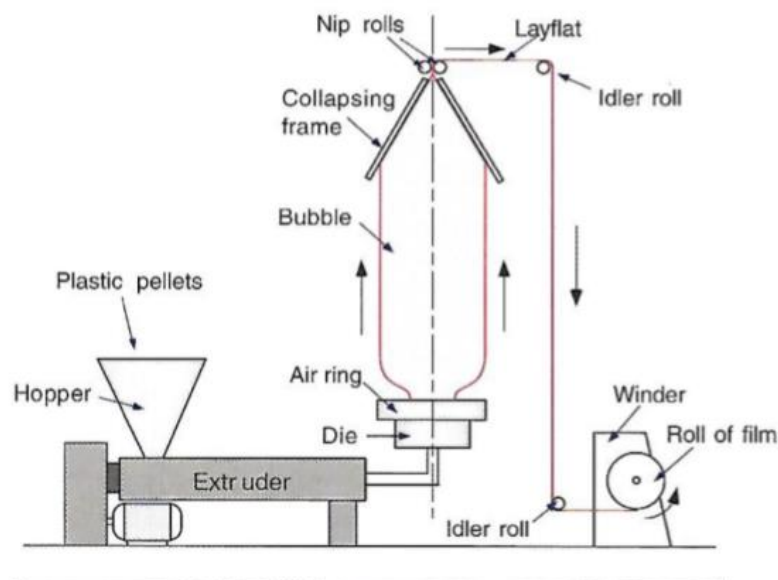


Figura 2. 41 Esquema de una línea de película soplada

2.4.6 Líneas compuestas de extrusión

Las líneas compuestas vienen en muchas formas y tamaños. La composición puede estar formada por extrusores de tornillo simple, extrusores de doble tornillo, mezcladores de tornillo simple, conjunto de mezcladores internos, mezcladores internos continuos. La configuración de la línea es determinada, dentro de otras cosas, por los ingredientes para ser combinado en el extrusor de composición. El equipo consiste típicamente de un sistema de peletización, ver la Figura 2.42. Los componentes poliméricos son usualmente añadidos por el primer puerto de alimentación. Los rellenos son usualmente añadidos a un puerto bajo de alimentación donde el plástico ya se ha fundido; este arreglo reduce el desgaste de la máquina de extrusión causada por el material de relleno. Los altos niveles de relleno se agregan a menudo por una extrusora de doble husillo, particularmente cuando el relleno tiene baja densidad. Con altos niveles de relleno, usualmente hay una cantidad substancial de aire arrastrado; esto es removido a través de un orificio de ventilación. El orificio de ventilación es usualmente conectado a bomba aspiradora; un alto nivel de aspiración mejora la remoción de volátiles del plástico.

Algunos peletizadores cortan filamentos extruídos enfriados en un baño de agua; estos son llamados peletizadores de filamentos. Los dados optan láminas extraídas en vez de filamento. Los pellets de un dado tienen una forma uniforme cúbica u octaédrica. Otros peletizadores cortan el material justo a la salida de la boquilla; estos son llamados “die face pelletizers”. Estos sistemas de corte pueden ser peletizadores de dados secos, peletizador de anillo de agua o peletizador subacuáticos. En los peletizadores de secado frontal, el plástico fundido es optado frente a la boquilla. En los peletizadores de anillo de agua, la acción centrífuga del cortador lanza los pellets hacia una caja cerrada de caracol de agua girando alrededor del perímetro del alojamiento de la cuchilla. La suspensión fluye a un secado centrífugo. En los peletizadores subacuáticos, el plástico fundido es extruído directamente al agua y cortado inmediatamente por múltiples cuchillas.

La boquilla puede necesitar capacidad de calentamiento especial para que se enfríe. El procedimiento de puesta en marcha para el peletizado subacuático a menudo requiere una secuencia cuidadosa del flujo del plástico, rotación de corte, y el flujo de entrada de agua para evitar un congelamiento y aglomeración.

Extrusores compuestos pueden ser combinados con sistemas de formado. En muchos casos, una bomba es colocada en la descarga final del extrusor para generar la presión frontal y controlar la salida. Un ejemplo se muestra en la Figura 2.43.

El plástico es introducido al primer puerto de alimentación de extrusor compuesto, el relleno es introducido en el segundo puerto de alimentación, y los volátiles y el aire atrapado son removidos por el orificio de ventilación. Una bomba de engranajes es colocada entre el extrusor compuesto y la boquilla de la lámina. La lámina es alimentada en un conjunto de rodillos y de ahí es manejada como en un línea de láminas como se indicó anteriormente.

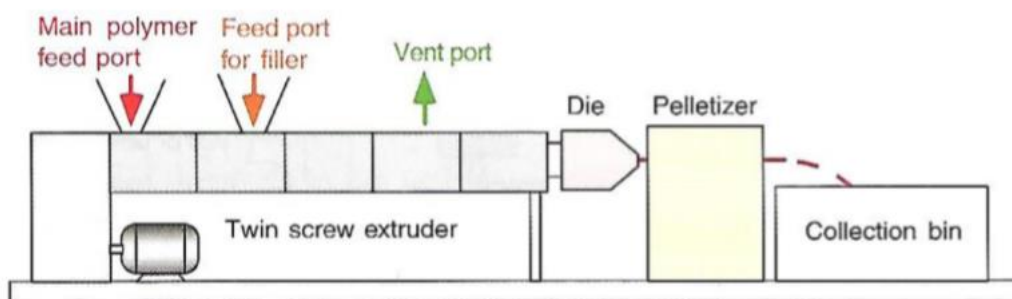


Figura 2. 42 Línea de extrusión de mezcla típica

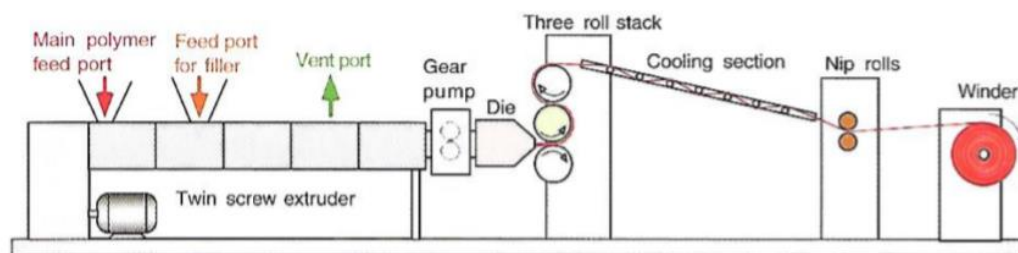


Figura 2. 43 Línea de extrusión de mezcla con formado en línea

2.4.7 Líneas de extrusión de perfiles

Muchas líneas de extrusión son usadas para la producción de perfiles. Las líneas de perfiles de igual manera vienen en muchas formas y tamaños. Una línea típica de extrusión consiste en un extrusor, una boquilla, una unidad de calibración, una unidad de enfriamiento, un dispositivo de medición, un jalador, y un cortador, ver la Figura 2.44.

Una bomba de engranajes puede ser utilizada si la tolerancia dimensional del producto extruído es bastante baja. En algunas líneas de perfiles una película o papel aluminio es laminado al perfil extruído. Perfiles extruídos tienen un enorme rango de formas y tamaños [2.8].

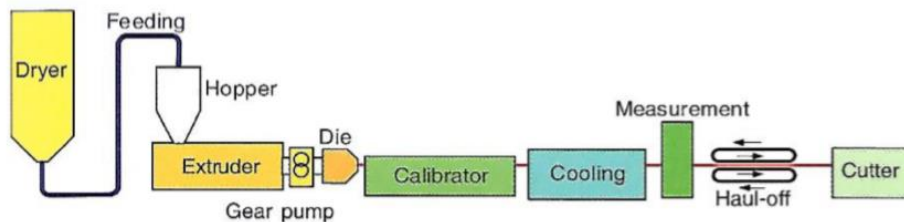


Figura 2. 44 Componentes de línea de extrusión de perfiles

2.5 Plásticos y sus propiedades importantes en la extrusión

A continuación se describirán las principales propiedades térmicas y de flujo de los plásticos en el proceso de extrusión. Conocer estas propiedades nos ayuda a seleccionar las máquinas apropiadas para la extrusión de plásticos, establecer las condiciones correctas del proceso, y analizar los problemas de extrusión.

2.5.1 Termoplásticos y termoestables

Los plásticos son materiales a base de carbono hechos de moléculas muy largas. Los plásticos son llamados de igual manera polímeros; son manufacturados mediante la modificación de productos naturales o por síntesis a través de intermedios. Por ejemplo, polietileno es formado por la combinación de grupos de etileno como se muestra en la Figura 2.45.

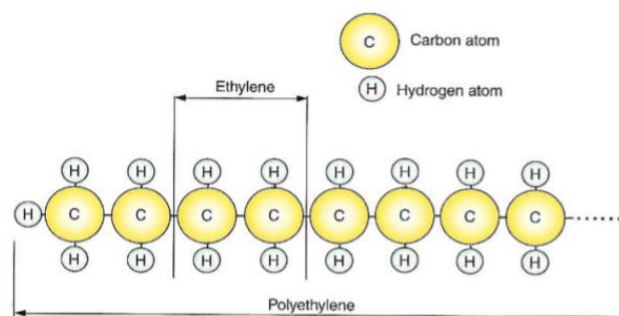


Figura 2. 45 Representación del polietileno

Los plásticos pueden ser divididos en termoplásticos y termoestables. Los termoplásticos son plásticos que se pueden moldear, fundir, y fluir como fluidos espesos cuando se calientan por encima de cierta temperatura. En este estado, el material es usualmente referido como plástico fundido. Es también en este estado que el material es usualmente formado o moldeado en un producto. Al enfriarse, los termoplásticos se endurecen y se comportan como un sólido. Después de que un producto termoplástico es formado, puede ser recalentado y ablandado para darle forma nuevamente. Así, los termoplásticos pueden ser procesados varias veces y esto es lo que los hace adecuados para el reciclaje.

Se debe notar que las propiedades de un plástico pueden cambiar después de reciclarse; como resultado, el plástico reciclado no puede ser utilizado en la misma aplicación que la original. Algunos ejemplos de termoplásticos son el polietileno, polipropileno, y policarbonato.

Los termoestables son plásticos que se endurecen cuando son calentados por encima de cierta temperatura. El endurecimiento es el resultado de una curación o de una acción de reticulación que conecta las moléculas individuales y causa la formación de una red molecular tridimensional. El formado de termoestables usualmente se produce antes del establecimiento de la reticulación, es decir, a una temperatura por debajo de la temperatura de curado.

La reacción de reticulación no es reversible, un termoestable no puede ser ablandado nuevamente como un termoplástico. Como resultado, es más complicado reciclar un termoestable que un termoplástico. Algunos ejemplos de termoestables son los compuestos fenólicos, ureas, ciertos poliésteres, melaminas, y epoxis.

2.5.2 Plásticos amorfos y semi-cristalinos

Los termoplásticos pueden ser divididos en plásticos amorfos o semi-cristalinos. Los plásticos amorfos, tienen una estructura molecular, aleatoria, irregular sin regiones cristalinas, ver la Figura 2.46.

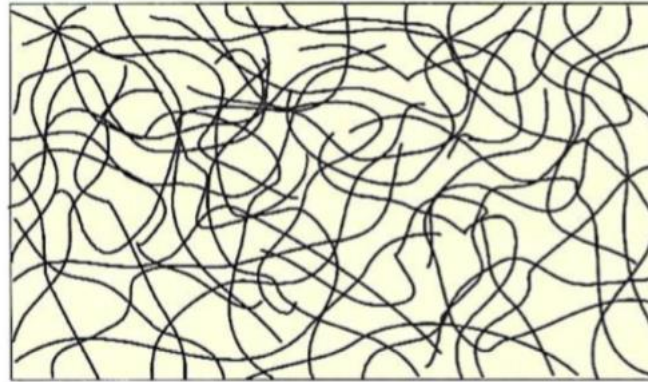


Figura 2. 46 Representación de la estructura de plásticos amorfos

Ejemplos de plásticos amorfos son el poli estireno (PS), policarbonato (PC), acrílico (PMMA), Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), cloruro de polivinilo (PVC).

Los plásticos semi-cristalinos pueden formar regiones altamente regulares donde las moléculas forman cristales, estas regiones cristalinas son referidas como cristalitas, ver la Figura 2.47.

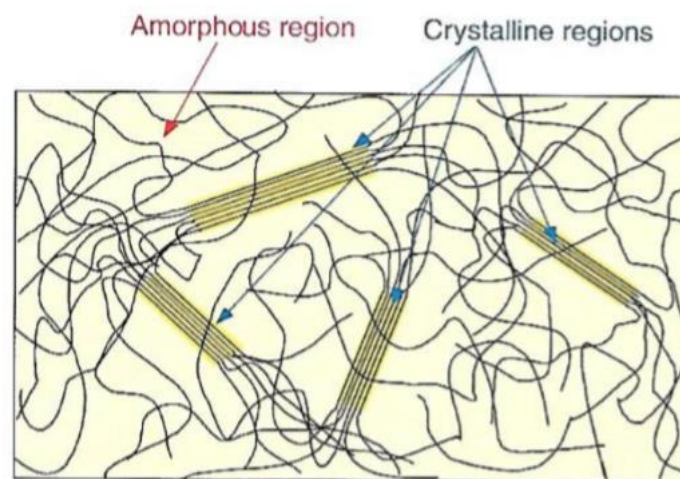


Figura 2. 47 Representación de la estructura de plásticos semi-cristalinos

La habilidad de formar cristales es determinada en gran medida por la forma de la molécula del plástico. Los plásticos que tienen moléculas lineales sin grupos laterales grandes usualmente pueden formar cristalitas. Un ejemplo es el polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés), el cual puede alcanzar altos niveles de cristalinidad (tan alto como 90%). Otros polímeros que pueden formar regiones cristalinas

son acetal (POM), nylon (PA), tereftalato de poliéster (PET), polietileno de baja densidad (LDPE), y polipropileno (PP). Los plásticos con grupos laterales voluminosos a menudo no pueden formar cristalitas y por lo tanto son amorfos, como el poli estireno (PS).

Las regiones cristalinas en los termoplásticos tienen diferentes propiedades que las regiones amorfas, tales como densidad y propiedades ópticas. Como resultado, la transmisión de la luz a través de un plástico cambia cuando los cristalitas están presentes; los cristalitas actúan como relleno y hacen al material opaco o translúcido bajo su punto de fusión. Por encima del punto de fusión, los cristalitas desaparecen y el material es transparente. Ya que los plásticos amorfos no tienen cristalitas, son usualmente transparentes, a menos que por supuesto, contengan rellenos u otros materiales que alteren sus propiedades ópticas. Es interesante notar que “el cristal poli estireno” es un plástico amorfo. Es llamado “cristal” porque es transparente, no porque es cristalino.

Los plásticos semi-cristalinos nunca son completamente cristalinos; el nivel más alto de cristalinidad ocurre en HDPE con una cristalinidad mayor al 90%. A pesar de esto, los plásticos semi-cristalinos son usualmente referidos como materiales cristalinos. Debe recordarse que el término semi-cristalino es más apropiado. Algunos plásticos cristalizan más rápido, por ejemplo, HDPE, mientras que otros cristalizan lentamente, por ejemplo, PET. De hecho, si el PET es enfriado rápidamente después de su fundición, puede enfriarse por completo a un estado amorfo.

En general, la morfología que se desarrolla en un plástico depende de que tan rápido es enfriado durante y después del proceso del formado. La morfología es de igual manera afectada por los esfuerzos ejercidos en el plástico durante y después del proceso de formado. Así, el flujo y la temperatura en la boquilla y por debajo de la boquilla juegan un rol importante en la morfología que en última instancia se desarrolla en la parte de plástico. Las propiedades de la pieza están fuertemente determinadas por su morfología. Por lo tanto, las propiedades del producto extruído son afectadas por el flujo y la temperatura de la boquilla o dado y por debajo de estos.

2.5.3 Plásticos líquidos cristalinos (LCPs)

Las moléculas de LCPs son estructuras en forma de varillas organizadas en largos y paralelos dominios, no solo en el estado sólido sino que también en el estado fundido, ver la Figura 2.48. Los dominios, largos y ordenados, le dan a los plásticos líquidos cristalinos (LCPs) características únicas comparadas con plásticos amorfos y semi-cristalinos.

Las diferencias entre las propiedades mecánicas y físicas entre plásticos se pueden atribuir a su estructura. El orden en los plásticos semi-cristalinos y LCPs los hacen más rígidos, fuertes, y menos resistentes al impacto que los plásticos amorfos. Los plásticos semi-cristalinos y los LCPs tienden a ser más resistentes a la fluencia, calor, y productos químicos, sin embargo, tienden a requerir temperaturas más altas de fundición en proceso.

A pesar de las temperaturas de procesamiento más altas, LCPs se contraen menos durante el enfriamiento que los plásticos amorfos.

Cuando los plásticos amorfos son calentados, se ablandan gradualmente, mientras que los semi-cristalinos tienden a ablandarse más abruptamente. En el proceso de fundición, los plásticos amorfos usualmente no fluyen tan fácilmente como los semi-cristalinos. LCPs tienen el punto más alto de fusión de los plásticos semi-cristalinos, pero se suavizan gradualmente como los amorfos. LCPs tienen la viscosidad y contracción más baja de todos los termoplásticos. LCPs son adecuados para la producción de pequeñas partes de precisión para aplicaciones exigentes.

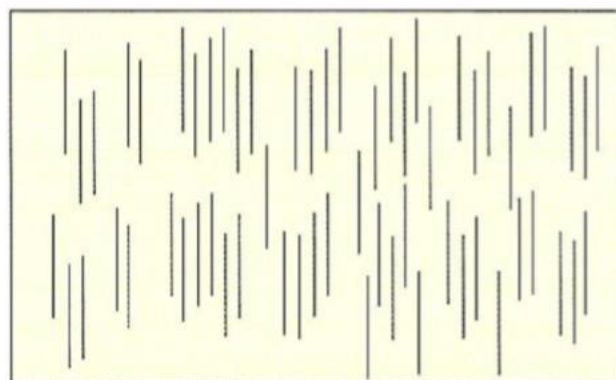


Figura 2. 48 Representación de la estructura de plásticos líquidos cristalinos

2.5.4 Elastómeros

Los elastómeros son materiales capaces de soportar grandes deformaciones elásticas. Existen tres tipos de elastómeros: elastómero convencional (vulcanizable), elastómeros de sistema reactivo, y elastómeros termoplásticos, ver la Figura 2.49. Los elastómeros convencionales se convierten en elásticos mediante la creación de una red tridimensional de reticulaciones entre las moléculas. La formación de enlaces cruzados químicos es llamada “vulcanización” o “curación”. Algunos ejemplos de elastómeros son poliisopreno y polibutadieno.

Los elastómeros de igual manera pueden ser producidos de productos químicos reactivos de bajo peso molecular. Algunos poliuretanos y elastómeros de silicona entran en esta categoría. En los elastómeros termoplásticos o TPEs, no hay reticulaciones químicas. Los enlaces entre las moléculas son enlaces físicos en vez de enlaces químicos. Algunos ejemplos son uretano TPE y estirénico TPE. Los principales tipos de plásticos sintéticos se muestran en la Figura 2.50 [2.9].

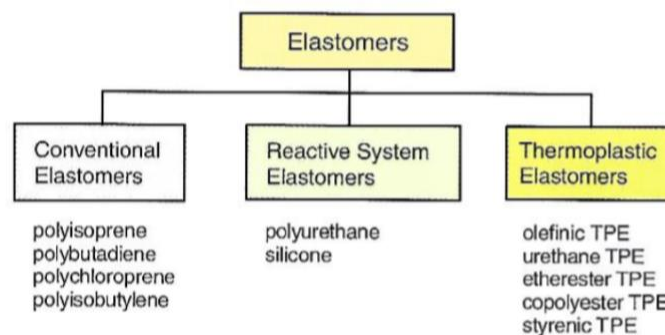


Figura 2. 49 Principales tipos de elastómeros

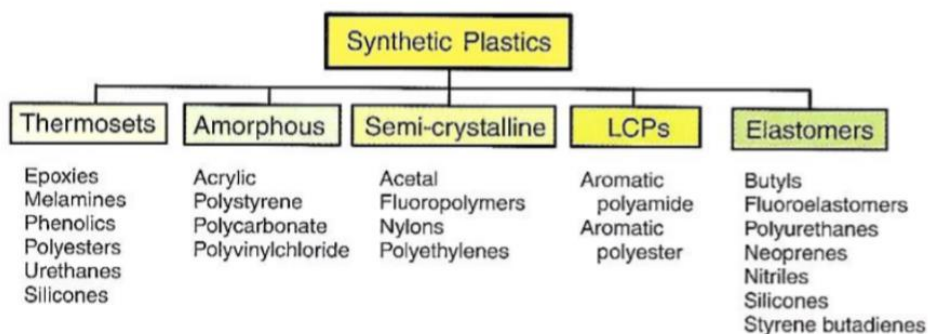


Figura 2. 50 Diferentes tipos de plásticos sintéticos

2.5.5 Comportamiento del flujo de plásticos fundidos

Para comprender como es el comportamiento de los plásticos durante su procesamiento, es necesario saber cómo el plástico fundido fluye. Una de las más importantes propiedades de flujo es la viscosidad del fluido. La viscosidad es la resistencia a fluir. Un fluido de baja viscosidad, como el agua, fluye fácilmente. Un fluido de alta viscosidad, como la miel, fluye con menos facilidad. La viscosidad en el flujo de cizallamiento es el esfuerzo de cizallamiento que actúa sobre el fluido dividido por la velocidad de cizallamiento.

Los plásticos están formados por moléculas muy largas, como resultado, tienen viscosidades de fusión altas. La viscosidad es expresada con frecuencia en las unidades Pascal por segundo; las unidades Poise son usadas igualmente. Es fácil convertir de Poise a Pascales por segundo, $10 \text{ Poise} = 1 \text{ Pascal por segundo}$. La Tabla 2.7 muestra la viscosidad aproximada de varios fluidos, expresados en Pascales por segundo.

Tabla 2. 7 Viscosidad de varios materiales

Material	Viscosidad (Pa-s)
Aire	0.00001
Agua	0.001
Aceite de Oliva	0.1
Plásticos fundidos	100 a 1,000,000
Resina	1,000,000,000

Es claro observar de la tabla que la viscosidad de los plásticos es mucho más alta que la viscosidad del agua, por al menos cinco ordenes de magnitud. Con una viscosidad del plástico más alta, un torque mayor es requerido en el extrusor y una presión mayor es necesaria para forzar al material fundido a través de la boquilla. La viscosidad de un plástico es altamente dependiente de su peso molecular, mientras más alto es su peso molecular, más alta es su viscosidad.

2.5.6 Índice de fusión

La habilidad de un plástico fundido a fluir es usualmente mediada en un ensayador de índices de fusión. La máquina de índices de fusión es un simple extrusor de pistón, ver la Figura 2.51.

El plástico está localizado en el depósito y calentado a una temperatura apropiada. Un peso es colocado en la parte superior del pistón; esto causa que el plástico fundido sea extruído fuera la boquilla de la máquina localizada al final del depósito. El índice de fusión (MI), algunas veces llamado índice de fluidez (MFI), es la cantidad de plástico extruído en gramos en un cierto periodo de tiempo, usualmente diez minutos.

Un plástico de baja viscosidad fluye mucho más rápido que un flujo de alta viscosidad. Así, un alto nivel de MI indica una baja viscosidad del plástico y un bajo nivel de MI indica una alta viscosidad del plástico. El término de plástico fundido fraccional es usado con frecuencia, esto significa que el plástico tiene un índice de fusión menor a uno. Un índice de fusión menor a uno es considerado bajo y así, los plásticos fundidos fraccionales tienen altas viscosidades.

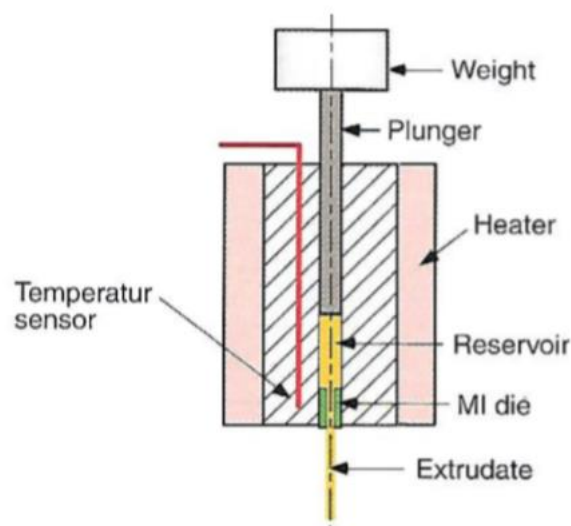


Figura 2. 51 Aparato de índice de fusión

2.5.7 Efecto de cizallamiento

Cuando un plástico es procesado, generalmente es expuesto a un flujo de cizallamiento. En el flujo de cizallamiento, diferentes capas de plástico se mueven a diferentes velocidades. La tasa de cizallamiento que ocurre en un fluido es llamada velocidad de cizallamiento; es la diferencia de velocidad entre dos elementos fluidos divididos por la distancia normal entre los elementos; ver la Figura 2.52.

La velocidad de flujo y la geometría del canal de flujo determinan la velocidad de cizallamiento, cuando la velocidad de flujo es alta, las velocidades de cizallamiento son altas.

De igual manera, cuando el canal de flujo es pequeño, la velocidad de cizallamiento es alta [2.10].

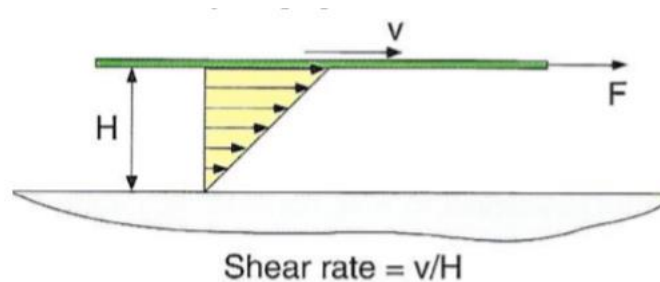


Figura 2. 52 Cizallamiento de un fluido entre dos placas paralelas

2.5.8 Dilución por cizallamiento o comportamiento pseudoplástico

En los plásticos, la viscosidad cambia cuando las velocidades de cizallamiento cambian. Un fluido que se comporta de esta manera es llamado fluido no-Newtoniano o no-linear. La viscosidad de un plástico fundido disminuye cuando se incrementa la velocidad de cizallamiento; esto es llamado dilución por cizallamiento o comportamiento pseudoplástico. El comportamiento resulta del hecho de que las moléculas del plástico son muy largas y enredadas. Los enredos de las moléculas determinan la viscosidad de un plástico. Cuando un plástico es expuesto a una alta velocidad de cizallamiento, el número de enredos de las moléculas disminuye y con él, la viscosidad. Cuando la velocidad de cizallamiento disminuye, la viscosidad aumenta nuevamente. Este comportamiento es llamado comportamiento dilución por cizallamiento, también es

llamado comportamiento pseudoplástico. Este comportamiento es muy importante en la extrusión.

Si representamos gráficamente la viscosidad frente a la velocidad de cizallamiento para un fluido y forma una línea recta en un gráfico logarítmico (log-log plot), el fluido es llamado fluido de ley de potencia, ver la Figura 2.53.

Si la curva real del índice de viscosidad de cizallamiento está cercana a una línea recta, el comportamiento real se puede aproximar con una expresión de ley de potencia.

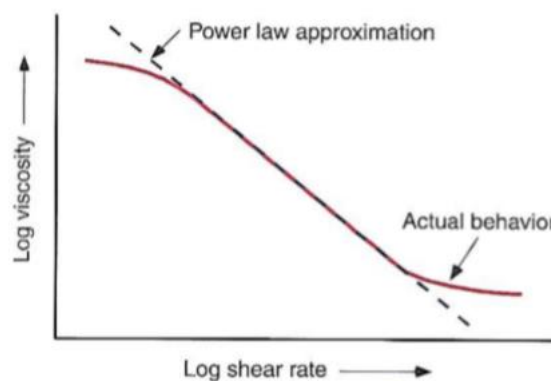


Figura 2. 53 Viscosidad contra aproximación de la tasa de participación y aproximación de ley de potencia

La ecuación de la ley de potencia tiene dos parámetros importantes: el índice de consistencia y el índice de la ley de potencia. El índice de consistencia es el valor de la viscosidad a una velocidad de cizallamiento de uno. El índice de la ley de potencia es una medida del grado de comportamiento de dilución por cizallamiento; para los plásticos varía de entre cero y uno. Mientras más cercano es el índice de la ley de potencia de cero, es más fuerte la dilución de cizallamiento del plástico.

Cuando el índice de la ley de potencia es cercano a uno, el plástico la dilución de cizallamiento es más baja. Cuando el índice de la ley de potencia es igual a uno, la viscosidad no es afectada por la velocidad de cizallamiento; un fluido que se comporta de esta manera es llamado Newtoniano.

2.5.9 Efecto de la temperatura en la viscosidad

Cuando la temperatura de un plástico fundido es incrementada, la viscosidad se reduce, como se muestra en la Figura 2.54. El efecto de la temperatura en la viscosidad varía de un plástico a otro. En general, los plásticos amorfos tienen una alta sensibilidad a la temperatura comparados con los plásticos semi-cristalinos. El coeficiente de temperatura para plásticos amorfos varía de aproximadamente de 5 a 20%. Esto significa que la viscosidad varía de un 5 a un 20% por cada grado centígrado de cambio en la temperatura. Para plásticos semi-cristalinos, el coeficiente de la temperatura de la viscosidad es alrededor del 2 al 3%. Un cambio en la temperatura del cañón extrusor va a tener un efecto mayor en los plásticos amorfos que en los semi-cristalinos. Por lo tanto un buen control de la temperatura es incluso más crítico en el procesamiento de plásticos amorfos que en los plásticos semi-cristalinos.

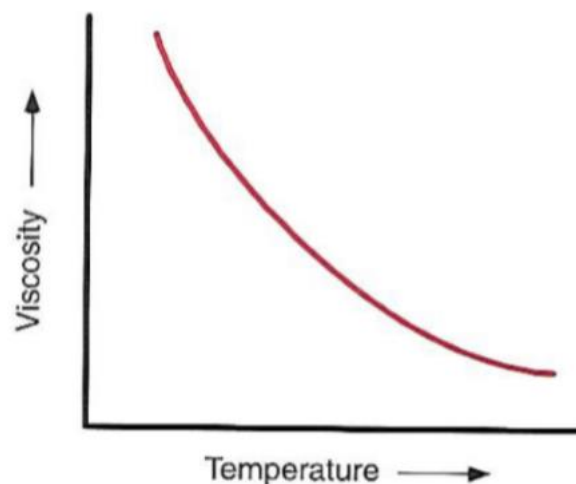


Figura 2. 54 Efecto de la temperatura en la viscosidad de fusión

2.5.10 Generación de calor viscoso

Cuando un plástico fundido es cortado, se genera calor en el plástico; esto es llamado generación de calor viscoso. La cantidad de generación de calor viscoso es determinada por el producto de la viscosidad y la velocidad de cizallamiento al cuadrado. Así, mientras más grande es la viscosidad del plástico, más grande es la generación de calor viscoso. Lo mismo es cierto para la velocidad de cizallamiento; sin embargo, la velocidad de

cizallamiento tiene un fuerte efecto porque el calentamiento viscoso incrementa con la velocidad de cizallamiento al cuadrado.

Como resultado la alta viscosidad de los plásticos, en extrusión la mayoría del calentamiento de los plásticos viene de la generación de calor viscoso. De hecho, en algunos casos sucede mucha generación de calor viscoso en el extrusor y la máquina tiene que ser enfriada para mantener las temperaturas de fundición deseadas.

2.5.11 Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de un plástico son importantes para comprender como se comporta un material dentro del extrusor. El conocimiento de las propiedades térmicas permite la selección de la máquina apropiada, el establecimiento correcto de las condiciones del proceso, y el análisis de problemas del proceso. Las propiedades térmicas más importantes son la conductividad térmica, el calor específico, la estabilidad térmica y el tiempo de inducción, densidad, punto de fusión, y la temperatura de transición vítrea.

2.5.11.1 Conductividad térmica

La conductividad térmica es probablemente la propiedad térmica más importante. La conductividad térmica es la habilidad de un material para conducir calor. Los plásticos tienen una baja conductividad térmica; son considerados aisladores térmicos. Esto significa que el calentamiento y enfriamiento de los plásticos por conducción es un proceso lento. El calentamiento ocurre en el extrusor y el enfriamiento después de la boquilla. Con frecuencia la baja conductividad térmica determina que tan rápido puede ser procesado un plástico. Esto es verdadero no solo en la extrusión sino que también en el moldeo por inyección y, de hecho, en la mayoría de las operaciones de procesamiento de plásticos.

Otro aspecto de la baja conductividad térmica de los plásticos es que son propensos a temperaturas no uniformes. Por ejemplo, si un plástico fundido es introducido a una boquilla de extrusión con una región de alta temperatura en un lado del canal, toma un tiempo considerable para las temperaturas de fusión igualarse por conducción. Si el canal tiene un diámetro de 20 mm, podría tomar de 5 a 10 minutos para que las temperaturas se

iguales. Un tiempo típico de estancia en una boquilla de extrusión es solo alrededor de 30 segundos. Como resultado, el tiempo de estancia es muy corto para que las temperaturas de fusión se igualen por conducción. Esto significa que el flujo de altas temperaturas de fusión persiste a través de toda la boquilla y causa un flujo no uniforme en la salida de la boquilla, típicamente, esto resulta en un punto espeso local en el producto extruído como se muestra en la Figura 2.55.

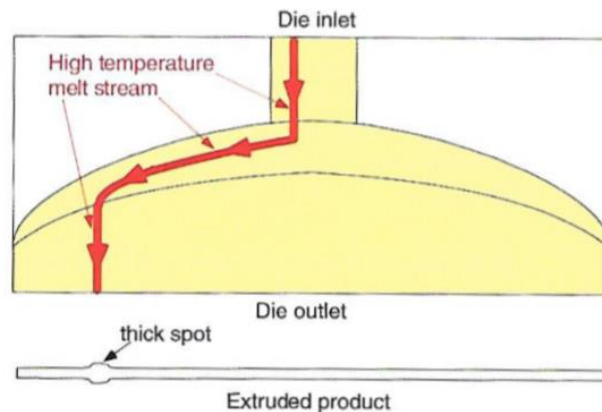


Figura 2. 55 Efecto de temperaturas de fusión no uniformes en la extrusión de láminas o películas

2.5.11.2 Calor específico y entalpía

El calor específico es la cantidad de calor necesaria para incrementar la temperatura de un material por un grado. En la mayoría de los casos, el calor específico de los plásticos semi-cristalinos es mayor que el de los plásticos amorfos. La cantidad de calor necesario para incrementar la temperatura de un material de una temperatura base a una temperatura más alta es determinada por la diferencia de entalpía entre dos temperaturas. Si utilizamos la temperatura ambiental como la temperatura base, la entalpía de diferentes plásticos puede ser representada frente a la temperatura, esto se muestra en la Figura 2.56.

La entalpía es expresada en KWh/kg o Hp-hr/lb; es una energía específica, en otras palabras, energía por unidad de masa. La mayoría de la energía requerida en el procesamiento de plásticos se necesita para incrementar la temperatura del plástico. Si conocemos la temperatura inicial (usualmente la temperatura ambiental) y la temperatura de descarga, podemos determinar la energía mínima requerida para procesar el plástico.

Por ejemplo, si miramos la curva para el PVC, podemos observar que la energía específica requerida para incrementar la temperatura de la temperatura ambiental a 150 °C es alrededor de 0.05 kWh/kg. Así, por cada kg/hr, se requiere de 0.05 kW. Si se procesa PVC comenzando de la temperatura ambiental hasta 150 °C a 100 kg/hr (220 lbs/hr) el requisito de potencia mínimo es 5 kW (6.7 hp).

Si comparamos LDPE con PVC, podemos observar que el LDPE requiere alrededor de 0.15 kWh/kg para pasar de la temperatura ambiental a una temperatura de 150 °C. Así, el requisito de energía específica para LDPE es mucho mayor que el del PVC. En general, los plásticos semi-cristalinos tienen requerimientos más altos de energía específica que los plásticos amorfos. Obviamente, esto también afecta el enfriamiento. Significa que en el enfriamiento de LDPE de 150 °C a la temperatura ambiental, una mayor cantidad de calor tiene que ser removida que en la del enfriamiento de la misma masa de PVC de 150 °C a la temperatura ambiental.

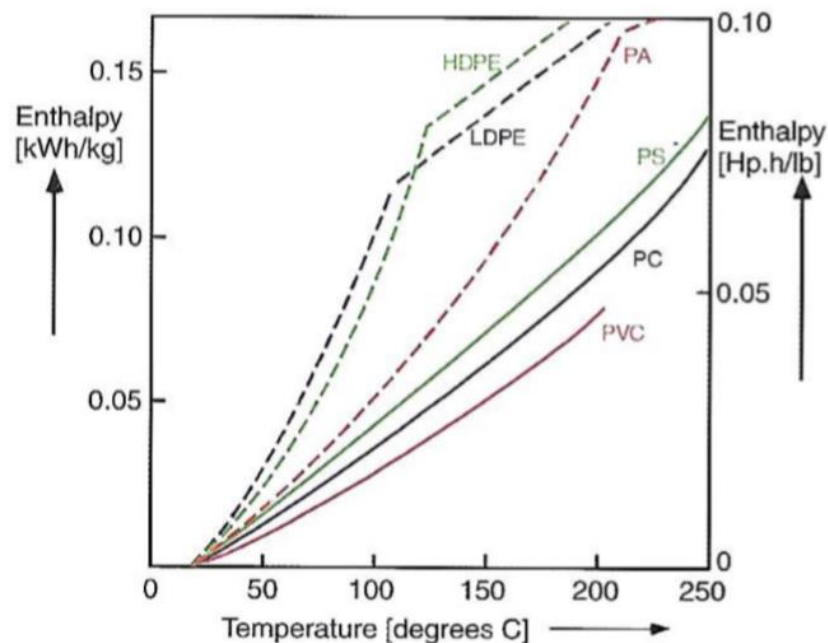


Figura 2. 56 Curvas de entalpía/temperatura para seis plásticos diferentes

2.5.11.3 Estabilidad térmica y tiempo de inducción

Los plásticos se pueden degradar durante el proceso de extrusión. Las principales variables involucradas en la degradación son la temperatura y la duración del tiempo en la que un plástico es sometido a altas temperaturas. Los plásticos se degradan cuando son

expuestos a altas temperaturas; mientras más alta es la temperatura, la degradación es más rápida. La degradación puede resultar en la pérdida de propiedades mecánicas y ópticas, problemas de apariencia, desgasificación, quemadura, entre otras. Otras variables pueden afectar la degradación, como la presencia de oxígeno.

El tiempo de inducción es la medida de la estabilidad térmica de un plástico, es el tiempo en el que un plástico puede sobrevivir a elevadas temperaturas sin degradación medible. Mientras más largo es el tiempo de inducción a una cierta temperatura, mejor es la estabilidad térmica del plástico. El tiempo de inducción puede ser medido usando diferentes instrumentos, como un analizador termogravimétrico (TGA por sus siglas en inglés), cono y reómetro de placas, y otros.

Cuando el tiempo de inducción es medido a varias temperaturas, puede ser trazada frente a la temperatura como se muestra en la Figura 2.57 para HDPE y ácido acrílico de etileno (EAA). Dos cosas son claras de la figura. Una, el tiempo de inducción disminuye exponencialmente con la temperatura. Dos, el tiempo de inducción para el HDPE es mucho más largo que para el EAA. La estabilidad térmica de un plástico puede ser obviamente muy diferente a la de otro plástico.

La estabilidad térmica y el tiempo de inducción de un plástico pueden ser mejorados con la adición de estabilizadores térmicos.

Algunos plásticos tienen tan pobre estabilidad térmica que no pueden ser procesados sin los estabilizadores térmicos; un ejemplo es el PVC rígido.

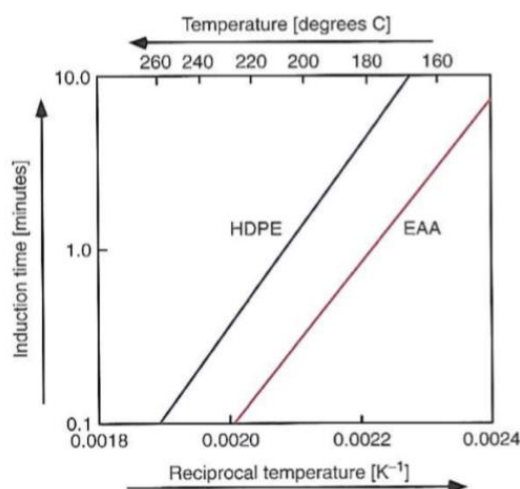


Figura 2. 57 Tiempo de inducción para HDPE y EAA contra temperatura

2.5.11.4 Densidad

La densidad de un material es la masa dividida por el volumen de una muestra de material; con frecuencia es expresada en gramos por centímetro cúbico o gm/cm^3 . La densidad de la mayoría de los plásticos es alrededor de la misma que la del agua, la cual es 1 g/cm^3 . La densidad de varios plásticos a temperatura ambiente se muestra en la Tabla 2.8.

Tabla 2. 8 Valores de densidad para plásticos varios

Plástico	Densidad (g/cm^3)
LDPE	0.92
HDPE	0.95
PVC	1.40
ABS	1.02
PP	0.91
NYLON-6	1.13
PETP	1.35
PS	1.06
FEP	2.15

La densidad también puede ser descrita mediante el término volumen específico. El volumen específico es el volumen dividido por la masa de una muestra de un material; es el recíproco de la densidad y puede ser expresada en cm^3/g . La densidad o volumen específico es afectada por la temperatura y la presión. La movilidad de las moléculas del plástico incrementa con altas temperaturas. Como resultado, el volumen específico incrementa con el aumento de la temperatura, como se ilustra en la Figura 2.58 para HDPE. El volumen específico disminuye con presiones altas como se muestra.

El volumen específico se incrementa rápidamente conforme el plástico se aproxima al punto de fusión. En el punto de fusión, la pendiente cambia bruscamente y el volumen se

incrementa más lentamente a altas temperaturas. Un diagrama que muestra el efecto de la presión y la temperatura en el valor específico de un plástico es llamado diagrama P-V-T.

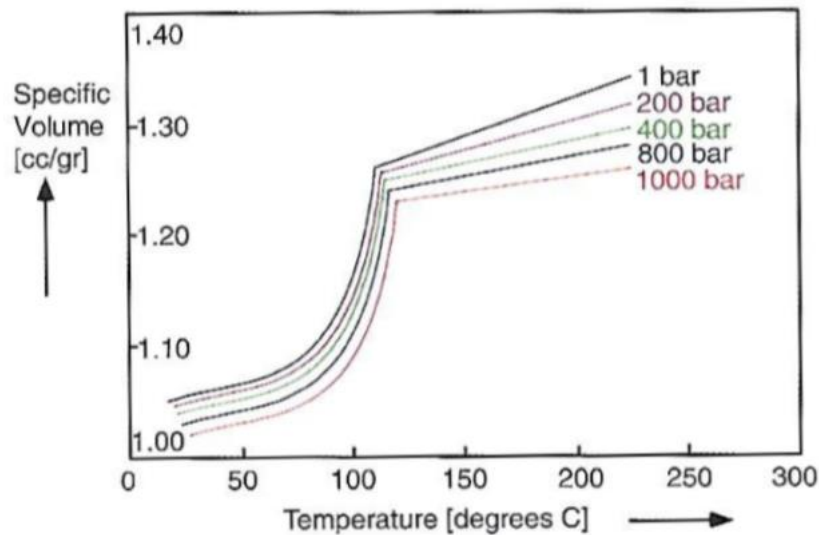


Figura 2. 58 Volumen específico del HDPE contra la temperatura a varias presiones

2.5.11.5 Punto de fusión

El punto de fusión es la temperatura a la cual los cristalitas se funden. Debido a que los plásticos amorfos no tienen cristalitas, no hay un punto de fusión para este tipo de materiales, solo para los plásticos semi-cristalinos. Los plásticos semi-cristalinos usualmente son procesados alrededor de 50 °C por encima de su punto de fusión.

El punto de fusión de varios plásticos se muestra en la Tabla 2.9. Si el plástico es susceptible a la degradación, la temperatura de procesamiento debe ser lo más baja posible. Cuando el plástico tiene una alta viscosidad, las temperaturas de procesamiento deben ser tan altas como sean posible sin causar una degradación del plástico.

2.5.11.6 Temperatura de transición vítrea

Los plásticos a bajas temperaturas son rígidos y duros. A temperaturas altas, los plásticos se vuelven suaves y dúctiles debido a que las moléculas se vuelven flexibles y pueden cambiar su conformación. La transición entre dos estados es llamada temperatura de

transición vítrea. Cuando la temperatura de transición vítrea está por encima de la temperatura ambiental, el plástico es duro y frágil a la temperatura ambiente, por ejemplo, poliestireno. Cuando la temperatura de transición vítrea está por debajo de la temperatura ambiental, el plástico es suave y flexible a la temperatura ambiente [2.11].

Tabla 2. 9 Temperatura de transición vítrea y punto de fusión para varios plásticos

Plástico	Temperatura de transición vítrea [°C]	Punto de fusión [°C]
Polystyrene (PS)	101	-
Polyvinylchloride (PVC)	80	-
Polymethyl methacrylate (PMMA)	105	-
Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	115	-
Polycarbonate (PC)	150	-
Low density polyethylene (LDPE)	-120/-90	120
High density polyethylene (HDPE)	-120/-90	130
Polypropylene (PP)	-10	175
Nylon-6 (PA-6)	50	225
Polyethylene terephthalate (PET)	70	275
Polybutylene terephthalate (PBT)	45	250
Polyvinylidene fluoride (PVDF)	-40	170
Tetrafluoroethylene/hexafluoropropylene	70	275
Copolymer (FEP)		

2.6 Sumario

En este capítulo se describe el proceso de extrusión. Se inicia con la descripción de los elementos de la maquinaria de extrusión, la instrumentación y el control de la maquinaria, así como los sistemas que conforman diferentes líneas de extrusión con diferentes fines de producción. De igual manera se observan las características generales de los materiales a procesar.

En el siguiente capítulo se muestran las diferentes etapas del proceso de diseño mecánico y su aplicación para generar conceptos y por consiguiente la fabricación y el ensamble de los sistemas que conforman la línea de extrusión de materiales termoplásticos.

2.7 Referencias

- [2.1] Rosato, D.V., *Extruding Plastics*, Ed. Springer, pp. 1-53, 1998.
- [2.2] Stevens, M.J., *Extruder principles and opration*, Ed. Springer, pp. 4-26, 1995.
- [2.3] Griskey, R., *Polymer process engineering*, Ed. Springer, pp. 278-310, 1995.
- [2.4] Hanson, D., ¿En qué pensar cuando se compra una extrusora?, *Revista científica*, núm. 147, Tecnología del plástico, Colombia, 2004.
- [2.5] Lafleur, P., *Polymer extrusión*, Ed. Wiley, pp. 37-85, 109-151, 2014.
- [2.6] Giles, H.F., *Extrusión, the defenitive processing guide and handbook*, Ed. PDL, pp. 13-34, 2005.
- [2.7] Rauwendaal, C., *Understanding extrusion*, Ed. Hanser, pp. 19-29, 2010.
- [2.8] Baird, G., *Polymer processing, principles and design*, Ed. Wiley, 1998.
- [2.9] Tadmor, Z. and Gogos, C. G., *Principles of Polymer Processing*, Ed. John Wiley & Sons, New York, 2006.
- [2.10] Spalding, M. A., Hyun, K. S., *An Experimental Investigation of Solids Conveying in Smooth and Grooved Barrel Single-Screw Plasticating Extruders*, 1998.
- [2.11] Seymour, B., *Thermal properties of polymers*, Ed. Springer, pp. 83-93, 1984.

CAPÍTULO 3



3. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

3.1 Proceso de diseño

Los humanos han estado diseñando objetos mecánicos por aproximadamente cinco mil años. Todos resultantes de un proceso de diseño. Independientemente de lo que se esté diseñando, hay ciertas técnicas que pueden ser usadas durante el proceso de diseño para obtener resultados exitosos. El proceso de diseño es importante debido a que hay una continua necesidad por lo nuevo, por la importancia costo-efectividad y por la alta calidad de los productos.

El proceso completo, de principio a fin, que a menudo se bosqueja como se muestra en la Figura 3.1, comienza con la identificación de una necesidad y la decisión de hacer algo al respecto. Después de muchas iteraciones, termina con la presentación de los planes para satisfacer la necesidad [3.1].



Figura 3. 1 Fases del proceso de diseño con múltiples retroalimentaciones e iteraciones

Los factores importantes que determinan el éxito o el fracaso de un producto son:

- Diseño de producto
- Negocios
- Producción

3.1.1 Diseño del producto

Los factores importantes que determinan el éxito o el fracaso de un producto son:

- Diseño de producto
- Negocios
- Producción

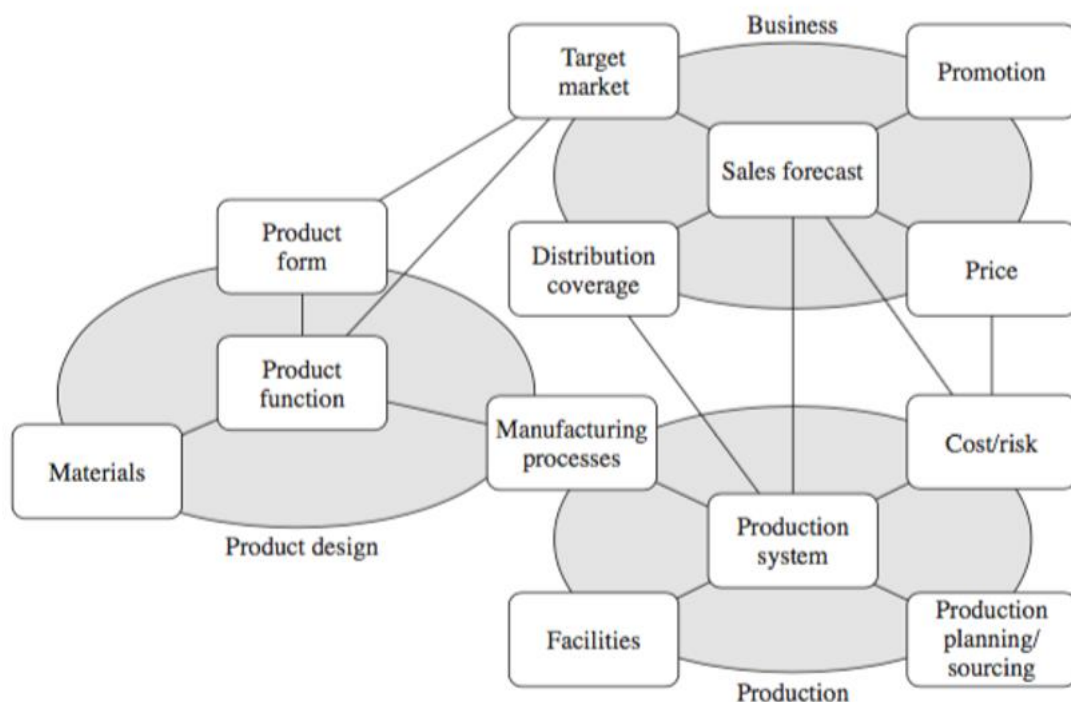


Figura 3. 2 Variables controlables en el desarrollo de un producto

Los factores del diseño del producto están enfocados en la función del producto, que es una descripción de lo que el objeto hace. Relacionado con la función están la forma del producto, los materiales y los procesos de manufactura.

La forma incluye la arquitectura del producto, forma, color, textura y otros factores relacionados con su estructura.

El diseño del producto incluye:

- Función del producto
- Forma del producto

- Materiales
- Procesos de manufactura

La forma del producto y su función es importante en los negocios porque los consumidores juzgan un producto primeramente en que hace (función) y como se ve (forma), igualmente influye la habilidad de la compañía para producir el producto, las ventas están afectadas por las habilidades de la compañía para promover el producto, distribuirlo y su precio.

3.1.2 Consideraciones de diseño

Las consideraciones de diseño son características que influyen en el diseño del elemento, o tal vez en todo el sistema. A menudo se deben considerar muchas de esas características en una situación de diseño dada. Entre las más importantes se encuentran:

Tabla 3. 1 Consideraciones de diseño

• Funcionalidad	• Ruido
• Resistencia/esfuerzo	• Estilo
• Distorsión/deflexión/rigidez	• Forma
• Desgaste	• Tamaño
• Corrosión	• Control
• Seguridad	• Propiedades térmicas
• Confiabilidad	• Superficie
• Manufacturabilidad	• Lubricación
• Utilidad	• Comercialización
• Costo	• Mantenimiento
• Fricción	• Volumen
• Peso	• Responsabilidad legal
• Vida	• Capacidad de reciclado/ recuperación de recursos

Algunas de estas propiedades se relacionan de manera directa con las dimensiones, el material, el procesamiento y la unión de los elementos del sistema [3.2].

3.1.3 Características clave de las mejores prácticas del diseño

Las tres medidas de efectividad del diseño son:

- Costo del producto
- Calidad
- Tiempo de producción

El cliente y la administración siempre quieren algo económico (bajo costo), mejor o bueno (alta calidad) y rápido (menor tiempo de producción)

El actual costo por diseñar un producto es usualmente una pequeña parte del costo de manufactura del producto.

Las decisiones tomadas durante el proceso de diseño tienen un gran efecto sobre el costo de un producto pero costará muy poco.

Si se falla durante el diseño, el producto fallará en el futuro, es mejor invertir en el diseño del producto que después invertir en fallas.

Las diez características clave de las mejores prácticas de diseño son:

1. Enfocarse en la vida entera del producto.
2. Uso y apoyo de equipos de diseño.
3. Notar que el proceso es tan importante como el producto.
4. Atención a la planificación de tareas centradas en información.
5. Cuidado del desarrollo de los requerimientos del producto.
6. Fomento de la generación de conceptos múltiples y evaluación.
7. Conciencia de la toma de decisiones del proceso.
8. Atención para diseñar con calidad durante cada fase del proceso de diseño.
9. Desarrollo concurrente del producto y proceso de fabricación.
10. Énfasis sobre la comunicación de la correcta información para las correctas personas en el momento correcto.

3.1.4 Vida del producto

Independientemente del proceso de diseño seguido, cada producto tiene una historia de vida como se describe en la Figura 3.3.

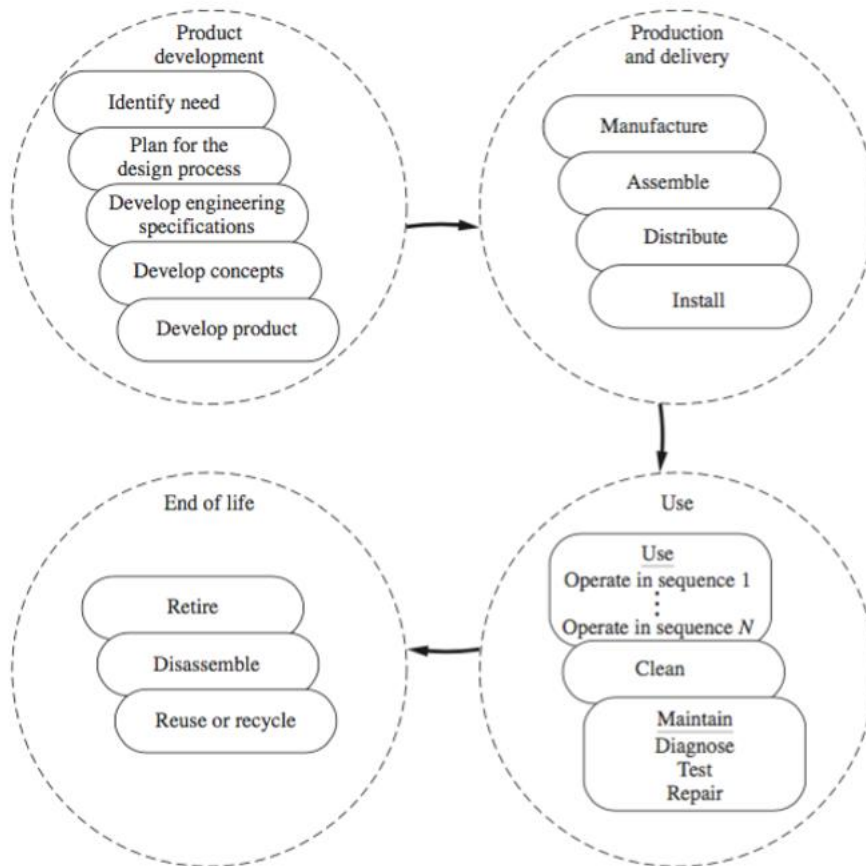


Figura 3. 3 Vida de un producto

Las fases están agrupadas en 4 áreas generales. La primer área se refiere al desarrollo del producto, el segundo grupo de fases incluye la producción y entrega del producto, el tercer grupo contiene todas las consideraciones importantes del uso del producto, y el grupo final, se enfoca en lo que sucede con el producto una vez que sea inservible.

Las fases del desarrollo del producto son:

- Identificar una necesidad
- Planear el proceso de diseño

- Desarrollo de especificaciones de ingeniería
- Desarrollo de conceptos
- Desarrollo de productos

Estas primeras cinco fases deben tener en cuenta lo que le sucederá al producto en el resto de su vida útil. Cuando el trabajo de diseño es completado, el producto es lanzado para su producción, y excepto para los cambios de ingeniería, los ingenieros de diseño no tendrán más participación con él.

Las fases de producción y entrega incluyen:

- Manufactura
- Ensamble
- Distribución
- Instalación

La meta del desarrollo del desarrollo del producto, producción y entrega es el uso del producto. Las fases del “uso” son:

- Operación
- Limpieza
- Mantenimiento

Finalmente, cada producto tiene una vida finita. Las preocupaciones del final de vida se han vuelto cada vez más importantes y son:

- Retiro
- Desensamble
- Reuso o Reciclado

Este énfasis en la vida de un producto ha resultado en el concepto “Gestión del ciclo de vida del producto” (PLM por sus siglas en inglés). Como se muestra en la Figura 3.4 PLM integra seis diferentes tipos principales de información.

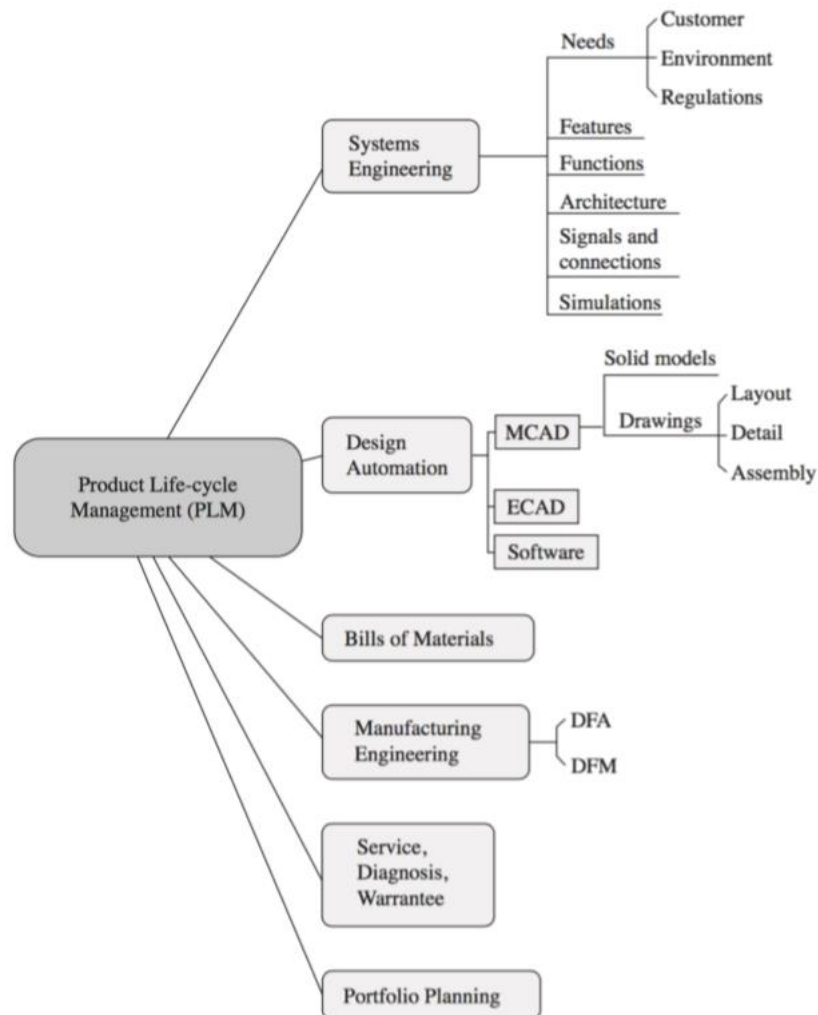


Figura 3. 4 Gestión del ciclo de vida del producto (PLM)

3.1.5 Soluciones a problemas de diseño

La meta en el diseño es encontrar una buena solución que conduzca a una calidad de producto con un menor compromiso de tiempo y de otros recursos.

Todos los problemas de diseño tienen una multitud de soluciones satisfactorias y ninguna mejor solución. Esto es mostrado gráficamente en la Figura 3.5 donde se señalan los factores que afectan exactamente a la solución desarrollada.

El conocimiento del dominio se desarrolla a través del estudio de la física de ingeniería y de otras áreas técnicas y mediante la observación de productos existentes. Son el estudio de la ciencia y la ciencia de ingeniería las que proporcionan la base sobre la que se basa el proceso de diseño.

Para los problemas de diseño mecánico en particular, hay una característica adicional: la solución debe ser una pieza de hardware de trabajo: un producto. Por lo tanto, los problemas de diseño mecánico comienzan con una necesidad mal definida y dan lugar a un objeto que se comporta de cierta manera, de una manera que los diseñadores sienten satisface esta necesidad. Esto crea una paradoja. Un diseñador debe desarrollar un dispositivo que, por definición, tiene la capacidad de satisfacer alguna necesidad que no está totalmente definida.

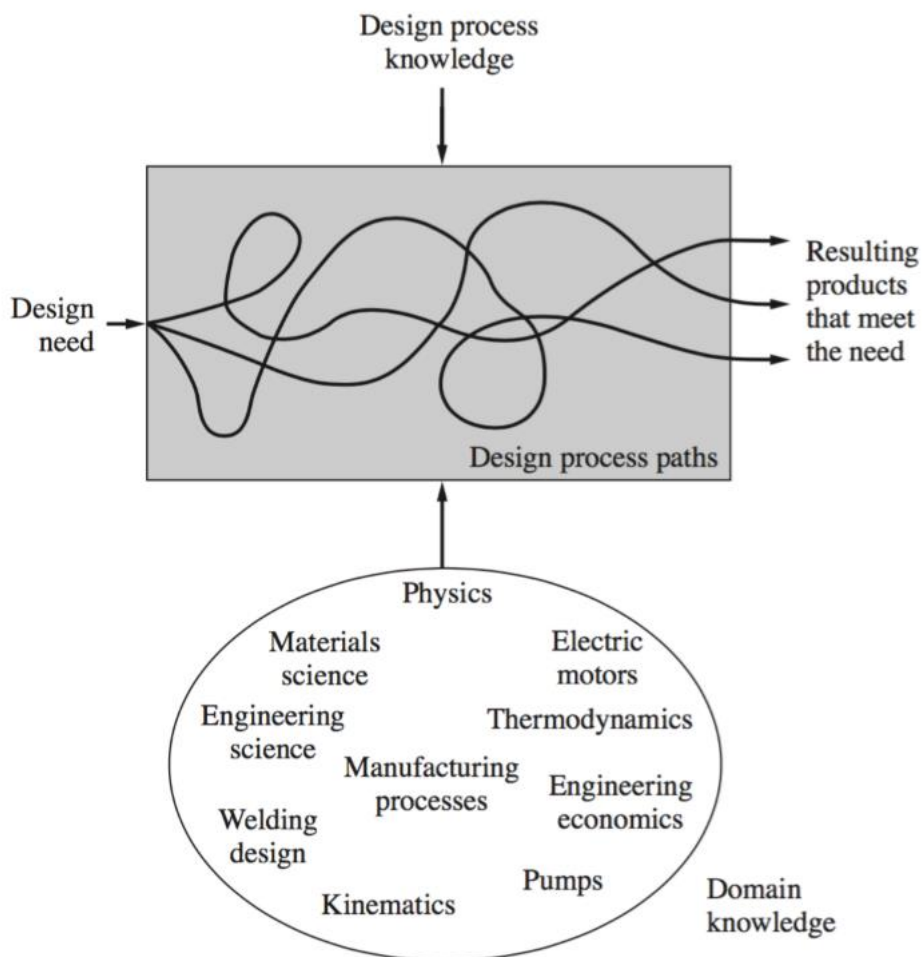


Figura 3. 5 Diferentes resultados del proceso de diseño

3.1.5.1 Acciones básicas para la solución del problema

Independientemente del problema de diseño que se está resolviendo, consciente o inconscientemente, siempre tomamos seis acciones básicas:

1. Establecer la necesidad o darse cuenta de la existencia de un problema que necesita ser resuelto.
2. Planear como resolver el problema.
3. Comprender el problema desarrollando requerimientos y descubriendo soluciones existentes para problemas similares.
4. Generar soluciones alternas.
5. Evaluar las alternativas comparándolas con los requisitos de diseño y unas a las otras.
6. Decidir sobre las soluciones aceptables.

Estas acciones no se siguen necesariamente en este orden. De hecho, a menudo se mezclan con la generación y evaluación de soluciones para mejorar la comprensión del problema, permitiendo generar nuevas soluciones mejoradas.

3.1.6 Diseño para la sustentabilidad

Es importante darse cuenta de que los ingenieros de diseño tienen mucho control sobre qué productos están diseñados y cómo interactúan con la tierra durante su vida útil. La responsabilidad que conlleva el diseño está bien resumida en los Principios de Hannover. Estos fueron desarrollados en la EXPO 2000, la feria mundial de Hannover, Alemania. Estos principios definen los conceptos básicos de Diseño para la Sustentabilidad (DFS por sus siglas en inglés) o Diseño para el Medio Ambiente (DFE por sus siglas en inglés).

Los Principios de Hannover son:

1. Insistir en derechos de la humanidad y naturaleza para coexistir.
2. Reconocer la interdependencia.
3. Aceptar responsabilidad por las consecuencias del diseño.
4. Crear objetos seguros de valor a largo plazo.
5. Eliminar el concepto de desperdicio.
6. Confiar en los flujos naturales de energía.

7. Entender las limitaciones del diseño.
8. Buscar constantemente la mejora de compartición de conocimiento.
9. Respetar las relaciones entre espíritu y materia.

3.1.7 Fases del proceso del diseño mecánico

Independientemente del producto que será diseñado o cambiado, hay un conjunto genérico de fases que deben ser completadas para todos los proyectos. Las fases son las siguientes:

- Descubrimiento del producto
- Proyecto de planeación
- Definición del producto
- Diseño conceptual
- Desarrollo del producto
- Soporte técnico del producto

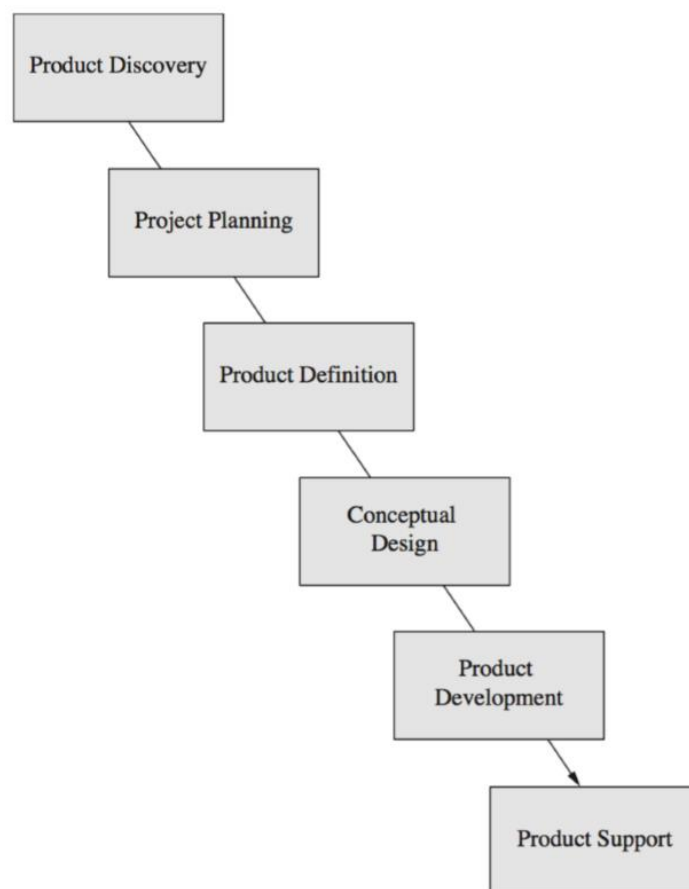


Figura 3. 6 Proceso de diseño mecánico

3.1.7.1 Descubrimiento del producto

Antes de que el diseño o el rediseño original de un producto puedan comenzar, la necesidad de él debe establecerse. Como se muestra en la Figura 3.7, hay tres fuentes principales para proyectos de diseño: tecnología, mercado y cambio.

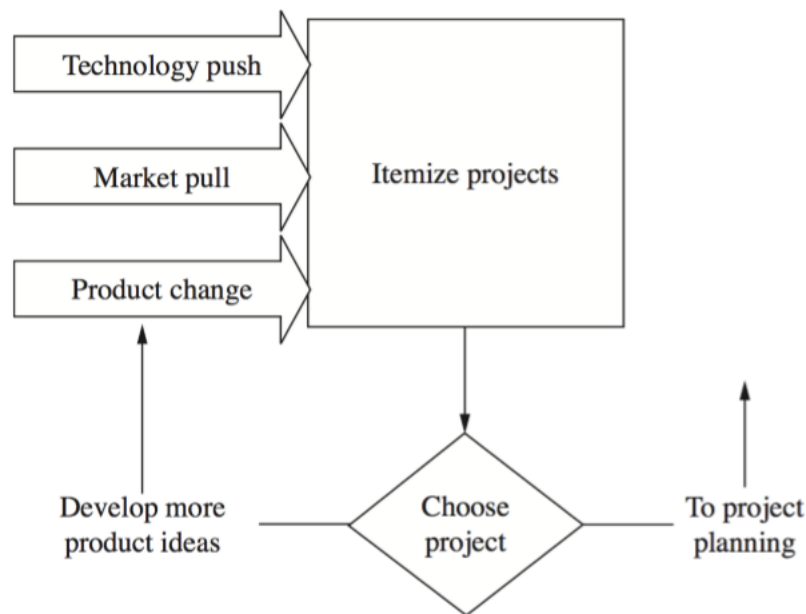


Figura 3. 7 Fase de descubrimiento del proceso de diseño mecánico

3.1.7.2 Proyecto de planeación

La segunda fase consiste en planificar para que los recursos de dinero, personas y equipo de la empresa puedan ser asignados y contabilizados. La planificación debe preceder cualquier compromiso de recursos; sin embargo, al igual que con muchas actividades de diseño, esto requiere especular sobre lo desconocido, y eso hace que la planificación de un producto similar a un producto anterior sea más fácil que la planificación de un producto totalmente nuevo. Dado que la planificación requiere un compromiso de personas y recursos de todas las partes de la empresa, parte de la planificación está formando el equipo de diseño.

El objetivo de la planificación de proyectos es formalizar el proceso para que un producto se desarrolle de manera oportuna y rentable. La planificación es el proceso usado para desarrollar un esquema para programar y comprometer los recursos de tiempo, dinero y personas, como se muestra en la Figura 3.8.

La planificación genera un procedimiento para desarrollar la información necesaria y distribuirla a las personas correctas en el momento correcto. Información importante incluye los requisitos del producto, bocetos conceptuales, diagramas funcionales del sistema, modelos sólidos, dibujos, selecciones de materiales y cualquier otra representación de las decisiones tomadas durante el desarrollo del producto.

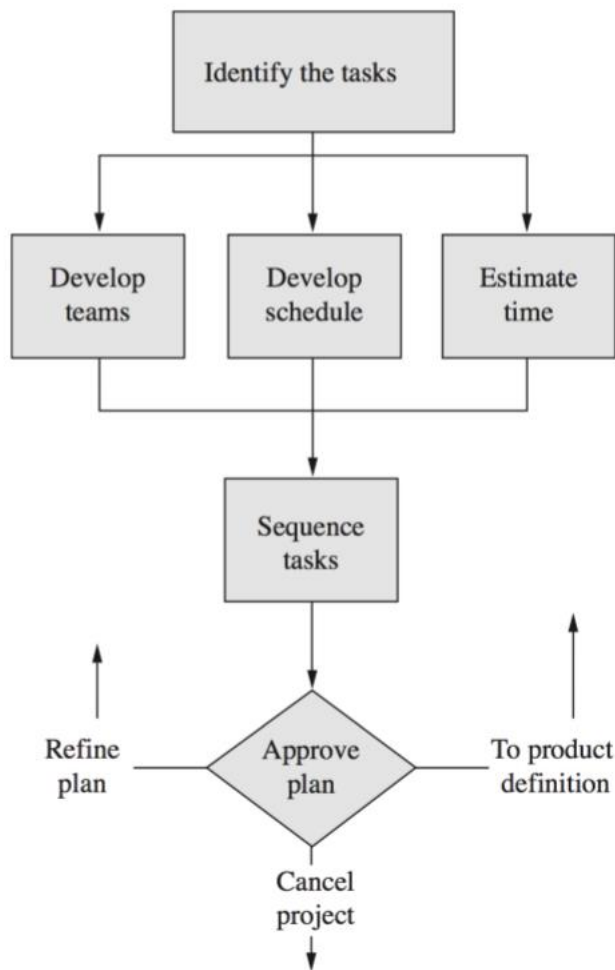


Figura 3. 8 Fase de planificación del proyecto del diseño mecánico

3.1.7.3 Definición de producto

Durante la fase de definición del producto (Figura 3.9), el objetivo es comprender el problema y sentar las bases para el resto del proyecto de diseño. La comprensión del problema puede parecer una tarea sencilla, pero como la mayoría de los problemas de diseño están mal definidos, encontrar la definición puede ser una tarea importante.

La primera actividad será identificar a los clientes para el producto. Esta actividad sirve de base para generar las necesidades de los clientes. Estos requisitos se utilizan para evaluar la competencia y generar especificaciones de ingeniería, comportamientos medibles del producto futuro que, más adelante en el proceso de diseño, ayudará a determinar la calidad del producto. Por último, para medir la "calidad" del producto, nos fijamos metas para su desempeño [3.3].

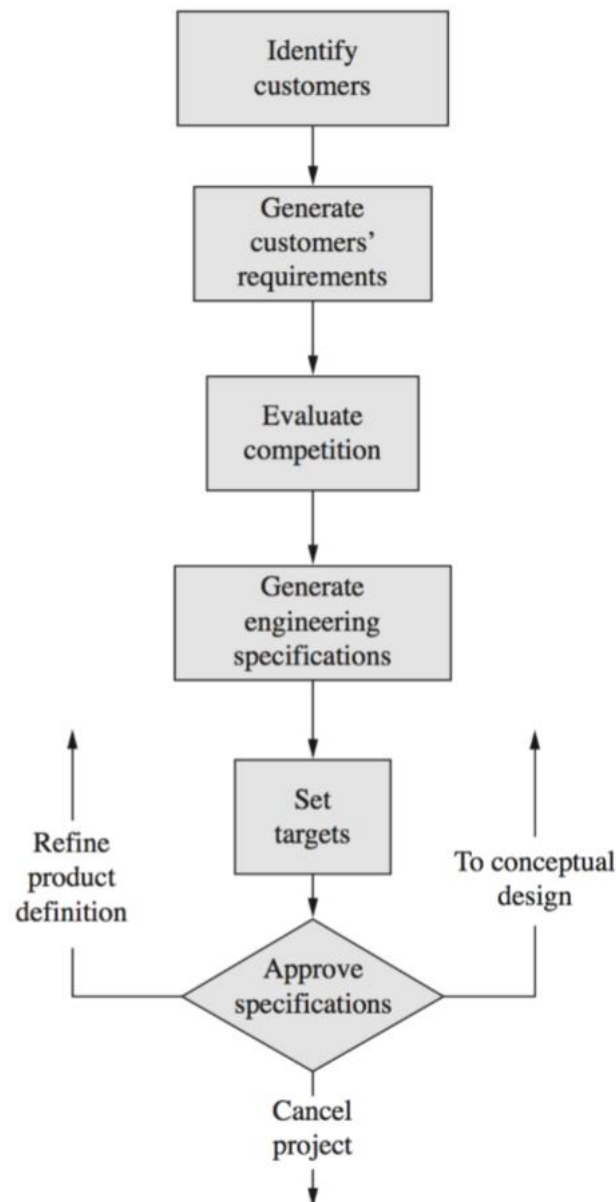


Figura 3. 9 Fase de la definición del producto del diseño mecánico

3.1.7.4 Diseño conceptual

Los diseñadores usan los resultados de las fases de planificación y definición del producto para generar y evaluar conceptos para los productos o cambios en los productos (Figura 3.10).

Cuando generamos conceptos, los requisitos del cliente sirven de base para desarrollar un modelo funcional del producto [3.4]. La comprensión adquirida a través de este enfoque funcional es esencial para desarrollar conceptos que finalmente conducirán a un producto de calidad. Después de evaluar conceptos, el objetivo es comparar los conceptos generados con los requisitos desarrollados durante la definición de producto y tomar decisiones.

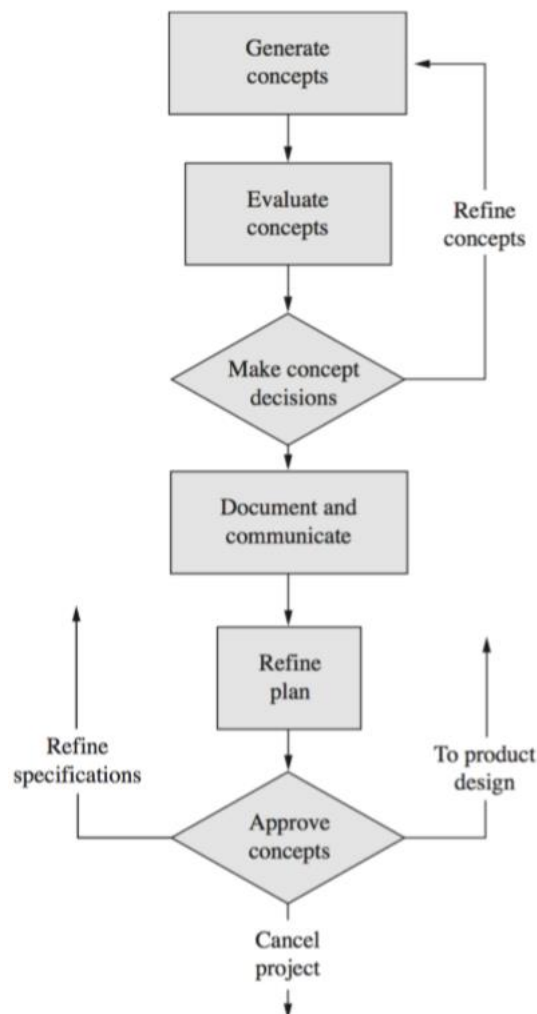


Figura 3. 10 Fase de diseño conceptual del proceso de diseño mecánico

3.1.7.5 Desarrollo del producto

Una vez que los conceptos se han generado y evaluado, es el momento de refinar lo mejor de ellos en productos reales (ver Figura 3.11).

Desafortunadamente, muchos proyectos de diseño se comienzan desde aquí, sin el beneficio de la especificación previa o el desarrollo del concepto. Este enfoque de diseño a menudo conduce a productos de mala calidad y en muchos casos causa costosos cambios al final del proceso de diseño. No se puede enfatizar demasiado: iniciar un proyecto mediante el desarrollo de productos sin preocuparse por las fases anteriores es una mala práctica de diseño.

Al final de la fase de desarrollo de producto, el producto se libera para su producción. En este momento, la documentación técnica que define las instrucciones de fabricación, montaje y control de calidad debe estar completa y lista para la compra, fabricación y montaje de componentes.

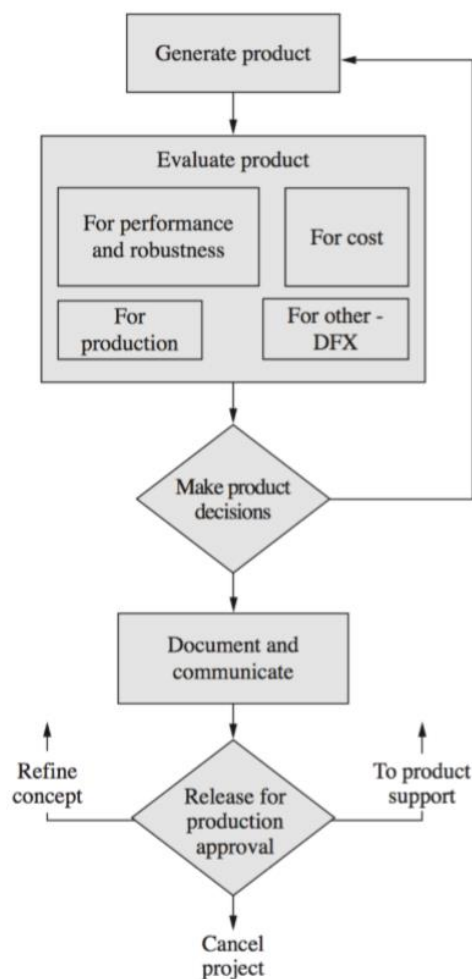


Figura 3. 11 Fase del desarrollo de producto del proceso de diseño mecánico

3.1.7.6 Soporte técnico del producto

La responsabilidad del ingeniero de diseño no puede terminar con el lanzamiento a la producción. A menudo, hay una necesidad continua de soporte de fabricación y montaje, soporte para proveedores y ayuda en la introducción del producto al cliente (ver Figura 3.12). Además, los ingenieros de diseño suelen participar en el proceso de cambio de ingeniería. Este es el proceso en el que los cambios realizados en el producto, por cualquier razón, se gestionan y documentan.

Finalmente, los diseñadores pueden participar en el retiro del producto. Esto es especialmente cierto para los productos que están diseñados para el uso especializado a corto plazo y luego el desmantelamiento. Pero, como se señaló en los Principios de Hannover, esto debería ser una preocupación independientemente del producto durante todo el proceso de diseño.

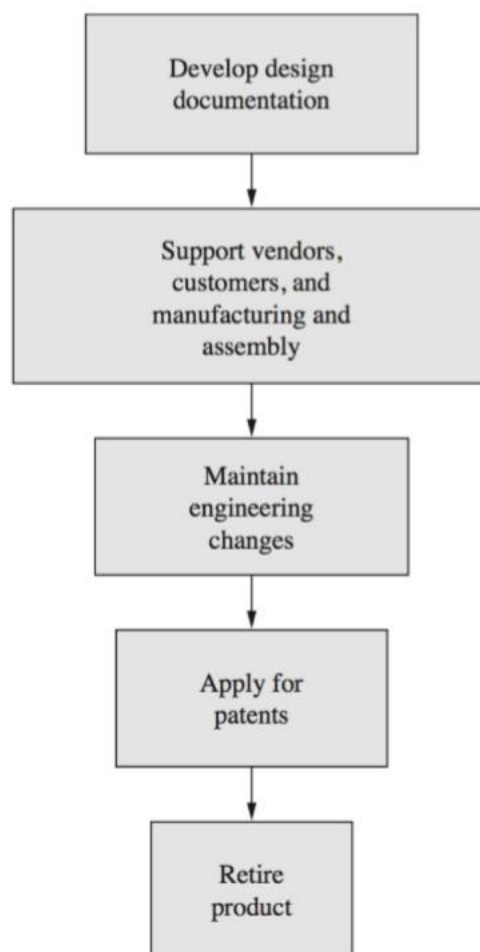


Figura 3. 12 Fase del soporte técnico del producto en el proceso de diseño mecánico

3.2 Análisis SWOT

Un método que se utiliza como ayuda para elegir un proyecto se llama análisis FODA (SWOT por sus siglas en inglés), FODA significa Fortalezas, Debilidades, Oportunidades y Amenazas. Este método se utiliza comúnmente en los negocios, se puede aplicar a la evaluación de proyectos individuales, y es fácil de hacer. Los fundamentos básicos del método son enumerar los cuatro elementos FODA en un cuadrículado (cada uno de los cuatro cuadrantes rellenos con las entradas FODA), y luego ponderar informalmente las fortalezas frente a las debilidades y las oportunidades frente a las amenazas.

El llenado de un análisis FODA hace más fácil juzgar si se debe emprender un solo proyecto potencial. Aunque este método establece los puntos principales a considerar para la toma de decisiones, en realidad no ayuda a tomar la decisión.

3.2.1 Fortalezas (Strengths)

- Conocimiento sobre los procesos de extrusión
- Conocimiento sobre las áreas necesarias para sobrellevar el proyecto
- Apoyo del área de Biomecánica de la SEPI ESIME Zacatenco para el desarrollo del proyecto
- Impresiones fallidas que pueden ser procesadas y utilizadas nuevamente
- Espacio para la instalación del prototipo funcional
- Desarrollo tecnológico
- El mercado de las impresiones 3D está en pleno crecimiento
- El costo de la inversión inicial se puede recuperar rápidamente

3.2.2 Debilidades (Weaknesses)

- Solo una persona es la encargada de realizar todo el proyecto
- El tiempo que se tiene para la elaboración del proyecto es de 1 año y medio
- Los costos del desarrollo del proyecto están limitados

- El uso de materiales reciclados en la elaboración de la máquina puede disminuir el ciclo de vida del producto
- Los materiales a tratar (reciclar) son difíciles de procesar

3.2.3 Oportunidades (Opportunities)

- Alto crecimiento del uso de la impresión 3D
- Reciclaje de impresiones fallidas
- Costos de equipos de reciclaje muy elevados

3.2.4 Amenazas (Threats)

- Costo elevado de los componentes para la fabricación del equipo
- Empresas totalmente especializadas en el reciclaje de plásticos

3.3 Comprensión del problema y desarrollo de especificaciones de ingeniería

La comprensión del problema de diseño es una base esencial para diseñar un producto de calidad. "Comprender el problema de diseño" significa traducir los requisitos de los clientes en una descripción técnica de lo que se debe diseñar.

Hay muchas técnicas utilizadas para generar especificaciones de ingeniería. Una de las mejores y actualmente de las más populares se llama Despliegue de Funciones de Calidad (QFD por sus siglas en inglés). Lo bueno del método QFD es que está organizado para desarrollar las principales piezas de información necesarias para comprender el problema:

1. Escuchar la voz de los clientes
2. Desarrollo de las especificaciones o metas para el producto
3. Descubrir cómo las especificaciones miden los deseos de los clientes
4. Determinar qué tan bien la competencia cumple con los objetivos
5. Desarrollo de metas numéricas hacia los cuales trabajar

3.3.1 QFD

El método QFD ayuda a generar la información necesaria en la fase de definición del producto de ingeniería del proceso de diseño [3.5]. Antes de detallar los pasos que comprenden esta técnica para entender un problema de diseño, se deben de considerar algunos puntos importantes:

1. No importa lo bien que el equipo de diseño piensa que entiende un problema, debe emplear el método QFD para todos los proyectos originales de diseño o rediseño. En el proceso, el equipo aprenderá lo que no sabe sobre el problema.
2. Los requisitos de los clientes deben traducirse en objetivos de diseño medibles para los parámetros críticos identificados (medibles de ingeniería).
3. El método QFD se puede aplicar a todo el problema y cualquier sub-problema.
4. Es importante primero preocuparse por lo que se necesita ser diseñado y, sólo después de que se entienda, preocuparse por cómo el diseño se verá y funcionará.
5. Este método toma tiempo en completarse.

Los principales beneficios de la metodología QFD son: asegura la satisfacción del cliente, establece una fuente de información para futuros diseños, servicios y mejoras del proceso [3.6].

3.3.1.1 Identificación de los clientes (¿Quiénes son?)

Para la mayoría de las situaciones de diseño, hay más de un cliente, para muchos productos, los clientes más importantes son los consumidores, la gente que va a comprar el producto y quién le dirá a otros consumidores sobre su calidad (o falta de ella).

En este caso particularmente el cliente principal es una sección del Departamento de Biomecánica de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica unidad Zacatenco.

Algunos otros clientes a los que les podría interesar el producto a desarrollar son:

- Personas o empresas que se dediquen a la producción de filamentos para la impresión 3D.
- Personas que deseen reciclar impresiones fallidas para producción de nuevo material de impresión 3D.

- Personas que se interesen en el procesamiento de termoplásticos.
- Personas o empresas que realicen inyección de plásticos.

3.3.1.2 Determinación de los requerimientos de los clientes (¿Qué quieren los clientes?)

Una vez que los clientes han sido identificados, el siguiente objetivo del método QFD es determinar qué se va a diseñar. Es decir, ¿qué es lo que los clientes quieren?

Los requerimientos generales son:

- Sistema de producción de material reimprimible en forma de filamento.
- Filamentos con diferentes diámetros: 1.5, 1.75 y 3mm.
- El filamento debe ser presentado en rollos de 1 kg.
- Sistema sea capaz de reciclar termoplásticos ABS y PLA.

Los requerimientos del sistema de producción son:

- Sistema compacto.
- Sistema económico en comparación a los sistemas que existen actualmente en el mercado.
- Ensamble y desensamble con facilidad.
- Fácil de operar.
- Seguro para el operario.
- Buena apariencia.
- Sistema de conexión americano para hogar.
- Fácil de transportar.

3.3.1.3 Determinación de la importancia relativa de los requerimientos (¿Quién contra qué?)

El siguiente paso en la técnica QFD es evaluar la importancia de cada uno de los requisitos de los clientes. Esto se logra generando un factor de ponderación para cada requisito. La

ponderación dará una idea de cuánto esfuerzo, tiempo y dinero invertir en lograr cada requisito.

Para este caso utilizaremos la siguiente escala de 1 a 9 dónde 1 es un valor débil mientras que el 9 es un valor muy fuerte, los números se representarán mediante un símbolo como se muestra a continuación:



Tabla 3. 2 Ponderación de los requerimientos del cliente

REQUERIMIENTOS	IMPORTANCIA (PRIORIDAD DEL CLIENTE)	% DE IMPORTANCIA
• Filamentos con diferentes diámetros: 1.5, 1.75 y 3mm.	◎	14.51
• El filamento debe ser presentado en rollos de 1 kg.	◎	14.51
• Sistema compacto.	○	4.83
• Sistema económico	●	11.29
• Ensamble y desensamble con facilidad.	□	8.06
• Fácil de operar.	□	8.06
• Seguro para el operario.	◎	14.51
• Buena apariencia.	□	8.06
• Sistema de conexión eléctrica para hogar.	●	11.29
• Fácil de transportar.	○	4.83
TOTAL	62	100

3.3.1.4 Identificación y Evaluación de la competencia (¿Qué tan satisfechos están los clientes en la actualidad?)

El objetivo de este paso es determinar cómo es que el cliente percibe la capacidad de la competencia para satisfacer cada uno de los requisitos mencionados anteriormente. A pesar de que se esté trabajando con un diseño totalmente nuevo, hay competencia, o al menos los productos que vienen cerca de llenar la misma necesidad que el producto a desarrollar.

Para nuestro caso de estudio se analizarán tres empresas dedicadas a la venta de maquinaria de extrusión de plásticos, estas empresas son: Filabot (Figura 3.13), Filafab (Figura 3.14), Assembled Wee Filament Extruder (Figura 3.15). Tomamos como referencia la opinión del cliente principal y las opiniones públicas de las personas que han comprado estos productos tanto en la plataforma [amazon.com](https://www.amazon.com), [amazon.mx](https://www.amazon.mx) y en las páginas principales de las empresas.



Figura 3. 13 Filabot



Figura 3. 14 FilaFab



Figura 3. 15 Assembled Wee Filament Extruder

Utilizaremos la misma escala que en la ponderación de los requerimientos de 1 a 9 dónde 1 es un valor débil mientras que el 9 es un valor muy fuerte, los números se representarán mediante un símbolo como se muestra a continuación:

Tabla 3. 3 Análisis de la competencia

REQUERIMIENTOS	FILABOT	FILAFAB	ASSEMBLED WEE FILAMENT EXTRUDER
• Filamentos con diferentes diámetros: 1.5, 1.75 y 3mm.	○	○	○
• El filamento debe ser presentado en rollos de 1 kg.	△	△	△
• Sistema compacto.	⊙	⊙	⊙
• Sistema económico	△	△	□
• Ensamble y desensamble con facilidad.	●	●	⊙
• Fácil de operar.	⊙	⊙	⊙
• Seguro para el operario.	⊙	⊙	□
• Buena apariencia.	□	□	△
• Sistema de conexión eléctrica para hogar.	⊙	⊙	⊙
• Fácil de transportar.	⊙	⊙	⊙
TOTAL	62	62	60

Analizando la tabla de resultados podemos notar que tanto el filabot como el filafab cumplen mejor con los requerimientos de los clientes que el Assembled Wee Filament Extruder, una característica en común es que el costo de los sistemas de producción es relativamente alto y que ninguno de los tres cuenta con un sistema integrado de enrollado de los filamentos que se producen, estos sistema de enrollado se venden por separado y sus costos son prácticamente iguales o incluso mayores que la máquina de procesamiento de plásticos.

Por ejemplo, el sistema de enrollado que fabrica la empresa filabot tiene un costo de \$24,989.89, mientras que el sistema de enrollado más económico que fabrica la empresa filafab es de \$12,950 y una opción más avanzada de \$17,221. Esto resulta bastante costoso para poder producir los filamentos en forma de rollos y con los diferentes diámetros que se utilizan en impresoras 3D. Además de que las boquillas que se requieren para obtener los diferentes diámetros se venden de igual manera por separado, como un accesorio.

Si se desearan obtener las características que buscan nuestros clientes comprando los artículos de la empresa filabot, se tendría que hacer una inversión total de **\$44,945** esto adquiriendo su máquina de procesamiento de plásticos más básica con un costo de \$19,955.

Por el contrario si se desean obtener los productos de la empresa filafab se tendría que hacer una inversión de **\$32,841** con sus productos más básicos, los cuales son para principiantes o para aficionados, como lo mencionan en su página web.

Otro punto débil de las empresas analizadas además de su costo es que los diámetros de los filamentos que producen no son constantes es decir, si se requiere un diámetro de 1.75 mm, se producen filamentos con diámetros de 1.60 a 1.80 mm y resulta bastante complicado alcanzar con precisión las dimensiones solicitadas, además de que los filamentos producidos tienen burbujas de aire lo que complica su uso en la impresora 3D.

Una vez analizados los datos anteriores llegamos a la conclusión de que se debe de trabajar en la construcción de un sistema que:

- Sea más económico y de mayor precisión para la obtención de los diámetros de los filamentos.

A continuación se muestra una tabla de comparación de las empresas con nuestro sistema producido, la cual muestra que este supera fácilmente a nuestros competidores.

Tabla 3. 4 Comparación entre la competencia y nosotros

REQUERIMIENTOS	US	FILABOT	FILAFAB	ASSEMBLED WEE FILAMENT EXTRUDER
• Filamentos con diferentes diámetros: 1.5, 1.75 y 3mm.	☉	□	□	○
• El filamento debe ser presentado en rollos de 1 kg.	☉	△	△	△
• Sistema compacto.	●	☉	☉	☉
• Sistema económico	☉	△	△	□
• Ensamble y desensamble con facilidad.	●	●	●	☉
• Fácil de operar.	☉	☉	☉	☉
• Seguro para el operario.	●	☉	☉	●
• Buena apariencia.	☉	□	□	△
• Sistema de conexión eléctrica para hogar.	☉	☉	☉	☉
• Fácil de transportar.	●	☉	☉	☉
TOTAL	82	64	64	62

3.3.1.5 Generación de especificaciones de ingeniería (¿Cómo pueden ser medidos los requerimientos de los clientes?)

El objetivo aquí es desarrollar un conjunto de especificaciones de ingeniería de los requisitos de los clientes. Estas especificaciones son la re expresión del problema de diseño en términos de parámetros que pueden medirse y tienen valores objetivos. Sin tal información los ingenieros no pueden saber si el sistema que se está desarrollando satisfará a los clientes.

Las especificaciones de ingeniería consisten en parámetros de interés y objetivos para parámetros.

Estas especificaciones son una traducción de la voz del cliente a la voz del ingeniero.

Tabla 3. 5 Especificaciones de ingeniería

REQUERIMIENTOS	¿CÓMO?	TÉRMINOS MENSURABLES
<ul style="list-style-type: none"> Filamentos con diferentes diámetros: 1.5, 1.75 y 3mm. 	Boquillas Diametrales	Diámetro de filamentos (milímetros)
<ul style="list-style-type: none"> El filamento debe ser presentado en rollos de 1 kg. 	Sistema de Enrollado	Peso de los rollos (kilogramos)
<ul style="list-style-type: none"> Sistema compacto 	Aprovechamiento del espacio de instalación	Volumen del sistema (centímetros cúbicos)
<ul style="list-style-type: none"> Sistema económico 	Uso de materiales reciclados	Costo del prototipo (pesos)
<ul style="list-style-type: none"> Ensamble y desensamble con facilidad 	Generalización del sistema de armado	Número de piezas
<ul style="list-style-type: none"> Fácil de operar 	Manejo del equipo simple	Número de pasos para producir filamentos
<ul style="list-style-type: none"> Seguro para el operario 	Componentes peligrosos al contacto	Equipo de protección necesario (# de equipos de seguridad)
<ul style="list-style-type: none"> Buena apariencia 	Materiales a utilizar	Atractivo visual (Escala)
<ul style="list-style-type: none"> Sistema de conexión eléctrica para hogar 	Elementos de conexión eléctrica para hogar	110-120 Volts C.A.
<ul style="list-style-type: none"> Fácil de transportar 	Peso del sistema	Kilogramos

3.3.1.6 Relación de los requerimientos de los clientes con las especificaciones de ingeniería (¿Cómo medir los qué?)

Para completar este paso, llenamos la parte central de la casa de calidad. Esta matriz de relación se completa en paralelo al paso anterior, y proporciona conocimientos adicionales. Cada celda de la forma representa cómo una especificación de ingeniería se relaciona con el requisito de un cliente.

La fortaleza de esta relación puede variar con algunas especificaciones de ingeniería, proporcionando medidas fuertes para el requerimiento del cliente y otras no proporcionan

ninguna medida en absoluto. La relación se transmite a través de símbolos o números específicos:

Utilizaremos la misma escala que en las anteriores ponderaciones dónde 1 indica una baja relación mientras que el número 9 una relación muy fuerte.

Cada requerimiento del cliente debe tener al menos una especificación con una relación muy fuerte.

Tabla 3. 6 Medición de los requerimientos contra las especificaciones de ingeniería

REQUERIMIENTOS CONTRA ESPECIFICACIONES DE INGENIERÍA	(mm) Diámetro filamentos	(Kg) Peso de los rollos	(cm ³) Volumen del sistema	(\$) Costo del prototipo	(#) Número de Piezas	(#) Número de Pasos producción	(#) Número de equipo de seguridad	(#) Atractivo Visual	(V) Conexión Eléctrica	(Kg) Peso del sistema
• Filamentos con diferentes diámetros: 1.5, 1.75 y 3mm.	⊙	○	△	□	○	○	△	△	△	△
• El filamento debe ser presentado en rollos de 1 kg.	○	⊙	△	⊙	□	□	△	△	△	△
• Sistema compacto.	□	●	⊙	□	□	△	△	□	△	□
• Sistema económico	□	●	□	⊙	●	△	△	□	△	○
• Ensamble y desensamble con facilidad	●	□	●	□	⊙	□	○	△	△	△
• Fácil de operar	□	⊙	○	△	△	⊙	○	△	○	●
• Seguro para el operario	○	□	○	△	△	○	⊙	△	△	□
• Buena apariencia	△	○	△	●	△	△	△	⊙	△	○
• Sistema de conexión eléctrica para hogar	△	●	△	○	△	△	△	△	⊙	△
• Fácil de transportar	□	●	●	△	△	△	○	△	△	⊙

3.3.1.7 Establecimiento de los objetivos para las especificaciones de ingeniería y su importancia (¿Cuánto es lo suficientemente bueno?)

En esta parte de la casa de la calidad se establecen las metas y lo importante que es satisfacer cada una de ellas. Si un objetivo es importante, el esfuerzo debe ser ampliado para alcanzar el objetivo. En el desarrollo de productos, es raro que todos los objetivos se puedan cumplir en el tiempo disponible por lo que este esfuerzo ayuda a guiar en lo que se debe trabajar.

Para calcular la importancia se requiere multiplicar el valor de las especificaciones de ingeniería por el porcentaje de la importancia de los requerimientos y al final sumarlos, para así saber en qué requerimientos enfocarse principalmente. Si no es importante, entonces el cumplimiento de la meta se puede relajar más fácilmente.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla anterior, podemos notar que hay tres aspectos en los que se debe trabajar principalmente, estos son:

1. Se debe de enfocar en un sistema de enrollado para poder obtener los rollos de filamentos de 1 kilogramo.
2. Se debe tratar de obtener un prototipo funcional a un bajo costo, esto en comparación a los precios ofrecidos antes mostrados de la competencia.
3. Otro aspecto a enfocarse es en obtener los filamentos con diferentes diámetros, esto mediante el uso de boquillas diametrales y de un control de velocidad del sistema de arrastre y enrollado del material.

Independientemente de los resultados obtenidos, se debe de trabajar en todos los requerimientos del cliente para así obtener un producto deseado y de alta calidad, no solo para el cliente en específico sino para el mercado en la actualidad.

Tabla 3. 7 Obtención de valores de importancia

REQUERIMIENTOS CONTRA ESPECIFICACIONES DE INGENIERÍA	(mm) Diámetro filamentos	(Kg) Peso de los rollos	(cm ³) Volumen del sistema	(\$) Costo del prototipo	(#) Número de Piezas	(#) Número de Pasos producción	(#) Número de equipo de seguridad	(#) Atractivo Visual	(V) Conexión Eléctrica	(Kg) Peso del sistema
• Filamentos con diferentes diámetros: 1.5, 1.75 y 3mm.	130.59	43.53	14.51	72.55	43.53	43.53	14.51	14.51	14.51	14.51
• El filamento debe ser presentado en rollos de 1 kg.	43.53	130.59	14.51	130.59	72.55	72.55	14.51	14.51	14.51	14.51
• Sistema compacto.	24.15	33.81	43.47	24.15	24.15	4.83	4.83	24.15	4.83	24.15
• Sistema económico	56.45	79.03	56.45	101.61	79.03	11.29	11.29	56.45	11.29	33.87
• Ensamble y desensamble con facilidad	56.42	40.3	56.42	40.3	72.54	40.3	24.18	8.06	8.06	8.06
• Fácil de operar	40.3	72.54	24.18	8.06	8.06	72.54	24.18	8.06	24.18	56.42
• Seguro para el operario	43.53	72.55	43.55	14.51	14.51	43.53	130.59	14.51	14.51	72.55
• Buena apariencia	8.06	24.18	8.06	56.42	8.06	8.06	8.06	72.54	8.06	24.18
• Sistema de conexión eléctrica para hogar	11.29	79.03	11.29	33.87	11.29	11.29	11.29	11.29	101.61	11.29
• Fácil de transportar	24.15	33.81	33.81	4.83	4.83	4.83	14.49	4.83	4.83	43.47
IMPORTANCIA	438.47	609.37	306.23	486.89	338.55	312.75	257.93	228.91	206.39	303.01
% IMPORTANCIA	12.56	17.46	8.77	13.95	9.70	8.96	7.39	6.56	5.91	8.68

3.3.1.8 Relación entre las especificaciones de ingeniería (¿Qué tanto dependen los unos de los otros?)

Las especificaciones de ingeniería pueden ser dependientes entre sí. Lo mejor es darse cuenta de estas dependencias al principio del proceso de diseño. Por lo tanto, en el techo de la casa de la calidad se añaden estas relaciones para mostrar que a medida que se trabaja para cumplir con una especificación, ésta puede estar teniendo un efecto positivo o negativo en los demás.

El techo del QFD muestra líneas diagonales que conectan las especificaciones de ingeniería. Si dos especificaciones son dependientes, se puede observar un símbolo en la intersección. Hay muchos estilos diferentes de símbolos utilizados. El método más simple es usar un "+" para indicar que al mejorar el cumplimiento de una de las especificaciones mejorará a la otra es decir son sinérgicas, y usar un "-" para demostrar que la mejora en la reunión puede dañar a la otra (un compromiso puede ser forzado). Algunas personas usan ++ y -- para mostrar una fuerte dependencia.

En el mundo ideal, todas las especificaciones son independientes. Sin embargo, la realidad es que a veces, cuando mejoras una cosa, mejoras o lastimas otra cosa. Estas relaciones brindan orientación sobre los compromisos.

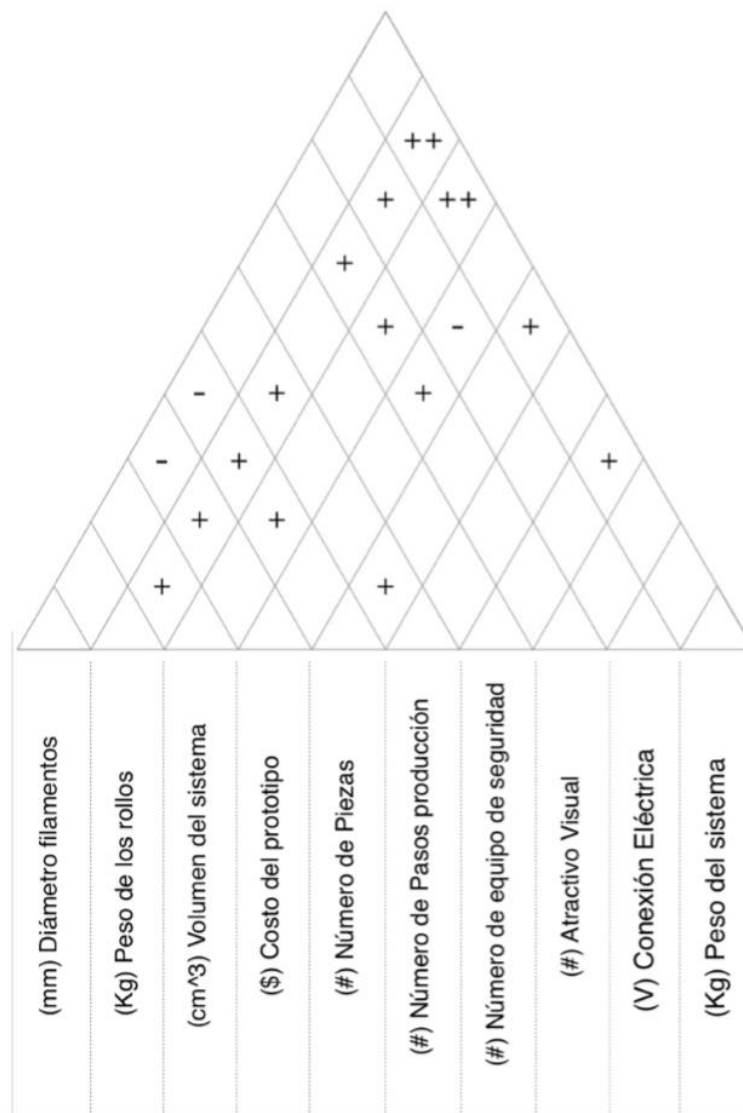


Figura 3. 16 Relación de las especificaciones de ingeniería

Al observar la parte superior de nuestra casa de la calidad podemos notar que al agregar el sistema de enrollado se aumenta tanto el peso como el volumen total del prototipo funcional y de igual manera tiene un impacto en su costo final, esto debido a un aumento en el número de piezas.

3.4 Análisis final de la propuesta de solución

Cuando empezamos a diseñar un dispositivo, el dispositivo en sí es desconocido, pero lo que se quiere que haga es conocido. Si se conoce el sistema el comportamiento del sistema se puede encontrar. El comportamiento es la salida real, por lo tanto el comportamiento puede ser medido y simulado mientras que la función solo es un deseo. El rendimiento es la medida de la función y el comportamiento, de que tan bien el dispositivo hace lo que está diseñado para hacer.

En este caso en específico sabemos la función que nuestro sistema debe de cumplir, la cual es producir el material reimprimible que se utiliza para las impresoras 3D mediante el uso de polímeros específicos y reciclados (ABS y PLA) en forma de pellets, el sistema a diseñar debe ser capaz de fundir los pellets de materiales de impresiones fallidas y darles forma de filamento con los diferentes diámetros que se mencionaron anteriormente, además, debe ser capaz de enfriar el material que es previamente fundido y debe de ser enrollado y entregado en rollos de 1 kilogramo de material.

Una vez identificada la necesidad, la cual se planteó al inicio de este trabajo escrito y de la función que debe que debe realizar nuestro sistema, dentro de las propuestas de solución se llegó a la conclusión de diseñar un prototipo funcional de una línea de extrusión para filamentos termoplásticos (específicamente ABS y PLA), el cual comprende de tres sistemas para satisfacer dicha necesidad y cumplir con los requerimientos del cliente, estos sistemas son:

- Máquina de extrusión de filamentos termoplásticos
- Sistema de enfriamiento del material proveniente del extrusor
- Sistema de arrastre del material (de la tina de enfriamiento al sistema de enrollado)

- Sistema de enrollado de los filamentos termoplásticos

Las partes que comprenden estos sistemas se mencionan en el capítulo 2 de este documento.

Aplicando las fases del proceso de diseño mecánico tenemos lo siguiente:

- Descubrimiento del producto

Prototipo Funcional de una línea de extrusión para filamentos termoplásticos.

- Proyecto de planeación

Las actividades a realizar fueron las siguientes:

1. Investigación de los diferentes procesos de transformación de plásticos.
2. Diseño del sistema de extrusión de termoplásticos.
3. Fabricación del sistema de extrusión de termoplásticos.
4. Diseño del sistema de enfriamiento de filamentos.
5. Fabricación del sistema de enfriamiento de filamentos.
6. Diseño del sistema de arrastre.
7. Fabricación del sistema de arrastre de filamentos.
8. Diseño del sistema de enrollado de filamentos.
9. Fabricación del sistema de enrollado de filamentos.
10. Diseño de boquillas diametrales.
11. Fabricación de boquillas diametrales.
12. Análisis funcional del prototipo
13. Pruebas mecánicas de tensión a los filamentos obtenidos.

Se puede observar detalladamente el inicio, fin y duración de cada actividad del proyecto en los anexos finales del documento.

- Definición del producto

Dentro de esta etapa se identificaron los clientes del producto, y se utilizó la técnica QFD para generar los requerimientos de los clientes y así transformar estos requerimientos en especificaciones de ingeniería.

- **Diseño conceptual**

Dentro de esta etapa se convirtieron las especificaciones de ingeniería a los elementos que iban a conformar los sistemas a fabricar una forma útil de ver los componentes que forman una máquina de extrusión de plásticos es mediante un análisis FAST, el cual se puede observar dentro de los anexos de este documento, de igual manera se llevó a cabo la generación de planos y se podrá observar detalladamente la selección de cada uno de sus elementos de los sistemas dentro del capítulo 4 de este documento.

- **Desarrollo del producto**

De igual manera en el capítulo cuatro se puede observar la evolución de la fabricación del prototipo funcional de la línea de extrusión de materiales termoplásticos.

- **Soporte técnico del producto**

Las instrucciones de operación, limpieza y mantenimiento se pueden observar dentro de los anexos de este documento.

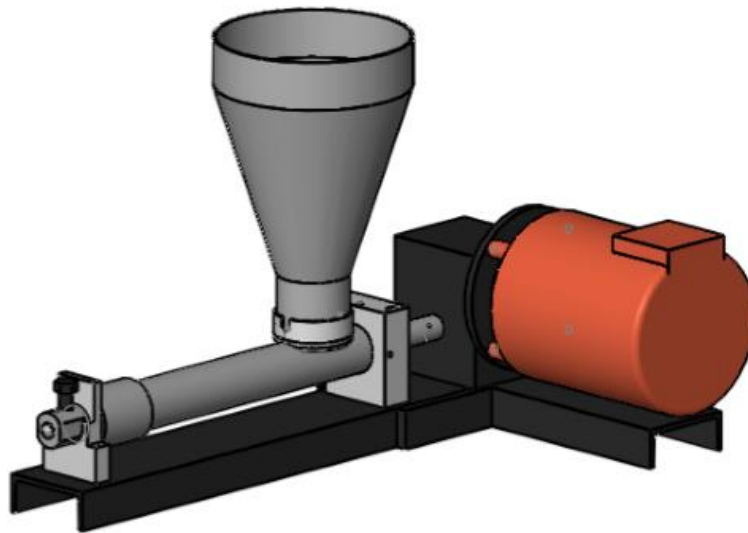
3.5 Sumario

En este capítulo se muestra el proceso de diseño utilizado en este proyecto, desde la identificación de la necesidad hasta el desarrollo de conceptos, con base en el despliegue de la función de calidad (QFD). A continuación se podrá observar el proceso de fabricación de cada uno de los elementos que conforman el prototipo funcional de la línea de extrusión para materiales termoplásticos.

3.6 Referencias

- [3.1] Budynas, R., Nisbett, K., Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, Ed. Mc Graw Hill, octava edición, pp. 4-10, 2008.
- [3.2] Villamil, G., García, M.J., Introducción a la ingeniería y al diseño en ingeniería, Ed. UBA, pp. 5, 2003.
- [3.3] Ullman, D.G., The mechanical design process, Ed. Mc Graw Hill, pp. 10-21, 28-41, 81-101, 143-169, 2010.
- [3.4] French, M., Conceptual design, Ed. Springer, pp. 17, 1999.
- [3.5] Sanguesa, M., Mateo, R., Ilzarbe, L., Teoría y práctica de la calidad, Ed. Cenage learning, pp. 34-37, 2006.
- [3.6] Bralla, J., Design for manufacturability handbook, Ed. Mc Graw Hill, pp.71, 1998.

CAPÍTULO 4



4. Generación de productos

La fase del diseño del producto tiene como meta refinar conceptos en productos de calidad.

La refinación del concepto a un producto manufacturable requiere un trabajo en todos los elementos mostrados en la Figura 4.1.

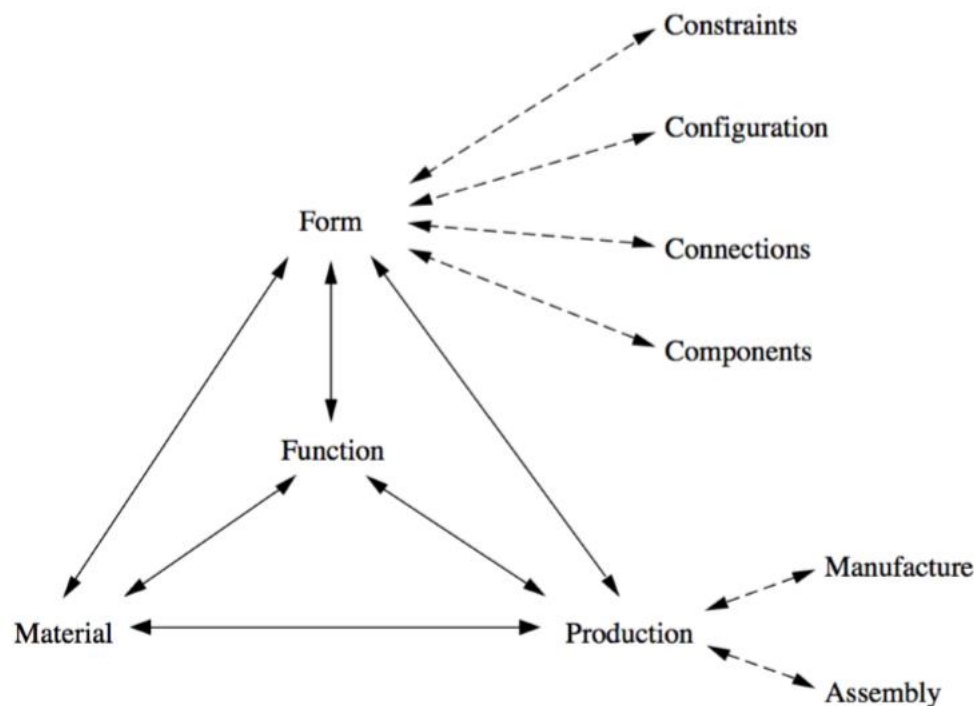


Figura 4. 1 Elementos básicos del diseño del producto

El centro de esta figura es la función del producto. Alrededor de la función y mutuamente dependientes entre sí, están la forma del producto, los materiales utilizados para fabricar el producto y las técnicas de producción utilizadas para generar la forma a partir de los materiales. Aunque estos tres pudieron haber sido considerados en el diseño conceptual, el enfoque principal estaba en el desarrollo de la función. Ahora, en el diseño del producto, la atención se dirige al desarrollo de formas producibles que proporcionan la función deseada que se pueden producir con materiales que están disponibles y pueden ser controlados.

La forma del producto es más o menos definida por las limitaciones espaciales que proporcionan la envolvente en la que opera el producto. Dentro de esta envolvente, el

producto se define como una configuración de componentes conectados. En otras palabras, el desarrollo de la forma es la evolución de los componentes, cómo se configuran entre sí y cómo se conectan entre sí.

Como se muestra en la Figura 4.1, las decisiones sobre la producción requieren el desarrollo de cómo se fabrican los componentes del producto a partir de los materiales y cómo se ensamblan estos componentes. En general, el término "fabricación" se refiere a la fabricación de componentes individuales y "ensamblaje" para reunir componentes fabricados y comprados. La evolución simultánea del producto y los procesos utilizados para producirlo es una de las características clave de la ingeniería moderna.

4.1 Generación de forma

La meta de esta sección es dar forma a los conceptos que se han desarrollado durante los capítulos anteriores de este trabajo escrito. Idealmente, la forma crece de restricciones con otros conjuntos y componentes. Una vez comprendidas las restricciones para los componentes, se puede desarrollar la configuración o la arquitectura. Después, se pueden desarrollar las conexiones o interfaces con otras partes. Estas soportan las funciones del producto. Finalmente, los componentes mismos pueden ser desarrollados. Estos cuatro pasos, aunque son presentados secuencialmente, ocurren obviamente concurrentemente.

4.1.1 Comprensión de las limitaciones espaciales

Las restricciones espaciales son las paredes o la cubierta para el producto. La mayoría de los productos deben trabajar en relación con otros objetos existentes e inmutables.

Inicialmente las limitaciones espaciales son para todo el producto, sistema o conjunto, sin embargo, a medida que las decisiones de diseño se toman en un ensamblaje o componente, se añaden otras limitaciones espaciales.

4.1.2 Configuración de componentes

La configuración es la arquitectura, estructura o disposición de los componentes y conjuntos de componentes del producto.

4.1.3 Desarrollo de conexiones: Crear y Refinar Interfaces para Funciones

Este es un paso clave cuando se construye un concepto porque las conexiones o interfaces entre componentes soportan su función y determinan sus posiciones y ubicaciones relativas.

4.1.4 Desarrollo de componentes

Una vez que se han determinado las interfaces funcionales entre los componentes, el diseño del cuerpo del componente suele ser un problema sofisticado de conectar los puntos.

4.2 Selección de materiales y procesos

Al mismo tiempo en el que se está desarrollando la forma, es importante identificar materiales y técnicas de producción y estar al tanto de sus requerimientos específicos de ingeniería.

Un diseñador con experiencia tiene una breve lista de materiales y procesos en mente, incluso con los primeros conceptos.

Al desarrollar una comprensión del producto, podemos haber establecido requisitos sobre materiales, fabricación y montaje. Como mínimo, hicimos análisis competitivo en dispositivos similares, estudiándolos para generar ideas conceptuales para conocer de que fueron hechos y cómo se hicieron. Toda esta información influye en la realización del producto de varias maneras. Primero, la cantidad del producto a fabricar influye grandemente en la selección de los procesos de fabricación a ser utilizados. Para un producto que se construirá sólo una vez, es difícil justificar el uso de un proceso que requiere altos costos de herramientas. Las operaciones de maquinado utilizadas se muestran en los anexos del documento (A.8), [4.2].

4.3 Fabricación del prototipo funcional

El prototipo funcional consta de tres sistemas: sistema de extrusión de materiales termoplásticos, sistema de enfriamiento, sistema de arrastre y sistema de enrollado.

A continuación se muestra cada uno de los elementos que conforman cada sistema, el material del que están formados y los procesos de manufactura que se realizaron para así darles su forma final.

4.3.1 Sistema de Extrusión

Un dato importante a tener en cuenta en el diseño del sistema de extrusión es la temperatura de fusión de los materiales que van a ser procesados, en este caso se reciclarán los materiales ABS y PLA cuyas temperaturas de fusión son de aproximadamente 220 °C y 165 °C respectivamente, por lo tanto los materiales a utilizar deben ser adecuados para soportar tales temperaturas de trabajo.

Los elementos que componen este sistema se describen detalladamente en el capítulo 2 de este trabajo escrito.

4.3.1.1 Tornillo extrusor

El tornillo extrusor o husillo es el elemento principal de la máquina de extrusión, su geometría y características definirán mayoritariamente el dimensionamiento de la máquina [4.3].

Los diámetros de tornillos extrusores van desde los 25 hasta 200 mm, debido a que se busca realizar un prototipo funcional compacto se decidió diseñar un husillo con un diámetro de 25 mm, con base a este diámetro se realizaron los cálculos correspondientes para la obtención de un tornillo estándar mostrados en la Tabla 2.3 de este documento.

Tabla 2.3. Características generales de un tornillo extrusor estándar

Longitud Total	20-30 D
Longitud de la Sección de Alimentación	4-8 D
Longitud de la Sección de Dosificación o de Bombeo	6-10D
Número de filetes paralelos	1
Paso del Filete	1D (ángulo de hélice 17.66°)
Ancho del Filete	0.1 D
Profundidad del Canal en la Sección de Alimentación	0.15-0.20 D
Profundidad del Canal	2-4 D

Al sustituir los valores del diámetro en los valores mínimos tenemos una longitud total de 500 mm, la longitud de la zona de alimentación es de 100 mm, la zona de bombeo es de 150 mm. El número de filetes 1, ángulo de hélice 17.66° , ancho del filete 2.5 mm con una profundidad del canal de la zona de alimentación de 3.75 mm y una profundidad de canal de 50 mm.

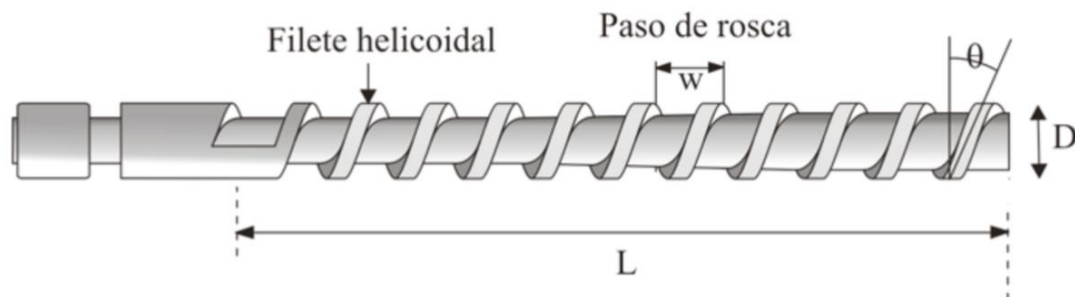


Figura 4. 2 Representación de los valores de medición de un tornillo extrusor

Una vez realizado el diseño del husillo se cotizó su precio en el mercado existente, pero su costo era bastante alto (\$30,000), después se cotizaron husillos usados pero el precio más económico que se logró obtener fue de \$18,000 lo cual aún resulta costoso considerando que no se cuenta con un presupuesto muy elevado para sobrellevar el proyecto.

Otra alternativa planteada fue maquinar una barra cromada para obtener la geometría del husillo, pero desafortunadamente no se cuenta con una maquinaria la cual sea capaz de realizar tal geometría debido a su grado de dificultad. Debido a las problemáticas antes mencionadas se decidió revisar detalladamente la geometría del husillo que utilizaban las empresas que se mencionaron y analizaron en el capítulo 3, de ahí pudimos notar que utilizaban una broca de gusano para madera cuya función simplemente era transportar el plástico fundido dentro del cilindro.

De ahí se llegó a la conclusión de utilizar una broca de gusano de berbiquí que más se asemejara a la geometría del husillo diseñada.

En la figura 4.3 observamos la broca de gusano para madera (de berbiquí) que se decidió utilizar para nuestro prototipo funcional del sistema de extrusión.



Figura 4.3 Alternativa utilizada como tornillo extrusor

Tiene una longitud total de 457.2 mm (18 in), un diámetro de 30.81 mm (1.5 in), tiene un solo filete y se asemeja a un buen diseño de tornillo extrusor como se muestra en la Figura 4.4.

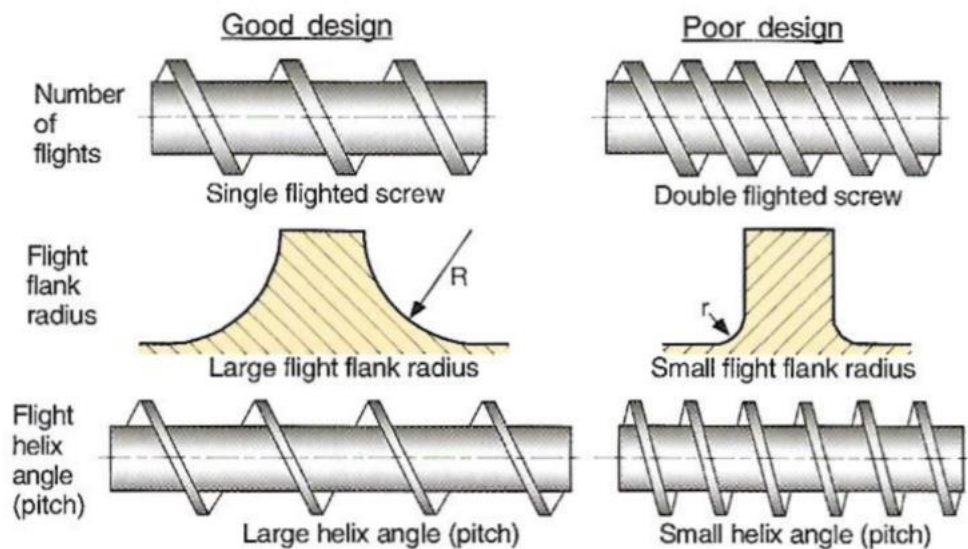


Figura 4.4 Buen diseño (lado izquierdo) y mal diseño (lado derecho) de un tornillo extrusor

4.3.1.2 Cañón extrusor

Algunos criterios importantes a considerar para el diseño del cañón o barril son:

- Dimensiones del tornillo extrusor
- Resistencia al desgaste por defectos de abrasión y corrosión
- Espacio entre el husillo y el cañón

Debido a que el diámetro de nuestro tornillo extrusor es de 1.5 in, y que las temperaturas a trabajar son de alrededor de 300 °C, el cañón extrusor seleccionado para este prototipo funcional fue un tubo honeado (totalmente liso internamente) que permite el libre giro del

husillo ver Figura (4.5), está fabricado de acero 1026 con un diámetro interno de 1.5 in y un diámetro externo de 2 in.

Se seleccionó este material ya que resiste altas temperaturas y altas presiones internas, además de que es liso internamente y esto permite el libre giro del husillo lo cual da como resultado un buen transporte de sólidos, ver anexo.

El tubo honeado tiene en un extremo una cuerda de 2 pulgadas con 12 hilos por pulgada en la cual se colocará la boquilla mayor del sistema. De igual manera cuenta con la garganta de alimentación del material en la cual se colocará la base de la tolva.

Las máquinas utilizadas para fabricar esta pieza fueron:

- Torno
- Fresadora
- Taladro



Figura 4. 5 Cañón del prototipo funcional (extrusor)

El primer cañón fue soldado a la tolva de almacenamiento del material pero finalmente se cambió debido a motivos que se explicarán más adelante dentro de este capítulo.

4.3.1.3 Soportes cañón extrusor

Las bases delantera y trasera del cañón extrusor se muestran en la Figura 4.6. Estas bases son de Aluminio serie 6000 y resisten las temperaturas de trabajo a las cuales será sometido el sistema.

Las máquinas utilizadas para fabricar estas piezas fueron:

- Torno
- Fresadora
- Taladro

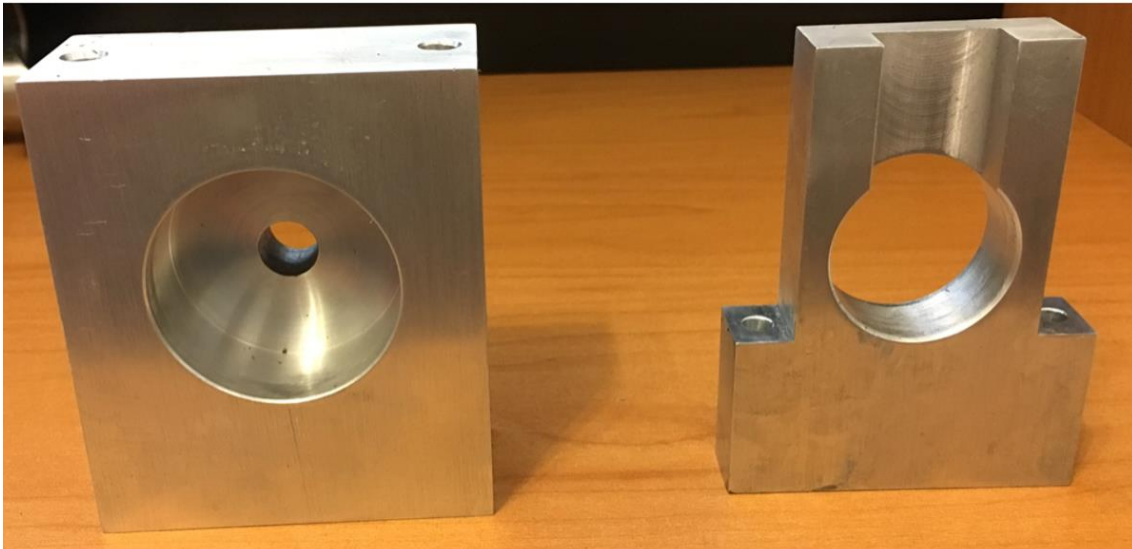


Figura 4. 6 Soporte trasero y delantero del cañón extrusor

4.3.1.4 Boquilla Mayor

La boquilla mayor se muestra en la Figura 4.7, esta boquilla se acopla a la parte delantera del cañón y su parte frontal se colocan las boquillas diametrales del sistema de extrusión.

Cuenta con una cuerda interna de 2 pulgadas de 12 hilos por pulgada y además en la parte superior se puede colocar un tornillo regulador de caudal.

El material de la boquilla es de acero 1045 y las máquinas utilizadas para esta pieza fueron:

- Torno
- Fresadora



Figura 4. 7 Boquilla Mayor del sistema de extrusión

Conforme se realizaban pruebas de producción de filamentos termoplásticos, notamos que el material ABS es el más complicado de procesar, debido a que tiene una mayor densidad y viscosidad. Debido a esto le costaba más trabajo salir del extrusor utilizando la boquilla mostrada en la Figura 4.7. Finalmente se decidió diseñar y fabricar otra boquilla mayor más corta (ver Figura 4.8) y con una mayor conicidad para facilitar la salida del material. De esta manera logramos procesar el material ABS. El material de esta boquilla es de acero 1045.



Figura 4. 8 Boquilla mayor para material ABS

4.3.1.5 Boquillas diametrales

Las boquillas diametrales se colocan en la parte frontal de la boquilla mayor, estas son utilizadas para definir los diámetros finales de los filamentos. En un principio se utilizaba un tornillo el cual tenía un canal recto como se muestra en la Figura 4.9. Esta propuesta de boquilla no funcionó adecuadamente por lo que se decidió diseñar y fabricar boquillas utilizando las secciones mostradas en el capítulo dos de este documento, el resultado final se muestra en la Figura 4.10. De igual manera las boquillas no funcionaron adecuadamente ya que al ser demasiado grandes y al estar situadas al final de la máquina el calor no se distribuía correctamente en ellas provocando que el material se atascara dentro del cañón.

Finalmente se fabricaron las boquillas mostradas en la Figura 4.11, estas boquillas cuentan con una conicidad la cual ayuda a fluir al material y a salir sin ningún problema del extrusor.

El material de las boquillas es de acero 1045 y las máquinas utilizadas para su fabricación fueron:

- Torno



Figura 4. 9 Tornillo canal recto utilizado como boquilla



Figura 4. 10 Segundo diseño boquillas diametrales



Figura 4. 11 Boquillas diametrales finales

4.3.1.6 Tolva

La tolva se diseñó en base a lo que es considerado un buen diseño mostrado en el capítulo dos de este trabajo escrito Figura 2.9.

Inicialmente la tolva se soldó al cañón extrusor (ver Figura 4.12 a) pero esto trajo problemas al momento de procesar los plásticos. Los pellets se quedaban a los costados (Figura 4.12 b) sin introducirse al cañón, se endurecían provocando que la alimentación del material al cañón no fuera de una manera constante.

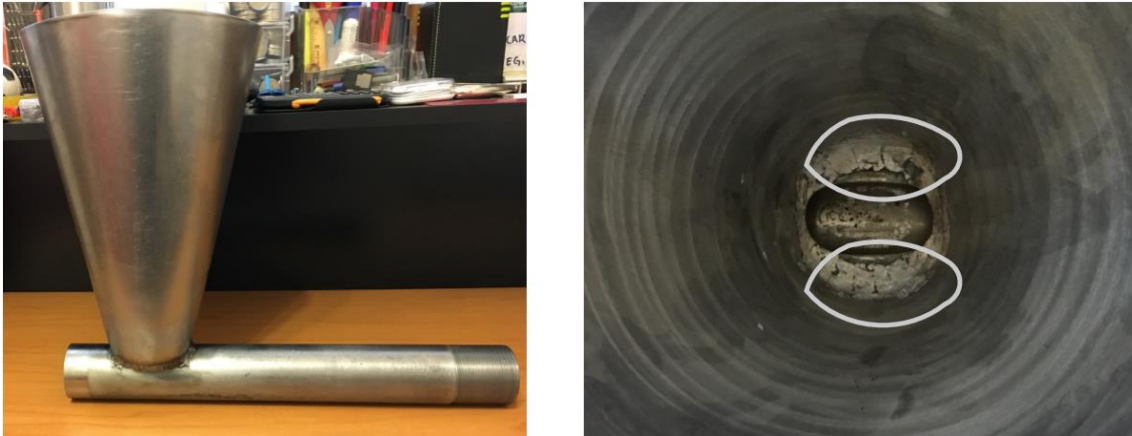


Figura 4. 12 (a) Tolva soldada al cañón, (b) Problemas de alimentación de la tolva al cañón

Debido a las problemáticas antes mencionadas se decidió diseñar y fabricar una base para la tolva, la cual tuviera una conicidad (ver Figura 4.13) y alimentará el material de una forma constante al interior del extrusor. La forma final de la base para la tolva y la tolva se observan en la Figura 4.14.

El material de la tolva es de lámina negra calibre 16 (utilizada dentro de hornos) y las máquinas utilizadas para darle forma fueron:

- Roladora
- Dobladora

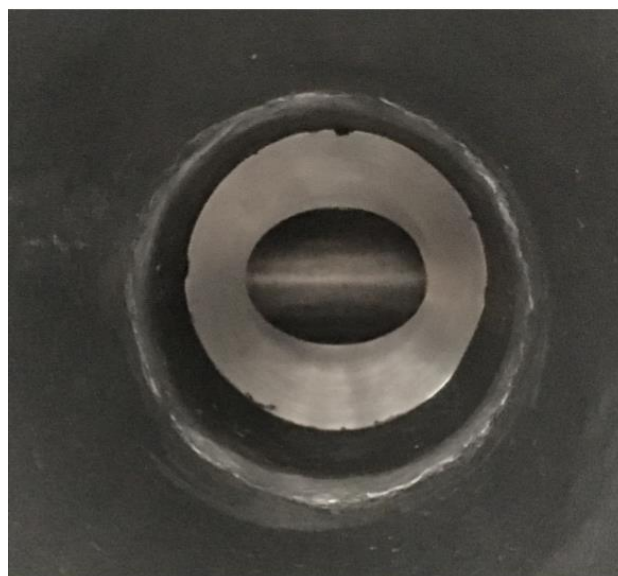


Figura 4. 13 Conicidad base de tolva para una alimentación constante de material



Figura 4. 14 Unión tolva-base tolva

4.3.1.7 Base Tolva

La base que soporta la tolva se observa en la Figura 4.15, fue diseñada y fabricada para solucionar las problemáticas antes mencionadas, la base de la tolva tiene la forma de la garganta de alimentación el cual se puede observar en la Figura 2.8 de este trabajo.

El material de la base es aluminio grado automotriz y los maquinados a los cuales se sometió la pieza fueron:

- Fresado
- Taladrado
- Cilindrado

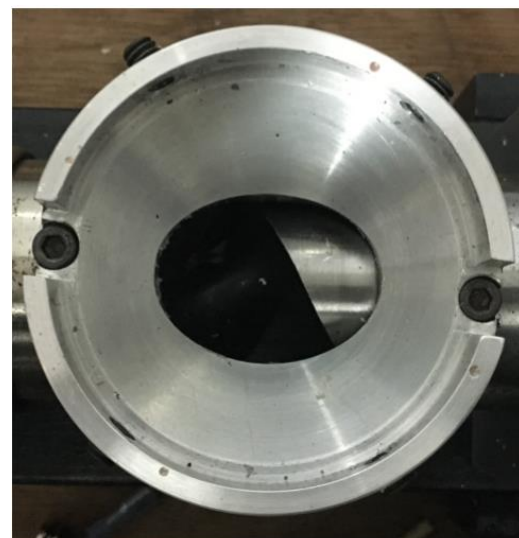


Figura 4. 15 Base tolva

4.3.1.8 Motor eléctrico

Los factores más importantes a tenerse en cuenta en la elección de un motor son:

- Tensión de alimentación
- Potencia
- Velocidad
- Frecuencia
- Torque requerido por el husillo

Para este caso se seleccionó un motor eléctrico monofásico de 115 Volts (debido a que uno de los requerimientos del cliente era que el prototipo funcional tuviera una conexión ideal para hogar), una potencia de 0.5 HP, una frecuencia de 60 Hz, velocidad de rotación de 1740 rpm. Ver Figura 4.16.



Figura 4. 16 Motor eléctrico (Unidad extrusora)

4.3.1.9 Reductor

Debido a que la velocidad de giro de nuestro motor es de 1740 rpm se decidió utilizar un reductor de relación 29:1 (Figura 4.17) para así obtener una velocidad de giro del husillo de 60 rpm la cual está dentro de las velocidades promedio para la extrusión de plásticos.

Además con ayuda del reductor podemos aumentar el torque [4.4], esto lo podemos notar aplicando la formula siguiente:

$$T = \frac{HP \times 716}{RPM} \text{ en Kg-m}$$

El torque del motor eléctrico es de 0.20 Kg-m y al momento de agregar el reductor tenemos un torque final de 5.96 Kg-m. El cual es suficiente para generar movimiento al husillo extrusor.



Figura 4. 17 Reductor de velocidad (29:1)

4.3.1.10 Acople (Reductor Husillo)

La función del acople es unir dos piezas en este caso el eje del reductor con el eje del tornillo extrusor, el acople se puede ver en la Figura 4.18 y es de Acero cromado 1045, los ejes de los elementos entran a presión y además se sostienen por medio de opresores. Las máquinas utilizadas para la fabricación de esta pieza fueron:

- Torno
- Taladro



Figura 4. 18 Acople (reductor-husillo)

4.3.1.11 Base soporte del sistema en general

El soporte de la máquina de extrusión fabricada se encuentra sobre un riel de Canal C de Acero A32, este riel le brinda estabilidad y equilibrio general al sistema (Figura 4.19), además de que es utilizado para unir las piezas del sistema, la base (en forma de L) se puede instalar fácilmente sobre alguna mesa de trabajo.

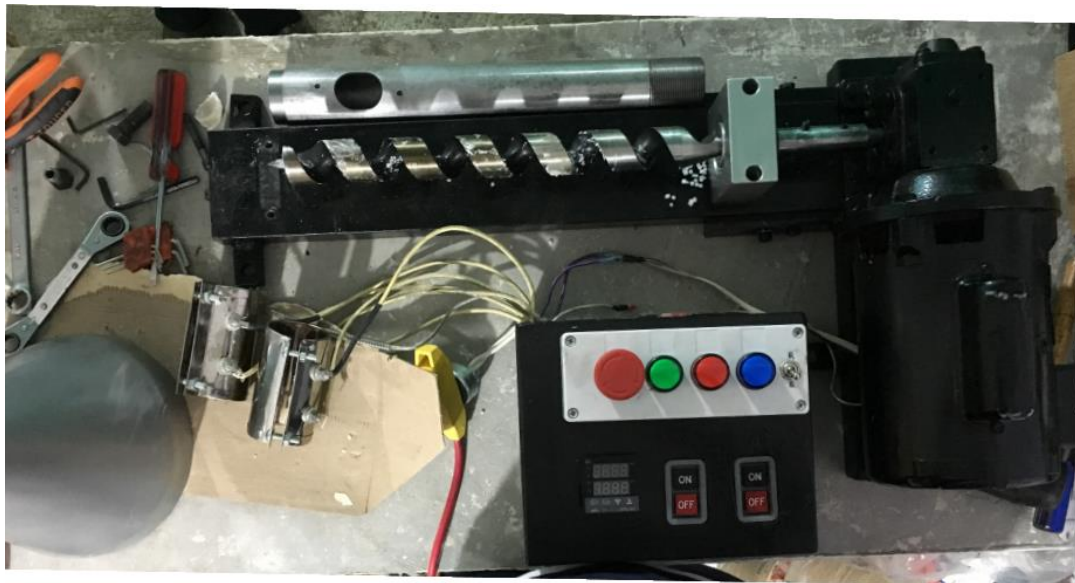


Figura 4. 19 Riel (Soporte del sistema de extrusión)

4.3.1.12 Instrumentación y control del sistema de extrusión

Los elementos a utilizar para fundir el material a tratar (ABS y PLA) son resistencias eléctricas tipo banda de cerámica con una temperatura máxima de 500 °C (Figura 4.20), con cierre de tornillo estándar, su conexión es monofásica de 127 Volts, sus terminales de conexión son de cable de alta temperatura (Figura 4.21), sus medidas son :

- 2 resistencias de 2" de diámetro por 4" de largo
- 1 resistencia de 2.5" de diámetro y 2" de largo
- 1 resistencia de 2.5" de diámetro y 1.5" de largo

Estas resistencias fueron seleccionadas ya que cumplen mejor los requisitos del cliente de conexión para hogar y para fundir los materiales termoplásticos.



Figura 4. 20 Resistencias eléctricas tipo banda



Figura 4. 21 Cable de alta temperatura

El controlador de temperatura utilizado en este proyecto (ver Figura 4.22) es un pirómetro digital con un sistema de encendido y apagado (ON-OFF control), en el cual la energía está completamente encendida o totalmente apagada. Esta energía que se transfiere a las resistencias eléctricas es regulada por un relé de potencia (JQX-62-2H) de 50/60 Hz (Figura 4.23).

El giro del motor se puede controlar mediante un conector cola de gusano (ver Figura 4.24) esto se hizo con la finalidad de poder cambiar el sentido de giro del tornillo extrusor y así poder transportar el material desde la tolva hasta la boquilla.

El sistema cuenta con dos botoneras de encendido y apagado, una para controlar el motor eléctrico (unidad de manejo del sistema de extrusión) y otro para el controlador de temperatura.



Figura 4. 22 Controlador de temperatura (ON-OFF)

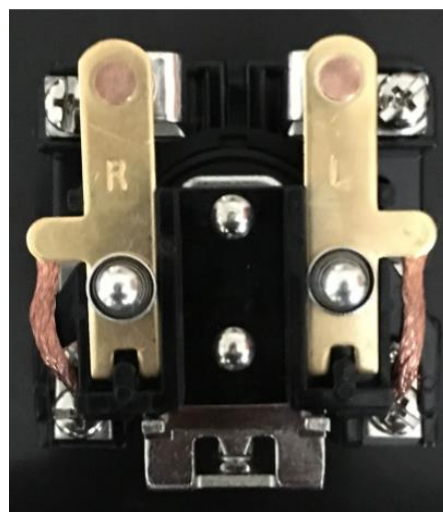


Figura 4. 23 Relé de potencia



Figura 4. 24 Conexión cambio de giro del motor

Todos los elementos de control se encuentran instalados sobre una caja (ver Figura 4.25) la cual cuenta con un botón paro de emergencia del sistema en general y tres focos indicadores Led que se encienden junto con el encendido de cada elemento.



Figura 4. 25 Caja de controles

El sensor de temperatura utilizado es un termopar tipo J de aguja (ver Figura 4.26) el cual complementa al controlador de temperatura. Su rango de medición es de -270 a 1200 °C.



Figura 4. 26 Termopar tipo J

Todos los elementos de control y potencia del sistema se detallan en la tabla de costos mostrada en el capítulo 6 de este documento.

Los esquemas de las conexiones eléctricas se encuentran dentro de los anexos al final del documento.

En la Figura 4.27 podemos observar el sistema de extrusión de materiales termoplásticos totalmente ensamblado.



Figura 4. 27 Sistema de extrusión de termoplásticos

4.3.2 Sistema de enfriamiento

El material proveniente del sistema extrusor, al momento de salir por la boquilla de extrusión, se encuentra caliente y debido a esto el filamento se puede deformar. Por este motivo, es necesario agregar un sistema de enfriamiento del material para así poder dirigirlo y manejarlo sin problemas (con ayuda del sistema de arrastre) hacia el sistema de enrollado.

El sistema de enfriamiento cuenta con dos elementos principales:

- Canal de enfriamiento
- Tina de enfriamiento

4.3.2.1 Canal de enfriamiento

El canal de enfriamiento se encuentra unido a la tina de enfriamiento y este guía el material hacia el interior de la tina, en la parte superior final del canal se encuentra instalada una manguera (ver Figura 4.28) en la cual circula agua proveniente de la tina, esto con la finalidad de enfriar totalmente el material, debido a que la máquina de extrusión se coloca a un nivel superior al de los sistema de enfriamiento, arrastre y enrollado (para mejorar el flujo de salida), el canal de enfriamiento se encuentra inclinado (35°) con respecto a la tina (aproximadamente) ver Figura 4.29, esta inclinación se puede ajustar de acuerdo a la consideración del operario.



Figura 4. 28 Canal de enfriamiento



Figura 4. 29 Inclinación del canal de enfriamiento

El material del canal de enfriamiento es Aluminio serie 6000 y la maquinaria utilizada para su fabricación fueron:

- Torno
- Taladro

4.3.2.2 Tina de enfriamiento

La tina de enfriamiento del sistema se muestra en la Figura 4.30. Está fabricada de Aluminio serie 6000 y es la encargada de contener el agua con la que se enfría el filamento proveniente del extrusor. Cuenta con un canal en su interior el cual sirve como guía del material hacia el sistema de arrastre, de igual manera cuenta con una bomba de agua en la cual se conecta una manguera que la dirige hacia el canal de enfriamiento y la mantiene en circulación para mantenerla fría.

Las máquinas utilizadas para la fabricación de esta pieza fueron:

- Fresadora



Figura 4. 30 Tina de enfriamiento

4.3.3 Sistema de arrastre

El sistema de arrastre es el encargado de dirigir el material desde la tina de enfriamiento hacia el sistema de enrollado, cuenta con dos rodillos de presión, superior e inferior y estos son accionados mediante el uso de poleas y bandas conducidas por el motor-reductor colocado en el sistema de enrollado.

Los dos sistemas principales de este sistema son:

- Base de rodillos
- Rodillos de presión

4.3.3.1 Base de rodillos

La base de los rodillos se puede observar en la Figura 4.31, está fabricada de Aluminio serie 5000 y la maquinaria utilizada para su fabricación fueron:

- Fresadora
- Taladro



Figura 4. 31 Base rodillos de presión

En la parte central se colocan los ejes de los rodillos de presión, el rodillo superior se puede deslizar hacia arriba y hacia abajo para sujetar correctamente el filamento, independientemente de su diámetro.

4.3.3.2 Rodillos de presión (superior e inferior)

Los ejes de los rodillos de presión se pueden observar en la Figura 4.32, el material de los ejes es acero 1045 y los rodillos están formados por poliuretano como se observa en la Figura 4.33.

El rodillo superior se puede deslizar libremente hacia arriba y hacia abajo mientras que el rodillo inferior gira libremente y es conducido mediante una polea de aluminio serie 5000 la cual está conectada mediante una banda al sistema de enrollado.

Las máquinas utilizadas para la manufactura de estas piezas fueron:

- Torno

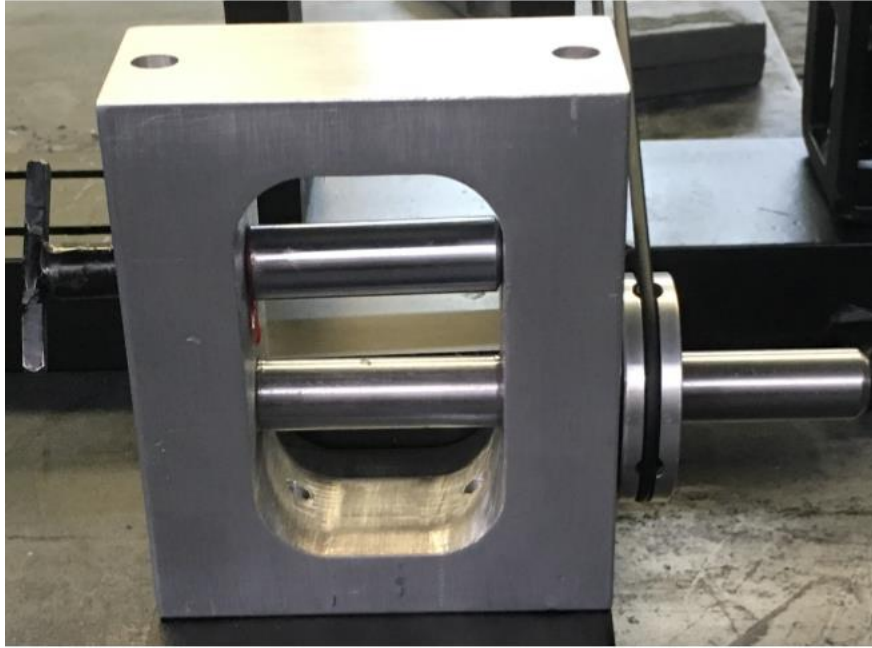


Figura 4. 32 Ejes rodillos de presión

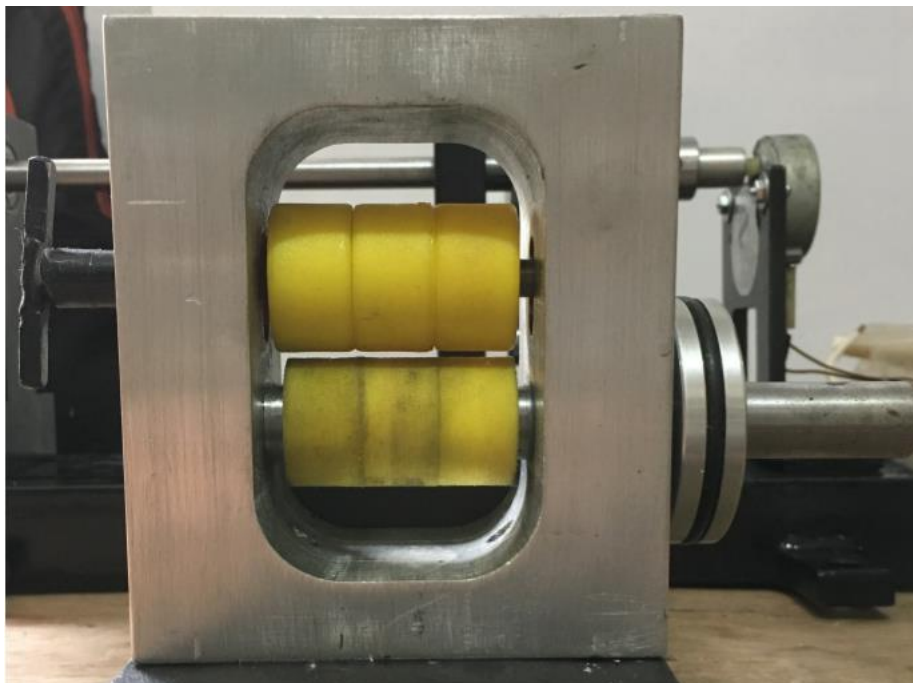


Figura 4. 33 Rodillos de poliuretano

4.3.4 Sistema de enrollado

El sistema de enrollado es la parte final del sistema donde el filamento proveniente del extrusor, una vez enfriado por el sistema de enfriamiento y mediante la ayuda del sistema de arrastre se enrolla sobre un carrete el cual es utilizado y colocado en las impresoras 3D.

Los elementos principales de este sistema son:

- Bases eje carrete
- Eje carrete
- Acople Motor-reductor-Juego de poleas
- Juego de poleas

4.3.4.1 Bases eje carrete

Las bases o soportes del eje del carrete se puede observar en la Figura 4.34, están fabricados de placa A36 de 3/4"x3"x5", además cuentan con dos baleros por los cuales pasa el eje del carrete y lo hace girar libremente.

Las máquinas utilizadas para manufacturar estas piezas fueron:

- Torno
- Fresadora



Figura 4. 34 Bases eje carrete

4.3.4.2 Eje carrete

Inicialmente se tenía un eje de carrete muy pequeño como se puede observar en la figura anterior, por lo cual se decidió realizar un eje de carrete más largo para poder acoplar diferentes tamaños de carretes, junto con la ayuda de los soportes colocados bajo los soportes del eje del carrete (ver Figura 4.35).

El eje final se puede observar en la Figura 4.36, está fabricado de acero 1018 y las máquinas utilizadas para manufacturar la pieza fueron:

- Torno

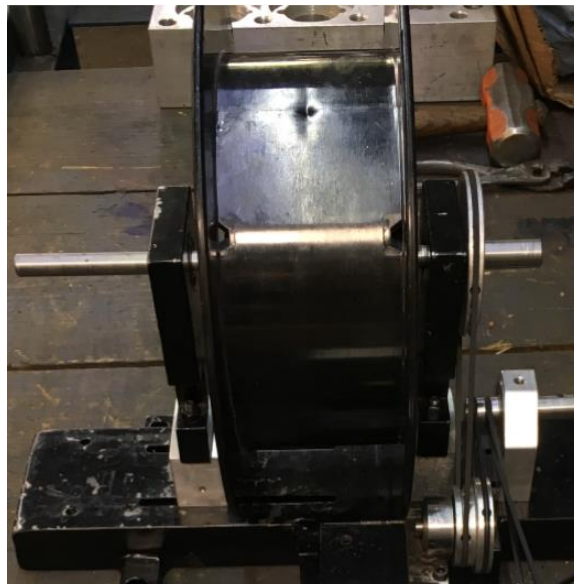


Figura 4. 35 Ajuste carrete para filamentos



Figura 4. 36 Eje carrete

4.3.4.3 Acople motor-reductor juego de poleas

El acople del motor-reductor juego de poleas se observa en la Figura 4.37. El acople está fabricado de acero 1045 y la maquinaria utilizada para su manufactura fue:

- Torno
- Taladro

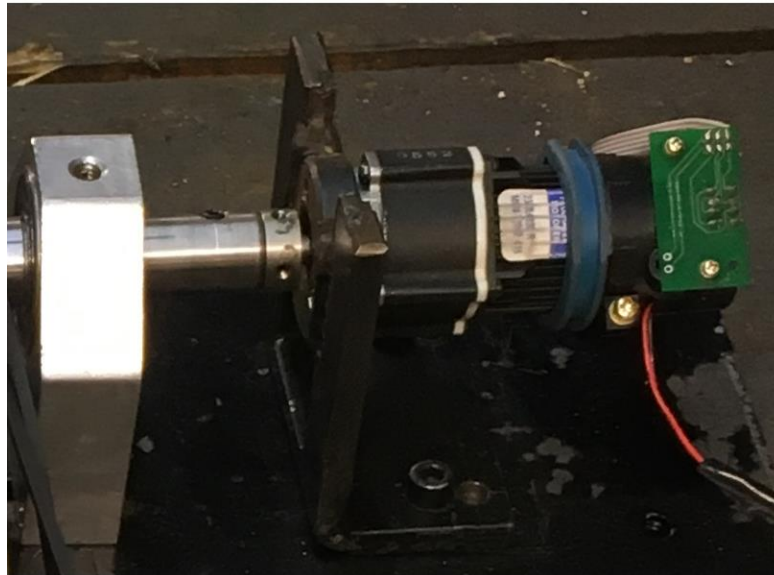


Figura 4. 37 Acople motor-reductor juego de poleas

4.3.4.4 Juego de poleas

El juego de poleas es accionado por un motor-reductor, su finalidad es convertir las rpm del motor-reductor en fuerza y de igual manera reducir la velocidad final del eje del carrete. Están fabricadas de Aluminio serie 5000 y están conectadas entre sí mediante bandas como se observa en la Figura (4.38).

Además cuentan con dos baleros para que los ejes de las poleas giren libremente.

La maquinaria utilizada para su manufactura fue:

- Torno

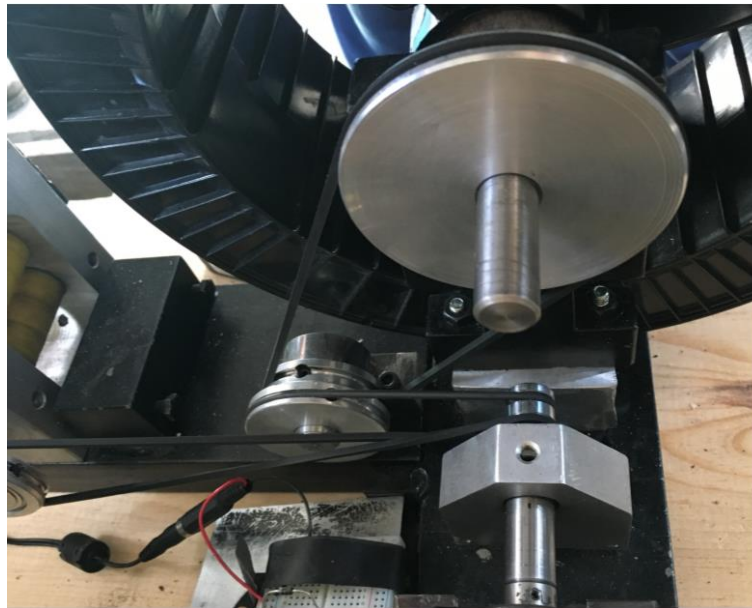


Figura 4. 38 Juego de poleas

4.3.4.5 Base soporte sistema de enfriamiento, arrastre y enrollado

La base que soporta los sistemas de enfriamiento, arrastre y enrollado mostrado en la Figura 4.39, es de las mismas características a la base que soporta al sistema de extrusión. Es un riel de Canal C de Acero A32, este riel igualmente brinda estabilidad y equilibrio general a los sistemas. La base (en forma de T) se puede instalar fácilmente sobre una mesa de trabajo.

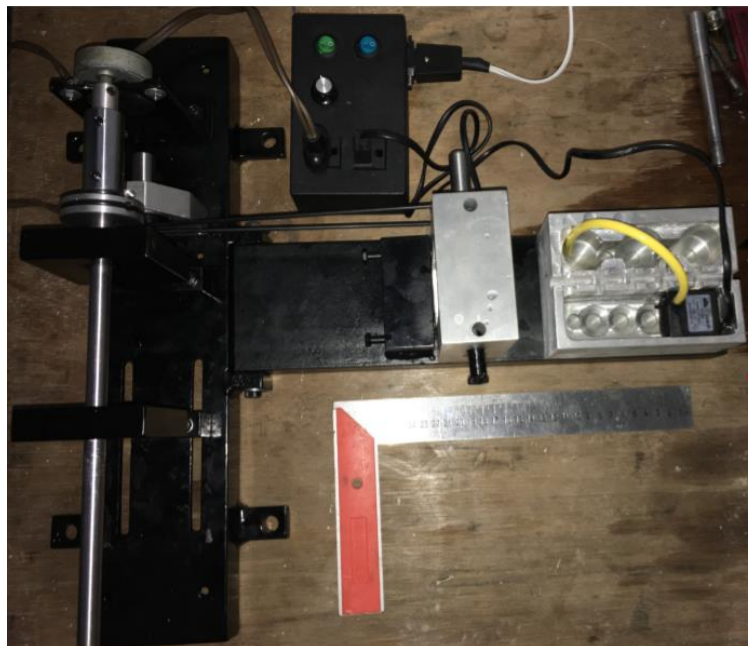


Figura 4. 39 Soportes sistemas de enfriamiento, arrastre y enrollado

4.3.5 Instrumentación y control del sistema de enfriamiento, arrastre y enrollado

La caja de controles de los sistemas de enfriamiento, arrastre y enrollado se muestra en la Figura 4.40. Esta caja cuenta con dos conexiones, una para la fuente de alimentación de un motor-reductor de Corriente Directa de 12 volts, y otra para la conexión de la bomba de agua del sistema de enfriamiento, además, cuenta con dos potenciómetros los cuales se utilizan para variar la velocidad del motor-reductor (ver Figura 4.41) que acciona el juego de poleas del sistema en general. Los esquemas de conexión del circuito electrónico de variación de velocidad del motor-reductor, así como los eléctricos de la caja de controles se pueden observar en los anexos de este documento (A5 y A6), [4.5], [4.6], [4.7]



Figura 4. 40 Caja de controles del sistema de enfriamiento, arrastre y enrollado

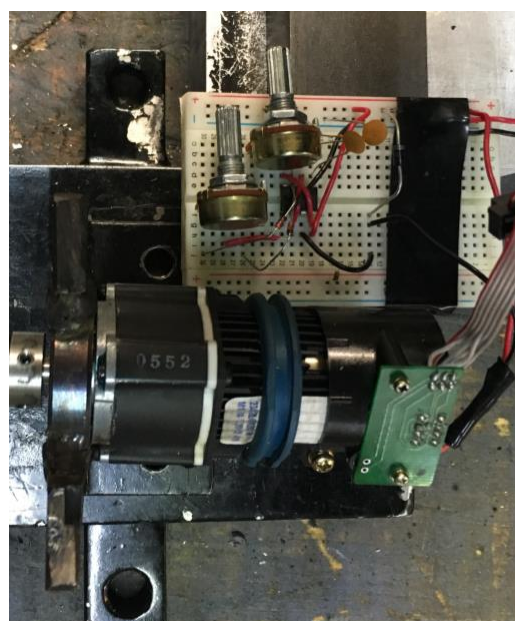


Figura 4. 41 Circuito de variación de velocidad motor-reductor

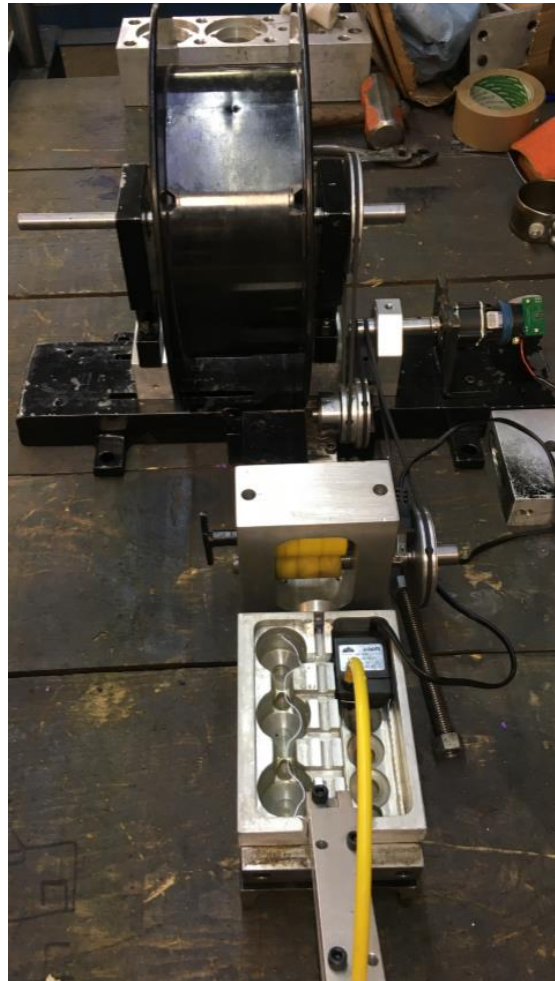


Figura 4. 42 Sistemas de enfriamiento, arrastre y enrollado

4.4 Sumario

En este capítulo se muestran cada uno de los elementos que se fabricaron y seleccionaron para el prototipo funcional de una línea de extrusión de materiales termoplásticos. De igual manera se da una breve explicación de la maquinaria necesaria para su manufactura y del porqué se decidieron seleccionar tales elementos, cabe mencionar que la mayoría de los materiales seleccionados (a excepción de los elementos de control y de potencia) están fabricados de pedacería restante, es decir, material restante de piezas las cuales fueron fabricadas para otros proyectos, esto con la finalidad de disminuir el costo final del prototipo funcional. Esto no significa que los materiales de pedacería restante no estén en buenas condiciones, simplemente se están aprovechando materiales que se consideraban materiales de desperdicio o para reciclaje. En el capítulo siguiente se observarán los resultados y discusión de resultados del prototipo fabricado y de los materiales que produce.

4.5 Referencias

- [4.1] Ullman, D.G., The mechanical design process, Ed. Mc Graw Hill, pp. 244-267, 2010.
- [4.2] Groover, P., Fundamentals of modern manufacturing, Ed. Wiley. 2010.
- [4.3] Rauwendaal, C., Polymer extrusion, Ed. Hanser, 2014.
- [4.4.] Chapman, J., Máquinas eléctricas, Ed. Mc Graw Hill, 2010.
- [4.5] Edminister, J., Circuitos eléctricos, Ed. Shaum, 2005.
- [4.6] Rashid, M., Electrónica de potencia, Ed. Pearson, 2004.
- [4.7] Dorf, S., Circuitos eléctricos, Ed. Alfaomega, 2008.

CAPÍTULO 5



5. Resultados y discusión

A continuación se muestran los resultados obtenidos con el diseño y la fabricación de los sistemas de producción para la obtención de filamentos termoplásticos y de los mismos filamentos.

Los sistemas desarrollados durante la elaboración del proyecto:

- Sistema de extrusión
- Sistema de enfriamiento
- Sistema de arrastre
- Sistema de enrollado

Los materiales procesados en la línea de extrusión fueron:

- ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)
- PLA (Ácido Poliláctido)
- HDPE (Polietileno de alta densidad)
- PP (Polipropileno)

5.1 Línea de extrusión

La línea de extrusión es capaz de procesar diferentes materiales termoplásticos, debido al rango de temperaturas que controla (40-400 grados Centígrados), representando en un ejemplo, al procesar ABS se logra producir 1.050 Kg/h.

La capacidad del cañón de la máquina es de aproximadamente 0.4 Kg y de la tolva de 3.3 Kg. Estos valores varían dependiendo de la densidad del material a procesar. El consumo eléctrico de la línea extrusora se muestra en la siguientes Tablas.

Tabla 5. 1 Consumo energético extrusora

Consumo energético extrusora por hora			
Parte	Pza	consumo (kW/h)	costo (pesos)
Motor	1	1.058	2.96769
Pirómetro	1	0.36	1.0098
Resistencias	3	1.5	4.2075
Indicadores	3	0.072	0.20196
	Total=	\$2.99	\$8.39
	Precio kW/h=	\$2.81	

Tabla 5. 2 Consumo energético sistemas de enfriamiento y enrollado

Consumo energético sistemas enfriamiento, enrollado por hora			
Parte	cantidad	consumo (kW/h)	costo (pesos)
bomba centrífuga	1	0.003	0.008415
elmininador DC	1	0.028	0.07854
motor rpm	1	0.024	0.06732
indicadores	2	0.048	0.13464
	Total=	0.103	\$0.29
	Precio kW/h=	\$2.81	

Se tiene como resultado final un gasto de \$ 8.67 pesos por hora en consumo eléctrico.

Considerando que el costo del material en forma de pellets varía de \$35 a \$45 pesos el kilogramo, más el consumo energético por hora del sistema de producción, el rollo de 1kg de material ABS tiene un costo de \$54.

Considerando el precio más bajo de los proveedores \$500 pesos, notamos que el producir nuestro material resulta 10 veces más económico y que la inversión inicial para la fabricación del sistema de producción se puede recuperar rápidamente.

5.2 Análisis de Resultados Filamentos ABS

Para realizar una comparación de la calidad del filamento fabricado con nuestro sistema de producción contra el filamento que se obtiene directamente de los proveedores, los filamentos se sometieron a una serie de pruebas que se mencionan a continuación:

- Ensayo de tensión de los filamentos
- Ensayo de compresión de probetas cilíndricas impresas

5.2.1 Ensayo de tensión

Los resultados obtenidos mediante los ensayos de tensión a los cuales fueron sometidos los filamentos se analizaron mediante la correlación de imagen digital 2D con GOM Correlate, el curso del programa fue impartido en la SEPI ESIME Zacatenco. Este

programa se basa en la correlación de imágenes digitales, el cual es un método óptico para medir sistemas 2D y 3D [5.1].

El programa puede determinar las coordenadas de los patrones de cada imagen por capa. El patrón deformado representa el objeto deformado que se podrá usar para medir o calcular los desplazamientos y esfuerzos de estos [5.2].

Con estos resultados se puede evaluar el comportamiento del objeto; en este caso los filamentos, para crear u obtener un elemento adecuado para el análisis se tiene que realizar un moteado del mismo, el cual consiste en colocar un poco de pintura en spray sobre el objeto para hacer los patrones que analiza el sistema (ver Figura 5.1).

Las pinturas utilizadas fueron pinturas mate, que son las recomendadas para realizar las pruebas.



Figura 5. 1 Moteado de los filamentos

Una vez moteado el material, se colocó en una pequeña prensa como se muestra en la Figura 5.2. Frente a los materiales se colocó una cámara con la cual se tomó una grabación de la deformación del material, con respecto a una carga aplicada (desconocida).

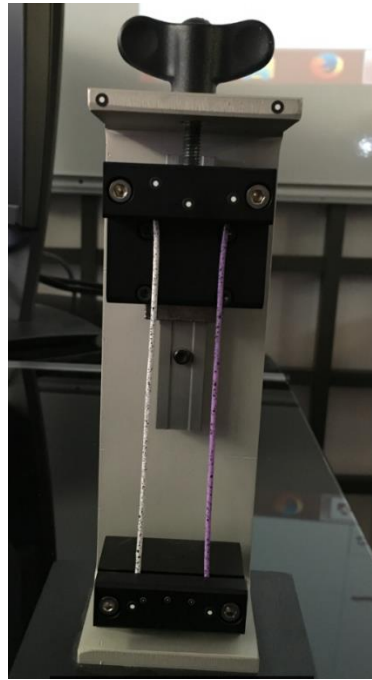


Figura 5. 2 Filamentos colocados en la prensa

Desafortunadamente no se pudieron analizar los filamentos debido a que la sujeción de estos no era buena y se terminaban desprendiendo de la parte inferior y superior (se deslizaban), además de que los lentes de la cámara utilizados no detectaron los patrones moteados sobre los filamentos debido a que son muy pequeños. Para solucionar esta problemática se decidió realizar una prensa (ver Figura 5.3) en la cual se pudieran sujetar los filamentos y someterlos a tensión.

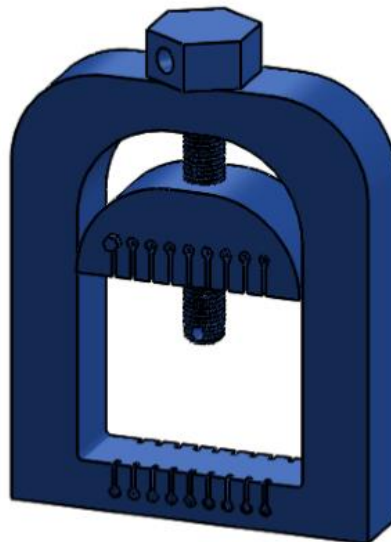


Figura 5. 3 Prensa para filamentos

Los filamentos y la colocación de los filamentos se observan en la Figura 5.4.

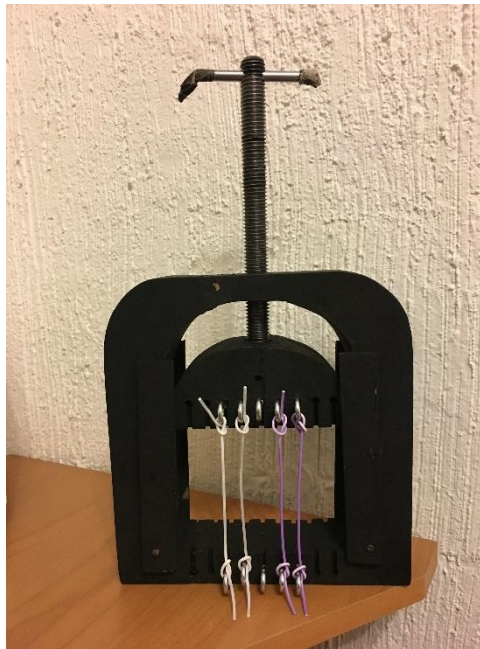


Figura 5. 4 Sujeción de los filamentos en prensa fabricada

Esta no es una forma correcta de analizar los filamentos, pero se intenta obtener simplemente una comparación del comportamiento de los filamentos fabricados con los filamentos comprados realizando las pruebas bajo las mismas condiciones.

Debido a que no se conoce el valor de la carga, se decidió utilizar un sistema de referencia el cual consiste en analizar la misma longitud de los filamentos (50 mm), dar cierto número de vueltas del tornillo de la prensa (10 vueltas completas) en un tiempo determinado (30 segundos), tomar un vídeo y analizar las deformaciones del material utilizando el programa GOM Correlate.

La cámara utilizada fue de un celular (iPhone 6s), y se adquirió una base para poder asegurar que la cámara mirara perpendicularmente al objeto tanto en el eje horizontal como en el vertical, esto para poder captar los esfuerzos fuera del plano de movimiento del objeto.

A continuación se muestran las deformaciones máximas que alcanzó cada material.

Durante las 5 pruebas de tensión de nuestro material la deformación máxima que se alcanzó fue de 6.328 mm, mientras que la más alta del material de la competencia fue de 5.957 mm.

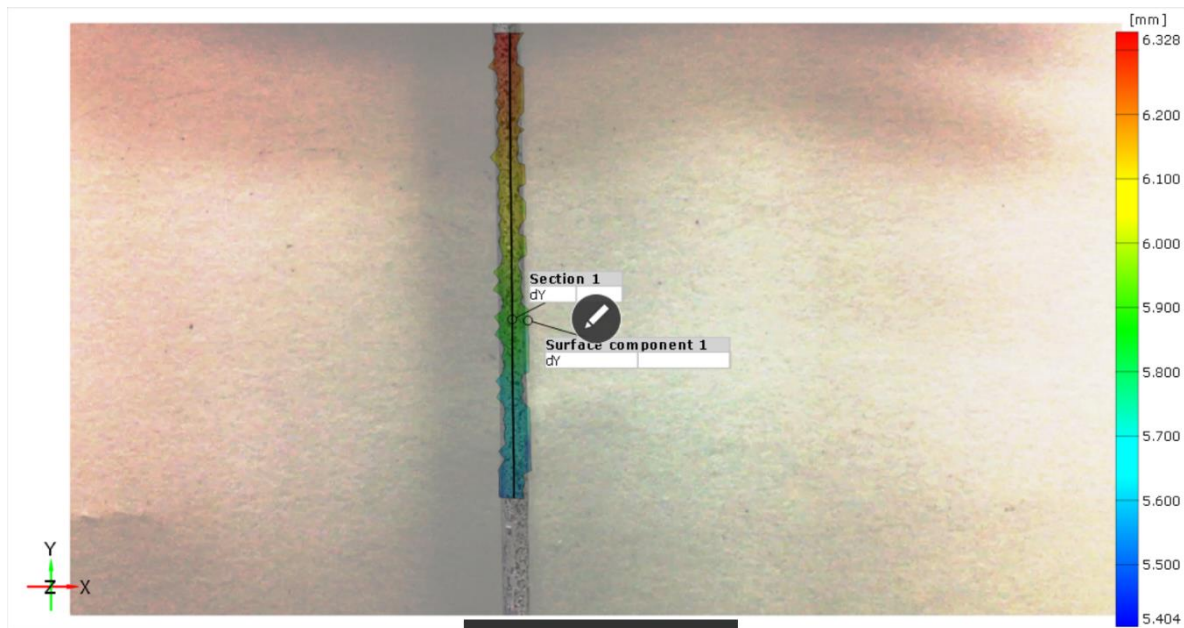


Figura 5. 5 Deformación máxima material fabricado

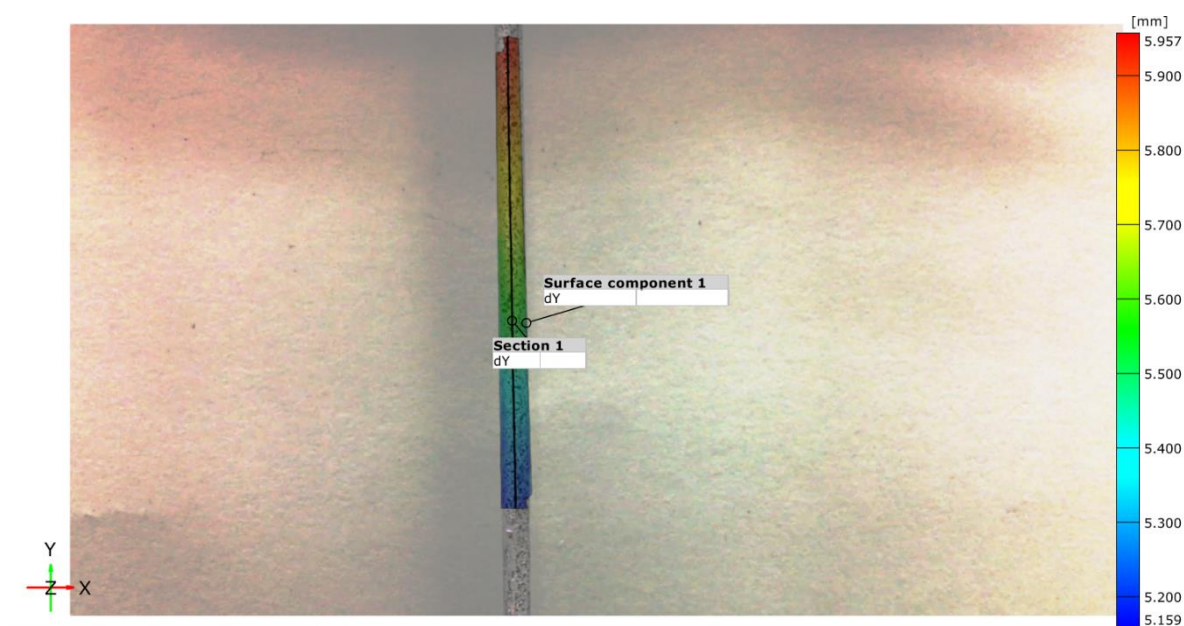


Figura 5. 6 Deformación máxima material comprado

Como se puede observar la deformación de los filamentos es prácticamente la misma, lo que nos dice que el material fabricado es de buena calidad.

5.2.2 Ensayos de compresión

Para hacer otra comparación de los materiales se realizó un ensayo de compresión a probetas cilíndricas impresas con nuestro material fabricado (Figura 5.7) y por el material de la competencia.

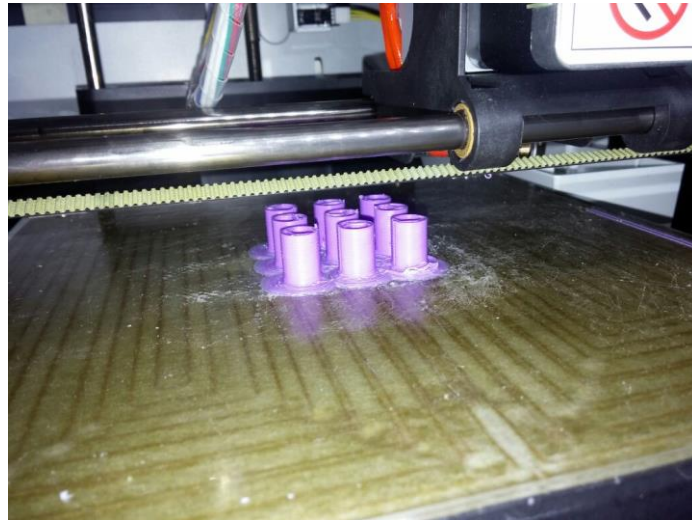


Figura 5. 7 Probetas cilíndricas

Estos ensayos se realizaron bajo las siguientes condiciones:

Tabla 5. 3 Condiciones Iniciales Pruebas Compresión

Condiciones Iniciales	
Fuerza (N)	362.97
Área (mm ²)	14.92
Esfuerzo σ (Mpa)	24.32774799
Long. Inicial (mm)	13

De igual manera se realizó el moteado de los cilindros (Figura 5.8) para analizarlos con GOM Correlate pero esta vez no se detectaron los patrones dentro de la pieza, como resultado, no se obtuvieron las deformaciones mediante el programa.



Figura 5. 8 Cilindros moteados

Como alternativa se decidió tomar la longitud inicial de cada cilindro y a longitud final del mismo una vez aplicada la carga, esto con la finalidad de estimar la deformación del material y su módulo de rigidez [5.3], [5.4].

Los cilindros morados se fabricaron mediante el uso de nuestro filamento.

Tabla 5. 4 Longitudes finales cilindros

	ABS MORADO (Lf mm)	ABS BLANCO (Lf mm)
Prueba 1	12.5	12.5
Prueba 2	12.3	12.75
Prueba 3	12.5	12.5
Prueba 4	12.3	12.5
Prueba 5	12.7	12.7

Tabla 5. 5 Deformación cilindros

	ABS MORADO	ABS BLANCO
Deformación 1 (ϵ)	-0.038461538	-0.038461538
Deformación 2 (ϵ)	-0.053846154	-0.019230769
Deformación 3 (ϵ)	-0.038461538	-0.038461538
Deformación 4 (ϵ)	-0.053846154	-0.038461538
Deformación 5 (ϵ)	-0.023076923	-0.023076923
Promedio (ϵ)	-0.041538462	-0.031538462

Tabla 5. 6 Módulo de rigidez promedio cilindros

Mpa	ABS MORADO	ABS BLANCO
Promedio E	608	810

Analizando los resultados obtenidos podemos notar que no hubo una gran diferencia entre las deformaciones de los materiales, tanto a tensión como compresión, lo cual nos dice que el material (ABS Morado) es de buena calidad.

5.3 Sumario

En este capítulo se analizaron las pruebas bajo ciertas condiciones, primero se realizaron ensayos de tensión de los filamentos con una prensa fabricada y se analizaron las deformaciones con el programa GOM Correlate, de igual manera se muestran los ensayos de compresión a probetas impresas y se compararon los resultados. A continuación se muestra la efectividad del sistema de producción diseñado y fabricado.

5.4 Referencias

- [5.1] <http://www.gom-correlate.com/>
- [5.2] Manuales GOM Correlate, curso GOM Corretale, 2016.
- [5.3] Askeland, D., Ciencia e ingeniería de los materiales, Ed. CENGAGE Learning, 2004.
- [5.4] Gere, J.M., Mecánica de materiales, Ed. CENGAGE Learning, 2009.

CAPÍTULO 6



6. Eficacia y Eficiencia del diseño

Según la RAE:

- **Eficiencia** es la capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un efecto determinado.
- **Eficacia** es la capacidad de lograr un efecto determinado.
- **Efectividad** es sinónimo de eficacia.

Las tres palabras vienen a significar prácticamente lo mismo, sin embargo hay una serie de diferencias fundamentales entre estas tres palabras [6.1].

- **Eficiencia** es hacer bien las cosas, es decir, hacer las cosas buscando la mejor relación posible entre los recursos empleados y los resultados obtenidos. La eficiencia tiene que ver con cómo se hacen las cosas.
- **Eficacia** es hacer las cosas correctas, es decir, hacer las cosas que mejor conducen a la consecución de los resultados. La eficacia tiene que ver con qué cosas se hacen.
- **Efectividad** es hacer bien las cosas correctas, es decir, hacer las cosas de manera eficiente y eficaz. La efectividad tiene que ver con qué cosas se hacen y con cómo se hacen esas cosas.

Para determinar qué tan eficiente y eficaz es nuestra línea de extrusión de materiales termoplásticos se debe realizar una evaluación de la misma. La evaluación de este producto debe estar enfocada en una comparación entre los requerimientos de ingeniería y los resultados obtenidos así como en la evolución de la función del producto.

Dentro del capítulo 3 de este documento escrito se pueden observar los requerimientos del cliente, los cuales mediante la metodología QFD se convirtieron en especificaciones de ingeniería, los aspectos más importantes en los que se trabajaron fueron:

1. Se debe de enfocar en un sistema de enrollado para poder obtener los rollos de filamentos de 1kilogramos

2. Se debe tratar de obtener un prototipo funcional a un bajo costo, esto en comparación a los precios ofrecidos por la competencia.
3. Obtener los filamentos con diferentes diámetros, esto mediante el uso de boquillas diametrales y de un control de velocidad del sistema de arrastre y enrollado del material.

Tabla 3.5. Especificaciones de ingeniería

REQUERIMIENTOS	¿CÓMO?	TÉRMINOS MENSURABLES
• Filamentos con diferentes diámetros: 1.5, 1.75 y 3mm.	Boquillas Diametrales	Diámetro de filamentos (milímetros)
• El filamento debe ser presentado en rollos de 1 kg.	Sistema de Enrollado	Peso de los rollos (kilogramos)
• Sistema compacto	Aprovechamiento del espacio de instalación	Volumen del sistema (centímetros cúbicos)
• Sistema económico	Uso de materiales reciclados	Costo del prototipo (pesos)
• Ensamble y desensamble con facilidad	Generalización del sistema de armado	Número de piezas
• Fácil de operar	Manejo del equipo simple	Número de pasos para producir filamentos
• Seguro para el operario	Componentes peligrosos al contacto	Equipo de protección necesario (# de equipos de seguridad)
• Buena apariencia	Materiales a utilizar	Atractivo visual (Escala)
• Sistema de conexión eléctrica para hogar	Elementos de conexión eléctrica para hogar	110-120 Volts C.A.
• Fácil de transportar	Peso del sistema	Kilogramos

Analizando los componentes fabricados para cumplir con los requerimientos del cliente se puede observar lo siguiente:

- Para la obtención de los filamentos enrollados en carretes de 1 Kg:
 - Se diseñó y fabricó el sistema de enrollado.
 - Se diseñó y fabricó un sistema de arrastre del material proveniente de la máquina extrusora hacia el sistema donde finalmente es enrollado.
 - Se diseñó y fabricó un juego de poleas y bandas el cual es accionado por un motor-reductor y de esta manera dar movimiento a los rodillos de presión del sistema de arrastre y al eje del carrete.

- Para la obtención de los diámetros solicitados por el cliente:
 - Se diseñaron y fabricaron las boquillas diametrales mostradas en la Figura 4.11, las cuales son indispensables para poder obtener los diámetros solicitados por el cliente (1.5, 1.75 y 3mm).
 - El sistema de enrollado cuenta con un motor-reductor en el cual su velocidad es variada por un circuito electrónico controlado por dos potenciómetros, lo cual ayuda a adelgazar o engrosar el material y así obtener diferentes diámetros de filamentos.
 - La línea de extrusión cuenta con un sistema de enfriamiento el cual ayuda a solidificar los filamentos provenientes de la máquina extrusora y así obtener sobre la longitud total del filamento un diámetro de una manera constante.
- Para la obtención de un prototipo funcional de bajo costo:
 - Se utilizaron materiales de pedacería restantes de la fabricación de otras piezas ajenas al proyecto, esto con la finalidad de aprovechar esos materiales, el hecho de ser pedacería restante no significa que el material se encuentre en malas condiciones, los materiales eléctricos, electrónicos y de potencia, así como el husillo del extrusor son materiales totalmente nuevos, simplemente seleccionando los mejores precios del mercado.

El costo de un elemento se ve determinado por los siguientes aspectos (ver Figura 6.1), [6.2].

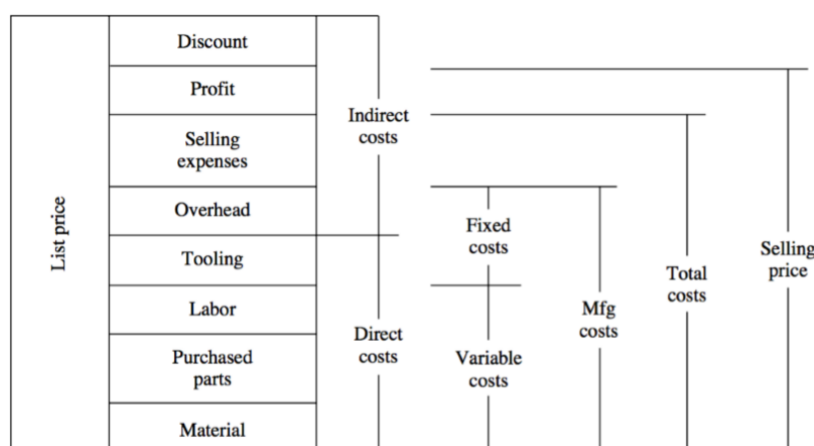


Figura 6. 1 Determinación del costo de un producto

El costo total del prototipo funcional fabricado se puede encontrar dentro de los anexos de este documento, en él se desglosan los precios tanto del material, como de los procesos

de manufactura utilizados para fabricar cada elemento y de otros aspectos directos e indirectos.

El costo final del prototipo es mucho menor (prácticamente la mitad) que el de los sistemas ofrecidos por las empresas analizadas y detalladas dentro del capítulo 3.

Una vez terminado el prototipo funcional se procedió a cuestionar al cliente sobre qué tan bien cumple este con los requerimientos establecidos, utilizando la misma escala de ponderación de la casa de la calidad, los resultados se muestran en la Tabla 3.4.

REQUERIMIENTOS	US	FILABOT	FILAFAB	ASSEMBLED WEE FILAMENT EXTRUDER
• Filamentos con diferentes diámetros: 1.5, 1.75 y 3mm.	☉	□	□	○
• El filamento debe ser presentado en rollos de 1 kg.	☉	△	△	△
• Sistema compacto.	●	☉	☉	☉
• Sistema económico	☉	△	△	□
• Ensamble y desensamble con facilidad.	●	●	●	☉
• Fácil de operar.	☉	☉	☉	☉
• Seguro para el operario.	●	☉	☉	●
• Buena apariencia.	☉	□	□	△
• Sistema de conexión eléctrica para hogar.	☉	☉	☉	☉
• Fácil de transportar.	●	☉	☉	☉
TOTAL	82	64	64	62

Podemos observar que nuestro sistema es más efectivo que los ofrecidos por la competencia es decir que la producción de los filamentos para impresoras 3D mediante el uso de nuestra línea de extrusión cumple de una manera más satisfactoria con los requerimientos del cliente.

Otra característica importante de nuestro sistema de producción de filamentos termoplásticos para impresoras 3D es que, de acuerdo al tipo de elementos que lo conforman, se pueden procesar una amplia variedad de materiales termoplásticos que tengan un punto de fusión de hasta 400 °C.

Los materiales procesados en esta línea de extrusión fueron:

- ABS
- PLA
- HDPE
- PP

6.1 Satisfacción del cliente

La satisfacción del cliente también se puede ver reflejada mediante el diagrama Kano [6.3] en la cual los requerimientos se dividen en 3 categorías:

- Requerimientos básicos
- Requerimientos de rendimiento
- Requerimientos atractivos

6.1.1 Requerimientos básicos

Nuestro sistema cumple con los requerimientos básicos los cuales son, el accionamiento del tornillo extrusor para el transporte de sólidos y la fundición del material dentro del cañón extrusor.

Requerimientos Básicos

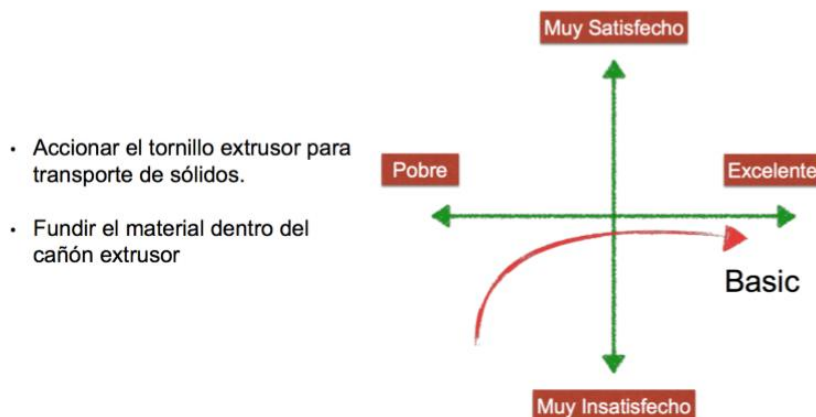


Figura 6. 2 Requerimientos básicos

6.1.2 Requerimientos de rendimiento

Los requerimientos de rendimiento, los cuales son la velocidad de giro del tornillo extrusor de forma constante, control de temperatura adecuado, diámetro de los filamentos constante.

Requerimientos de Rendimiento

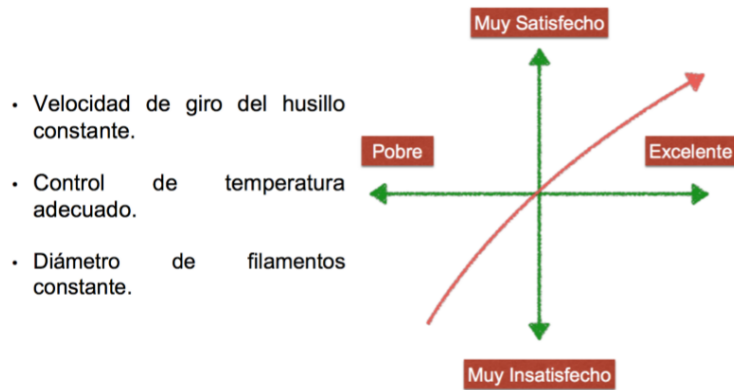


Figura 6. 3 Requerimientos de rendimiento

6.1.3 Requerimientos atractivos

Los requerimientos atractivos que son la variación de velocidad del motor-reductor del sistema de enrollado y la capacidad de procesar materiales termoplásticos con un punto de fusión de hasta 400°C.

Requerimientos atractivos (wow)

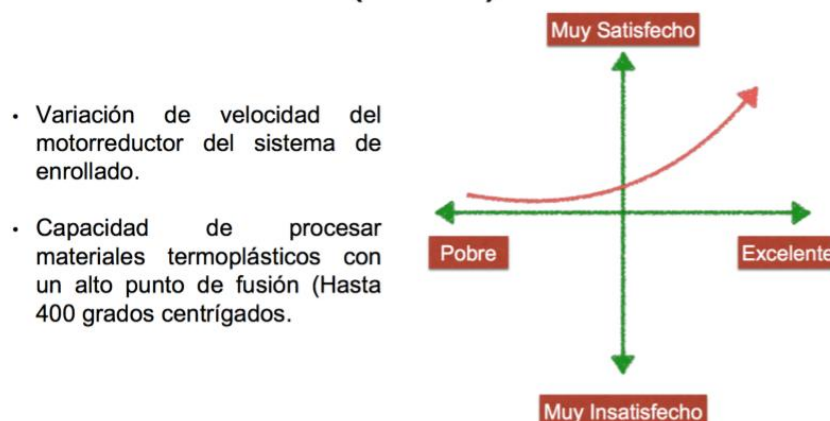


Figura 6. 4 Requerimientos atractivos

6.2 Sumario

En el capítulo se analizó que tan efectivo es nuestro sistema, la efectividad es la medición de la eficiencia y eficacia del sistema de producción los cuales se obtuvieron mediante la comparación de los resultados obtenidos y los requerimientos ingenieriles que se mostraron en el capítulo 3 de este documento escrito.

De igual manera se muestran la medición de los requerimientos básicos, de rendimiento y atractivos mediante el modelo de Kano.

6.3 Referencias

[6.1] <http://www.rae.es/>

[6.2] Ullman, D.G., The mechanical design process, Ed. Mc Graw Hill, pp. 315-325.

[6.3] Sanguesa, M., Mateo, R., Ilzarbe, L., Teoría y práctica de a calidad, Ed, Cenage learning, 2006.

Conclusiones

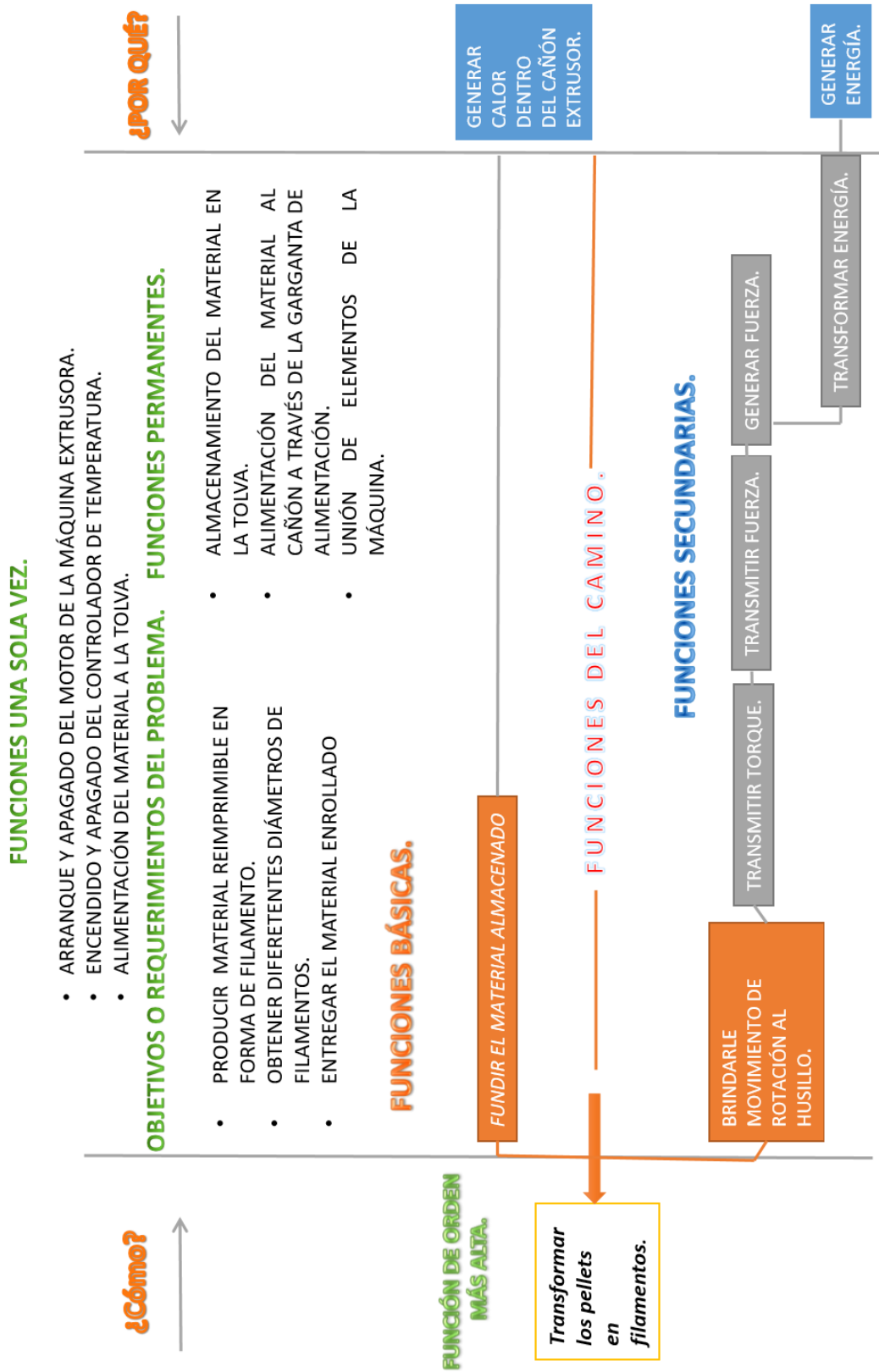
- ❖ El primer aspecto que se debe de conocer antes diseñar y fabricar el sistema de producción es conocer los materiales a procesar.
- ❖ Una vez identificados los materiales, el aspecto más importante a tomar en cuenta de cada uno de ellos es su punto de fusión, debido a que bajo estas condiciones de temperatura tendrán que operar los elementos de los sistemas y, para realizar una instrumentación y control adecuado de los mismos.
- ❖ El procesamiento de materiales termoplásticos es muy complicado, debido a las diferentes propiedades de cada material, por lo que se generalizó un procesamiento de tales materiales con la fabricación de la línea de extrusión.
- ❖ Para el procesamiento de materiales termoplásticos es necesario utilizar una máquina de extrusión.
- ❖ Para la obtención de filamentos termoplásticos útiles para su uso en las impresoras 3D, se requieren los siguientes sistemas:
 - Sistema de extrusión (Máquina extrusora)
 - Sistema de enfriamiento
 - Sistema de arrastre
 - Sistema de enrollado
- ❖ El sistema de enfriamiento es necesario para obtener un diámetro constante en toda la longitud de los filamentos.
- ❖ El sistema de arrastre es necesario para dirigir el filamento del sistema de enfriamiento, hacia donde finalmente será enrollado.
- ❖ Mediante la variación de la velocidad del motorreductor del sistema de enrollado, se pueden obtener diferentes diámetros de los filamentos, una alta velocidad adelgaza el material, mientras que una lenta lo engrosa.
- ❖ El proceso de diseño mecánico es de suma importancia para solucionar un problema, con él podemos identificar cuál es realmente el problema y planear su solución.
- ❖ Mediante el uso del QFD podemos convertir los requerimientos del cliente, en especificaciones de ingeniería, es decir, transformar la voz del cliente a la voz del ingeniero.

- ❖ Es importante conocer a las empresas que ofrecen sistemas de producción de materiales reimprimibles, identificar sus debilidades y trabajar en ellas para ofrecer un producto competente al mercado.
- ❖ El análisis funcional FAST nos ayuda a identificar los elementos que conforman un sistema, las funciones de cada uno y, de esta manera, generar conceptos.
- ❖ Es importante considerar las recomendaciones de diseño mostradas en el marco teórico de este documento escrito para el correcto funcionamiento de los sistemas de la línea de extrusión.
- ❖ Al utilizar pedacería restante de piezas fabricadas con otros fines, reduce el costo final del sistema de producción.
- ❖ La inversión inicial para la realización del proyecto se puede recuperar rápidamente debido al ahorro que se obtiene con la fabricación de los filamentos.
- ❖ La mayoría de los sistemas ofrecidos actualmente en el mercado son de costos muy elevados y no son de muy buena calidad.
- ❖ Se logró cumplir con una de las metas de diseño más importantes, reciclar materiales para la fabricación del prototipo y reciclar materiales (termoplásticos) mediante el uso del prototipo diseñado y fabricado.

ANEXOS



A. 3 Diagrama de Funciones



A4. Manual de operación Sistema de producción de filamentos termoplásticos

1. El sistema de extrusión es controlado por la siguiente caja de controles.



Para conectar la caja de controles se recomienda realizar lo siguiente:



- Realizar la conexión de los conectores (hembra-macho) del motor del sistema de extrusión (M-M)



- Realizar la conexión de los conectores (hembra-macho) de las resistencias eléctricas (T-T)



- Realizar la conexión de los conectores (hembra-macho) del controlador cambio giro motor (G-G)



- Realizar la conexión de los conectores (hembra-macho) de la alimentación de corriente.



Alimentación de corriente 120 V AC 60 Hz.

2. El sistema de enfriamiento, arrastre y enrollado es controlado por la siguiente caja de controles.



- La bomba de agua del sistema de enfriamiento y la fuente de alimentación del motorreductor del sistema de enrollado se conectan de la siguiente manera:



Es importante notar que la fuente de alimentación se enciende con el botón verde (horizontal a la conexión) y la bomba de agua se enciende con el botón azul (horizontal a su conexión).

La alimentación de la caja de controles es de 120 V AC 60 Hz.

La caja cuenta con conectores hembra macho para su conexión de corriente eléctrica.

Una vez realizadas las conexiones correspondientes la luz verde de la caja de controles se encenderá, indicando que la caja se encuentra energizada, por lo cual se recomienda realizar lo siguiente:

1. Colocar el termocople tipo J (sensor de temperatura) en la entrada de la boquilla mayor.
2. Encender el controlador de temperatura.
3. Establecer la temperatura deseada, dependiendo del material a procesar.
4. Esperar aproximadamente entre 10 y 15 minutos a que se estabilice el sistema.
5. Alimentar la tolva de alimentación.
6. Colocar el giro del motor en sobre la letra E (extrusión).
7. Colocar la boquilla diametral deseada.

8. Antes de accionar el motor se recomienda ajustar el sistema de enfriamiento, arrastre y enrollado.
9. Colocar las bandas del juego de poleas como se muestra en la figura:



10. La banda que une la polea del sistema de arrastre con el eje del motorreductor debe estar colocada en forma de un 8 invertido (∞), con la finalidad de hacer girar los rodillos de presión en un sentido de arrastre del material hacia el carrete.



11. Colocar el carrete deseado.
12. Encender el motorreductor del sistema de enrollado.
13. Colocar agua en la tina de enfriamiento.
14. Unir la manguera de la bomba al canal de enfriamiento.
15. Encender la bomba de agua.

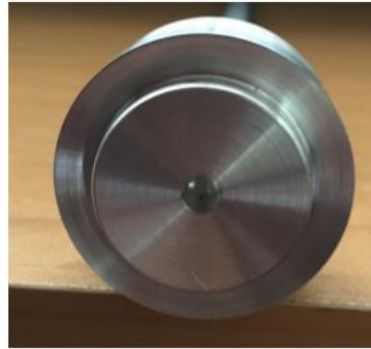
16. Encender el motor del sistema de extrusión.
17. Colocar el filamento extruído sobre el canal de enfriamiento, pasarlo por la tina de enfriamiento, el sistema de arrastre y pegarlo (cinta adhesiva) al carrete instalado. Se debe cuidar el no romper el filamento.
18. Una vez pegado el filamento al carrete se recomienda variar la velocidad del motorreductor, para adelgazar o engrosar el diámetro del filamento hasta obtener la medida deseada.

Limpieza de la línea de extrusión.

Se recomienda realizar limpieza de la máquina extrusora siempre y cuando se quiera cambiar el material a procesar, o que presente problemas de extrusión del material, de lo contrario se recomienda simplemente fundir el material y alimentar la tolva con el mismo material que se haya procesado anteriormente.

De lo contrario se recomienda realizar lo siguiente:

1. Asegurarse de que todos los componentes se encuentren desconectados.
2. Retirar las bandas del juego de poleas.
3. Retirar el agua de la tina de enfriamiento y secarla para evitar que se oxide.
4. Retirar el carrete de filamentos.
5. Retirar la boquilla diametral.
6. Retirar la base frontal del cañón.
7. Retirar la boquilla mayor.
8. Retirar las resistencias eléctricas del cañón.
9. Retirar el cañón de la base trasera.
10. Retirar base de la tolva.
11. Retirar la tolva.
12. Introducir el dispositivo de limpieza a través del cañón para retirar el material pegado en él.



13. Para la limpieza del husillo se recomienda utilizar una escuadra plana de metal, para retirar el material adherido entre los filetes.

Problemas de extrusión (¿Qué hacer en caso de?)

- La máquina de extrusión no enciende:
 - Revisar que las conexiones se hayan realizado de la forma mostrada en el manual de operación.
 - Revisar que la conexión sea de 120 V AC 60 Hz.
 - Revisar que ningún elemento se encuentre desconectado.
- El material no sale a través de la boquilla diametral:
 - Revisar que la boquilla diametral no contenga material seco que impide la salida del material.
 - Utilizar la temperatura adecuada de fusión del material.
 - Cerciorarse del correcto funcionamiento de las residencias eléctricas.
 - Colocar de manera adecuada el sensor de temperatura sobre la boquilla mayor.

- Revisar que el controlador de cambio de giro del motor se encuentre sobre la letra E (extrusión).
- Revisar que todos los componentes se encuentren conectados adecuadamente como se muestra en el manual de operación.
- Revisar que el material dentro de la tolva se encuentre en buenas condiciones.

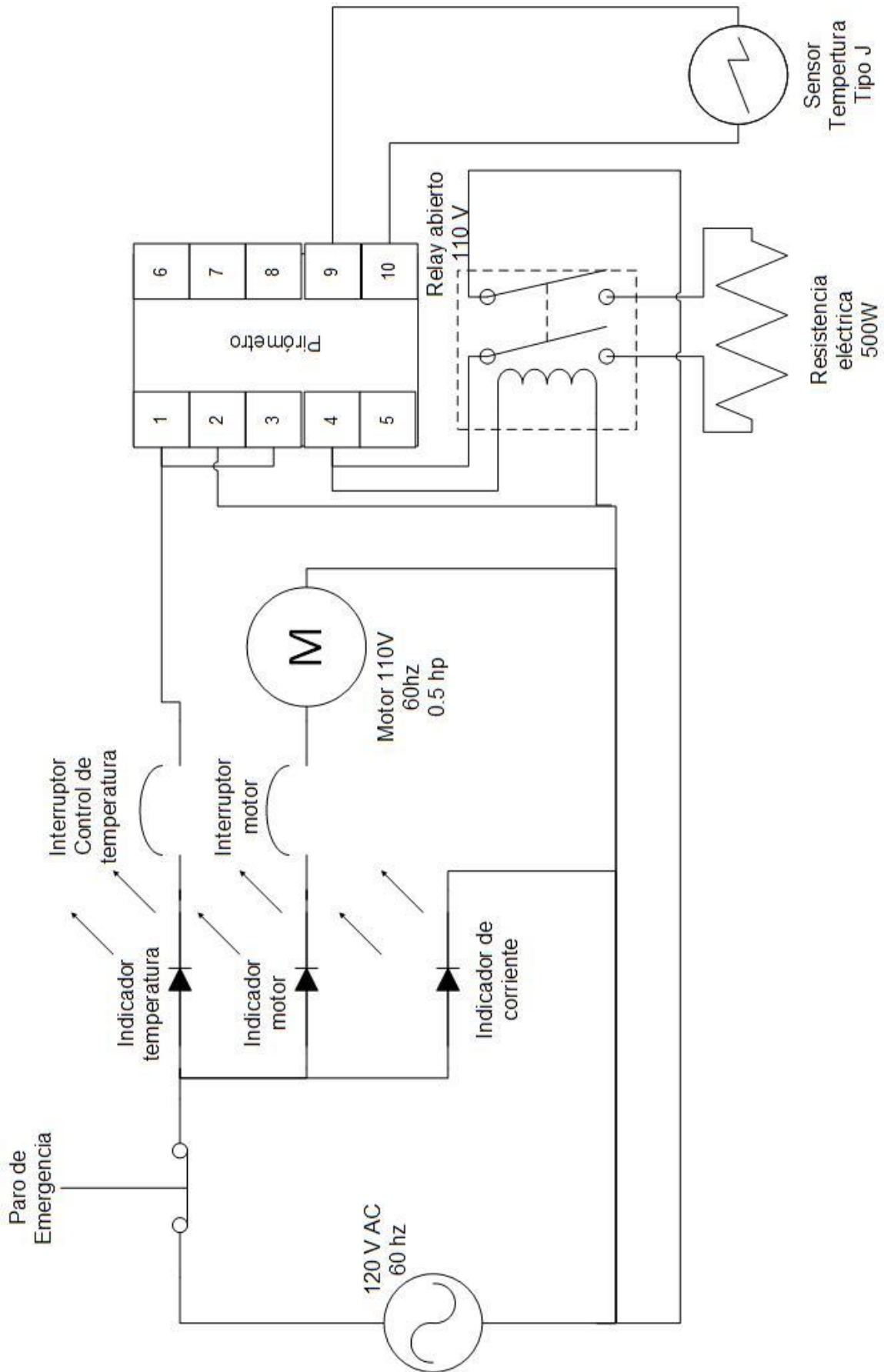
- El motorreductor del sistema de enrollado no enciende:
 - Revisar que las conexiones se hayan realizado de la forma mostrada en el manual de operación. (Paralelo al botón verde).
 - Revisar que la conexión sea de 120 V AC 60 Hz.
 - Revisar que ningún elemento se encuentre desconectado.

- La bomba de agua no circula el agua:
 - Revisar que las conexiones se hayan realizado de la forma mostrada en el manual de operación. (Paralelo al botón azul).
 - Revisar que la conexión sea de 120 V AC 60 Hz.
 - Revisar que ningún elemento se encuentre desconectado.
 - Revisar que la manguera se encuentre bien conectada y no presente ningún daño.
 - Revisar que la tina se encuentre completamente llena de agua.
 - Revisar que la bomba se encuentre sumergida sobre el nivel del agua.

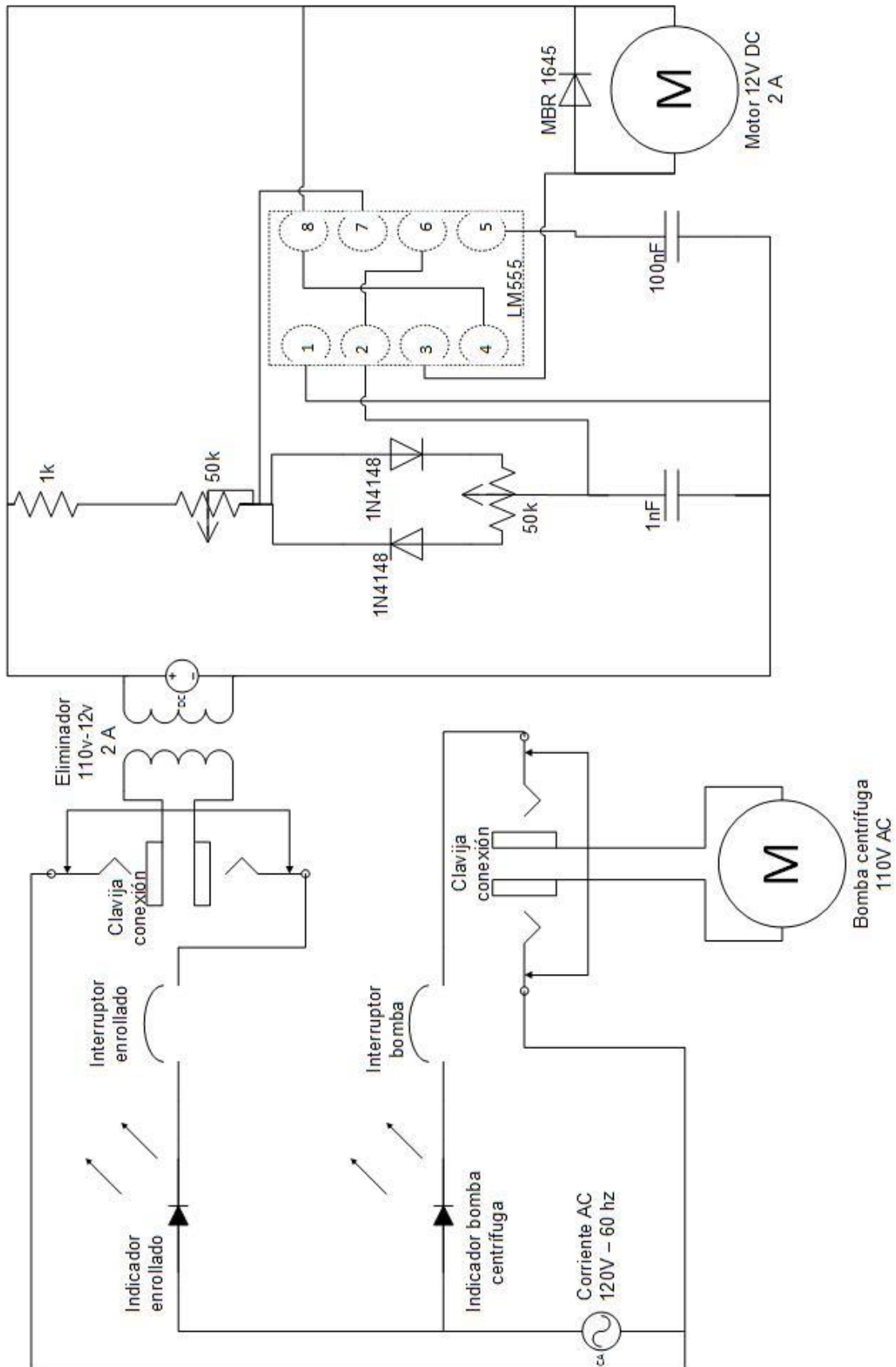
- El sistema de arrastre y enrollado no giran adecuadamente:
 - Revisar que el motorreductor se encuentre bien conectado
 - Revisar que las bandas de las poleas se encuentren instaladas como se muestra en el manual de operación.
 - Revisar que las bandas se encuentren en buenas condiciones y estén tensas.

En caso de revisar estas indicaciones y los problemas continúan, para más información, favor de comunicarse al teléfono (55) 52-03-46-82 o al correo r.regis91@gmail.com con el Ing. Ricardo Regis Aguilar.

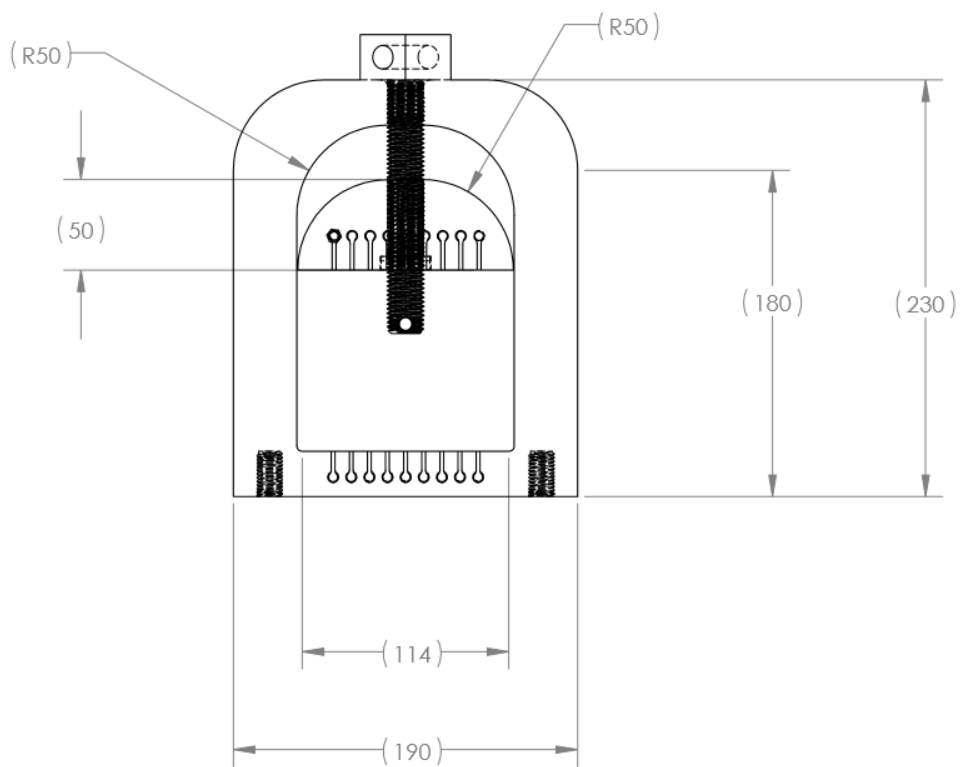
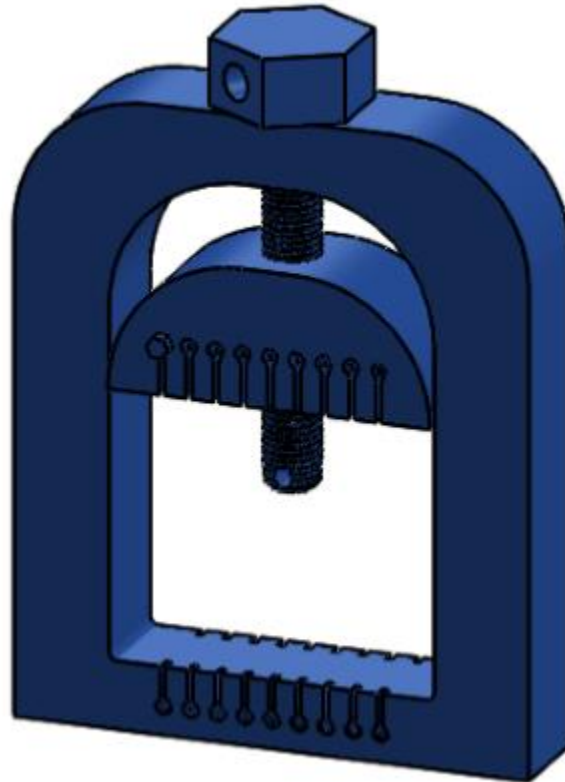
A5. Diagramas conexiones Sistema de extrusión



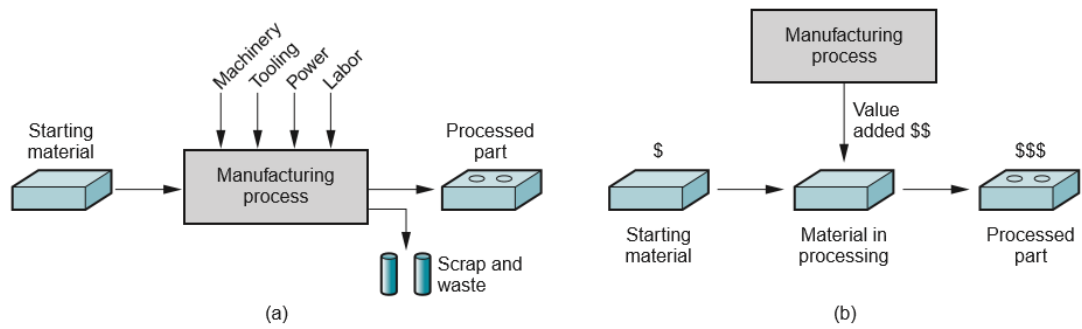
A6. Diagramas conexión sistemas enfriamiento, arrastre y enrollado



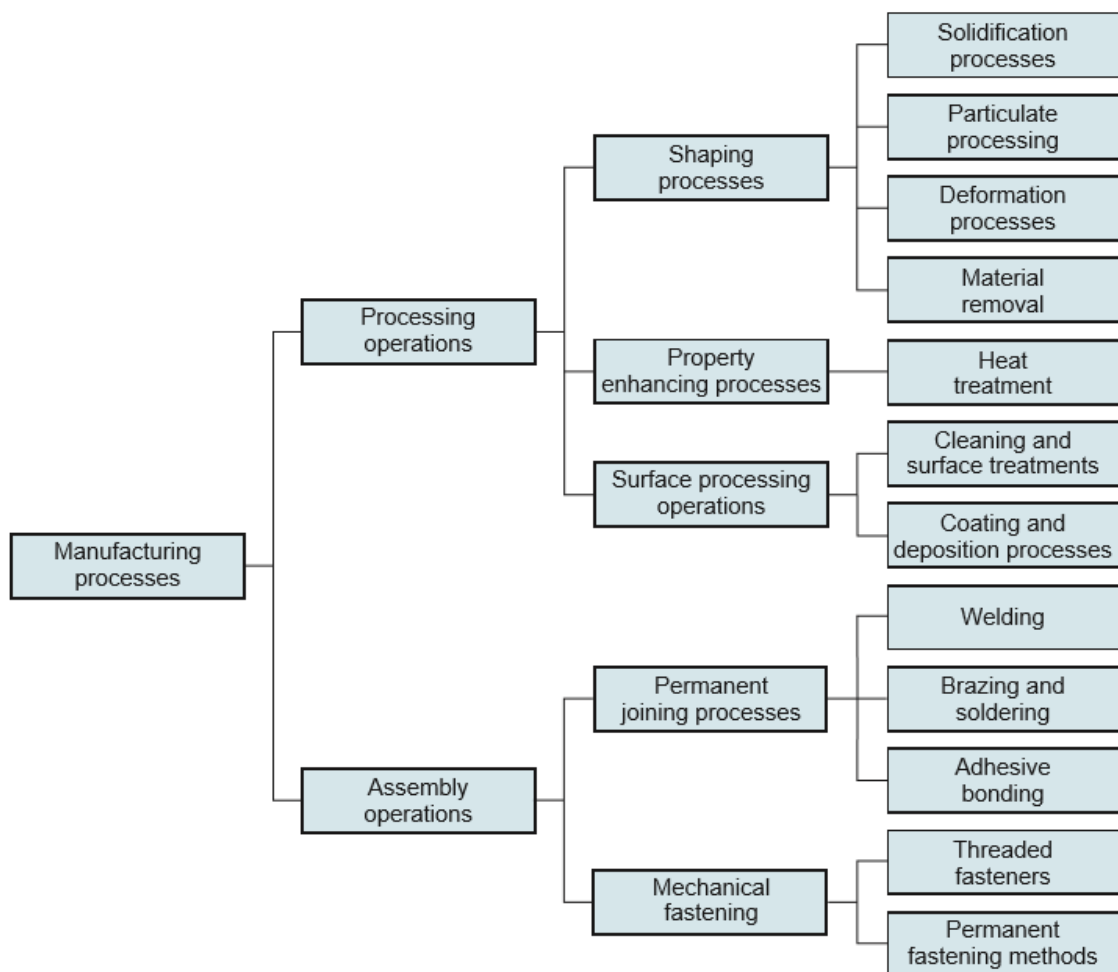
A7. Prensa para filamentos



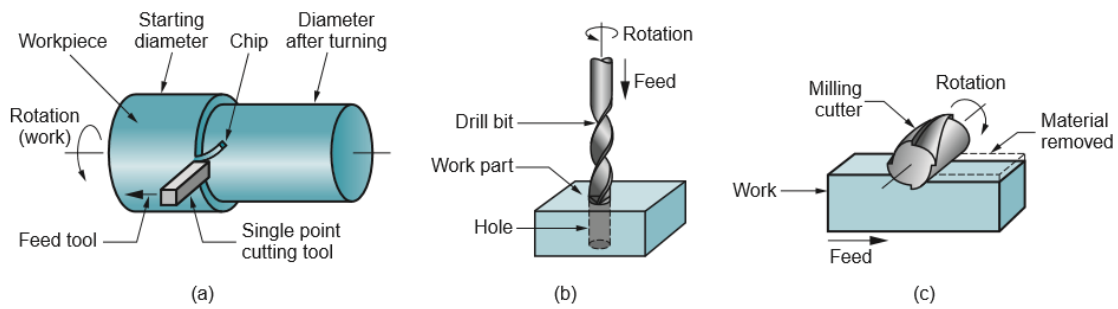
A8. Procesos de Manufactura



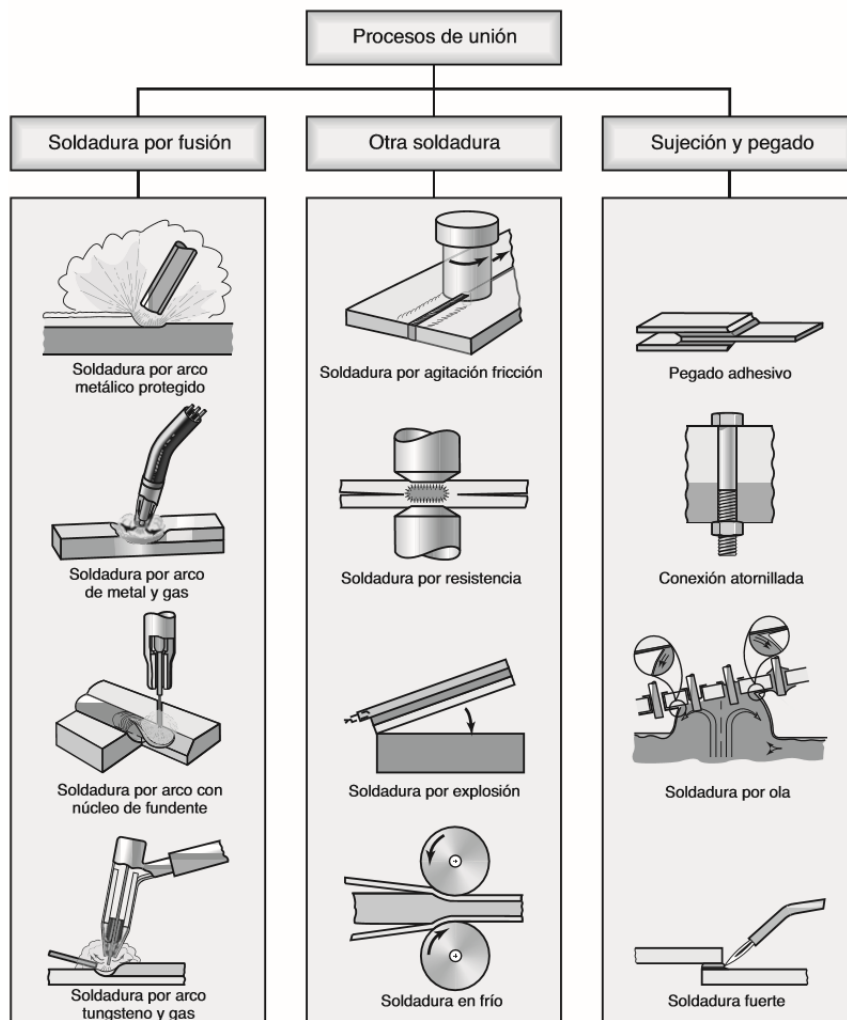
A8.1 Maneras de definir manufactura: a) proceso técnico, b) proceso económico



A8.2 Clasificación de los procesos de manufactura

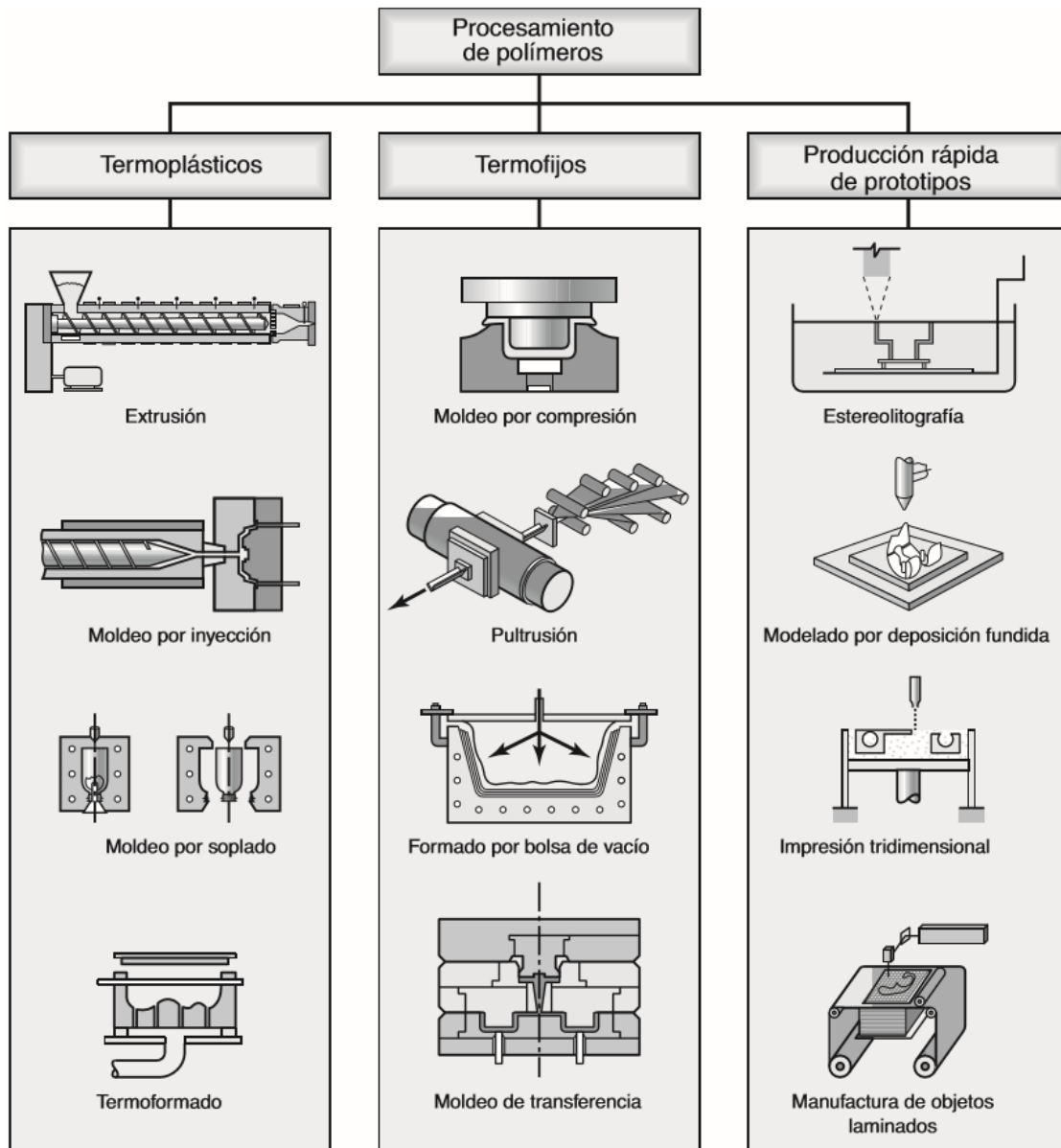


A8.3 Operaciones de maquinado comunes: **a) torneado**, en el que una herramienta de corte de un solo punto retira el metal de una pieza de trabajo giratoria para reducir su diámetro, **b) taladrado**, en el que se introduce una broca giratoria en la pieza de trabajo para crear un agujero redondo, **c) fresado**, en el que una parte de trabajo es alimentada por un cortador giratorio con múltiples bordes.



A8.4 Procesos de unión

A.9 Procesamiento de polímeros



A.10 Manual de operación controlador de temperatura

1. Presionar set 3 segundos.
2. Alarma 1 (ALM1) Alarma límite superior (9999) °C.
3. Alarma 2 (ALM2) Alarma límite inferior (-1999) °C.
4. HY-1 Alarma de desviación positiva 0~ (9999).
5. HY-2 Alarma de desviación negativa 0~ (9999).
6. HY Banda cero 0~200.
7. AT Modo control.
8. Fijar parámetro (I) Tiempo integral (0~9999) °C.
9. Parámetro de rango (P) proportional band 0~9999.
10. Tiempo de retardo (d) tiempo derivado 0~2000- segundos.
11. Periodo de control (t) 0-120 segundos.
12. Especificación de entrada (Sn).
13. Posición punto decimal (dP).
14. P-SL
15. P-SH
16. (Pb) cambio de entrada
17. Modo de salida OP-A.

A.11 Maquinaria utilizada para la fabricación de las piezas

Torno



Fresadora



Taladro



A.12 ANÁLISIS COSTOS LÍNEA DE EXTRUSIÓN

COSTO FINAL DEL PROYECTO

Descripción	Costo por:			
	Materiales	Maquinado	Componentes	Total
Sistema de Extrusión	\$1,555.00	\$4,662.17	\$7,244.82	\$13,461.99
Sistema de Enfriamiento	\$820.00	\$1,710.00	\$404.50	\$2,934.50
Sistema de Arrastre	\$835.00	\$1,393.97	\$45.00	\$2,273.97
Sistema de Enrollado	\$1,105.00	\$2,869.64	\$150.00	\$4,124.64
Piezas Siniestradas	\$0.00	\$0.00	\$1,258.00	\$1,258.00
Elementos extra	\$1,567.00			\$1,567.00

Total Máquina Extrusora \$25,620.09

COSTOS MAQUINADOS

Costo/Hora de Maquinados	
Máquina-Herramienta	\$/Hora
Torno	\$300.00
Fresadora	\$380.00
Taladro	\$150.00
	\$/Pul-diam
Soldadura	\$12.00

SISTEMA DE EXTRUSIÓN

Piezas Maquinadas	No. De Piezas	Material	\$/Material	Maquinado	Tiempo de Maquinado (Hr)	\$/Maquinado			
Acople (Motor-Husillo)	1	Acero Cromado 1045	\$117.00	Torno	0.50	\$150.00			
				Taladro	0.25	\$37.50			
				Subtotal Material		\$117.00	Subtotal Maquinado		\$187.50
						Total	\$304.50		
Base soporte cañón trasera	1	Aluminio serie 6000	\$150.00	Fresadora	1.00	\$380.00			
				Torno	0.50	\$150.00			
				Subtotal Material		\$150.00	Subtotal Maquinado		\$530.00
						Total	\$680.00		
Cañón (Tubo Honeado Diam Mayor 2", Diam Menor 1.5", Largo 16")	1	Acero 1026	\$358.00	Torno	1.00	\$300.00			
				Fresadora	1.00	\$380.00			
				Subtotal Material		\$358.00	Subtotal Maquinado		\$680.00
						Total	\$1,038.00		
Base soporte cañón delantera	1	Aluminio serie 6000	\$80.00	Torno	0.50	\$150.00			
				Fresadora	0.50	\$190.00			
				Subtotal Material		\$80.00	Subtotal Maquinado		\$340.00
						Total	\$420.00		
Boquilla Mayor	1	Acero 1045	\$280.00	Torno	2.00	\$600.00			
				Fresadora	0.50	\$190.00			
				Subtotal Material		\$280.00	Subtotal Maquinado		\$790.00
						Total	\$1,070.00		
Boquillas Diametrales	3	Acero 1045	\$45.00	Torno	1.00	\$300.00			
				Subtotal Material		\$135.00	Subtotal Maquinado		\$900.00
Riel soporte de máquina extrusora	2	Acero A32 - Canal C 4"x2"	\$115.00	Taladro	0.50	\$75.00			
				Fresadora	0.17	\$63.33			
				Soldadura	4.00	\$48.00			
				Barrenos		\$20.00			
				Subtotal Material		\$230.00	Subtotal Maquinado		\$344.67
						Total	\$574.67		
Base para tolva	1	Aluminio grado automotriz	\$120.00	Fresadora	1.50	\$570.00			
				Subtotal Material		\$120.00	Subtotal Maquinado		\$570.00
Tolva	1	Lámina negra Cal. 16	\$85.00	Roladora		\$170.00			
				Dobladora		\$150.00			
				Subtotal Material		\$85.00	Subtotal Maquinado		\$320.00
						Total	\$405.00		
Piezas Maquinadas		Subtotal Material	\$1,555.00	Subtotal Maquinado		\$4,662.17			
						Total	\$6,217.17		

Piezas de Control y Potencia	Unidad	Cantidad	P.U.	Costo
Motor monofásico de 0.5 HP de 1740 rpm a 110 V y 60 Hz	Pza	1	\$1,400.00	\$1,400.00
Reductor relación 29:1	Pza	1	\$600.00	\$600.00
Husillo (Broca de berbiquí Makita)	Pza	1	\$1,000.00	\$1,000.00
Tablero de control	Pza	1	\$200.00	\$200.00
Tornillos	Pza	30	\$1.50	\$45.00
Opresores	Pza	25	\$1.00	\$25.00
Botonera (Caja control Lay5Box4)	Pza	1	\$128.81	\$128.81
Foco (Lámpara piloto 22mm con LED)	Pza	3	\$31.00	\$93.00
Botón hongo retén (Paro de emergencia)	Pza	1	\$76.59	\$76.59
Pirómetro (Controlador de temperatura digital)	Pza	1	\$846.50	\$846.50
Switch cola de ratón	Pza	1	\$30.50	\$30.50
Push botton SP-315 15 Amp	Pza	2	\$103.50	\$207.00
Relé (Transformador 50/60 Hz Modelo SQX-62-2H)	Pza	1	\$267.00	\$267.00
Cable FVNíquel puro mica 500° C	m	5	\$73.00	\$365.00
Macho aislado pidg-250-22-16	Pza	15	\$1.16	\$17.40
Zapata espada aislada 22-18	Pza	15	\$1.22	\$18.27
Hembra aislada Kst-22-18	Pza	15	\$1.45	\$21.75
Zapata acero inoxidable 900	Pza	15	\$3.65	\$54.81
Clavija de uso rudo	Pza	1	\$18.00	\$18.00
Cable calibre 16	m	2	\$5.00	\$10.00
Termofeat 5 mm	m	3	\$4.14	\$12.42
Clavija tomacorriente	Pza	3	\$18.00	\$54.00

Tomacorriente macho	Pza	3	\$30.00	\$90.00
Resistencia tipo banda 127 V 500 W 4" diam. 2"	Pza	2	\$600.00	\$1,200.00
Resistencia tipo banda 127 V 500 W 2.5" diam. 2.5"	Pza	1	\$413.77	\$413.77
Termocople tipo J	Pza	1	\$50.00	\$50.00

Piezas de Control y Potencia	Total \$7,244.82
-------------------------------------	-------------------------

SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Piezas Maquinadas	No. De Piezas	Material	\$/Material	Maquinado	Tiempo de Maquinado (Hr)	\$/Maquinado
Tina de agua	1	Aluminio serie 6000 4"x2.5"x6"	\$620.00	Fresadora	3.50	\$1,330.00
Canal de enfriamiento	1		\$200.00	Fresadora	1.00	\$380.00
		Subtotal Material	\$820.00		Subtotal Maquinado	\$1,710.00
					Total	\$2,530.00
Piezas Maquinadas		Subtotal Material	\$820.00		Subtotal Maquinado	\$1,710.00
					Total	\$2,530.00

Piezas para el Enfriamiento	Unidad	Cantidad	P.U.	Costo
Bomba de agua sumergible	Pza	1	\$60.00	\$60.00
Manguera para bomba sumergible de 1/4"	Pza	1	\$39.00	\$39.00
Caja de plástico mediana	Pza	1	\$42.00	\$42.00
Botón redondo On/Off	Pza	2	\$11.00	\$22.00
Circuito variador de velocidad	Pza	1	\$150.00	\$150.00
Alambre estaño	Pza	2	\$5.00	\$10.00
Clavija tomacorriente	Pza	2	\$18.00	\$36.00
Tomacorriente macho	Pza	1	\$30.00	\$30.00
Tomacorriente para chasis	Pza	1	\$15.50	\$15.50
Piezas para el Enfriamiento			Total	\$404.50

SISTEMA DE ARRASTRE

Piezas Maquinadas	No. De Piezas	Material	\$/Material	Maquinado	Tiempo de Maquinado (Hr)	\$/Maquinado	
SopORTE de rodillos 4"x2"x5"	1	Aluminio serie 5000	\$360.00	Fresadora	1.50	\$570.00	
Subtotal Material			\$360.00	Subtotal Maquinado		\$570.00	
						Total	\$930.00
Rodillos vulcanizados con poliuretano	2	Acero 1045	\$45.00	Torno	1.50	\$450.00	
		Poliuretano	\$100.00				
Subtotal Material			\$290.00	Subtotal Maquinado		\$450.00	
						Total	\$740.00
Eje	1	Acero 1045	\$80.00	Torno	0.33	\$99.99	
Polea estandar	1	Aluminio	\$60.00	Torno	0.67	\$199.98	
Subtotal Material			\$140.00	Subtotal Maquinado		\$299.97	
						Total	\$439.97
Tensor	1	Placa A36 1"x1"x2.5"	\$45.00	Taladro Soldadura	0.33 2.00	\$50.00 \$24.00	
Subtotal Material			\$45.00	Subtotal Maquinado		\$74.00	
						Total	\$119.00
Piezas Maquinadas		Subtotal Material		Subtotal Maquinado		\$1,393.97	
						Total	\$2,228.97

Piezas de Arrastre	Unidad	Cantidad	P.U.	Costo
O'ring sección B de 1/8"	Pza	3	\$15.00	\$45.00
Piezas de Arrastre			Total	\$45.00

SISTEMA DE ENROLLADO

Piezas Maquinadas	No. De Piezas	Material	\$/Material	Maquinado	Tiempo de Maquinado (Hr)	\$/Maquinado
Base de carretes	2	Placa A36 3/4"x3"x5"	\$135.00	Torno	0.50	\$150.00
Baleros	2		\$90.00	Fresadora	1.00	\$380.00
		Subtotal Material	\$450.00		Subtotal Maquinado	\$1,060.00
					Total	\$1,510.00
Eje de carrete	1	Acero 1018	\$85.00	Torno	0.50	\$150.00
		Subtotal Material	\$85.00		Subtotal Maquinado	\$150.00
					Total	\$235.00
Polea estandar	1	Aluminio	\$60.00	Torno	0.67	\$199.98
		Subtotal Material	\$60.00		Subtotal Maquinado	\$199.98
					Total	\$259.98
Acople (Eje-polea-carrete)	1	Acero 1045	\$80.00	Torno	0.50	\$150.00
				Taladro	0.50	\$75.00
		Subtotal Material	\$80.00		Subtotal Maquinado	\$225.00
					Total	\$305.00
Acople (Motorreductor-acople carrete)	1	Aluminio	\$15.00	Torno	0.33	\$99.99
		Subtotal Material	\$15.00		Subtotal Maquinado	\$99.99
					Total	\$114.99
Base de motorreductor	1	Solera	\$35.00	Fresadora	0.50	\$190.00
				Soldadura	3.00	\$36.00
		Subtotal Material	\$35.00		Subtotal Maquinado	\$226.00
					Total	\$261.00
Riel del sistema	2	Acero A32 - Canal C	\$115.00	Fresadora	0.17	\$63.33
		Subtotal Material	\$230.00		Subtotal Maquinado	\$126.67
					Total	\$356.67
Placa soporte de polea	1	Aluminio	\$50.00	Fresadora	1.00	\$380.00
		Subtotal Material	\$50.00		Subtotal Maquinado	\$380.00
					Total	\$430.00
Perno de polea	1	Acero 1045 cromado	\$70.00	Torno	1.00	\$300.00
		Subtotal Material	\$70.00		Subtotal Maquinado	\$300.00
					Total	\$370.00
Oreja de riel	6	Aluminio	\$5.00	Barreno	1.00	\$5.00
				Soldadura		\$12.00
		Subtotal Material	\$30.00		Subtotal Maquinado	\$102.00
					Total	\$132.00
Tren de Poleas	4	Aluminio	\$200.00	Taladro	1.00	\$150.00
				Torno	2.00	\$600.00
		Subtotal Material	\$800.00		Subtotal Maquinado	\$3,000.00
					Total	\$3,800.00
Piezas Maquinadas		Subtotal Material	\$1,105.00		Subtotal Maquinado	\$2,869.64
					Total	\$3,974.64

Piezas de Enrollado	Unidad	Cantidad	P.U.	Costo
Motorreductor	Pza	1	\$150.00	\$150.00
Piezas de Enrollado			Total	\$150.00

PIEZAS SINIESTRADAS

Piezas Siniestradas	Unidad	Cantidad	P.U.	Costo
Tolva de lámina calibre 19	Pza	1	\$350.00	\$350.00
Cañón	Pza	1	\$358.00	\$358.00
Resistencia	Pza	1	\$250.00	\$250.00
Motorreductor	Pza	2	\$150.00	\$300.00
Piezas para el Enfriamiento			Total	\$1,258.00

ELEMENTOS EXTRA

Elementos Extra	Unidad	Cantidad	P.U.	Costo
Prensa de pruebas madera	Pza	1	\$300.00	\$300.00
Areosoles	Pza	2	\$49.00	\$98.00
Tripié para cámara	Pza	1	\$200.00	\$200.00
Carretes	Pza	3	\$10.00	\$30.00
Limpiador Cañón	Pza	1	\$250.00	\$250.00
Protoboard	Pza	1	\$89.00	\$89.00
Mesa de trabajo	Pza	1	\$600	\$600.00
Elementos Extra				\$1,567.00