



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TEMA:

MÁQUINA EXTRUSORA PARA RECICLAJE DE PLÁSTICO

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

AUTOR: Flores Salazar Leonel Ismael

DIRECTOR: Ing. Octavio Arias

Ibarra, Julio del 2013

CERTIFICACIÓN

Certifico que la Tesis MÁQUINA EXTRUSORA PARA RECICLAJE DE PLÁSTICO ha sido realizada en su totalidad por el señor: Flores Salazar Leonel Ismael portador de la cédula de identidad número: 100320344-3.

Ing. Octavio Arias

CERTIFICACIÓN

Otavalo, 8 de julio del 2013.

Señores
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Presente

De mis consideraciones.

Siendo auspiciantes del proyecto de tesis del Egresado Flores Salazar Leonel Ismael con CI: 100320344-3 quien desarrolló su trabajo con el tema “MÁQUINA EXTRUSORA PARA EL RECICLAJE DE PLÁSTICO”, me es grato informar que se han superado con satisfacción las pruebas técnicas y la revisión de cumplimiento de los requerimientos funcionales, por lo que se recibe el proyecto como culminado. Una vez que hemos recibido la capacitación y documentación respectiva, nos comprometemos a continuar utilizando el mencionado aplicativo en beneficio de nuestra empresa.

El egresado Flores Salazar Leonel Ismael puede hacer uso de este documento para los fines pertinentes en la Universidad Técnica del Norte.

Atentamente,

Lcda. Nancy Salazar
Jefa departamento de desechos sólidos



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, Flores Salazar Leonel Ismael, con cedula de identidad Nro. 100320344-3, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4,5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado: “MÁQUINA EXTRUSORA PARA RECICLAJE DE PLÁSTICO” que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniería en Mecatrónica en la Universidad Técnica Del Norte, quedando la Universidad Facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

.....

Firma

Nombre: Flores Salazar Leonel Ismael

Cédula: 100320344-3

Ibarra, a los 08 días del mes de julio de 2013



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACION A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE.

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determino la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1003101852		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Flores Salazar Leonel Ismael		
DIRECCIÓN:	Otavalo, Quichinche Av. Quito y Jacinto Collaguazo		
EMAIL:	leoemelec@hotmail.com		
TELÉFONO FIJO:	(06)2 925329	TELÉFONO MÓVIL:	0980105953
DATOS DE LA OBRA			
TÍTULO:	MÁQUINA EXTRUSORA PARA RECICLAJE DE PLÁSTICO		
AUTOR:	Flores Salazar Leonel Ismael		
FECHA: AAAAMMDD	2013-07-08		
PROGRAMA:	PREGRADO		
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniería en Mecatrónica		
DIRECTOR:	Ing. Octavio Arias		

2. AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD.

Yo, Flores Salazar Leonel Ismael, con cédula de identidad Nro. 100320344-3, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de grado descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

CONSTANCIA

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá a defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 28 días del mes de mayo de 2013

.....

Firma

Flores Salazar Leonel Ismael

100320344-3

Ibarra, a los 08 días del mes de julio de 2013

DEDICATORIA

*Con amor, dedico este trabajo de grado a mi abuelo Luis A. Flores.
Paz en su tumba*

Leonel F.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento especialmente a Consuelo Salazar, Gustavo Capelo (†), Christopher Capelo y Doménica Capelo

A mi Madre Pilar y a mi Padre Alfredo que son la razón de mi vida.

Al Ing. Octavio Arias quien es un apoyo constante y estimulación para los estudiantes.

Un especial reconocimiento al Dr. Rogerio Moncayo, por su ayuda para poder culminar la carrera.

Al Sr. Mario Conejo Maldonado Alcalde de Otavalo, quien creyó que los jóvenes podemos.

A la Lcda. Nancy Salazar y a la Jefatura de desechos sólidos del Cantón Otavalo, quien fue mi guía en todo el transcurso del desarrollo del proyecto.

A Alexis mi fiel y buen amigo.

Leonel F.

ÍNDICE GENERAL

CERTIFICACIÓN	i
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE GRADO	iii
AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACION	iv
CONSTANCIA.....	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
FIGURAS	xv
GRÁFICOS.....	xvi
TABLAS.....	xvii
ECUACIONES	xviii
GLOSARIO.....	xix
INDICE DE SIGLAS.....	xx
RESUMEN.....	xxi
SUMMARY	xxii
PRESENTACIÓN	xxiii
CAPÍTULO I.....	1
ANTECEDENTES	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. POLÍMERO Y PLÁSTICO	1
1.2.1. Tipos de plásticos.....	2
1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:	3
1.4. PROCESO DE RECICLAJE.....	4
1.4.1. Reciclado mecánico.....	4
1.4.2. Reciclado de termoplásticos	6

1.4.3. Polietileno (PE).....	6
1.4.4. Reconocimiento e identificación.....	9
1.5. TECNOLOGÍA	10
1.5.1. Modos de ser trabajados los materiales sintéticos	10
1.5.2. Extrusión de plásticos.....	10
1.5.3. Tipos de extrusoras	11
1.6. SEGURIDAD Y AMBIENTE	14
CAPÍTULO II.....	16
SELECCIÓN DEL EQUIPO MECÁNICO	16
2.1. INTODUCCIÓN	16
2.2. SELECCIÓN DEL EXTRUSOR	16
2.2. DESCRIPCIÓN DEL EXTRUSOR	16
2.3.1. Relación Longitud Diámetro (L/D).....	21
2.4. COMPONENTES DE LA EXTRUSORA	21
2.4.1. Tolva.....	21
2.4.2. Cilindro.....	21
2.4.3. Garganta de Alimentación	22
2.4.4. Husillo:	23
2.4.5. Álabes, filetes o hilos	24
2.4.6. Holgura	24
2.5. CAUDAL EXTRUIDO	25
2.6. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA	26
2.6.1. Zona de alimentación:	26
2.6.2. Zona de transición	27
2.6.3. Zona de descarga o dosificación	29
2.7. DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE EXTRUSIÓN SELECCIONADA	29

2.8. PARÁMETROS TECNOLÓGICOS	31
2.8.1. Cálculo de la producción	31
2.8.2. Cálculo de las revoluciones del husillo	33
2.8.3. Cálculo de la potencia	34
2.9. IMPULSORES DE BANDA	36
2.10. SISTEMA DE TRANSMISIÓN	37
2.11. CONSTRUCCIÓN	38
CAPÍTULO III	40
SISTEMA DE CONTROL.....	40
3.1. INTRODUCCIÓN:.....	40
3.2. SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL CILINDRO:.....	40
3.3. PARÁMETROS DE CONTROL DEL PROCESO	41
3.3.1. Temperatura de Extrusión:	41
3.3.2. Velocidad de Extrusión:	42
3.4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL.....	42
3.4.1. Control On-Off	42
3.5. DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE FUERZA.....	44
3.5.1. Fuente principal de alimentación.....	44
3.5.2. Diagrama de fuerza para el arranque del motor:	44
3.5.3. Dimensionamiento del conductor del motor	45
3.5.4. Dimensionamiento de contactores.....	46
3.5.5. Dimensionamiento del relé térmico de protección	47
3.5.6. Selección del conductor para niquelinas	48
3.5.7. Selección del contactor para niquelinas.	49
3.5.8. Dimensionamiento del disyuntor general	49
3.6. DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE CONTROL MOTOR	50

3.6.1.	Pulsadores	50
3.6.2.	Señalización de los pulsadores	50
3.7.	DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE CONTROL NIQUELINAS	51
3.7.1.	Interruptores:	51
3.7.2.	Resistencias:	52
3.7.3.	Termocupla:.....	52
3.7.4.	Pirómetro.....	53
3.4.5.	Amperímetro.....	53
3.8.	MONTAJE E INSTALACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS	54
3.8.1.	Montaje del disyuntor principal.....	54
3.8.2.	Montaje de los pulsadores.....	55
3.8.3.	Montaje del circuito de control.....	55
CAPÍTULO IV		57
TRANSFERENCIA DE CALOR.....		57
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	57
4.2.	TRANSFERENCIA DE CALOR.....	57
4.3.	POTENCIA DE LOS CALEFACTORES	58
4.3.1.	Balance energético en el estado transitorio	58
4.4.	CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR	61
4.4.1.	Determinación del coeficiente de convección	62
4.4.2.	Determinación del coeficiente de radiación	64
4.5.	ESTIMACION DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR	64
4.5.1.	Pérdidas por conducción.....	64
4.5.2.	Pérdidas por radiación	65
4.5.3.	Pérdidas por convección.....	65
4.6.	INCREMENTO DE LA ENERGÍA INTERNA DEL POLÍMERO	66

4.7. POTENCIA DE LAS BANDAS CALEFACTORAS	66
4.7.1 Temperatura media de la película.	66
4.7.2 Número de Grashof	67
4.7.3 Cálculo de número de Nusselt	67
4.7.4 Cálculo del coeficiente de convección	68
4.7.5 Coeficiente de radiación	68
4.7.6 Pérdidas por radiación	69
4.7.7 Pérdidas por convección.....	69
4.7.8 Cantidad de calor necesaria para elevar la masa del material a la temperatura de trabajo.....	69
4.8. CÁLCULO DE POTENCIA REQUERIDA PARA BANDAS CALEFACTORAS.....	70
CAPÍTULO V	71
ANÁLISIS ECONÓMICO.....	71
5.1. INTRODUCCIÓN.....	71
5.2. ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD DEL RECICLAJE DE PLASTICO.....	71
5.3. PROYECCIÓN DE INGRESOS.....	71
5.4. FLUJO DE CAJA.....	73
5.5. EVALUACION:.....	73
5.5.1. Tasa de descuento	73
5.5.2. Valor actual neto	74
5.5.3. Tasa interna de rentabilidad.....	75
5.5.4. Relación beneficio costo.....	76
CAPÍTULO VI	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
6.1. CONCLUSIONES	78

6.2. RECOMENDACIONES:.....	80
CAPÍTULO VII.....	82
INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO.....	82
7.1. INTRODUCCIÓN.....	82
7.2. TIPOS DE MANTENIMIENTO.....	82
BIBLIOGRAFÍA.....	84
ANEXOS.....	88

ÍNDICE DE FIGURAS, GRÁFICOS, TABLAS Y ECUACIONES

FIGURAS

Figura 1. Proceso de reciclaje mecánico de productos plásticos	5
Figura 2. Representación gráfica de las moléculas de polietileno.	7
Figura 3. Códigos de la Sociedad de Industrias del Plástico	10
Figura 4. Extrusora de Pistón	12
Figura 5. Extrusora Doble Husillo	14
Figura 6. Máquina de extrusión de un husillo.	17
Figura 7. Equipo para extrusión de perfiles.....	20
Figura 8. Tolla de Alimentación	21
Figura 9. Barril para extrusor	22
Figura 10. Garganta de alimentación.	23
Figura 11. Garganta de alimentación instalada.....	23
Figura 12. Husillo.	23
Figura 13. Variables que constituyen al husillo.....	24
Figura 14. Esquema simplificado de los perfiles de flujo por arrastre y presión.	25
Figura 15. Variación del gradiente de presión en el extrusor de husillo simple, según Morton. .	26
Figura 16. Representación del modelo de Tadmor, de la fusión del plástico dentro del extrusor.	28
Figura 17. Geometría de bandas planas.	36
Figura 18. Lazo del Control On - Off	43
Figura 19. CONTROL ON – OFF.....	43
Figura 20. Circuito de Fuerza – Motor.....	45
Figura 21. Curvas de disparo de los relés térmicos.....	47
Figura 22. Circuito de Fuerza - Niquelinas	48
Figura 23. Pulsador NO.....	50
Figura 24. Indicador Luminoso	51
Figura 25. Circuito de control	51
Figura 26. Interruptor	51
Figura 27. Resistencias tipo abrazadera.	52
Figura 28. Termocupla.	53
Figura 29. Pirómetro.	53
Figura 30. Amperímetro.	54
Figura 31. Circuito de Control Motor	54
Figura 32. Disyuntor Principal.....	55
Figura 33. Pane de control.....	55
Figura 34. Panel energizado.....	56
Figura 35. Sistema de análisis para el balance energético.....	59

GRÁFICOS

Gráfico 1. Producción mundial de termoplásticos..... 2

Gráfico 2. Producción mundial de termoestables 2

TABLAS

Tabla 1. Parámetros geométricos del husillo.....	30
Tabla 2. Tipos de husillo.	31
Tabla 3. Caja Reductora.....	38
Tabla 4. Datos Técnicos.	39
Tabla 5. Análisis de costos.	72
Tabla 6. Flujo de Caja.	73
Tabla 7. Tasa de descuento.....	74
Tabla 8. Indicadores de rentabilidad financiera.....	77

ECUACIONES

Ecuación 1. Holgura.....	24
Ecuación 2. Relación L/D	29
Ecuación 3. Relación de compresión.	30
Ecuación 4. Flujo volumétrico.....	31
Ecuación 5. Flujo de arrastre.	32
Ecuación 6. Flujo de presión.	32
Ecuación 7. Flujo de filtración.	33
Ecuación 8. Cálculo de revolución del husillo.	33
Ecuación 9. Potencia.	35
Ecuación 10. Velocidad de giro.....	37
Ecuación 11. Relación de velocidad.	37
Ecuación 12. Calculo del diámetro de la polea conducida.....	37
Ecuación 13. Potencia	45
Ecuación 14. Potencia del contactor.	46
Ecuación 15. Intensidad de corriente	49
Ecuación 16. Corriente de alimentación	50
Ecuación 17. Energía almacenada por el cilindro.	59
Ecuación 18. Energía que sale del cilindro hacia el exterior.....	60
Ecuación 19. Energía almacenada por el husillo.	60
Ecuación 20. Coeficiente por Transferencia de Calor.	61
Ecuación 21. Temperatura media de película.....	62
Ecuación 22. Número de Grashof.....	62
Ecuación 23. Número de Nusselt para cilindros horizontales.	63
Ecuación 24. Número de Nusselt para convección libre.....	63
Ecuación 25. Coeficiente de convección.....	63
Ecuación 26. Pérdidas por radiación.....	64
Ecuación 27. Coeficiente de radiación.....	64
Ecuación 28. Pérdidas por radiación.....	65
Ecuación 29. Pérdidas por convección.....	65
Ecuación 30. Cantidad teórica de calor.....	66
Ecuación 31. Tasa de rendimiento medio.	74
Ecuación 32. VAN.....	74
Ecuación 33. TIR.	75
Ecuación 34. Beneficio costo.	76

GLOSARIO¹

Álabe.- Cada una de las paletas curvas de la turbina que reciben el impulso del fluido.

Axial.- Perteneciente o relativo al eje.

Cojinetes.- Pieza o conjunto de piezas en que se apoya y gira el eje de un mecanismo.

Emisividad.- Capacidad de un material para emitir energía radiante.

Extrudir.- Dar forma a una masa metálica, plástica, etc., haciéndola salir por una abertura especialmente dispuesta.

Extrusión.- Acción y efecto de extrudir.

Extrusora.- Máquina para extrudir.

Histéresis.- Fenómeno por el que el estado de un material depende de su historia previa. Se manifiesta por el retraso del efecto sobre la causa que lo produce.

Husillo.- Tornillo de hierro o madera que se usa para el movimiento de las prensas y otras máquinas.

Polietileno.- Polímero preparado a partir de etileno. Se emplea en la fabricación de envases, tuberías, recubrimientos de cables, objetos moldeados, etc.

Polímero.- Compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y que consiste esencialmente en unidades estructurales repetidas.

Radiador.- Aparato metálico con gran desarrollo superficial, por cuyo interior circula un fluido caliente que transmite calor al medio circundante.

Reología.- Estudio de los principios físicos que regulan el movimiento de los fluidos.

Termoestable.- Que no se altera fácilmente por la acción del calor.

Termoplástico.- Dicho de un material: Maleable por el calor

Transductor.- Dispositivo que transforma el efecto de una causa física, como la presión, la temperatura, la dilatación, la humedad, etc., en otro tipo de señal, normalmente eléctrica.

¹ Real Academia Española. *Diccionario de la lengua española* [en línea]. 22.º ed. [ref. 10 de febrero de 2013]. Disponible en Web: < <http://www.rae.es/RAE/Noticias.nsf/Home?ReadForm> >

ÍNDICE DE SIGLAS

PET: Polietilén tereftalato.

HDPE: Polietileno de alta densidad.

PVC: Policloruro de vinilo.

LDPE: Polietileno de baja densidad.

PP: Polipropileno.

PS: Poliestireno.

NEC: National Electrical Code.

ISO: International Organization for Standardization.

IEC: International Electrotechnical Commission.

INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización.

MÁQUINA EXTRUSORA PARA EL RECICLAJE DE PLÁSTICO

Autor: Leonel Flores

Tutor: Ing. Octavio Arias

Año: 2013.

RESUMEN

Contribuir a la disminución de la contaminación ambiental, mediante la construcción de una máquina extrusora, para el reciclaje de plástico. Es el objetivo fundamental del presente proyecto, velando por intereses además ambientales, hacen que el reciclaje de plástico beneficie a espacios que requieran atención.

El plástico una vez que ha concluido su vida útil considerado como material de difícil descomposición necesita de un tratamiento especial debido a la inadecuada disposición de los residuos sólidos, que son desechados directamente al vertedero convirtiéndose así en un sinónimo de contaminación ambiental para lograr además buscar utilidades de este cuerpo. De esta manera es necesario el reciclaje como una herramienta de conservación de los recursos naturales, esto para preservar el planeta y hacer un mejor uso de él. La idea se basa en resolver problemas en la comunidad utilizando la Ingeniería Mecatrónica. Por esta razón se presenta este proyecto que pasará a ser parte del Relleno Sanitario del Cantón Otavalo, reciclando HDPE, Polietileno de alta densidad, LDPE, Polietileno de baja densidad, PP, Polipropileno.

Para realizar el proyecto de investigación, se priorizó el uso de metodologías que vayan acorde a la línea de procedimientos y se busca solucionar una problemática puntual, que permitirá científicamente cubrir una demanda o problema. Por ello el método inductivo permitirá analizar científicamente una serie de hechos y acontecimientos de carácter particular para llegar a generalidades que sirvan como referente en la investigación.

EXTRUDER PLASTIC RECYCLING

Author: Leonel Flores

Tutor: Ing. Octavio Arias

Year: 2013.

SUMMARY

To contribute towards reducing environmental contamination through the construction of an extruder machine for the recycling of plastics. This is the main objective of this project which apart from the environmental interests, the recycling of plastics will benefit outdoor spaces that require more attention. Plastic is a very difficult material to decompose and needs special treatment. In order to achieve this and to find other beneficial uses, it is necessary to recycle this material as a conservation tool of natural resources in order to protect the planet and take better advantage of it. The idea is based on resolving problems in the community using Mechatronic Engineering. This is the reason why this project is being presented and will be a part of the Sanitary landfill in the city of Otavalo. In order to recycle HDPE, high density Polyethylene, LDPE, low density Polyethylene, PP and Polypropylene, since the inadequate disposal of solid waste in almost all populated centers, specifically those in developing countries, are an environmental hazard and there is no adequate treatment once its usefulness has ended, this becomes synonymous to environmental contamination. In order to proceed with the investigation of this project, the use of methodologies which follow a line of procedures was put forth and a specific solution to these questions were found, in order to be analyzed scientifically and cover a series of demands or problems. This is why the inductive method will be able to scientifically analyze a series of incidents and events of a particular nature in order to arrive at general solutions which will then serve as references in the investigation.

PRESENTACIÓN

El proyecto de la máquina extrusora para el reciclaje de plástico, está estructurado en siete capítulos: Antecedentes, conceptos generales, aspectos intervinientes en el proceso del reciclaje de plástico, diseño de la máquina, análisis económico, conclusiones, recomendaciones, inspección y mantenimiento

En el primer capítulo se realiza el análisis de la problemática la contaminación y la necesidad e importancia de reciclar, así como el proceso de reciclaje, reciclaje mecánico, reciclaje de materiales termoplásticos y acerca de la extrusión.

El segundo capítulo describe el fundamento teórico y la información para la selección y construcción del sistema de extrusión.

El tercer capítulo presenta el diseño del sistema de control, detallando los parámetros utilizados y requerimientos necesarios para el funcionamiento.

El cuarto capítulo describe el fundamento teórico y la información el cálculo del calor necesario para la fundición del plástico.

En el quinto capítulo se realiza un estudio económico, para lo cual se calculan los costos y gastos intervinientes en la construcción del sistema, para establecer la rentabilidad del proyecto y expectativas futuras.

En el sexto capítulo se detallan las conclusiones y recomendaciones.

En el séptimo capítulo se da una guía práctica de inspección y mantenimiento predictivo, correctivo.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

1.1. INTRODUCCIÓN

En nuestro medio uno de los problemas evidentes, que ha existido durante años y que enfrenta la humanidad es la degradación del medio ambiente, hecho que se produce por la falta de conciencia del ser humano, al arrojar basura en calles, bosques, ríos, etc. Y evidentemente el estado del planeta no es el mismo que el de hace milenios, y las consecuencias sufrirán las futuras generaciones, al no poder controlar el degrado planetario, por ello más allá de formar hábitos para rescatar el significado ambiental, es necesario implementar maquinaria adecuada que sea útil para mejorar las condiciones de cuerpos de difícil descomposición.

1.2. POLÍMERO Y PLÁSTICO

Etimológicamente la palabra polímero proviene de las raíces griegas: poli = muchos y meros = partes, es decir se trata de una sustancia conformada por la repetición de la misma unidad química. (OIKOS, Corporación, 2000.)

Los polímeros se forman por una serie de uniones de muchas moléculas pequeñas llamadas monómeros, que dan origen a moléculas muy grandes, llamadas macromoléculas; las reacciones químicas sucesivas que se presentan para formar a los polímeros o macromoléculas, se denominan polimerización.

El polímero formado por un solo tipo de monómero se conoce como homopolímero, mientras al polímero formado por dos o más monómeros diferentes se le llama copolímero.²

El científico belga Bakeland (inventor de la bakelita) parece ser el primero en utilizar la palabra plástico para designar una sustancia polimérica sintetizada mediante la química orgánica. El término plástico se generalizó para describir a

² MORALES MÉNDEZ, José Eduardo. “Obtención y clasificación de los polímeros”. Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos. México: Trillas, 2010. p. 46

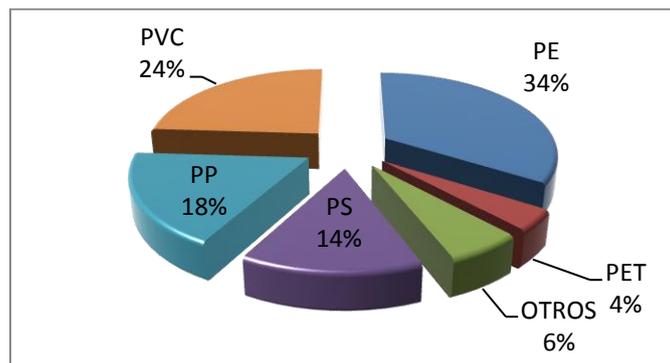
los polímeros sintéticos a los cuales se les añade una serie de sustancias que facilitan su procesamiento o su utilización como materiales de ingeniería. (OIKOS, Corporación, 2000.)

1.2.1. Tipos de plásticos

Hay dos principales tipos de plásticos: los **termoplásticos** y los **termoestables**.

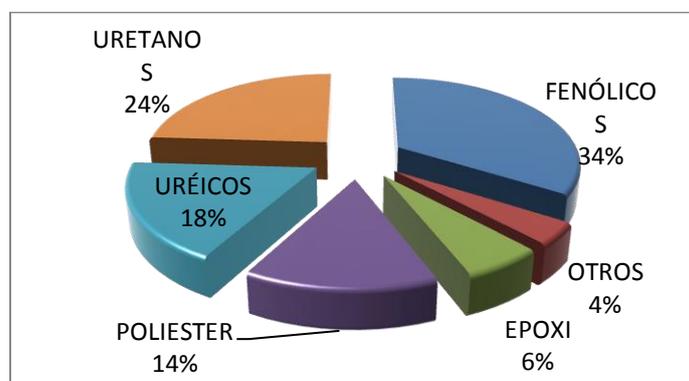
- **Los termoplásticos** se reblandecen al ser calentados y se endurecen al enfriarse. A nivel mundial, los termoplásticos representan el 83% del total de plásticos.
- **Los termoestables** se endurecen por medio de un proceso de fraguado y no se pueden volver a fundir ni a moldear.

Gráfico 1. Producción mundial de termoplásticos.



Fuente: OIKOS, Corporación, 2000.

Gráfico 2. Producción mundial de termoestables.



Fuente: OIKOS, Corporación, 2000.

Es en los países asiáticos y sudamericanos, donde el crecimiento relativo de los plásticos se muestra más importante. En el Ecuador, la industria de los materiales de ingeniería representa el 7% del PIB y de entre éstos, el 50% le corresponde a la industria de los plásticos. El número de industrias transformadoras de plástico(es decir aquellas que fabrican piezas y objetos de plástico) ha ido creciendo sostenidamente, se reportan alrededor de 80 empresas en Pichincha, igual número en la provincia del Guayas y en la zona austral alrededor de 40. Las líneas actuales de desarrollo, tanto a nivel investigativo como industrial, están en: Desarrollo y utilización de nuevos materiales, especialmente en la línea de mezclas, polímeros degradables, polímeros conductores y materiales compuestos para altas exigencias.

El mejoramiento de la comprensión de su comportamiento con el paso del tiempo y bajo la combinación de tensiones de diversa naturaleza (es decir bajo los efectos combinados de tensiones mecánicas, ambientes químicos, condiciones de temperatura, etc.).

Optimización de los procesos de transformación, para mejorar su eficiencia energética, la cantidad de materia prima utilizada, el diseño de los moldes, etc.

Avances en la tecnología del reciclaje para reducir las consecuencias medioambientales del uso de materiales no degradables. (OIKOS, Corporación, 2000)

1.3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA:

Los plásticos son en la sociedad actual uno de los materiales más utilizados debido a su gran diversidad, versatilidad de usos, facilidad de producción, peso, desarrollo de investigaciones para la creación de nuevos materiales, etc. Pero estas mismas características los han llevado a ser los causantes de uno de los más grandes problemas de contaminación ambiental. La inadecuada disposición de los residuos sólidos una vez concluida su vida útil, se han convertido en un sinónimo de contaminación ambiental, ya que no son tratados previamente sino son recolectados, depositados en los cubetos de los rellenos sanitarios para ser cubiertos, y esperar su descomposición; cabe mencionar que la vida útil de un plástico es de promedio 100 años aproximadamente.

Por esta razón se presenta este proyecto que pasará a ser parte del Relleno Sanitario del Cantón Otavalo, reciclando HDPE, Polietileno de alta densidad, LDPE, Polietileno de baja densidad, PP, Polipropileno; además buscar utilidades de este cuerpo. La idea se basa en resolver problemas en la comunidad utilizando la Ingeniería en Mecatrónica

1.4. PROCESO DE RECICLAJE

El plástico es una de los materiales que al ser desechado ocupa el mayor volumen en los Rellenos Sanitarios. Por eso, es muy importante que este material sea reciclado, evitando de esta manera su disposición final; el presente proyecto está enfocado en el reciclaje mecánico de plásticos

1.4.1. Reciclado mecánico

Se denomina reciclado mecánico porque durante su proceso no sufre transformaciones químicas (y si existen son poco significativas)

Primera etapa consiste en la recolección del material plástico; la cual está a cargo del Gobierno Municipal de San Luis de Otavalo, que proviene de los desperdicios domésticos o industrias que desechan plástico.

Una vez conseguido el material se pasa a una etapa de triturado o molido, para facilitar el procesamiento posterior del material.

La reducción del tamaño del polímero se lo va a realizar mediante una aglutinadora que es parte del Relleno Sanitario del Cantón Otavalo, reduciendo el polímero a 1 cm^2 .

En general parte de residuos industriales se pueden obtener limpios, por lo que no es preciso un lavado a profundidad, pero en otros casos vienen contaminados, lo que se requiere que se sometan a unos procesos especiales de separación. Los residuos de las basuras o de la agricultura necesitan ser lavados por lo que una vez triturados se introducen en recipientes llenos de agua y por medio de agitadores mecánicos se va desprendiendo la suciedad. Los materiales plásticos

sufren varios procesos de degradación durante su fabricación, su uso y cuando se realiza la etapa de extrusión para su reciclaje.

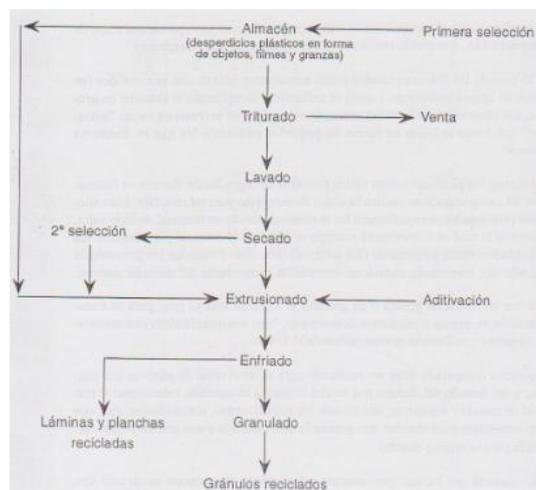
Esto altera sus propiedades, especialmente las mecánicas, dando un material de bajo valor, razón por la cual es conveniente incorporar aditivos al material para mejorar sus propiedades. Estas sustancias (los aditivos) dificultan o retardan los procesos de degradación mejorando considerablemente las propiedades del material plástico.

Una vez en forma de granza o de grumos, el material está ya listo para su transformación en piezas o productos comerciales, bien sean mezclándolo con materiales vírgenes o utilizando granza reciclada al 100%.

Si el material que ha sido previamente seleccionado se compone de un solo tipo de plástico, por ejemplo, únicamente de polietileno de baja densidad, el material triturado servirá para fabricar productos de polietileno de baja densidad (aunque no para uso alimentario). En el caso de reciclar PVC, se puede fabricar tuberías de drenaje. A partir de polipropileno se puede hacer cuerdas; a partir de polietileno de tereftalato se puede obtener alfombras, etc.

Si el material no ha sido seleccionado y se compone de varios tipos de plástico mezclados, servirá para fabricar objetos igualmente útiles: mobiliarios de jardín, bancos para parques, vallas, suelos para establos, etc.

Figura 1. Proceso de reciclaje mecánico de productos plásticos



Fuente: OIKOS, Corporación, 2000.

1.4.2. Reciclado de termoplásticos

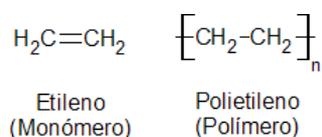
El reciclado de materiales termoplásticos es el que se lleva a cabo en mayor volumen, respecto a todos los plásticos, en razón de la gran cantidad de este tipo de materiales que se producen. Los vamos a denominar plásticos de gran consumo que son:

Polietileno (PE), Polipropileno (PP), Poliestireno (PS), Polietileno de tereftalato (PET) y policloruro de vinilo (PVC), estos cinco materiales son los que han adquirido mayor atención en el tema de reciclaje y por lo tanto, son materiales para los cuales se disponen de los mayores desarrollos tecnológicos para su reaprovechamiento.(OIKOS, Corporación, 2000.)

1.4.3. Polietileno (PE)³

El polietileno (PE) es un material termoplástico blanquecino, de transparente a translúcido, y es frecuentemente fabricado en finas láminas transparentes. Las secciones gruesas son translúcidas y tienen una apariencia de cera. Mediante el uso de colorantes pueden obtenerse una gran variedad de productos coloreados.

Por la polimerización de etileno pueden obtenerse productos con propiedades físicas muy variadas. Estos productos tienen en común la estructura química fundamental $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$, y en general tienen propiedades químicas de un alcano de peso molecular elevado. Este tipo de polímero se creó para usarlo como aislamiento eléctrico, pero después ha encontrado muchas aplicaciones en otros campos, especialmente como película y para envases.



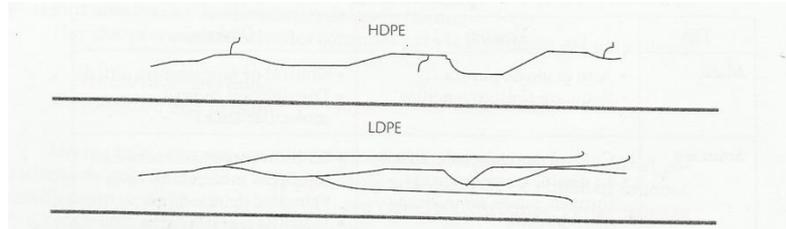
1.4.3.1. Tipos de Polietileno

En general hay dos tipos de polietileno:

³ SAENZ DE MAGAROLA, Carlos D. “Materiales Sintéticos y modo de trabajarlos”. En: LEYENSETTER, A. Tecnología de los oficios metalúrgicos. Barcelona, 2001. p. 119

- De baja densidad (LDPE)
- De alta densidad (HDPE).

Figura 2. Representación gráfica de las moléculas de polietileno.



Fuente: Fuente: Tecnología de los plásticos, 2010.

En el caso del polietileno de baja densidad, la mayor parte del mismo se fabrica en forma de láminas muy delgadas (filmes), que tienen su aplicación en la fabricación de:

- Láminas para empaçado
- Bolsas plásticas
- Laminados para la agricultura
- Tapas

El polietileno de alta densidad tiene gran aplicación en el área de recipientes, tanto a nivel doméstico como industrial:

- Recipientes para artículos de tocador (shampoo, aceites, etc.)
- Recipientes para sustancias de limpieza (detergentes, blanqueantes, etc.)
- Tuberías
- Láminas para empaçados
- Tanques para la industria

1.4.3.2 Reciclado del Polietileno⁴

Aunque las mezclas de los dos tipos de polietileno son, en principio, compatibles, el re-aprovechamiento (reciclado) óptimo del material se consigue a través de una adecuada separación de estos dos tipos de plástico.

⁴ ROSATO, Dominick V. ROSATO, Andrew V. DIMATTIA, David P. *Blow Molding Handbook*. 2da ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2004. 621 p. ISBN 3-446-22017-8

Si el material a reciclarse proviene de la industria del empaquetado, contiene tomar en cuenta que las sustancias que hayan podido tomar contacto con el plástico no tienen mayores efectos en cuanto a modificar las propiedades mecánicas del material, pero si pueden alterar el olor. La facilidad con que este contaminante pueda ser eliminado dependerá de su origen (en algunas ocasiones basta con un lavado exhaustivo)

Cuando el material a reprocesarse proviene de artículos de polietileno destinados a tener una mayor duración, como pueden ser: tuberías, tanques, etc., estos son de más fácil recolección y selección, puesto que normalmente están fabricados a partir de un solo material (en este caso, polietileno de alta densidad). Sin embargo hay que considerar el tiempo y las condiciones a las que estuvieron expuestos, puesto que esto podría haber causado degradación o deterioro del producto.

Las botellas empleadas para almacenar agua (volúmenes de 5 litros), son una fuente importante de HDPE y, adicionalmente, no tiene color (libres de pigmentos), lo cual es una gran ventaja pues significa que la resina recuperada es adecuada para una amplia variedad de usos. No obstante, las botellas, de HDPE que han sido pigmentadas, también pueden ser recicladas aunque las posibilidades de su aplicación se reducen en mayor medida. Un tipo de botella de HDPE pigmentado, que no se acepta en muchos programas de reciclaje, es aquel que se usa para el envasado de aceites para motor, puesto que esta sustancia suele causar considerables degradaciones al material plástico.

Las propiedades del HDPE reciclado dependen de las propiedades del material virgen de partida y de la historia de procesamiento que haya sufrido el producto. En general, sus propiedades mecánicas se mantienen dentro de niveles aceptables, aunque su resistencia al impacto generalmente decrece.

El HDPE posee una gran facilidad para absorber los componentes de los productos que contiene, lo cual puede ocasionar varios problemas para sus futuras aplicaciones. El ácido butírico, por ejemplo, es el responsable de muchos de los olores a leche rancia y tiene una significativa solubilidad en el HDPE.

Afortunadamente, existen varios mecanismos por medio de los cuales pueden evitarse o corregirse estos inconvenientes. Se ha determinado que, colocando la capa de material reciclado entre capas de material virgen, se puede prevenir la migración de olores contaminantes. Se ha observado también que con un diseño apropiado de la pieza, que facilite un lavado a profundidad, se puede mover varios de los residuos molestos.

Sin embargo sustancias tales como: la gasolina, los agentes de limpieza, los insecticidas y el aceite de cocina, no pueden ser removidos por los procesos convencionales, sobre todo al nivel necesario como para poder utilizar los materiales reciclados para el envasado de alimentos.

El polietileno de alta densidad reciclado puede utilizarse en la fabricación de tuberías de baja presión, tuberías para drenaje de agua, láminas para empaques, también se utiliza en la fabricación de recipientes que tienen varias capas, con el material reciclado en la capa intermedia, con ello se ha conseguido abaratar considerablemente los costos de fabricación de estos materiales. También pueden utilizarse para fabricar recipientes, siempre que no contengan sustancias con fines alimenticios. A partir de HDPE también pueden utilizarse para fabricar recipientes, siempre que no contengan sustancias con fines alimenticios. A partir del HDPE también se pueden obtener cubos de basura y algunos productos de uso doméstico, conos y barrederas de seguridad, macetas y juguetes.

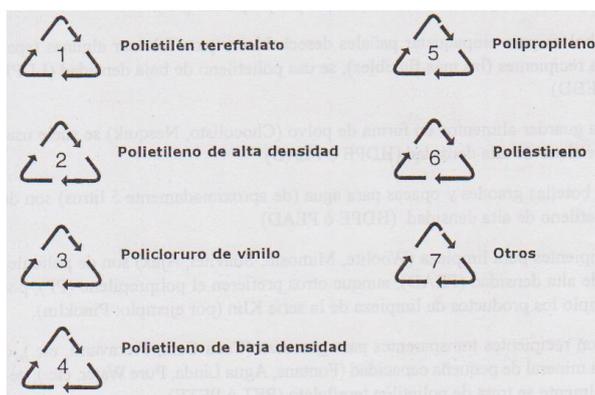
El LDPE puede ser nuevamente utilizado como parte de los sistemas de irrigación en la agricultura y para volver a fabricar bolsas de uso doméstico.

1.4.4. Reconocimiento e identificación

Dentro de un proceso de reciclaje resulta crucial la selección previa del material que va hacer procesado. Una adecuada separación preliminar determinara la calidad del producto obtenido

La Sociedad de Industrias del Plástico (SPI) ha desarrollado voluntariamente unos códigos para identificar a los plásticos que se utilizan con mayor frecuencia por la población; estos códigos son:

Figura 3. Códigos de la Sociedad de Industrias del Plástico



Fuente: OIKOS, Corporación, 2000.

Dentro de "otros" podemos encontrar plásticos como el poliuretano (PU), acrilonitrilo-butadienestireno (ABS), policarbonato (PC) y los biopolímeros.

1.5. TECNOLOGÍA⁵

1.5.1. Modos de ser trabajados los materiales sintéticos

La conformación de los productos sintéticos se realiza predominantemente sin arranque de viruta. Los productos terminados se fabrican partiendo de materia prima líquida o de productos intermedios modelables en forma plástica (pellet o polvo)

Entre los principales procedimientos que podemos mencionar son: moldeado en prensa, prensado de inyección, colada de inyección, extrusión, etc. Este proyecto está enfocado en la selección de un sistema de extrusión que satisfaga las necesidades del relleno sanitario del Cantón Otavalo.

1.5.2. Extrusión de plásticos

Extrusión deriva de la palabra latina compuesta, ex (afuera) y trudere (empujar hacia); el primer extrusor fue desarrollado por Arquímedes, que se utilizó para sacar agua de un río.

⁵ SAENZ DE MAGAROLA, Carlos D. "Modos de ser trabajados los materiales sintéticos". En: LEYENSETTER, A. Tecnología de los oficios metalúrgicos. Barcelona: Reverté, 2001. p. 132

El proceso de extrusión hace referencia a un proceso por compresión donde un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para producir un artículo de sección transversal constante y de longitud indefinida.

En este proceso se emplea predominantemente materiales termoplásticos para fabricar barras, bandas, tubos, mangueras y láminas; para la obtención de una lámina en forma de manguera se emplea polietileno blando.

En general la extrusión es uno de los procesos continuos con los que cuenta la industria de transformación de los plásticos.

El proceso de extrusión de plásticos se lleva a cabo en máquinas denominadas extrusoras, aunque existen extrusoras de varios tipos nosotros haremos referencia a la extrusora monohusillo (un solo tornillo), porque es usada comúnmente para la transformación de termoplásticos granulados.

Existen diferentes tipos de extrusoras según la presión necesaria para hacer pasar el plástico fundido a través de la boquilla, tales como:

1.5.3. Tipos de extrusoras ⁶

Las extrusoras más utilizadas, según la presión necesaria para hacer pasar el plástico fundido a través de la boquilla son:

1.5.3.1. Extrusoras de desplazamiento positivo:

Son aquellas utilizadas para una extrusión directa o en avance, el material se coloca en una cámara y es impulsado a través de la abertura de una matriz mediante un pistón mecánico o ariete de prensa.

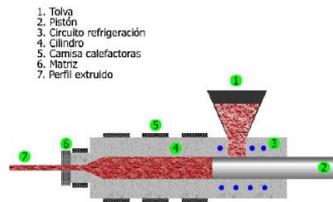
1.5.3.1.1. Extrusoras de pistón

Estas máquinas constan de un cilindro que posee elementos de calefacción, la materia prima desciende desde una tolva al interior del cilindro donde el material es plastificado. Éste es obligado a pasar a través de una boquilla, empujándolo con un pistón el cual

⁶ RAMOS, Luis Francisco. *Extrusión de plásticos*. 1 ed. México: Lumisa, 2012. 188p. ISBN: 978-968-18-4504-9

es accionado por presión hidráulica o mecánica. Las máquinas de un pistón producen piezas de longitud limitada, debido a la discontinuidad del proceso. Para fabricar perfiles continuos se utilizan las extrusoras de varios pistones

Figura 4. Extrusora de Pistón



Fuente⁷

1.5.3.1.2. Bombas de extrusión (bombas de engranaje)

Son bombas con algunos pares de engranajes que están acoplados y alojados en una carcasa cuando se impulsa un engrane éste mueve el correlativo. El transporte del plástico se debe solo al empuje de los dientes sobre el material por el lado de la carcasa. El acoplamiento entre dientes aísla el lado de descarga a presión, del lado de succión. El flujo de material es proporcional a la frecuencia de rotación de los discos dentados obteniéndose así un flujo de material esencialmente constante.

1.5.3.1.3. Extrusora de tambor rotatorio

En ésta máquina el material desciende por gravedad e ingresa por el émbolo hasta la cámara, la cual está formada por el tambor rotatorio y por el bastidor fijo o cuerpo estático El bastidor puede calentarse o enfriarse para controlar la temperatura. En la cámara el polímero es arrastrado por el cilindro rotor que lo pone en

⁷ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. *La extrusión de materiales polímeros*. [en línea]. [ref. 5 de Diciembre 2012]. “Tema 03: La extrusión de materiales polímeros, Extrusora de Pistón”. Disponible en Web: <https://www.upv.es/bin2/caches/miw/visfit?id=510532&idioma=C>

contacto con las paredes calientes del bastidor y con el material previamente fundido, con lo que se efectúa la plastificación. La homogenización tiene lugar en la pequeña holgura radial entre el marco fijo y el cilindro que gira.

El plástico así fundido es separado del cilindro rotatorio mediante una pieza en forma de cuchilla; la fundición, bajo acción de las fuerzas tangenciales se mueve hacia la boquilla y la cruz.

1.5.3.2. Extrusoras de fricción viscosa:

La acción del transporte, conseguida aprovechándose las características físicas del polímero y la fricción de éste con las paredes metálicas transportadoras de la máquina, donde ocurre la transformación de energía mecánica en calor que ayuda a la fusión del polímero. La reología del polímero tiene influencia sobre todo el proceso. Los tipos son: extrusora de cilindros y extrusora de rosca.

1.5.3.2.1. Extrusora de rodillos.

Es la utilizada para la denominada “extrusión plana” empleada en la fabricación de láminas y películas, su funcionamiento está basado en la utilización de rodillos.

1.5.3.2.2. Extrusora de tornillo.

El polímero se alimenta a través de una tolva, hasta un cañón, en el cual un tornillo helicoidal transporta el polímero hacia el extremo con matriz. Se divide en monohusillo, doblehusillo

1.5.3.2.2.1. Monohusillo

Son máquinas que constan de un solo tornillo son empleadas para mezclar, plastificar, granular materiales, fabricar películas, láminas, tubos y artículos de configuración compleja, y también para revestir telas y papel.

Existen de diferentes tipos y tamaños que difieren por sus características y formas constructivas, vale mencionar que son de menor tamaño y menor precio.

1.5.3.2.2.1. Doblehusillo

Son máquinas que como su nombre lo indica poseen dos tornillos, teniendo mayores ventajas de producción realizando un mezclado completo del compuesto, una excelente granulación de los materiales termoplásticos.

Existen numerosos tipos de máquinas de extrusión con varios husillos que difieren entre sí por la posición de los husillos, sentido de giro, geometría de los husillos, etc. De aquí la gran diversidad de las máquinas de extrusión.

Figura 5. Extrusora Doble Husillo



Fuente⁸

1.6. SEGURIDAD Y AMBIENTE⁹

El puesto en el que el operario va a realizar su trabajo con ayuda de las máquinas de reciclaje va a constituir el puesto de trabajo

⁸ UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. *La extrusión de materiales polímeros*. [en línea]. [ref. 5 de Diciembre 2012]. “Tema 03: La extrusión de materiales polímeros, El equipo de extrusión de Tornillo”. Disponible en Web: <https://www.upv.es/bin2/caches/miw/visfit?id=510532&idioma=C>

⁹ SAENZ DE MAGAROLA, Carlos D. “Constitución del puesto de trabajo y prevención de accidentes”. En: LEYENSETTER, A. *Tecnología de los oficios metalúrgicos*. Barcelona: Reverté, 2001. p. 199

El operario tiene que poder realizar su trabajo sin impedimentos; por eso el puesto de trabajo habrá de estar configurado de tal modo que se pueda trabajar con él con la mayor comodidad posible. El local de trabajo debe ser claro, despejado, estar agradablemente constituido y mantenerse limpio para prevenir accidentes

El comportamiento preventivo de accidentes puede aprenderse lo mismo que se aprende el oficio. Si se comporta uno imprudentemente respecto a la seguridad, acaba por presentarse el accidente.

Es decisivo, para la seguridad de uno, en primer lugar, su propio comportamiento.

Indicaciones generales:

Mantener libres los caminos de circulación en el espacio de trabajo. Con esto se limita el peligro de caídas y tropezones

Los defectos en máquinas, herramientas y otro útiles de trabajo deben comunicarse de inmediatamente al superior, pues de lo contrario sufre, tal vez, otro un accidente antes de haberse dado cuenta del defecto.

No debe suprimir los dispositivos de protección e instalaciones de protección.

El operario debe estar protegido con gafas de protección, casco, guantes, botas de seguridad, etc.

No estar manejando máquinas extrañas, a cada máquina le corresponden instrucciones de manejo propias; en cada máquina es instruido un operario.

El puesto de trabajo no es un campo de juego; por andar jugando, enredando o riñendo con los compañeros pueden provocarse accidentes llenos de graves consecuencias

Junto a máquinas y piezas en movimiento hay que llevar ropas bien ceñidas; las vestimentas anchas, los lasos o cintas sueltas y los cabellos largos son fácilmente atrapados por las piezas en movimiento de rotación.

CAPÍTULO II

SELECCIÓN DEL EQUIPO MECÁNICO

2.1. INTODUCCIÓN

En el presente capítulo se describe la fundamentación teórica, el diseño y la construcción de la maquina extrusora. El funcionamiento óptimo de la extrusora dependerá de algunos aspectos como son el tornillo sin fin y el barril. Un aspecto importante a tomar en cuenta en este proyecto son los costos de construcción e implementación, dado que ha sido desarrollado específicamente para instalarse en el Relleno Sanitario del cantón Otavalo.

2.2. SELECCIÓN DEL EXTRUSOR

El sistema seleccionado para este trabajo es la extrusora monohusillo, debido a:

- Su innovador sistema de transmisión
- Altas prestaciones para extrusión de manguera
- Excelente homogeneidad de las masa fundida a bajas temperaturas
- Diseño estable, sin vibraciones
- Su costo
- Su bajo consumo eléctrico

La máquina extrusora va a ser adquirida con la partida presupuestaria N° B300.320.840104.002.0.32.04 del Gobierno Municipal de Otavalo.

2.2. DESCRIPCIÓN DEL EXTRUSOR¹⁰

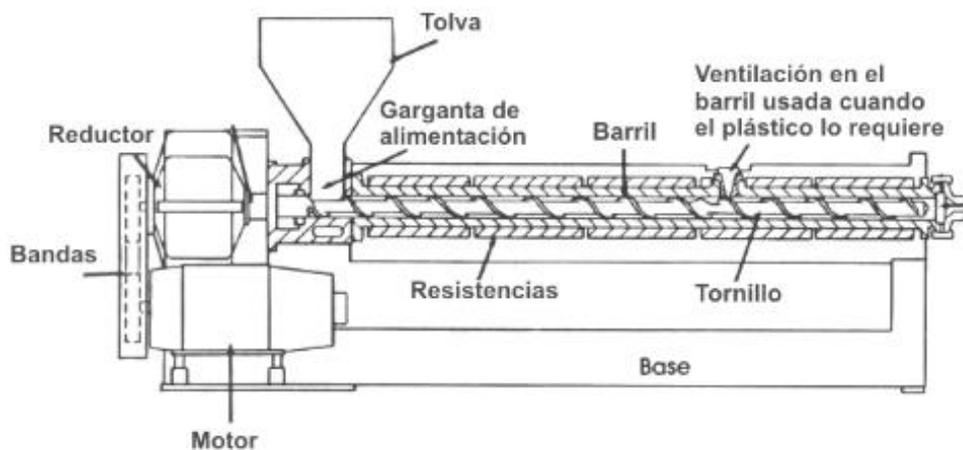
En la Figura 4 podemos observar a una extrusora de un husillo esquemáticamente; La cual está conformada motor eléctrico encargado de transmitir movimiento de giro por medio del reductor al husillo, que recoge el material de la tolva de carga en forma de gránulos, polvos y lo mezcla plastifica, comprime y lo desplaza por el canal helicoidal a lo largo del cilindro. Es gracias

¹⁰ SAVGORODNY, V.K. *Transformación de Plásticos*. URALDE, Luis (trad.). Barcelona: Gustavo Gili S.A., 1973. 468 p. ISBN: 84-252-0746-0

al husillo, que se consigue la homogenización del termoplástico fundido y su extrusión a través de las mallas filtrantes, rejillas y cabezal o hilera perfiladora.

El cilindro está dividido en varias zonas autónomas donde la temperatura se controla y regula automáticamente cada una de estas zonas va conectada independientemente a los sistemas de calentamiento. Con la finalidad de evitar accidentes desagradables los calentadores van cerrados con la cubierta. Generalmente para refrigerar las zonas calientes del cilindro, se emplean los ventiladores. La caja reductora, montada al extremo izquierdo del husillo, soporta convenientemente los esfuerzos axiales que surgen al girar el husillo.

Figura 6. Máquina de extrusión de un husillo.



Fuente: Blow Molding Handbook, 2003.

El cilindro está dividido en varias zonas autónomas donde la temperatura se controla y regula automáticamente cada una de estas zonas va conectada independientemente a los sistemas de calentamiento. Con la finalidad de evitar accidentes desagradables los calentadores van cerrados con la cubierta. Generalmente para refrigerar las zonas calientes del cilindro, se emplean los ventiladores. La caja reductora, montada al extremo izquierdo del husillo, soporta convenientemente los esfuerzos axiales que surgen al girar el husillo.

La acción impelente del husillo depende de la velocidad de giro, ángulo de hélice de la espiral y del coeficiente de fricción, que surge como consecuencia del roce del material con las paredes del cilindro y la superficie del husillo. El material será impulsado con mayor efectividad por el husillo cuanto mayor sea la fricción entre el material y las paredes del cilindro y cuanto menor sea en la superficie del husillo.

El calentamiento excesivo del cilindro entorpece considerablemente el proceso de extrusión, debido a la destrucción térmica de las capas del material cercanas a sus superficie; además, la elevación de la temperatura en la zona de carga del cilindro puede ocasionar la fusión del material, disminuyendo al mismo tiempo la capacidad de adhesión y por consiguiente el arrastre del material por los primeros filetes del husillo. El proceso de extrusión depende de la temperatura del cilindro en las diferentes zonas y de la temperatura del husillo. Durante la extrusión se deberá poner particular atención para que la regulación automática de la temperatura del cilindro y husillo sea lo más exacta posible.

En una extrusora simple de husillo el termoplástico atraviesa tres estados físicos: solido, conglomeración del material solido con la masa caliente, y finalmente se transforma en masa fundida. En los husillos dosificadores, provistos de zonas de alimentación, compresión y dosificación, resulta más sencillo analizar la zona de dosificación, puesto que, al flujo del material plastificado de esta zona se le puede aplicar las leyes hidrodinámicas para líquidos viscosos

En la zona de dosificación existen tres flujos: directo e inverso, a lo largo del canal helicoidal del husillo, y el correspondiente a las fugas de la masa, que tienen lugar a través de la holgura radiales existente entre las crestas los vértices de los filetes del husillo y la superficie interior del cilindro. Este último flujo, comparado con los otros dos, resulta tan insignificante que en la mayoría de los casos se suele presidir de él al efectuar los cálculos de producción. La producción o caudal de la zona dosificadora es igual a la diferencia entre el flujo directo e inverso, sumando a este ultimo las fugas.

El flujo directo se denomina flujo forzado y el inverso, flujo de presión. El primero constituye un movimiento de arrastre, originado por el desplazamiento relativo del husillo respecto al cilindro. El material acumulado en el espacio

anular formado por el núcleo del husillo y la superficie interior del cilindro, es sometido a deformaciones de cizallamiento que las paredes del canal helicoidal transforman en movimiento de avance, es decir, el flujo directo. El consumo o caudal volumétrico del flujo directo viene determinado fundamentalmente por la profundidad y anchura del canal, diámetro del husillo y velocidad de giro.

El flujo inverso surge como resultado de la presión sobrante acumulada ante la cabeza extrusora, que obliga a fluir a la masa en dirección contraria. Sin embargo como el flujo directo es considerablemente mayor se observará sólo la reducción de éste en una magnitud correspondiente al flujo inverso sin evidenciarse, como es lógico, la corriente de material en sentido contrario. La magnitud del flujo inverso depende de la profundidad del canal helicoidal, diámetro del husillo, la longitud de la zona de extrusión, presión ejercida por la masa sobre la cabeza extrusora y de la viscosidad de la masa.

Expresando en términos matemáticos el trabajo de una extrusora de husillo puede obtenerse aplicando conjuntamente las ecuaciones correspondientes a las leyes de la conservación de la masa, energía y número de movimientos, con las que describen el estado físico de un líquido a presión (el termoplástico fundido)

A continuación, se citan algunos productos que se encuentran en el mercado, fabricados mediante el proceso de extrusión¹¹:

1. Película tubular:

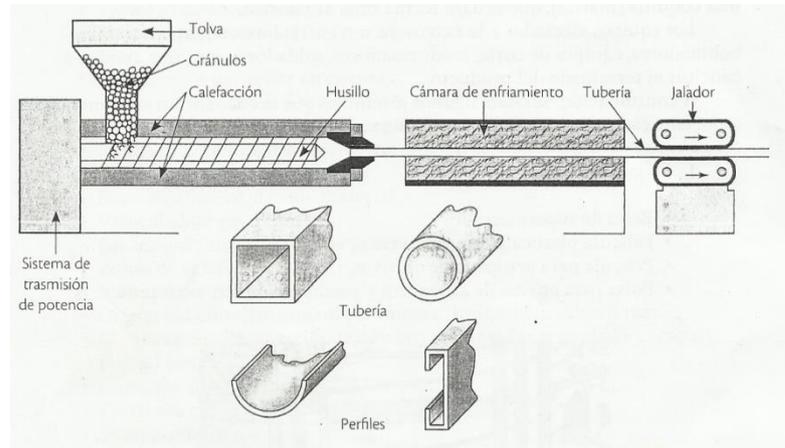
- Bolsa de supermercado
- Película de plástico para uso diverso
- Película para arropado de cultivos.
- Bolsa para envase de alimentos y productos de alto consumo

2. Tubería:

- Tubería para conducción de agua, drenaje y químicos.
- Manguera para jardín
- Manguera para uso médico y automotriz

¹¹ MORALES MÉNDEZ, José Eduardo. "Proceso de Extrusión". Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos. México: Trillas, 2010. p. 227

Figura 7. Equipo para extrusión de perfiles



Fuente: Fuente: Tecnología de los plásticos, 2010.

3. Recubrimiento:

- Alambre para corriente eléctrica.
- Cable para uso electrónico y telefónico.
- Fibra óptica.

4. Perfil:

- Hojas para persiana y aislantes de construcción.
- Ventanería y tiras guía, cinturones.
- Canales de flujo de agua.

5. Lámina y película plana:

- Rafia, piezas de refrigerador, cortinas.
- Manteles para mesa e individuales.
- Cinta adhesiva, instrumentos inflables.
- Flejes para embalaje

6. Monofilamentos:

- Filamentos, cepillos, accesorios de pesca.
- Alfombras (Filamento de las alfombras), tapicería.
- Mallas para empaque.

2.3. EPECIFICACIONES DE LA EXTRUSORA

2.3.1. Relación Longitud Diámetro (L/D)

La relación del factor L/D es la relación entre longitud y diámetro del tornillo. Si el husillo tiene una relación L/D de 16:1, significa que la longitud es 16 veces mayor que el diámetro; si el husillo tiene un diámetro de 2", su longitud será de 32"

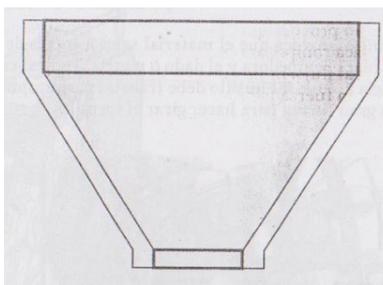
Como consecuencia de la importancia que tiene la longitud y el diámetro del equipo, y con base en la estrecha relación que guardan entre sí, se acostumbra especificar las dimensiones principales del husillo como una relación longitud / diámetro (L/D).

2.4. COMPONENTES DE LA EXTRUSORA¹²

2.4.1. Tolva

La tolva, que está fabricada en Acero SAE 1020; es el lugar en donde se deposita la materia prima en este caso pellets o gránulos de polvo de material plástico reciclado para la alimentación continua del extrusor, es de forma rectangular en su parte inferior tiene un orificio grande que se comunica hasta la entrada del extrusor este punto se le conoce como garganta de alimentación

Figura 8. Tolva de Alimentación



Fuente: Tecnología de los plásticos, 2010.

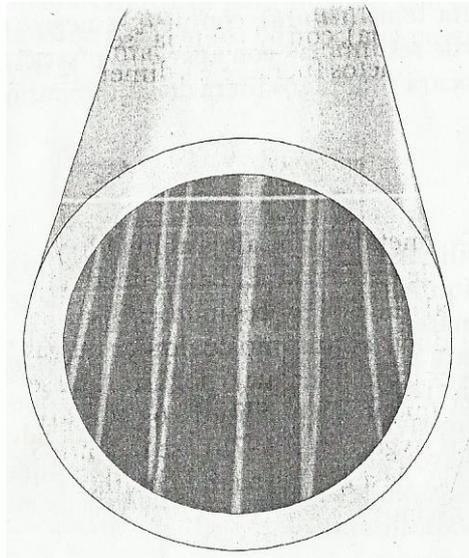
2.4.2. Cilindro

El barril es prácticamente un cilindro hueco de gran espesor, para que pueda soportar las presiones generadas en su interior por el husillo y el

¹² MORALES MÉNDEZ, José Eduardo. "Diámetro de los husillos". Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos. México: Trillas, 2010. p. 241

plástico Se encarga de transmitir el calor de las resistencias al polímero, que en este caso es polietileno.

Figura 9. Barril para extrusor



Fuente: Tecnología de los plásticos, 2010.

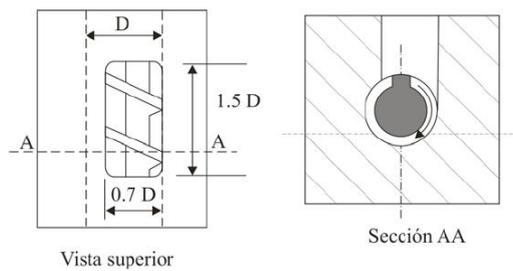
La superficie del cilindro debe ser muy rugosa para aumentar las fuerzas de cizalla que soportará el material y permitir así que éste fluya a lo largo de la extrusora. Para evitar la corrosión y el desgaste mecánico, el cilindro suele construirse de aceros muy resistentes y en algunos casos viene equipado con un revestimiento bimetálico que le confiere una elevada resistencia, en la mayoría de los casos superior a la del tornillo.

2.4.3. Garganta de Alimentación¹³

Es el sistema por medio del cual el material situado en la tolva pasará al cilindro, que está conectada a través de una boquilla de entrada.

¹³ BELTRAN, M. y MARCILLA, A. *Tecnología de polímeros* [en línea]. Tema 4: Extrusión. [ref. 28 de octubre del 2012]. Disponible en Word Wide Web: <<http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>>

Figura 10. Garganta de alimentación.



Fuente: Tecnología de Polímeros – M. Beltrán y A. Marcilla

Figura 11. Garganta de alimentación instalada.

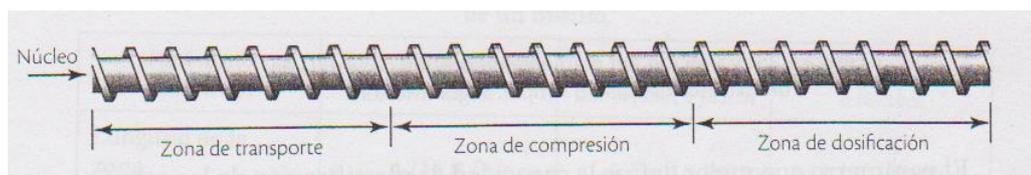


Fuente: Autor: Leonel Flores

2.4.4. Husillo:

Es el órgano fundamental de trabajo de una extrusora. Tanto la producción como la aplicación de la extrusora dependen del diámetro del husillo, su función principal es conducir la resina plástica en forma de polvo o pellet, desde la tolva y llenar la resina a la boquilla a velocidad uniforme y en forma de polímero fundido homogéneo.

Figura 12. Husillo.



Fuente: Tecnología de los plásticos, 2010.

No todos los plásticos se funden en el mismo rango de temperatura, algunos polímeros son más lentos (amorfos), como en el caso del polietileno de baja densidad (LDPE); para este tipo de materiales es apropiado un husillo con una longitud total dividida en 3 zonas (transporte, transición y dosificación).

2.4.5. Álabes, filetes o hilos

Los álabes, que recorren el husillo de un extremo al otro, son los verdaderos impulsores del material a través del extrusor. Las dimensiones y formas que éstos tengan determinarán el tipo de material que se puede procesar y la calidad de mezclado de la masa al salir del equipo.

Figura 13. Variables que constituyen al husillo.

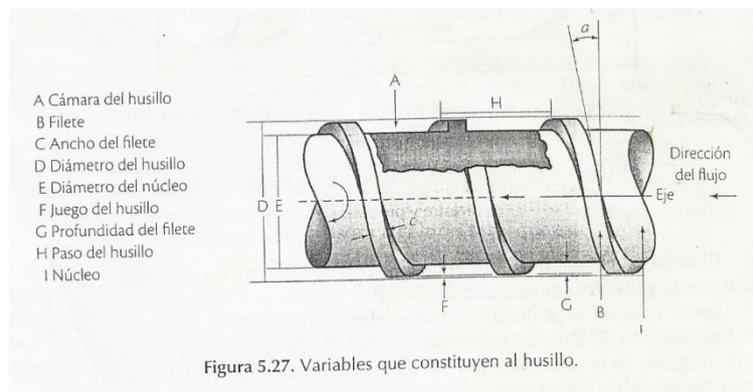


Figura 5.27. Variables que constituyen al husillo.

Fuente: Tecnología de los plásticos, 2010.

2.4.6. Holgura

Es la distancia radial (juego del husillo) entre el tornillo y el diámetro interno del barril. Savgorodny proponen que para alcanzar y mantener un nivel óptimo de eficiencia en la máquina, la distancia entre el barril y el husillo debe ser mínima y se puede calcular a partir de la siguiente ecuación.

Ecuación 1. Holgura.

$$\delta = 0.002 * D$$

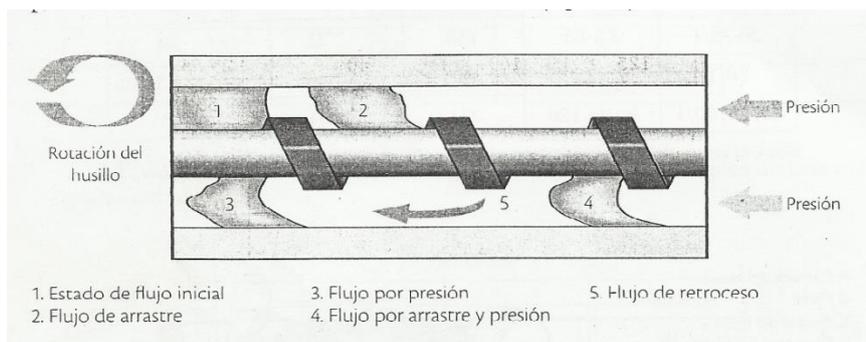
2.5. CAUDAL EXTRUIDO

De forma simplificada el caudal extruido por el equipo es el resultante de la adición de tres términos: $Q_{total} = Q_{arrastre} - Q_{presión} - Q_{retroceso}$.

El caudal de arrastre ($Q_{arrastre}$) es el resultante del movimiento relativo de la superficie del tornillo con respecto a la del cilindro de la extrusora, (ver figura 9). El término de flujo por arrastre es dependiente de la velocidad de giro del tornillo, su geometría y los coeficientes de fricción: polímero-tornillo, polímero-polímero y polímero-cilindro.

Una de las manifestaciones más evidentes del efecto caudal de arrastre se presenta en la zona de alimentación del tornillo.

Figura 14. Esquema simplificado de los perfiles de flujo por arrastre y presión.



Fuente: Tecnología de los plásticos, 2010.

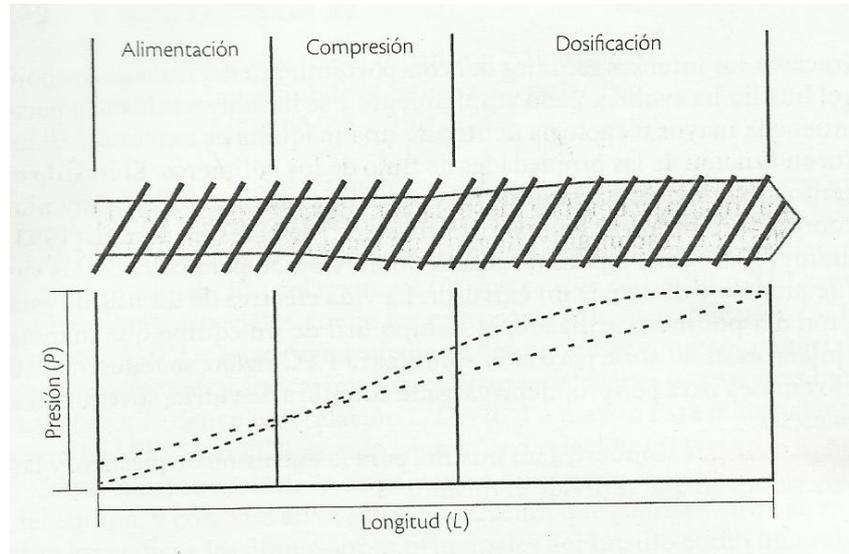
El flujo por presión ($Q_{presión}$) es el caudal teórico de retorno, o pérdida, originado por la presencia de restricciones que se oponen al flujo, existentes en el tornillo: el cabezal y la boquilla, dadas por geometría y la viscosidad de la masa polimérica.

El flujo de retroceso ($Q_{retroceso}$) es el resultante de la "pérdida" de la eficiencia de bombeo de la extrusora por la tolerancia entre el filete del tornillo y la pared del cilindro. El término de flujo en retroceso depende de la magnitud de la tolerancia entre el tornillo y el cilindro, de la caída de presión en la extrusora y de la viscosidad del polímero.

2.6. CONFIGURACIÓN GEOMÉTRICA

El husillo está dividido en tres zonas, las cuales son descritas a continuación.

Figura 15. Variación del gradiente de presión en el extrusor de husillo simple, según Morton.



Fuente: Tecnología de los plásticos, 2010.

2.6.1. Zona de alimentación:

Es la distancia entre el extremo del filete y la parte central o raíz del husillo. En esta parte, se acepta el material sin fundir, y se desprende el aire atrapado entre el material sólido y el que empieza a fundirse. Como el husillo tiene una forma de hélice, esto hace que el material se mueva hacia el frente y pueda avanzar a las zonas siguientes.

Buscando maximizar la alimentación de resina a la extrusora y con ello su productividad, el diseño de los tornillos de extrusión presenta en la zona de transporte la mayor profundidad de canal (mayor volumen).

Uno de los requerimientos más importantes que debe satisfacer todo tornillo en la zona de alimentación o transporte es tener una superficie sumamente lisa e incluso pulida de ser necesario, pues de esta manera se favorece la adhesión de la resina a la superficie del barril o cilindro de la

extrusora y no al tornillo, permitiendo así un transporte de resina más eficiente.

En la medida que el material avanza a lo largo de la zona de alimentación, comienza a ser compactado y calentado. Dos mecanismos son responsables de este calentamiento. El primero de ellos es debido a los efectos de fricción, mientras que el segundo es debido a la conducción de calor desde las bandas de calentamiento del barril. Se ha determinado que de un 80 a 90% del calor transmitido al polímero proviene de los efectos de fricción, o calentamiento por conversión de la energía mecánica.

2.6.2. Zona de transición

En esta zona el canal empieza a reducirse, en otras palabras, el diámetro interior del husillo se incrementa. Mientras pasa por esta zona, la resina se comprime y se calienta hasta el punto de fusión; El polímero se funde por acción mecánica en combinación con la elevación de su temperatura, por medio del calentamiento del cañón.

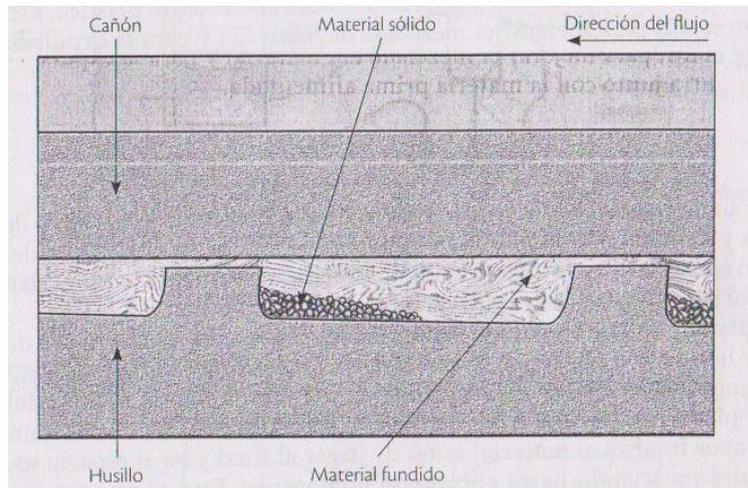
La fusión comienza a poca distancia de la tolva y se extiende hasta 60% de la longitud del cañón. Según el modelo del flujo plastificante de Tadmor (1979)¹⁴, “la fusión comienza en la paredes internas del cañón formando una delgada película, producto de su mayor movilidad, resultado del incremento en la temperatura del material y posteriormente también debida a la fricción”.

Dado que la mayor generación de calor en el proceso se origina en la interface barril-lecho de polímero sólido, las primeras trazas de fundido tienden a aparecer en la cercanía del barril. Producto de su mayor movilidad, este material fundido busca llenar los intersticios presentes en la resina sólida, solidificándose nuevamente en su trayectoria. Cuando esta película crece, es desprendida de la pared del barril por el giro del

¹⁴ MORALES MÉNDEZ, José Eduardo. “Relación de compresión”. Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos. México: Trillas, 2010. p. 250

husillo, en un movimiento de ida y vuelta y luego en un barrido, que forma un patrón semejante a un remolino o rotatorio, sin perder el arrastre final.

Figura 16. Representación del modelo de Tadmor, de la fusión del plástico dentro del extrusor.



Fuente: Tecnología de los plásticos, 2010.

La migración de material fundido hacia los intersticios hace que el material sólido constantemente se encuentre expuesto a la pared del barril, propiciando así la formación de un ciclo: sólido-fundido-sólido. Este no logra mantenerse en equilibrio durante un largo tiempo por causa del aumento de temperatura generada por la fricción, ello hace que finalmente se origine una pequeña película de fundido que queda, de modo permanente en la parte superior del canal, cubriendo la interface barril / lecho sólido.

Esta película de fundido crece en espesor y, una vez alcanzada una altura mayor que la claridad entre el filete y el barril, comienza la formación de un depósito de fundido ubicado entre el lecho sólido y el flanco activo del filete.

Resulta difícil establecer con precisión dónde se inicia la fusión, ya que rara vez coincide con el sitio donde se alcanza la temperatura de fusión del polímero en el barril. A medida que el polímero avanza dentro del

tornillo, el lecho sólido se reduce hasta finalmente perder su integridad desapareciendo en el lecho de fundido.

2.6.3. Zona de descarga o dosificación

En la mayoría de los casos, esta zona es mucho menor a la profundidad de filete en la alimentación. En consecuencia, se reduce el volumen de transporte del material y se ejerce una compresión sobre el elemento plástico. Esta compresión es útil para mejorar el mezclado del material y para la expulsión del aire que entra junto con la materia prima alimentada.

2.7. DESCRIPCIÓN DE LA UNIDAD DE EXTRUSIÓN SELECCIONADA

De acuerdo con los requerimientos que se mencionaron anteriormente, la selección del tornillo se inició tomando en cuenta la relación L/D que en este proyecto es igual a 24/1, la cual define la relación del diámetro y la longitud del husillo y el barril tendrán.

Una característica del Polietileno (Anexo 2) se podría decir, que no es sensible a la temperatura, es decir no se degrada, el largo del husillo no es tan importante en este aspecto. Pero tomando en cuenta que el husillo no debe ser muy grande por el espacio, también se trata de optimizar la cantidad de energía, se decidió escoger un husillo con un diámetro de 60 mm. La longitud se calcula despejando L de la ecuación 1

Ecuación 2. Relación L/D

$$\frac{L}{D} = 24$$

Despejando L de la ecuación

$$L = (24)(60mm) = 1440 mm$$

Con esto se tiene los requerimientos del sistema de extrusión, que se muestra en la tabla 1

Tabla 1. Parámetros geométricos del husillo.

Diámetro, D (mm)	Paso, H (mm)	Profundidad del canal en la zona de alimentación h_1 (mm)	Profundidad del canal en la zona de dosificación h_2 (mm)	Anchura de la cresta del filete (mm)
60	60	11	4,6	6.3

Fuente: Autor

Con los datos del husillo se calcula la relación de compresión para saber si el sistema será capaz de comprimir el plástico, esto se calcula de la división de la profundidad del canal de alimentación entre la profundidad del canal de dosificación.

Ecuación 3. Relación de compresión.

$$RC = \frac{h_1}{h_2}$$

Dónde:

$$RC = \frac{11}{3} = 3,6$$

Este valor se encuentra dentro del estándar para procesar HDPE.¹⁵

¹⁵ STEVENS, M.J. COVAS, J.A. *Extruder Principles and Operation*, 2da ed. Great Britain: Chapman & Hall, 1995. 478 p. ISBN: 0-412-63590-9

Tabla 2. Tipos de husillo.

Examples of Screw Types									
Purpose	Polymer	Depth (mm)			Length (diameters)				Compression ratio ^a
		Feed	Transition	Meter	Feed	Trans	Meter	Total	
High output compounding	LDPE	15	15-6.5 T ^b	6.5	6	12	6	24	2.1:1
General purpose	LDPE	15	15-5.5 T	5.5	4	10	6	20	2.4:1
	HDPE								
	PS								
Film	LDPE	15	15-3.0 S	3.0	10	1	9	20	4.3:1
High output compounding	PP powder	—	15-7.9 T	7.9	—	18	2	20	1.8:1
General purpose	PP	—	15-6.0 T	6.0	—	16	—	16	2.2:1
General purpose	PP	—	12.7-5.6 T	5.6	—	10.9	9.1	20	2.1:1
General purpose	POM	15	15-5.0 T	5.0	4	12	4	20	2.7:1
General purpose	PMMA	15	15-4.0 S	4.0	14	1	5	20	3.3:1
Compounding	Nylon 66	—	11.1-9.6 T/S	2.8	—	12+½	7.5	20	3.6:1
Film	PET	15	15-3.0 S	3.0	14	1	9	24	4.3:1
Film	UPVC	15	15-7.0 T	7.0	4	12	4	20	1.9:1
Low output compounding	UPVC	15	15-9.0 T	9.0	4	7	4	15	1.5:1

^a Cross-section basis

^b T = tapered; S = stepped

Fuente: Extruder Principles and Operation (1995)

Tanto el husillo como el cilindro tiene que soportar temperaturas que van a oscilar entre 150 y 190 grados centígrados, así que el material a usarse es un Acero Nitrurado 34 CrAlMo 7 (Anexo 13), el cual cubre los requerimientos.

2.8. PARÁMETROS TECNOLÓGICOS

Con los datos iniciales podemos hacer los cálculos necesarios para calcular la producción y potencia que requiere el husillo para su funcionamiento.

2.8.1. Cálculo de la producción¹⁶

El flujo volumétrico Q de la extrusora será determinado con la siguiente ecuación;

Ecuación 4. Flujo volumétrico

$$Q = \left(\frac{\alpha K}{K + \beta + \gamma} \right) n,$$

Dónde:

¹⁶ SAVGORODNY, V.K. “Proceso de extrusión y cálculo de los parámetros tecnológicos”.

Transformación de plásticos. Barcelona: Gustavo Gili S.A., 1973. p. 13

$K = 0,105 \text{ mm}^3$ la constante total de la forma geométrica de la cabeza perfiladora; (V.K Savgorodny, pág. 13)

n Las r.p.m. del husillo.

α y β Son las constantes de los flujos de arrastre y presión, que dependen solamente de las dimensiones del husillo:

Ecuación 5. Flujo de arrastre.

$$\alpha = \frac{\pi m D h \left(\frac{t}{m} - e \right) \cos^2 \varphi}{2}$$

Dónde:

φ : Angulo de la hélice

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{t}{\pi \times D}$$

Dónde:

D , Diametro

t , Paso

Teniendo en cuenta que $D = t$ tenemos:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{1}{\pi} = 17.65^\circ$$

h : Profundidad del canal en la zona de dosificación

m : Número de canales del husillo

e : Anchura de la cresta del filete

$$\alpha = \frac{\pi \times 1 \times 6 \times 0,46 \times 5,67 \times \cos^2 17,65}{2},$$

$$\alpha = 23,43 \text{ cm}^3,$$

Ecuación 6. Flujo de presión.

$$\beta = \frac{m h^3 \left(\frac{t}{m} - e \right) \sin \varphi \cdot \cos \varphi}{12L}$$

Dónde:

L : Longitud del husillo

$$\beta = \frac{1 \times (0,46)^3 (5,67) \sin 17,65 \cdot 17,65}{12 \times 144},$$

$$\beta = 8,78 \times 10^{-5} \text{ cm}^3.$$

Ecuación 7. Flujo de filtración.

$$\gamma = \frac{\pi^2 \times D^2 \times \delta^3 \times \tan \varphi}{10 \times e \times L}$$

Dónde:

δ : Holgura

$$\gamma = \frac{\pi^2 \times 6^2 \times 0,0064^3 \times \tan 17,65^\circ}{10 \times 0,60 \times 144}$$

$$\gamma = 3,43 \times 10^{-8} \text{ cm}^3.$$

2.8.2. Cálculo de las revoluciones del husillo

Para el cálculo debemos conocer la velocidad de cortadura¹⁷ igual $100 \frac{1}{s}$, la profundidad del canal podemos determinar las revoluciones del husillo para las condiciones indicadas.

Ecuación 8. Calculo de revolución del husillo.

$$\gamma = \frac{\pi \times D \times n}{h_2 \times 1s}$$

Reemplazando los valores conocidos

$$100 \frac{1}{s} = \frac{\pi \times 60 \text{ mm} \times n}{3 \text{ mm} \times 1s},$$

¹⁷ GÓMEZ, J. GUTIÉRREZ, J. *Diseño de una extrusora para plástico* [en línea]. Pereira 2007 [ref. de 24 marzo 2012]. Capítulo 3. Intervalos de velocidad de cortadura. Disponible en Word Wide Web: <<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1110/1/668413G633d.pdf>>

Despejando n :

$$n = \frac{\frac{100}{s} \times 3mm \times s}{\pi \times 60mm},$$

$$n = 1,59 \frac{rev}{s} \times 60 \frac{s}{1min},$$

$$n = 95 rpm.$$

Una vez obtenido todas las variables procedemos al cálculo del Flujo Volumétrico

$$Q = \left(\frac{\alpha K}{K + \beta + \gamma} \right) n$$

$$Q = \left(\frac{(23,43)(0,105)}{0,105 + 8,78 \times 10^{-5} + 3,43 \times 10^{-8}} \right) 95,$$

$$Q = 2224,9 \frac{cm^3}{min},$$

Siendo la densidad específica del polietileno¹⁸ $0,0009 \frac{kg}{cm^3}$ se tiene

$$= 0,0009 \frac{kg}{cm^3} \times 2224,9 \frac{cm^3}{min} \times 60 \frac{min}{h},$$

$$= 120,14 kg/h.$$

Esto nos indica que la producción de la maquina extrusora será de 120kg/h.

2.8.3. Cálculo de la potencia

La potencia es la rapidez con que se efectúa un trabajo por unidad de tiempo; conociendo el diámetro del husillo, el factor de proporcionalidad

¹⁸ MORALES MÉNDEZ, José Eduardo. “Influencia de las ramificaciones en el polímero”. Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos. México: Trillas, 2010. p. 110

($K = 66,7$)¹⁹ y el número de revoluciones podemos obtener la potencia dada. (V.K Savgorodny)

Ecuación 9. Potencia.

$$n = \frac{K^2 \times N}{\pi \times D^3}$$

Dónde:

n : numero de revoluciones

K : Factor de proporcionalidad

D : Diámetro del husillo

N : Potencia

Despejando N y reemplazando los valores tenemos:

$$N = \frac{90 \times \pi \times 60^3}{66,7^2},$$

$$N = 13.727 \text{ KW},$$

2.8.3.1. Potencia teórica

$$N = 18.4 \text{ HP}.$$

2.8.3.2. Potencia real usada

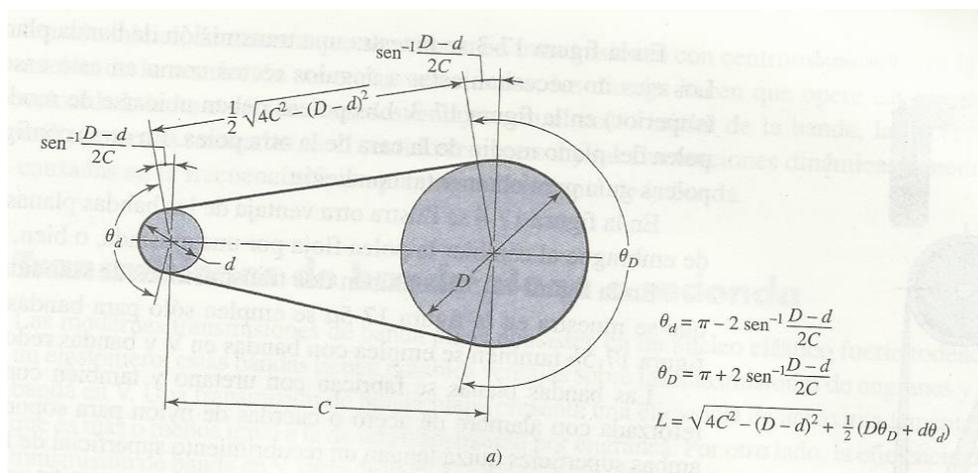
El motor a usarse según la Norma Nec (Anexo 5) 430-250 es de 20 Hp teniendo un factor de seguridad de 8.6%.

¹⁹ SAVGORODNY, V.K. “Proceso de extrusión y cálculo de los parámetros tecnológicos”. Transformación de plásticos. Barcelona: Gustavo Gili S.A., 1973. p. 13

2.9. IMPULSORES DE BANDA ²⁰

Es un elemento flexible capaz de transmitir potencia que asienta en forma ajustada sobre un conjunto de poleas o poleas acanaladas. Cuando se utiliza para reducción de velocidad, el caso más común, la polea acanalada más pequeña se monta en la flecha de alta velocidad, como la flecha de un motor eléctrico. La polea de mayor tamaño se monta en la máquina que es impulsada. La banda se diseña de manera que gire alrededor de las dos poleas sin deslizarse.

Figura 17. Geometría de bandas planas.



Fuente: Diseño de Ingeniería Mecánica de Shigley. (2008)

La banda (Anexo 12) se instala colocándola entre las dos poleas mientras que la distancia central entre ellas se reduce. Luego se separan las dos poleas acanaladas colocando la banda con una tensión inicial relativamente alta. Cuando se transmite potencia, la fricción provoca que la banda se adhiera a la polea impulsora, y, a su vez, se incrementa la tensión al lado que se denomina “lado tensionado del impulsor”. La fuerza de tracción que se genera en la banda ejerce una fuerza tangencial sobre la polea acanalada que es impulsada, por consecuencia, se aplica un torque a la flecha que es impulsada. El lado opuesto de la banda aún está en tensión, pero de menor valor, por lo tanto se le da el nombre de “lado flojo” (figura 16).

²⁰ BUDYNAS, Richard G. NISBETT, Keith J. “Transmisiones de banda plana o redonda”. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A., 2008. p.863-887

La velocidad de giro del husillo es de 90 rpm el cual va acoplado a un reductor de marca YB de relación 10:1 tenemos que las revoluciones requeridas son:

Ecuación 10. Velocidad de giro.

$$n = (95 \text{ rpm})(10) = 950 \text{ rpm}$$

Como la velocidad estándar del motor usado es 1700 rpm, con lo que se puede obtener la relación de velocidad.

Ecuación 11. Relación de velocidad.

$$V. R. = \frac{1800}{900} = 1.8$$

Se propone una polea de 140 mm como estándar y se calcula el diámetro requerido de la otra para poder tener la velocidad necesaria

Ecuación 12. Calculo del diámetro de la polea conducida

$$D_1 = D_2 \times VR = (140 \text{ mm})(1.8) = 252 \text{ mm}$$

2.10. SISTEMA DE TRANSMISIÓN

La máquina extrusora necesita un mecanismo de transmisión de engranajes que le permita girar al husillo en un rango adecuado de velocidad, un conjunto de cojinetes de apoyo que deberán soportar el empuje axial del husillo hacia atrás.

El sistema de cojinetes de apoyo del empuje permite detener las altas presiones de retroceso del husillo, generadas en la zona del cabezal y la boquilla y en el extremo anterior de aquel

Además de soportar las cargas axiales, el sistema y los cojinetes de apoyo deben transmitir la potencia del sistema motriz al husillo, precisamente a la velocidad de este, y por tanto a un par elevado, además debe mantener al tornillo centrado perfectamente con el cilindro mientras aquél gira.

La caja reductora instalada cumple con los siguientes parámetros

Tabla 3. Caja Reductora

MODEL	ZLYJ 173
Allowable input power (kw)	37.8
Output Torque (N.m)	2409
Allowable output shaft axial thrus (KN)	153
Screw Diameter(mm)	65
Input power (kw)	18.5
Input speed (rpm)	900
Output speed (rpm)	90

Según Anguita, R. (1977)²¹ una extrusora de 60 mm de diámetro puede generar un empuje axial de 1.65 Toneladas métricas, la caja reductora instalada según datos del fabricante puede admitir hasta 15.6 Toneladas métricas lo que nos garantiza su funcionamiento correcto.

2.11. CONSTRUCCIÓN

El proceso de manufacturar los tornillos se basan en especialmente en dos el método artesanal y moderno cnc (control numérico computarizado)

Por su mayor precisión y mejor calidad de productos hemos escogido el control numérico computarizado para manufacturar el tornillo, debido a que esta tecnología está siendo introducida en nuestro país, el costo de fabricación es muy elevado por lo que se optó por importar el husillo y el cilindro.

Ya que el tornillo y el cilindro deben ser de características similares de resistencia y de dureza.

²¹ MORALES MÉNDEZ, José Eduardo. “Sistema de transmisión de potencia del extrusor”. Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos. México: Trillas, 2010. p. 229-231

Los datos técnicos de la extrusora seleccionada en este trabajo se detallan a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 4. Datos Técnicos.

Producción:	120 kg/h
Relación L/D:	24:1
Diámetro del Husillo:	60 mm
Velocidad de giro:	95 rpm
Consumo de energía eléctrica de los elementos de calefacción (Kw)	36
Potencia del motor (Hp)	20

Fuente: Autor

CAPÍTULO III

SISTEMA DE CONTROL

3.1. INTRODUCCIÓN:

Este capítulo estará destinado al control eléctrico de la extrusora teniendo como objetivos alcanzar el desempeño óptimo, productividad máxima, beneficio máximo, costo mínimo y la utilización mínima de la energía²².

La variable principal que vamos a controlar es la temperatura en el sistema de calentamiento del cilindro; que se puede considerar como crítica a la hora de procesar la materia prima. Para lo cual se utilizará un controlador que es un instrumento que toma la señal desde un sensor, la compara y ajusta la salida de control

3.2. SISTEMA DE CALENTAMIENTO DEL CILINDRO:

Hay dos fuentes de calor en el barril para poder llevar el plástico a una temperatura deseada. Primero está el calor que se transmite por medio del barril y que por lo regular es generado por resistencias eléctricas, el otro es generado mediante la fricción causada por el tornillo y el material.

Durante los primeros ciclos de la máquina, la mayor cantidad de calor proviene de las resistencias, una vez que ya se está corriendo el ciclo de forma constante, la fricción del tornillo genera una buena parte de calor, aunque las resistencias se deben mantener funcionando para tener un control preciso de la temperatura en el proceso

Las resistencias eléctricas tienen forma de banda y se colocan alrededor del barril. Existen diferentes tipos de resistencias, entre las que podemos nombrar la que tienen núcleo de silicatos, núcleo cerámico y núcleo de fundición de aluminio. Su nombre lo reciben por el aislamiento que utilizan, siendo las de

²² AMADORI, Aldo. *Control Eléctrico Control* [en línea]. El ABC de la automatización. [ref. de 12 de agosto 2012]. Disponible en Web: < http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/Control_Electrico.pdf>

núcleo cerámico las que tienen un mejor funcionamiento y las que usamos en este proyecto.

El control de estas resistencias se lo realiza por medio de termopares, los cuales están hechos de un material sensible a la temperatura, son colocadas en el interior del barril para tener una medición real de la temperatura en el metal. Los termopares son conectados a sistemas de medición de temperatura conocido como pirómetros, este sistema tiene como función monitorear la temperatura y realizar diferentes acciones, ya sea para aumentar o reducir el calor generado por las resistencias.

3.3. PARÁMETROS DE CONTROL DEL PROCESO

Los principales parámetros para el control del proceso de extrusión son:

- Temperatura de extrusión.
- Velocidad de extrusión o caudal.

3.3.1. Temperatura de Extrusión:

El principal efecto de la modificación de la temperatura de extrusión es la viscosidad del polímero (su resistencia al flujo). La selección de la temperatura de extrusión debe hacerse de manera tal que permita reducir el consumo de potencia del motor de la extrusora a valores tales que estén en el intervalo de trabajo del equipo y, adicional mente, se alcance una viscosidad del polímero adecuada para su procesamiento. La temperatura óptima de extrusión de cada resina dependerá de su distribución de pesos moleculares, representado desde el punto de vista reológico por su viscosidad y, más popularmente, por su índice de fluidez, éste último de vaga precisión.

Los efectos de la temperatura de extrusión se observan más allá de la salida de la boquilla. Los principales efectos de la temperatura de extrusión resultan reflejados en las características de la superficie del material extruido y el grado de cristalización del mismo. Una de las

propiedades más afectada por la modificación de la temperatura de extrusión es la resistencia al impacto en los productos.

3.3.2. Velocidad de Extrusión:

Generalmente en los procesos de extrusión el objetivo de la optimización de las variables de procesamiento es el logro del máximo caudal (Kg. de resina procesada por unidad de tiempo) que permita la obtención de un producto de alta calidad.

3.4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

El desarrollo del sistema de control permite llevar un proceso controlado en la fusión del polímero, evaluando permanentemente un fallo o problema, para ello se han utilizado sensores que miden temperatura los cuales envían señales al sistema de control los cuales remiten una respuesta inmediata a los actuadores para la respectiva corrección.

El sistema de control ha sido diseñado de acuerdo a las necesidades del medio de aplicación.

El procedimiento realizado por el sistema de control es el siguiente:

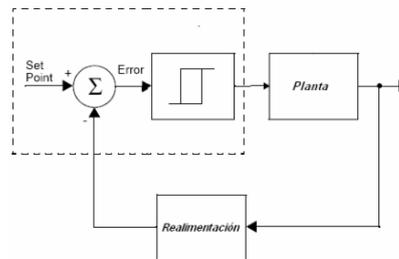
1. Adquirir información de los diferentes sensores en el sistema de extrusión
2. Procesar y controlar la información
3. Transmitir una señal a los actuadores para la corrección del fallo si fuera necesario

3.4.1. Control On-Off²³

Es la regulación más simple y económica, se utiliza en aplicaciones que pueda admitir una oscilación continua entre dos límites.

²³ SOTOMAYOR, Nelson. *Control con microprocesadores* [en línea]. Quito, Septiembre 2009 [ref. marzo 2012]. "Técnicas de Control, Control On - Off". p. 36. Disponible en Web: <<http://ciecfie.epn.edu.ec/CControlC/materias/cmicos/CONTROL%20CON%20MICROPROCESADORES.pdf>>

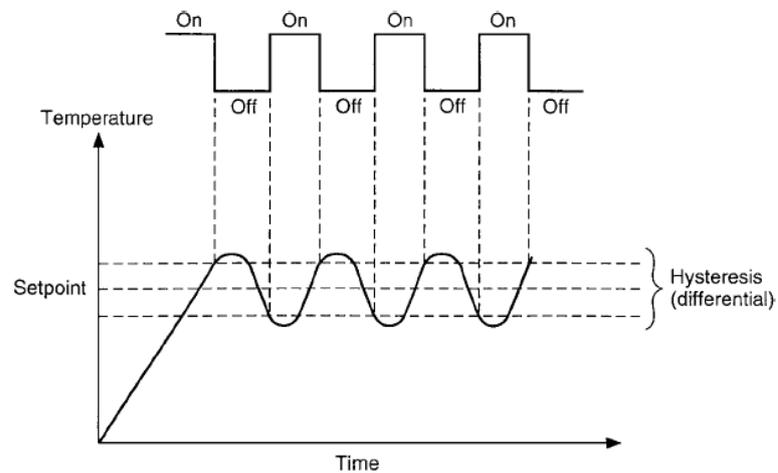
Figura 18. Lazo del Control On - Off



Fuente: Control con Microcontroladores, Nelson Sotomayor.

La salida de control estará 100% ON (activada) o 100% OFF (desactivada) operando dentro de un rango cercano a los puntos de activación; Para evitar un número excesivo de conmutaciones se incluye un lazo de histéresis.

Figura 19. CONTROL ON – OFF.



Fuente: Ingeniería de control moderna. OGATA, Katsuhiko.²⁴

La histéresis es como una oposición a experimentar cualquier cambio,

²⁴ OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. 4ta ed. Madrid: Pearson Educación, 2003. 984p. ISBN: 84-205-3678-4

Su respuesta es de tipo todo o nada, de forma que se conecta cuando la variable regulada ha descendido hasta un valor por debajo de la variable de consigna y solo se desconecta cuando dicha variable supera el límite superior de la variable de consigna.

El set point es de 160° C siendo esta la temperatura de fusión del HDPE

Las niquelinas elevaran la temperatura del barril hasta 160° C, la está siendo monitoreada por una termocupla cuando alcanza el set point ideal, una vez alcanzada dicha temperatura el pirómetro digital desconecta la energía, y la vuelve a conectar dependiendo de la histéresis.

3.5. DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE FUERZA²⁵

El diseño de los circuitos de fuerza comprende el dimensionamiento de los alimentadores de los circuitos derivados así como también de los aparatos de maniobra y protección que fueron instalados en el sistema electromecánico.

3.5.1. Fuente principal de alimentación

De acuerdo a exigencias del fabricante el sistema necesita de un servicio trifásico 220 VAC

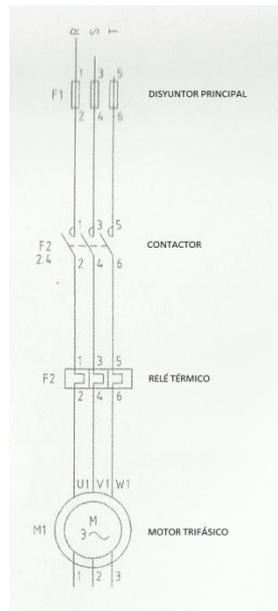
3.5.2. Diagrama de fuerza para el arranque del motor:

El diagrama implementado para cada uno de los circuitos para el motor y para las resistencias eléctricas

²⁵ CUSHICÓNDOR, Milton. *Automatización de la estación satelital del observatorio astronómico de Quito*. [en línea]. Quito 2007 [ref. de 30 marzo 2012]. Capítulo 1. Diseño de circuitos de fuerza.

Disponible en Word Wide Web: < <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/696/1/CD-1100.pdf>>

Figura 20. Circuito de Fuerza – Motor



Fuente: Autor

3.5.3. Dimensionamiento del conductor del motor

La norma Nec en la sección 430-22, establece que el conductor que alimenta a un solo motor de corriente alterna, debe tener una capacidad no menor del 125 % de la corriente nominal del motor.

Para la elección del conductor del motor se tiene:

Ecuación 13. Potencia

$$I = 1.25 \times \frac{I_{pc}}{Factor}$$

Dónde:

$$I_{pc} = 59.4;$$

$$Factor = 0,8;$$

Se toma un factor de 0.80 que corresponde al cableado de 1 a 3 conductores portadores de corriente por ducto.

$$I = 1.25 \times \frac{59.4}{0.8} = 92.81$$

Para el cableado del circuito de fuerza del motor utilizamos un conductor flexible # 4 AWG que tiene una capacidad de conducción de 95 Amp.

3.5.4. Dimensionamiento de contactores.

Para dimensionar los contactores debemos considerar:

- Tipo de accionamiento
- Voltaje nominal
- Intensidad nominal
- Categoría de utilización establecido por la norma IEC
- Frecuencia
- Voltaje de aislamiento
- Clase de servicio
- Voltaje de la bobina y número de contactos auxiliares

Para criterio de seguridad se considera un sobredimensionamiento de 125% de la potencia nominal del motor

Para la elección del contactor del motor se tiene:

Ecuación 14. Potencia del contactor.

$$P = 1.25 \times P_n Motor$$

$$P = 1.25 \times 20 = 25 Hp$$

De acuerdo a este criterio el contactor utilizado tiene las siguientes características:

- Tipo de accionamiento: Electromagnético
- Voltaje nominal: 220V
- Intensidad nominal: 59.4

- Categoría de utilización: Norma IEC 947-4: AC3
- Frecuencia: 60 Hz
- Voltaje de aislamiento U_i : 660V
- Clase de servicio: Intermitente
- Voltaje de la bobina: 240V
- contactos auxiliares: 1 NO y 1 NC

3.5.5. Dimensionamiento del relé térmico de protección

Se destinan a controlar el calentamiento de los arrollamientos de los motores y a provocar la apertura automática del contactor cuando se alcanza un calentamiento límite.

Poseen siempre un elemento fundamental que se alienta en función de la corriente del motor y que provoca la apertura automática de un contacto.

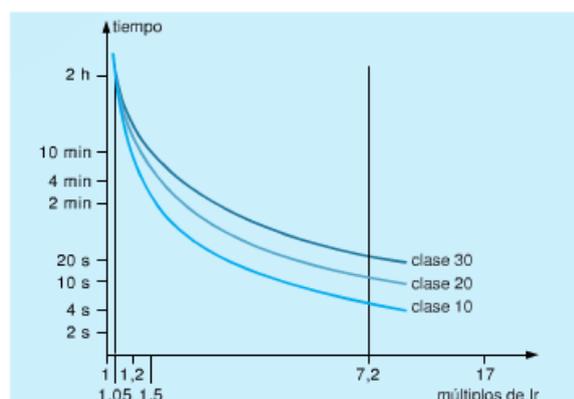
Los datos técnicos que deben considerarse en la especificación de un relé térmico para su selección, son siguientes:

RANGO DE AJUSTE DE CORRIENTE: Este valor se escoge en base a la corriente nominal del motor, $\pm 25\%$.

VOLTAJE NOMINAL DE OPERACIÓN: Corresponde al voltaje nominal del motor

CURVA DE OPERACIÓN DEL RELÉ: Relaciona el tiempo de disparo del relé en función de la corriente que circula por el mismo

Figura 21. Curvas de disparo de los relés térmicos



Fuente: Manual Electrotécnico – Telemecanique

Según la norma IEC 947-4-1-1 responde a esta necesidad definiendo tres tipos de disparo:

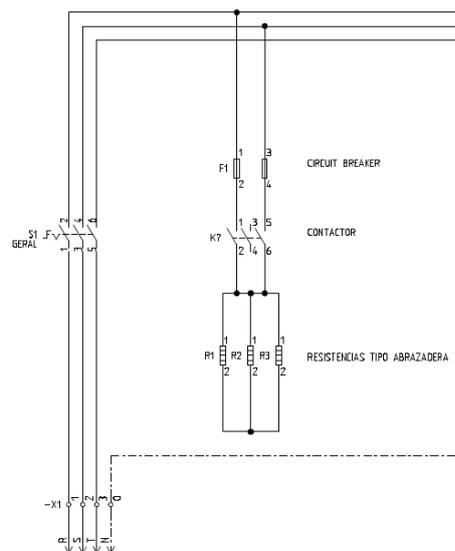
- Relés de clase 10
Valido para todas las aplicaciones corrientes con una duración de arranque inferior a 10 segundos.
- Relés de clase 20
Admiten arranques de hasta 20 segundos de duración
- Relés de clase 30
Para arranques con un máximo de 30 segundos de duración.

De acuerdo a este criterio el contactor utilizado tiene las siguientes características:

- Rango de ajuste de corriente: 44.5 – 74.25 A
- Voltaje nominal de operación: 220V
- Curva de operación del relé: 20

3.5.6. Selección del conductor para niquelinas

Figura 22. Circuito de Fuerza - Niquelinas



Fuente: Autor

Partimos de la ecuación de la corriente para realizar el cálculo de la intensidad de corriente.

Ecuación 15. Intensidad de corriente

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos \varphi} = \frac{1.5KW}{\sqrt{3} \times 220V \times 0.65} = 6 A$$

Dónde:

P: Potencia de Niquelinas 1500 Watts

Para el cableado del circuito de conexión de las niquelinas, se propone un conductor flexible # 14 AWG que tiene una capacidad de conducción de 20 Amp. Además este cable necesita ser a altas temperaturas por lo que se está usando un conductor de cobre electrolítico, flexibilidad clase V, aislamiento caucho de silicona, cubierta fibra de vidrio impregnada de silicona. Ver hoja técnica en el Anexo 4.

3.5.7. Selección del contactor para niquelinas.

Características con las cuales se seleccionó el contacto son las siguientes:

- Tipo de accionamiento: Electromagnético
- Voltaje nominal: 220V
- Intensidad nominal: 32 A
- Categoría de utilización: Norma IEC 947-4: AC3
- Frecuencia: 60 Hz
- Voltaje de aislamiento U_i : 660V
- Clase de servicio: Intermitente
- Voltaje de la bobina: 240V
- contactos auxiliares: 1 NO y 1 NC

3.5.8. Dimensionamiento del disyuntor general

La función principal de un disyuntor es la protección de cortocircuitos y casi con igual importancia, la protección contra sobrecarga y en algunos casos contra bajo voltajes de acuerdo a su aplicación, los disyuntores operan a través de relés o disparadores instalados en sus vías de corriente.

La norma NEC en su artículo 430-57 nos dice “El interruptor en la alimentación de un motor tendrá una intensidad de régimen continuo mínimo de 115% de la intensidad a plena carga del motor se debe tomar en cuenta factores de corrección cuando son interruptores termomagnéticos de caja moldeada, ya que este estará calibrado a 25 ° C”

Ecuación 16. Corriente de alimentación

$$I = Factor \times I_{pc}(Motor) + \sum I_{pc}(Niquelinas) + I(C.C)$$

Dónde:

I_{pc} = Corriente nominal

$Factor = 1.15$

$$I = (1.15 \times 59.4) + 12(6) + (5)$$

$$I = 145.31 \text{ Amp}$$

El disyuntor instalado tiene una capacidad de 160 Amp.

3.6. DISEÑO DE LOS CIRCUITOS DE CONTROL MOTOR

3.6.1. Pulsadores

Son aparatos de maniobra clasificados como interruptores, que tienen retroceso, que son accionados manualmente y se emplean para el mando de motores eléctricos, para abrir o cerrar circuitos auxiliares, para señalización, para el mando de relés, etc.

Figura 23. Pulsador NO



Fuente: Autor

3.6.2. Señalización de los pulsadores

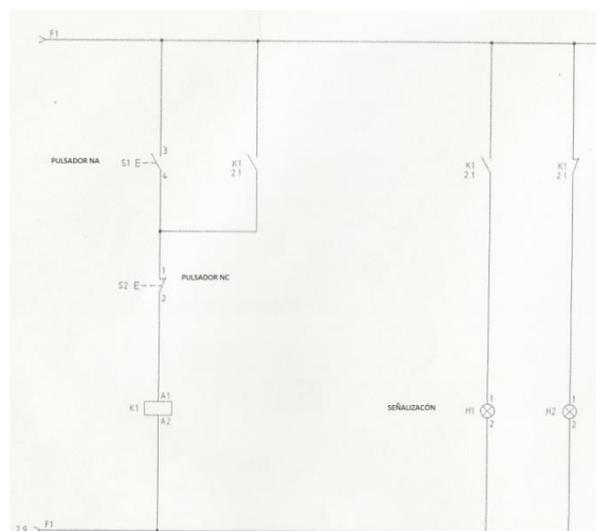
La señalización de los interruptores es óptica, está situada fuera del botón pero en el panel.

Figura 24. Indicador Luminoso



Fuente: Autor

Figura 25. Circuito de control



Fuente: Autor

3.7. DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL NIQUELINAS

3.7.1. Interruptores:

Son aparatos de maniobra para la conexión, desconexión o cambio de circuitos eléctricos en forma voluntaria o automática; en las cuales todas las piezas que sirven para la unión o la interrupción están fijamente montadas sobre una base común.

Figura 26. Interruptor

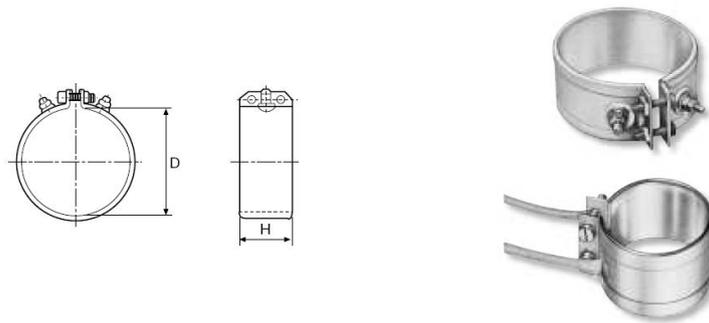


Fuente: Autor

3.7.2. Resistencias:

El cilindro cuenta con resistencias eléctricas tipo abrazadera que proporcionan una parte de la energía térmica que el material requiere para ser fundido

Figura 27. Resistencias tipo abrazadera.



Fuente: Autor

3.7.3. Termocupla:

Es un transductor formado por la unión de dos metales distintos que produce un voltaje que es función de la diferencia de temperatura.

3.7.3.1. Termocupla tipo J:

Este tipo de termocupla es conocida como la termocupla hierro – constantan donde el hierro es el conductor positivo, mientras que para el conductor negativo se recurre a una aleación de 55% de cobre y 45% de níquel (constantan)

Las termocuplas Tipo J resultan satisfactorias para uso continuo en atmósferas oxidantes, reductoras inertes y en vacío hasta 760°C. Por encima de 540°C, el alambre de hierro se oxida rápidamente, requiriéndose entonces alambre de mayor diámetro para exceder su vida en servicio. La ventaja fundamental de la termocupla Tipo J es su bajo costo

Las siguientes limitaciones se aplican al uso de las termocuplas Tipo J:

- No se debe usar en atmósferas sulfurosas por encima de 540°C
- A causa de la oxidación y fragilidad potencial, no se las recomienda para temperaturas inferiores a 0°C
- No se deben someter a ciclos por encima de 760°C, aun durante cortos períodos de tiempo.

Figura 28. Termocupla.



Fuente: Autor

3.7.4. Pirómetro

Los pirómetros son aparatos idóneos para realizar mediciones de precisión de temperaturas sin contacto ver Anexo 7

Figura 29. Pirómetro.



Fuente: Autor

3.4.5. Amperímetro

Un amperímetro es un instrumento que sirve para medir la intensidad de corriente que está circulando por un circuito eléctrico.

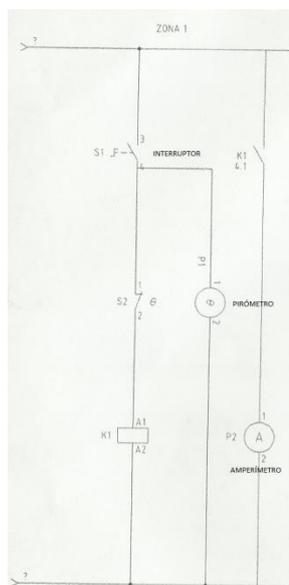
Figura 30. Amperímetro.



Fuente: Autor

Se sugiere la instalación de este instrumento, con la finalidad principal de dar a conocer la cantidad de corriente que circula por el conductor en todo momento, ayudando de esta manera al buen funcionamiento de los equipos y nos ayuda a detectar bajas repentinas de corriente.

Figura 31. Circuito de Control Motor



Fuente: Autor

3.8. MONTAJE E INSTALACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS

3.8.1. Montaje del disyuntor principal

La función principal es la de proteger todo el sistema su montaje se realizó en la parte interior del tablero de control

Figura 32. Disyuntor Principal



Fuente: Autor

3.8.2. Montaje de los pulsadores

Los pulsadores fueron ubicados en la parte superior del tablero como se muestra en la figura 33. Ver plano eléctrico N° 1

Figura 33. Pane de control.



Fuente: Autor

3.8.3. Montaje del circuito de control

El sistema de control se instaló dividido en 4 zonas en la parte superior del tablero, tal como se muestra en la figura, ver plano eléctrico N° 3

Figura 34. Panel energizado.



Fuente: Autor

CAPÍTULO IV

TRANSFERENCIA DE CALOR

4.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo se describe la fundamentación teórica necesaria para la realización de la cantidad de calor necesario para fundir el plástico.

4.2. TRANSFERENCIA DE CALOR

En física, la transferencia de calor es el paso de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura. Cuando un cuerpo, por ejemplo, un objeto sólido o un fluido, está a una temperatura diferente de la de su entorno u otro cuerpo, la transferencia de energía térmica, también conocida como transferencia de calor o intercambio de calor, ocurre de tal manera que el cuerpo y su entorno alcancen equilibrio térmico. La transferencia de calor siempre ocurre desde un cuerpo más caliente a uno más frío. Cuando existe una diferencia de temperatura entre dos objetos en proximidad uno del otro, la transferencia de calor no puede ser detenida; solo puede hacerse más lenta.

Los modos son los diferentes tipos de procesos de transferencia de calor. Hay tres tipos:

Conducción: transferencia de calor que se produce a través de un medio estacionario -que puede ser un sólido o un fluido- cuando existe un gradiente de temperatura.

Convección: transferencia de calor que ocurrirá entre una superficie y un fluido en movimiento cuando están a diferentes temperaturas.

Radiación: en ausencia de un medio, existe una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies a diferentes temperaturas, debido a que todas las

superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas.²⁶

4.3. POTENCIA DE LOS CALEFACTORES²⁷

La potencia que deberán suministrar las bandas calefactoras para poder elevar la temperatura del cilindro y del husillo, está en función del calor necesario que se produce en el estado transitorio. Se debe considerar este estado, puesto que el cilindro debe ser calentado hasta alcanzar la temperatura de trabajo antes de empezar a extruir el material plástico.

El cilindro y el husillo se encuentran al arrancar el equipo a temperatura ambiente, iniciado el proceso, se cierra el circuito de corriente de los elementos calefactores, los cuales comienzan a transferir calor, el mismo que se va acumulando y elevando su temperatura conforme pasa el tiempo.

4.3.1. Balance energético en el estado transitorio

Este balance se lo hace, considerando el cilindro y el husillo como dos sistemas, el husillo no gira y se desprecia el aire que se encuentra en el interior de los mismos.

Al realizar el balance energético en los sistemas de la figura 20 se tiene:

$$E_{ec} = E_{ac} + E_{sc} + E_{pc}$$

$$E_{eh} = E_{ah}$$

Dónde:

E_{ec} : Energía que entra al cilindro, proviene de los calefactores eléctricos (W).

E_{ac} : Energía almacenada por el cilindro (W).

²⁶ INCROPERA, Frank P. *Fundamentos de transferencia de calor*. 4a ed. México: Prentice Hall, 1999. 912 p. ISBN : 970-17-0170-4

²⁷ PALACIOS, O. RAMÍREZ, J. "Diseño y construcción de una máquina extrusora por tornillo para material plástico" [Tesis Ing. Mec.]. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, 1992

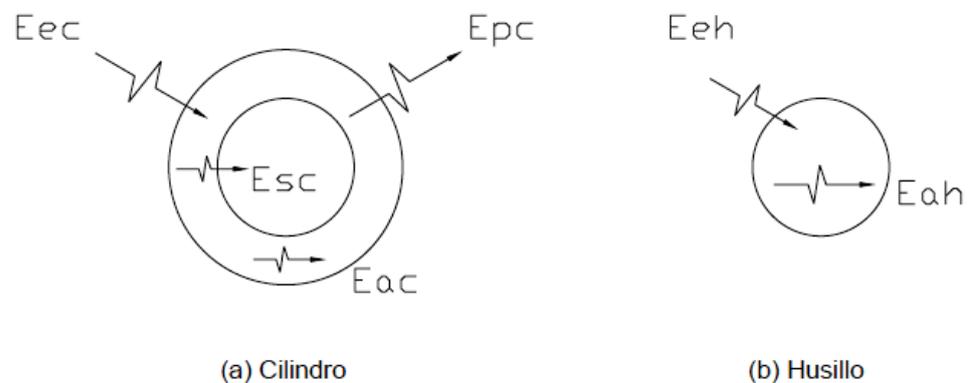
E_{pc} : Energía que sale del cilindro al exterior (W).

E_{sc} : Energía que sale desde el cilindro hacia el tornillo (W).

E_{eh} : Energía que entra al husillo, proviene del cilindro (W).

E_{ah} : Energía almacenada por el husillo (W).

Figura 35. Sistema de análisis para el balance energético.



Fuente: Palacios, O. y Ramírez, J. (1992)

Considerando que existe un contacto térmico ideal entre el cilindro y el husillo, se tiene:

$$E_{sc} = E_{eh}$$

Ecuación 17. Energía almacenada por el cilindro.

$$E_{ac} = m_c \cdot Cp_c \left(\frac{dT_c}{dt} \right)$$

Dónde:

m_c : Masa del cilindro.

Cp_c : Calor específico del material del cilindro (0.11 Kcal/Kg °K, acero).

$\frac{dT_c}{dt}$: Variación de la temperatura respecto al tiempo.

Ecuación 18. Energía que sale del cilindro hacia el exterior.

$$E_{pc} = h \cdot A [T_{c(t)} - T_{\alpha}]$$

Dónde:

h : Coeficiente de transferencia de calor ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$).

A : Área de transferencia de calor (m^2).

$T_{c(t)}$: Temperatura del cilindro, variable con el tiempo ($^\circ\text{C}$).

T_{α} : Temperatura del medio ambiente ($^\circ\text{C}$).

Ecuación 19. Energía almacenada por el husillo.

$$E_{ah} = m_h \cdot Cp_h \cdot \left(\frac{dT_h}{dt} \right)$$

Dónde:

m_h : Masa del husillo.

Cp_h : Calor específico del material del husillo (0.11 Kcal/Kg $^\circ\text{K}$, acero).

$\frac{dT_h}{dt}$: Variación de la temperatura respecto al tiempo.

Para facilitar la solución de las ecuaciones obtenidas por la figura 20, se considera que el husillo y el cilindro tienen la misma temperatura conforme varía el tiempo, consideración debida a que la termocupla se la coloca lo más cerca posible al polímero, en las cercanías del husillo, y dicho sensor indica la temperatura del interior del cilindro y del exterior del husillo. Al combinar las ecuaciones y reemplazando además las ecuaciones (14), (15) y (16), se llega a la siguiente expresión:

$$E_{ec} = (m_c \cdot Cp_c + m_h \cdot Cp_h) \left(\frac{dT}{dt} \right) + h \cdot A \cdot [T_{c(t)} - T_{\alpha}]$$

Esta ecuación se resuelve haciendo las siguientes sustituciones:

$$Q = E_{ec}$$

$$Q_{(t)} = T_{(t)} - T_{\alpha}$$

$$dQ_{(t)} = dT_{(t)}$$

$$M = \frac{h \cdot A}{m_c \cdot Cp_c + m_h \cdot Cp_h}$$

$$P = \frac{Q}{m_c \cdot Cp_c + m_h \cdot Cp_h}$$

La ecuación se reduce a:

$$\frac{dQ_{(t)}}{dt} + M \cdot Q_{(t)} = P$$

Resolviendo la ecuación diferencial se tiene:

$$Q_{(t)} = Q_0 \cdot e^{(-Mt)} + [1 - e^{(-Mt)}] \left(\frac{P}{M} \right)$$

Sustituyendo los valores anteriores, y considerando que $T_{c(0)} = T_{ambiente}$, la ecuación queda de la siguiente forma:

$$T_{(t)} = \left[1 - e^{\left(-\frac{h \cdot A t}{m_c \cdot Cp_c + m_h \cdot Cp_h} \right)} \right] \left(\frac{Q}{h \cdot A} \right) + T_{\alpha}$$

En esta ecuación interviene el coeficiente de transferencia de calor por convección, el cual se lo evalúa lo siguiente:

4.4. CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Este coeficiente es igual a la suma del coeficiente de convección y del coeficiente de radiación:

Ecuación 20. Coeficiente por Transferencia de Calor.

$$h = h_c + h_r$$

Dónde:

h_c : Coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

h_r : Coeficiente de transferencia de calor por radiación ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)

Los valores de h_c y h_r se los calcula a continuación:

4.4.1. Determinación del coeficiente de convección

La transferencia de calor por convección, se presenta siempre que un cuerpo sólido es colocado en la vecindad de un fluido que está a diferente temperatura que la superficie de dicho cuerpo.

Ecuación 21. Temperatura media de película.

$$T_f = \frac{T_s + T_\alpha}{2}$$

Dónde:

T_s : Temperatura de la superficie del cuerpo sólido

Las propiedades del aire deben ser evaluadas a la temperatura T_f .

La longitud característica en el número de Grashof, del cilindro horizontal grande, es su diámetro; por lo tanto:

El número de Grashof²⁸ puede interpretarse físicamente como un grupo adimensional que representa la razón de las fuerzas de flotación a las fuerzas viscosas en el sistema de flujo de convección libre.

Ecuación 22. Número de Grashof.

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta t \cdot D^3}{\gamma^2}$$

Dónde:

²⁸ HOLMAN, J.P. “Transferencia de calor por convección libre en una placa vertical”. Transferencia de calor. 10a ed. México: Continental, S.A., 1999. p. 305

g : Gravedad.

D : Diámetro del cilindro.

Δt : Variación de Temperatura.

El producto $Pr \cdot Gr$, es el número de Grayleigh que permite encontrar el número de Nusselt, así:

El número de Nusselt²⁹ es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción.

Ecuación 23. Número de Nusselt para cilindros horizontales.

$$Nu = \left(0.6 + \frac{0.387Ra^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

Dónde:

Pr : Número de Prandtl.

Ecuación 24. Número de Nusselt para convección libre.

$$Nu = \frac{hc \cdot D}{k}$$

Despejando hc y reemplazando valores se obtiene:

Ecuación 25. Coeficiente de convección.

$$hc = \frac{Nu \cdot k}{D} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°k]}$$

²⁹ HOLMAN, J.P. “La capa límite térmica”. Transferencia de calor. 10a ed. México: Continental, S.A., 1999. p. 218

4.4.2. Determinación del coeficiente de radiación

Las superficies metálicas oxidadas corrientes, son buenos radiadores de calor, las pérdidas que se verifican dependen de la temperatura absoluta, del área de la superficie y de la emisividad de la misma.

Ecuación 26. Pérdidas por radiación.

$$q = A \cdot \epsilon_1 \cdot \sigma (T_s^4 - T_a^4)$$

Dónde:

A: Área de transferencia de calor.

ϵ_1 : Emisividad (radiación térmica) de la superficie = 0.61.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8}$ (W/m² · °k).

T_s: Temperatura absoluta de la superficie.

T_a: Temperatura absoluta ambiental.

El calor de pérdidas por radiación, considerando un coeficiente de pérdidas es:

$$q = A \cdot hr \cdot (T_s - T_a)$$

De las ecuaciones (9) y la anterior, se determina:

Ecuación 27. Coeficiente de radiación.

$$hr = \frac{\epsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_a^4)}{T_s - T_a}$$

4.5. ESTIMACION DE LAS PÉRDIDAS DE CALOR

4.5.1. Pérdidas por conducción

El cilindro transmite calor a la garganta y a los soportes con los cuales entra en contacto. En el diseño de estos elementos de la extrusora se ha

tratado de minimizar la conducción de calor entre las superficies, reduciendo al mínimo el contacto físico de la superficie del cilindro con los soportes y con la garganta, estas pérdidas se desprecian.

4.5.2. Pérdidas por radiación

Las pérdidas por radiación se las determina mediante:

Ecuación 28. Pérdidas por radiación.

$$Qr = S \cdot \epsilon_1 \cdot \sigma \cdot (Ts^4 - T\alpha^4)$$

Dónde:

S : Área de cada zona.

ϵ_1 : Emisividad de la superficie.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann = $5.67 \cdot 10^{-8}$ (W/m² ·°k)

Ts : Temperatura absoluta de la superficie.

$T\alpha$: Temperatura absoluta ambiental.

4.5.3. Pérdidas por convección

El aire caliente en contacto con la superficie lateral del cilindro tiende a elevarse a causa de su menor densidad comparada con el aire más frío. Este proceso establece un flujo de corriente de aire que se eleva al techo, llevando consigo una cantidad importante de calor desde las partes calientes de la extrusora.

Aplicando la ley de enfriamiento de Newton, se tiene que:

Ecuación 29. Pérdidas por convección.

$$Qc = h_c \cdot \Delta T \cdot S$$

Las pérdidas calóricas por convección, se las determina utilizando el coeficiente de convección calculado para el sistema.

4.6. INCREMENTO DE LA ENERGÍA INTERNA DEL POLÍMERO

La siguiente relación, permite determinar:

Ecuación 30. Cantidad teórica de calor.

$$Esp = \frac{dm}{dt} \cdot Cp \cdot (Ts - T\alpha)$$

Dónde:

Esp : Cantidad de calor agregada al polímero (kcal/h).

$\frac{dm}{dt}$: Flujo másico del polímero en la zona (Kg/h).

Cp : Calor específico del polímero.

Ts : Temperatura del polímero a la salida (°C).

$T\alpha$: Temperatura del polímero a la entrada (°C).

4.7. POTENCIA DE LAS BANDAS CALEFACTORAS

4.7.1 Temperatura media de la película.

De la ecuación (21) tenemos:

$$Tf = \frac{Ts + T\alpha}{2}$$

Donde;

$$Ts = 453.15^{\circ}K = 180^{\circ}C$$

$$T\alpha = 293.15^{\circ}K = 20^{\circ}C \quad \text{Temperatura ambiente.}$$

$$Tf = \frac{453.15 + 293.15}{2}$$

$$Tf = 373.15^{\circ}K$$

Propiedades del aire a $373.15^{\circ}K$.

$$Pr = 0.695$$

Número de Prandtl.

$$\gamma = 2.3665 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

Viscosidad Cinemática.

$$k = 0.0319 \frac{W}{m^{\circ}K}$$

Conductividad Térmica.

$$\beta = \frac{1}{Tf}$$

$$\beta = \frac{1}{373.15}$$

$$\beta = 2.68 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$$

4.7.2 Número de Grashof

De la ecuación (22) tenemos:

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot \Delta t \cdot D^3}{\gamma^2}$$

Dónde:

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2} \text{ Gravedad.}$$

$$D = 0.152 \text{ m Diámetro del cilindro horizontal.}$$

$$\Delta T = T_s - T_a$$

$$\Delta T = 453.15 - 293.15$$

$$\Delta T = 160^\circ\text{K}$$

$$Gr = \frac{(2.68 \cdot 10^{-3}) \cdot (9.81) \cdot (160) \cdot (0.152)^3}{2.3665 \cdot 10^{-3}}$$

$$Gr = 6.24$$

$$R_a = P_r \cdot G_r$$

$$R_a = (0.695) \cdot (6.24)$$

$$R_a = 4.33$$

4.7.3 Cálculo de número de Nusselt

Reemplazando en la ecuación (23) tenemos:

$$N_u = \left(0.6 + \frac{0.387 \cdot R_a^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{P_r} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

$$Nu = \left(0.6 + \frac{0.387 \cdot (4.33)^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{0.695} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2$$

$$Nu = 1.011$$

4.7.4 Cálculo del coeficiente de convección

De la ecuación (25) tenemos:

$$h_c = \frac{Nu \cdot k}{D} = \frac{0.8375 \cdot 0.0319}{0.152}$$

$$h_c = 0.2121 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

4.7.5 Coeficiente de radiación

De la ecuación (27) tenemos:

$$hr = \frac{\epsilon_1 \cdot \sigma (T_s^4 - T_\alpha^4)}{T_s - T_\alpha}$$

Dónde:

ϵ_1 : Emisividad del acero de 453.15°K.

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ Constante de Stefan Boltzmann

$$T_s = 453.15^\circ K$$

$$T_\alpha = 293.15^\circ K$$

Sacamos el valor de la tabla de Emisividad.³⁰

$$\epsilon_1 = 0.659$$

Entonces:

$$hr = \frac{0.659 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (453.15^4 - 293.15^4)}{453.15 - 293.15}$$

³⁰ MALDONADO, M. MEDINA, C. "Diseño y construcción de una extrusora con capacidad de 1kg/h, Diseño del proceso y diseño del producto para el reciclaje mecánico del Pet" [Tesis Ing. Mec.]. Escuela Politécnica del Ejercito, Carrera de Ingeniería Mecánica, 2008.

$$hr = 11.418 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Coefficiente de transferencia de calor total

$$h = h_r + h_c$$

$$h = 116301 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

4.7.6 Pérdidas por radiación

De la ecuación (28) tenemos:

$$Q_r = S \cdot \epsilon_1 \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_a^4)$$

Dónde:

$$S = \pi \cdot D \cdot L$$

$L = 1 \text{ m}$ Longitud de la zona de calefacción.

$$S = \pi \cdot 0.152 \cdot 1,5$$

$$S = 0.716 \text{ m}^2 \text{ Área de la zona de calefacción.}$$

$$Q_r = (0.716) \cdot (0.659) \cdot (5.67 \cdot 10^{-8})(453.15^4 - 293.15^4)$$

$$Q_r = 930.5 \text{ W}$$

4.7.7 Pérdidas por convección

De la ecuación (29) tenemos:

$$Q_c = h_c \cdot \Delta T \cdot S$$

$$Q_c = (0.2121) \cdot (160) \cdot (0.716) = 24.29 \text{ W}$$

4.7.8 Cantidad de calor necesaria para elevar la masa del material a la temperatura de trabajo

Utilizamos la ecuación (30) entonces:

$$Esp = \frac{dm}{dt} \cdot Cp \cdot (T_s - T_a)$$

$$\frac{dm}{dt} = 120 \frac{Kg}{h} \text{ Flujo másico del polímero en la zona.}$$

$$Cp = 0.45 \frac{kcal}{Kg^{\circ}K} \text{ Calor específico del polietileno.}$$

$$Esp = (120) \cdot (0.45) \cdot (160)$$

$$Esp = 8640 \frac{Kcal}{h}$$

$$Qn = 10 kW$$

Cantidad teórica de calor necesario para elevar $120 \frac{Kg}{h}$ a una temperatura promedio en todo el cilindro o camisa de $453.15^{\circ}K$.
Energía que sale del sistema:

$$Es = Qr + Qc + Qn$$

$$Es = 11 kW$$

4.8. CÁLCULO DE POTENCIA REQUERIDA PARA BANDAS CALEFACTORAS

$$Q = 18 KW \quad \text{Potencia en los calefactores (12 bandas de 1500 W).}$$

$$Q_{real} = Q - Qr - Qc$$

$$Q_{real} = 17045,71 W \text{ Potencia neta (considerando perdidas).}$$

CAPÍTULO V

ANÁLISIS ECONÓMICO

5.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo está destinado al estudio económico, necesario para establecer la rentabilidad del proyecto, realizado en base a los diversos factores que influyen en el costo total del proyecto.

El estudio financiero es importante para establecer el nivel de rentabilidad de un proyecto en base a un estudio y análisis de los fondos disponibles contrastando con los posibles escenarios que se presentan en el entorno del proyecto. (Jácome W. 2005, 161)

5.2. ANÁLISIS DE LA RENTABILIDAD DEL RECICLAJE DE PLASTICO

En el análisis de rentabilidad del reciclaje de plástico hay que tener en cuenta que este se encuentra arrojado en el relleno sanitario del Cantón Otavalo.

5.3. PROYECCIÓN DE INGRESOS³¹

Para el análisis financiero del proyecto se ha tomado en cuenta las siguientes consideraciones

- Costo total de la máquina 16000 usd
- Producción 120 kg/h
- Rollo de 100 metros de manguera negra 15 usd
- Rollo de 100 metros pesa 13 Kg
- El período de vida útil de una Extrusora es 15 años
- La depreciación acelerada es del 5% para maquinaria.
- El consumo de energía es de 36KW/h de las resistencias.
- El consumo total de extrusión es de 50 KW/h
- Un kg de plástico peletizado cuesta 40ctvs el de mejor calidad
- La inflación anual en el Ecuador para el año 2011 fue de 5.41%

³¹ FUENTES, Álvaro. “Diseño y construcción de un biodigestor con sistema automático para generación de biogás en la finca Tanguarín de la parroquia San Antonio de Ibarra” [Tesis Ing. Mecatrónica]. Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, 2012.

Realizando un análisis entre las consideraciones expuestas se tiene que:

5.3.1. Producción anual

$$120 \frac{kg}{h} \cdot \frac{1 \text{ rollo}}{13kg} \cdot \frac{8h}{1 \text{ dia}} \cdot \frac{240 \text{ dias}}{1 \text{ año}} = 17723 \frac{\text{rollos}}{\text{año}}$$

5.3.2. Ingreso anual

$$17723 \frac{\text{rollos}}{\text{año}} \cdot \frac{15 \text{ usd}}{\text{rollos}} = 265846 \frac{\text{usd}}{\text{año}}$$

5.3.3. Costo de materia prima

$$17723 \frac{\text{rollos}}{\text{año}} \cdot \frac{0.4 \text{ usd}}{\text{rollos}} = 7089.2 \frac{\text{usd}}{\text{año}}$$

Cabe destacar que un beneficio incluido en la producción, esta que la materia prima se encuentra en el relleno sanitario.

De acuerdo al análisis, se tendrían unos ingresos anuales de 3600 USD. Estos valores varían para cada período dependiendo de la inflación y el tiempo de vida útil del sistema, establecido en 15 años. En la siguiente tabla, se presentan los ingresos proyectados.

Tabla 5. Análisis de costos.

Análisis de costos			
Detalle	cantidad al mes	valor unitario (dólares)	valor total anual (dólares)
Consumo de energía	1	3000	36000
Materia prima	1	640	6800
Arriendos	1	200	2400
Transporte materia prima	1	100	1200
Mantenimiento	1	250	3000
Mano de obra	1	1000	12000
Depreciación	1	800	9600
Costos indirectos	1	500	6000
		total	77880

Fuente: Autor

5.4. FLUJO DE CAJA.

El flujo de caja es la acumulación neta de activos líquidos en un período determinado, y por esta razón constituye un indicador importante para medir la liquidez de un proyecto en un período determinado.

Para el desarrollo del flujo de caja se toman en cuenta las siguientes consideraciones

Tabla 6. Flujo de Caja.

Flujo de caja			
Año de Operación	Ingresos usd	Costos	Utilidad bruta usd
0	-16000	0	-16000
1	265846	77880	187966
2	303580,8	82093,308	221487,492
3	320004,521	86534,556	233469,965
4	337316,766	91216,0754	246100,69
5	355565,603	96150,8651	259414,738
6	374801,702	101352,627	273449,075
7	395078,474	106835,804	288242,67
8	416452,22	112615,621	303836,599
9	438982,285	118708,126	320274,159
10	462731,226	125130,236	337600,99
11	487764,986	131899,782	355865,204
12	514153,071	139035,56	375117,512
13	541968,752	146557,383	395411,369
14	571289,262	154486,138	416803,124
15	602196,011	162843,838	439352,173

Fuente: Autor

5.5. EVALUACION:

5.5.1. Tasa de descuento

La tasa de descuento es una medida financiera que se aplica para determinar el valor actual de un pago futuro, es decir se utiliza para determinar el valor en moneda de hoy del dinero pagado o recibido en algún momento futuro.

Cuando un capital se ha invertido en un proyecto, es importante tomar en cuenta la tasa. Para este proyecto se estima una tasa del 5% de interés

generado al capital propio, y aplicando la fórmula para el cálculo de la tasa de redescuento se ha obtenido un valor de 10,8%.

Tabla 7. Tasa de descuento.

Descripción	Valor	%	Tasa Ponderante
Inversión	-16000	100	5%

Fuente: Autor.

Ecuación 31. Tasa de rendimiento medio.

$$TRM = (1 + TP) \cdot (1 + IF) - 1$$

Dónde:

- *TP*: Tasa Ponderante.
- *IF*: Índice de inflación (5.41%).

$$TRM = (1 + 0.05) \cdot (1 + 0.0541) - 1$$

$$TD = 0.107 = 10.7\%$$

5.5.2. Valor actual neto

Se considera al VAN como la rentabilidad en términos de dinero con poder adquisitivo presente y permite autorizar si es o no pertinente la inversión en el horizonte de la misma (Jácome, 2005, 82). Este indicador permite determinar si una inversión cumple con el objetivo básico financiero de maximizar la inversión, a través de la suma actualizada de los flujos de caja que se espera generar a lo largo de la vida útil del proyecto

La fórmula empleada para el cálculo del VAN, es la siguiente:

Ecuación 32. VAN.

$$VAN = \sum U_n (1 + cp)^{-m}$$

Dónde:

VAN = Valor actual neto

$\sum U_n$ = Sumatoria de los saldos de caja para cada período

n = período de análisis en años

cp = costo del capital (10,8%)

m = años de operación

Este indicador económico establecerá con certeza si el proyecto es o no viable.

Para ellos hay que analizar si se encuentra dentro de los siguientes criterios

$VAN > 0$; El proyecto es aceptado

$VAN < 0$; El proyecto es rechazado

$VAN = 0$; El proyecto es analizado para aceptarlo o rechazarlo

5.5.3. Tasa interna de rentabilidad

Se denomina Tasa Interna de Rentabilidad (T.I.R.) a la tasa de descuento que hace que el Valor Actual Neto (V.A.N.) de una inversión sea igual a cero.

La fórmula para el cálculo del TIR, es la siguiente

Ecuación 33. TIR.

$$I = \sum U_n (1 + TIR)^{-m}$$

Dónde:

I = Inversión inicial del proyecto

$\sum U_n$ = Sumatoria de los saldos de caja pero cada período

n = Período de análisis en años

TIR = Tasa interna de rentabilidad

m = Año de operación

Los criterios de evaluación del TIR, establecen lo siguiente:

TIR > Costo del capital; el proyecto es aceptado

TIR < Costo del capital; el proyecto es rechazado

TIR = Costo del capital; el proyecto es analizado para aceptarlo o rechazarlo.

5.5.4. Relación beneficio costo

Es la relación entre los ingresos actualizados sobre los costos de inversión actualizados; a través de este indicador, se puede determinar cuáles son los beneficios por cada dólar invertido en el proyecto.

El cual es calculado con la siguiente formula:

Ecuación 34. Beneficio costo.

$$\text{Beneficio Costo} = \frac{\sum \text{Ingresos} / (1 + i)^n}{\sum \text{Costos} / (1 + i)^n}$$

Dónde:

i = tasa de descuento

n = año de operación

Los indicadores financieros, Tabla 4; que arrojo el proyecto fueron los siguientes.

Valor actual neto (V.A.N) = 4 439 409,7

Tasa interna de rentabilidad (T.I.R) = 1193%

Beneficio/costo = 3.69

De acuerdo a los resultados del análisis y tomando en cuenta las consideraciones de evaluación para los indicadores financieros, mencionados anteriormente, se establece que el proyecto es factible

Tabla 8. Indicadores de rentabilidad financiera.

Año de operación	costos totales (usd)	Beneficios totales (usd)	Factor de actualización 10,7%	Costos actualizados (USD)	Beneficios actualizados (USD)	Flujo neto de efectivo actual (USD)
0	0	-16000	1	0	-16000	-16000
1	77880	288000	0,903	70355,15	260173,15	189817,99
2	82093,30	303580,8	0,816	74925,57	277074,55	202148,97
3	86534,55	320004,52	0,737	79710,52	294769,28	215058,75
4	91216,07	337316,76	0,666	84715,83	313278,89	228563,06
5	96150,86	355565,60	0,602	89957,40	332662,20	242704,79
6	101352,6	374801,70	0,543	95463,93	353025,34	257561,41
7	106835,8	395078,47	0,491	101222,971	374322,23	273099,26
8	112615,6	416452,22	0,443	107277,52	396711,96	289434,44
9	118708,1	438982,28	0,401	113614,716	420146,87	306532,15
10	125130,2	462731,22	0,362	120283,44	444807,79	324524,33
11	131899,7	487764,98	0,327	127284,74	470698,57	343413,836
12	139035,5	514153,07	0,295	134646,90	497923,82	363276,92
13	146557,3	541968,75	0,267	142370,38	526485,24	384114,86
14	154486,1	571289,26	0,241	150502,40	556557,42	406055,02
15	162843,8	602196,01	0,218	159045,34	588149,18	429103,84
total	1733339	6393885,6		1651376,87	6090786,57	4439409,7

Fuente: Autor

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

1. La principal variable que debe ser controlada durante el proceso de extrusión es la temperatura, el sistema de calefacción está trabajando con el control ON-OFF es el más apropiado ya que el polietileno no necesita que la temperatura sea exacta; con lo que se aumentó la histéresis para reducir el número de conmutaciones aumentando de esta forma el tiempo de vida útil de los contactos.
2. El polímero se funde por acción mecánica en combinación con la elevación de la temperatura en el cilindro; en la práctica las mejores condiciones en el proceso de extrusión del polietileno de alta densidad, se obtuvo a una temperatura promedio del 150°C en todo el cilindro y a una velocidad de rotación de 95 rpm del tornillo consiguiendo un flujo de 110 kg/h.
3. El sistema de extrusión está diseñado independientemente del producto terminado, esto quiere decir que se puede obtener diferentes productos únicamente cambiando el perfil de la boquilla, permitiendo no limitarnos a un solo producto, dándole así una mayor aplicación al sistema.
4. La relación volumétrica de las vueltas del filete en la zonas de alimentación y de dosificado es la relación de compresión; según los parámetros geométricos del husillo tenemos una relación de compresión igual a 3.6; la cual se encuentra dentro del estándar para procesar el polietileno de alta densidad.(Tabla 2)
5. La relación L/D (Longitud / Diámetro) del sistema es de 24 : 1, la cual se encuentra dentro del rango óptimo de extrusión para el polietileno de alta densidad según Savgorodny, proporcionando un calentamiento más uniforme en el material y un mejor rendimiento para la maquina extrusora.

6. El husillo es el elemento mecánico responsable de las operaciones de transporte, compresión y dosificación de la materia prima; teniendo una vida efectiva en función al polímero utilizado, siendo 20 años el tiempo de vida útil de un equipo que maneja Polietileno.

7. El husillo está soportando presiones hasta de 700 kg/cm^2 , efectos térmicos de 150°C , esfuerzos de corte y el arrastre; el acero que está fabricado el husillo es nitrurado al Cr-Mo-V de alta resistencia, el cual tiene una resistencia mecánica de 120 kg/mm^2 y una temperatura máxima de operación de 200°C siendo este adecuado en el proceso de extrusión.

8. La evaluación económica y financiera arroja que la demanda que existe dentro del mercado nacional, permitirá que la inversión realizada se pueda recuperar en poco tiempo; de tal manera que reciclando 35 kg/h tenemos un costo beneficio igual a 1 siendo esta la producción mínima de la extrusora para que pueda recuperar en un año la inversión realizada.

6.2. RECOMENDACIONES:

1. Una de las principales variables para controlar en el proceso de extrusión es la velocidad, la cual debe ser controlada mediante un VDF de 15Kw a 220 V trifásico, para mejorar la calidad del material fundido esto se refiere a que no se obtenga puntos duros materiales sin fundir o con gases asegurándonos así viscosidad constante del material.
2. Para tener un proceso completo de reciclaje mecánico de plástico, se puede implementar proyectos adicionales tales como el lavado y secado de la materia prima.
3. Con la relación de compresión igual a 3.6 podemos también reciclar polietileno de baja densidad el cual se encuentra dentro en el rango de 2 – 4 : 1 aprovechando así otro tipo de plástico que llega al relleno sanitario del Cantón Otavalo. (Tabla 2)
4. Implementar un sistema de refrigeración en la zona de alimentación, específicamente en la garganta de alimentación al menos a 50°C por debajo de la temperatura de fusión del polímero, permitiéndonos tener una temperatura baja en dicha zona, impidiéndonos tener una temperatura baja en dicha zona, impidiendo que la fusión de la resina produzca la adhesión de la misma a la superficie del tornillo, minimizando el flujo de material por arrastre, y por tanto, el caudal extruido.
5. Para garantizar el arranque de la maquina se debería implementar un control automático en el arranque del motor de tal forma que cuando la temperatura alcance los 150°C en todo el cilindro el motor arranque, evitando así un posibles daños en la caja reductora o en el husillo.

6. Para obtener una menor tarifa eléctrica se recomienda y menor exigencia de infraestructura eléctrica, se recomienda la instalación de un banco de capacitores que compense la potencia reactiva, el cual debe estar muy acercado a la unidad, evitando así sanciones para el usuario.
7. Considerar adecuado el aumento en la profundidad de enterramiento de la cimentación, con esto el funcionamiento del sistema mejora al lograr una significativa disminución de las respuestas. Además la frecuencia crítica aumenta alejándose de la zona de resonancia.

CAPÍTULO VII

INSPECCIÓN Y MANTENIMIENTO

7.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo está destinado, al mantenimiento e inspección de los equipos con la finalidad de mejorar sus condiciones funcionales.

7.2. TIPOS DE MANTENIMIENTO³²

En la práctica real del mantenimiento industrial solo existen dos tipos, o formas fundamentales de hacer mantenimiento:

- Mantenimiento reactivo
- Mantenimiento proactivo

El Mantenimiento Reactivo es el conjunto de actividades desarrolladas en los sistemas, equipos, maquinas, instalaciones o edificios, cuando a causa de una falla, se requiere recuperar su función principal. Como su nombre lo indica, las acciones de mantenimiento reaccionan a las fallas y se ejecutan para corregirlas.

El mantenimiento Proactivo es el sistema opuesto del sistema reactivo, es decir, las acciones de mantenimiento se realizan antes de presentarse la falla del equipo. En la operación proactiva la prevención de las fallas se hace a través de inspecciones y de acciones preventivas y predictivas. El objetivo del mantenimiento Proactivo es por tanto, anticiparse a la probabilidad de ocurrencia de las fallas.

³² GARCIA, Oliveiro. *Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial*. 1 ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2012. 170 p. ISBN: 978-958-762-051-1

Con la finalidad de garantizar al municipio de Otavalo las condiciones operativas seguras, efectuar el control del estado de los equipos así como su disponibilidad y poder pronosticar repuestos necesarios se realizó una guía de inspección y mantenimiento con posibles fallas y tiempos estimados para su ejecución.

Ver hojas de mantenimiento en el anexo 1.

BIBLIOGRAFÍA

1. Corporación OIKOS. *Manual de Reciclaje de Plástico*. Quito: Junio, 2000. 80p. ISBN 9978-41-507-6
2. MORALES MÉNDEZ, José Eduardo. “Obtención y clasificación de los polímeros”. *Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos*. México: Trillas, 2010. p. 46
3. SAENZ DE MAGAROLA, Carlos D. “Materiales Sintéticos y modo de trabajarlos”. En: LEYENSETTER, A. *Tecnología de los oficios metalúrgicos*. Barcelona, 2001. p. 119
4. ROSATO, Dominick V. ROSATO, Andrew V. DIMATTIA, David P. *Blow Molding Handbook*. 2da ed. Munich: Carl Hanser Verlag, 2004. 621 p. ISBN 3-446-22017-8
5. SAENZ DE MAGAROLA, Carlos D. “Modos de ser trabajados los materiales sintéticos”. En: LEYENSETTER, A. *Tecnología de los oficios metalúrgicos*. Barcelona: Reverté, 2001. p. 132
6. RAMOS, Luis Francisco. *Extrusión de plásticos*. 1 ed. México: Lumisa, 2012. 188p. ISBN: 978-968-18-4504-9
7. SAENZ DE MAGAROLA, Carlos D. “Constitución del puesto de trabajo y prevención de accidentes”. En: LEYENSETTER, A. *Tecnología de los oficios metalúrgicos*. Barcelona: Reverté, 2001. p. 199
8. SAVGORODNY, V.K. *Transformación de Plásticos*. Uralde, Luis (trad.). Barcelona: Gustavo Gili S.A., 1973. 468 p. ISBN: 84-252-0746-0

9. MORALES MÉNDEZ, José Eduardo. “Proceso de Extrusión”. Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos. México: Trillas, 2010. p. 222 – 229
10. MORALES MÉNDEZ, José Eduardo. “Diámetro de los husillos”. Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos. México: Trillas, 2010. p. 241
11. BELTRAN, M. y MARCILLA, A. *Tecnología de polímeros* [en línea]. Tema 4: Extrusión. [ref. 28 de octubre del 2012]. Disponible en Word Wide Web: <<http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>>
12. MORALES MÉNDEZ, José Eduardo. “Relación de compresión”. Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos. México: Trillas, 2010. p. 250
13. STEVENS, M.J. COVAS, J.A. *Extruder Principles and Operation*, 2da ed. Great Britain: Chapman & Hall, 1995. 478 p. ISBN: 0-412-63590-9
14. SAVGORODNY, V.K. “Proceso de extrusión y cálculo de los parámetros tecnológicos”. Transformación de plásticos. Barcelona: Gustavo Gili S.A., 1973. p. 13
15. GÓMEZ, J. GUTIÉRREZ, J. *Diseño de una extrusora para plástico* [en línea]. Pereira 2007 [ref. de 24 marzo 2012]. Capítulo 3. Intervalos de velocidad de cortadura. Disponible en Word Wide Web: <<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1110/1/668413G633d.pdf>>
16. MORALES MÉNDEZ, José Eduardo. “Influencia de las ramificaciones en el polímero”. Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos. México: Trillas, 2010. p. 110

17. SAVGORODNY, V.K. “Proceso de extrusión y cálculo de los parámetros tecnológicos”. Transformación de plásticos. Barcelona: Gustavo Gili S.A., 1973. p. 13
18. BUDYNAS, Richard G. NISBETT, Keith J. “Transmisiones de banda plana o redonda”. Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A., 2008. p.863-887
19. MORALES MÉNDEZ, José Eduardo. “Sistema de transmisión de potencia del extrusor”. Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos. México: Trillas, 2010. p. 229-231
20. AMADORI, Aldo. *Control Eléctrico Control* [en línea]. El ABC de la automatización. [ref. de 12 de agosto 2012]. Disponible en Web: < http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/Control_Electrico.pdf>
21. SOTOMAYOR, Nelson. *Control con microprocesadores* [en línea]. Quito, Septiembre 2009 [ref. marzo 2012]. “Técnicas de Control, Control On - Off”. p. 36. Disponible en Web: < <http://ciecfie.epn.edu.ec/CControlC/materias/cmicos/CONTROL%20CON%20MICROPROCESADORES.pdf>>
22. OGATA, Katsuhiko. *Ingeniería de control moderna*. 4ta ed. Madrid: Pearson Educación, 2003. 984p. ISBN: 84-205-3678-4
23. INCROPERA, Frank P. *Fundamentos de transferencia de calor*. 4a ed. México: Prentice Hall, 1999. 912 p. ISBN : 970-17-0170-4

24. PALACIOS, O. RAMÍREZ, J. “Diseño y construcción de una máquina extrusora por tornillo para material plástico”. [Tesis Ing. Mec.]. Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, 1992
25. HOLMAN, J.P. “Transferencia de calor por convección libre en una placa vertical”. Transferencia de calor. 10a ed. México: Continental, S.A., 1999. p. 305
26. HOLMAN, J.P. “La capa límite térmica”. Transferencia de calor. 10a ed. México: Continental, S.A., 1999. p. 218
27. MALDONADO, M. MEDINA, C. “Diseño y construcción de una extrusora con capacidad de 1kg/h, Diseño del proceso y diseño del producto para el reciclaje mecánico del Pet” [Tesis Ing. Mecánico.]. Escuela Politécnica del Ejercito, Carrera de Ingeniería Mecánica, 2008.
28. FUENTES, Álvaro. “Diseño y construcción de un biodigestor con sistema automático para generación de biogás en la finca Tanguarín de la parroquia San Antonio de Ibarra” [Tesis Ing. Mecatrónica]. Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, 2012.
29. GARCIA, Oliveiro. *Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial*. 1 ed. Bogotá: Ediciones de la U, 2012. 170 p. ISBN: 978-958-762-051-1

ANEXOS

- 1.- Mantenimiento e inspección
- 2.- Características del Polietileno
- 3.- tabla de conversión de cables
- 4.- Cable para altas temperaturas
- 5.- Normas Nec
- 6.- Data Sheets
 - Transformador de corriente
 - Controlador de temperatura
 - Circuit Breaker
 - Contactor LC1-D3210N
 - Contactor LC1D65
 - Gearbox ZLYJ 173
 - Banda en V
 - Acero Nitrurado 3CrAlMo7
 - Acero A36
 - Acero SAE-1020
 - Electrodo para acero de bajo carbón
- 7.- Galería Fotográfica
- 8.- Planos Eléctricos
- 9.- Planos Mecánico