



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

***“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXTRUSOR DE
TORNILLO PARA LA OBTENCIÓN DE PELLETS DE
BOTELLAS PLÁSTICAS DE PET RECICLADAS”***

TESIS DE GRADO

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

EDWIN ORLANDO TUBÓN VÉLEZ

BYRON FABRICIO CARRILLO SINCHE

Riobamba – Ecuador

2014

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo de tesis primeramente nos gustaría agradecer a DIOS por bendecirnos para poder llegar hasta donde hemos llegado, porque gracias a él estamos haciendo realidad este sueño tan anhelado; por iluminarnos día a día nuestros caminos, porque es él quien nos ayuda y brinda la fe confianza y la seguridad de seguir hacia delante y por darnos la dicha de contar con personas que nos motivan a superarnos siempre.

Debemos agradecer de manera especial y sincera a nuestros profesores Ing. Hanníbal Brito e Ing. Mabel Parada por permitirnos realizar esta tesis bajo su dirección. Por la confianza que tuvieron en nosotros para poder realizar este trabajo y su capacidad para poder guiar nuestras ideas, pero cabe recalcar que no solamente fue en el desarrollo de esta tesis, sino también en nuestra formación como profesionales.

DEDICATORIA

Yo, **Edwin Orlando Tubón Vélez** dedico el presente trabajo de graduación con todo mi cariño, amor filial y gratitud a mis padres Gonzalo y Andrea por el incondicional apoyo brindado durante la culminación de mi vida académica, ya que este logro es también de ustedes.

A mis hermanos, Víctor y Andrea. A mis tíos Adolfo y María.

A mi abuelita Luz por haberme orientado y haber cuidado de mí durante mis estudios en la secundaria y darme sus sabios consejos para mi propio bienestar.

Yo, **Byron Fabricio Carrillo Sinche** dedico este trabajo a Dios, por darme la vida, bendecirme y por permitirme llegar hasta esta instancia tan importante de mi formación profesional.

A mi papá Luis que con su sabiduría aprendí el valor de la responsabilidad y la dedicación que se debe meter a todas las cosas para poder llegar hacer una persona triunfadora y de bien

A mi mamá Margarita, mi hermano Orlando, las personas que siempre estuvieron con su apoyo incondicional, por sus consejos, por todos esos ánimos que siempre me supieron dar.

Y a todos mis amigos que estuvieron en todos esos momentos de felicidades y tristezas.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

El tribunal de tesis certifica que: El trabajo de investigación “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EXTRUSOR DE TORNILLO PARA LA OBTENCIÓN DE PELLETS DE BOTELLAS PLÁSTICAS DE PET RECICLADAS”, de responsabilidad de los señores Edwin Orlando Tubón Vélez y Byron Fabricio Carrillo Sinche ha sido prolijamente revisado por los Miembros del Tribunal de Tesis, quedando autorizado su presentación.

NOMBRE	FIRMA	FECHA
Dr. Silvio Álvarez L. DECANO DE LA FACULTAD DE CIENCIAS
Ing. Mario Villacrés A. DIRECTOR DE LA ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA
Ing. Hanníbal Brito M. DIRECTOR DE TESIS
Ing. Mabel Parada. MIEMBRO DEL TRIBUNAL
Ing. Eduardo Tenelanda. COORDINADOR SISIB-ESPOCH
Nota de Tesis Escrita	

HOJA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **EDWIN ORLANDO TUBÓN VÉLEZ** y **BYRON FABRICIO CARRILLO SINCHE**, somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en esta Tesis, y el patrimonio intelectual de la Tesis de Grado pertenecen a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.”

INDICE DE ABREVIATURAS

d =	Diámetro del canal del dado (cm)
L =	Longitud del husillo (cm)
m =	Número de canales del husillo
D =	Diámetro del tornillo (cm)
e =	Ancho de la cresta del filete (mm)
t =	Paso del husillo (cm)
Φ =	Ángulo de husillo de canal (°)
α =	Flujo de arrastre o de fricción (cm ³)
β =	Flujo de presión (cm ³)
K =	Constante total de la cabeza (cm ³)
L =	Longitud del canal (cm)
Q =	Flujo volumétrico (Kg/h)
n =	Revoluciones del tornillo o husillo (r.p.m.)
N =	Potencia requerida (HP)
E =	Eficiencia (%)
δ =	Holgura del filete (cm)
γ =	Flujo de Filtración (cm ³)
V =	Volumen de la tina de enfriamiento (L)
b =	Longitud de la tina (m)
a =	Ancho de la tina (m)
h =	Altura de la tina (m)
D _t =	Diámetro de la olla de recirculación (cm)
h ₂ =	Profundidad del canal en la zona de dosificación o bombeo (m)

$C =$	Capacidad calorífica del PET (KJ/Kg°C)
$T_m =$	Temperatura de trabajo de extrusión (°C)
$T_o =$	Temperatura ambiente (°C)
$P_{Max} =$	Presión máxima (MN/m ²)
$\mu =$	Viscosidad efectiva (Pa.s)
$P_{op} =$	Presión de operación (MN/m ²)
$R =$	Radio del alma del husillo (mm)
$Mg =$	Fuerza del husillo (N.m)
$\%R =$	Porcentaje de rendimiento (%)
$P_i =$	Peso inicial de la muestra (Kg)
$P_f =$	Peso final de la muestra (Kg)
$A =$	Área del agujero (mm ²)
$V =$	Velocidad de producción del hilo extruido (m/s)
$m =$	Flujo másico del PET (Kg/s)
$Q =$	Caudal volumétrico de la bomba (L/min)
$Q_1 =$	Calor que se deposita en el sumidero (Kw)
$Q_2 =$	Calor generado por las resistencias (Kw)

TABLA DE CONTENIDOS

CONTENIDO	Pp:
PORTADA	
AGRADECIMIENTO	
DEDICATORIA	
HOJA DE FIRMAS	
HOJA DE RESPONSABILIDAD	
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	
TABLA DE CONTENIDOS	
ÍNDICE DE TABLAS	
ÍNDICE DE FIGURAS	
ÍNDICE DE ANEXOS	
RESUMEN.....	i
SUMMARY.....	ii
INTRODUCCIÓN.....	iii
ANTECEDENTES.....	iv
JUSTIFICACIÓN.....	v
OBJETIVOS.....	vi

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO.....	27
1.1 PET.....	27
1.1.1 RECICLADO DE LOS PLÁSTICOS	27
1.1.2 PROPIEDADES DEL PET RECICLADO MECÁNICAMENTE	28
1.1.3 CARACTERÍSTICAS DEL PET Y RPET	28
1.1.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LOS TERMOPLÁSTICOS...29	
1.1.4.1 POLÍMEROS LÍQUIDOS.....	29
1.1.4.2 TEMPERATURA DE DEGRADACIÓN.....	30
1.1.4.3 LA VISCOSIDAD DE LOS PLÁSTICOS.....	30
1.1.4.4 FUENTES DE CALENTAMIENTO	30
1.1.4.5 FACTORES EN UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO	30
1.2 EXTRUSIÓN.....	31
1.2.1 ETIMOLOGÍA DE EXTRUSIÓN	31
1.2.2 EXTRUSOR DE UN SÓLO HUSILLO	31
1.2.3 VENTAJAS	32
1.2.4 LIMITACIONES.....	33
1.2.5 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UNA EXTRUSORA.....	33
1.2.6 DATOS TÉCNICOS POR TENER EN CUENTA	33
1.2.7 IMPORTANCIA DE LA FRICCIÓN.....	34
1.2.8 HINCHAMIENTO DEL EXTRUIDO	34

1.2.9	ZONAS DE LA EXTRUSORA	35
1.2.9.1	ZONA DE ALIMENTACIÓN	35
1.2.9.2	ZONA DE COMPRESIÓN O PLASTIFICACIÓN	35
1.2.9.3	ZONA DE DOSIFICACIÓN O BOMBEO	36
1.2.10	EQUIPOS PARA LA EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS.....	36
1.2.11	FUNCIONES DE UN EQUIPO DE EXTRUSIÓN.....	36
1.2.12	SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA DEL EXTRUSOR	37
1.2.13	COMPONENTES DE LA EXTRUSORA.....	38
1.2.13.1	TOLVA	38
1.2.13.2	CILINDRO, BARRIL O CAÑÓN.....	39
1.2.13.3	PLATO ROMPEDOR Y FILTROS	40
1.2.13.4	GARGANTA DE ALIMENTACIÓN	41
1.2.13.5	TORNILLO O HUSILLO	41
1.2.13.5.1	RELACIÓN L/D DEL TORNILLO	43
1.2.13.5.2	VARIACIÓN DEL GRADIENTE DE PRESIÓN EN UN EXTRUSOR DE HUSILLO SIMPLE	43
1.2.13.6	EL DADO	44
1.3	DISEÑO DE LA EXTRUSORA	45
1.3.1	VOLÚMEN DE LA TINA DE ENFRIAMIENTO	45
1.3.2	VOLÚMEN DE LA OLLA DE RECIRCULACIÓN.....	46
1.3.3	NÚMERO DE FILETES DEL HUSILLO.....	46
1.3.4	ÁNGULO DE HÉLICE DEL CANAL.....	46

Pp:

1.3.5	FLUJO DE ARRASTRE O DE FRICCIÓN (Q_D o α)	47
1.3.6	FLUJO DE PRESIÓN (Q_p o β)	48
1.3.7	CÁLCULO DE LA HOLGURA DEL FILETE (δ)	48
1.3.8	FLUJO DE FILTRACIÓN (Q_L o γ)	49
1.3.9	CONSTANTE TOTAL DE LA CABEZA (k)	49
1.3.10	REVOLUCIONES DEL HUSILLO (n)	49
1.3.11	FLUJO VOLUMÉTRICO	50
1.3.12	ÁREA DEL AGUJERO DEL DADO	50
1.3.13	VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN DEL HILO EXTRUIDO	51
1.3.14	POTENCIA REQUERIDA	51
1.3.15	PRESIÓN MÁXIMA	52
1.3.16	PRESIÓN DE OPERACIÓN	52
1.3.17	FUERZA DEL HUSILLO	53
1.3.18	FLUJO MÁSICO DEL PET	53
1.3.19	FLUJO MÁSICO DEL AGUA	53
1.3.20	CAUDAL VOLUMÉTRICO DE LA BOMBA	55
1.3.21	BALANCE DE MASA	55
1.3.22	ECUACIÓN PARA EL BALANCE DE ENERGÍA UTILIZANDO LA EFICIENCIA	56
1.3.23	ECUACIÓN GENERAL PARA EL BALANCE DE ENERGÍA DEL EXTRUSOR	56
1.3.24	CALOR QUE SE DEPOSITA EN EL SUMIDERO	57

Pp:

1.3.25	CALOR GENERADO POR LAS RESISTENCIAS	58
1.3.26	EFICIENCIA DEL EXTRUSOR	58
1.3.27	PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN TODO EL PROCESO DE LA PRODUCCIÓN DE PELLETS.....	59
1.3.28	EFICIENCIA EN TODO EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PELLETS.....	59

CAPITULO II

2.	PARTE EXPERIMENTAL.....	61
2.1	MUESTREO.....	61
2.2	MÉTODOS.....	61
2.2.1	MÉTODO INDUCTIVO.....	61
2.2.2	MÉTODO DEDUCTIVO	62
2.2.3	TÉCNICAS.....	62
2.2.3.1	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE RENDIMIENTO DE LA EXTRUSORA DE PET	63
2.3	DATOS EXPERIMENTALES.....	64
2.3.1	DIAGNÓSTICO	64
2.3.2	DATOS	64
2.4	IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES	67
2.5	DATOS ADICIONALES.....	69

CAPITULO III

3	DISEÑO	71
3.1	CÁLCULOS.....	71

Pp:

3.1.1	CÁLCULO DEL VOLÚMEN DE LA TINA DE ENFRIAMIENTO	71
3.1.2	CÁLCULO DEL VOLÚMEN DE LA OLLA DE RECIRCULACIÓN	71
3.1.3	CÁLCULO DEL NÚMERO DE FILETES DEL HUSILLO O TORNILLO ..	71
3.1.4	CÁLCULO DEL FLUJO VOLUMÉTRICO	72
3.1.4.1	CÁLCULO DEL ÁNGULO DE HÉLICE DE CANAL	72
3.1.4.2	CÁLCULO DEL FLUJO DE ARRASTRE O DE FRICCIÓN (Q_D ó α)	72
3.1.4.3	CÁLCULO DEL FLUJO DE PRESIÓN (Q_P ó β)	72
3.1.4.4	CÁLCULO DEL FLUJO DE FILTRACIÓN (Q_L o γ)	73
3.1.4.4.1	CÁLCULO DE LA HOLGURA DEL FILETE (δ)	73
3.1.4.4.2	CÁLCULO DEL FLUJO DE FILTRACIÓN (Q_L o γ)	73
3.1.4.5	CÁLCULO DE LA CONSTANTE TOTAL DE LA CABEZA (k)	73
3.1.4.6	CÁLCULO DE LAS REVOLUCIONES DEL HUSILLO	73
3.1.4.7	CÁLCULO DEL FLUJO VOLUMÉTRICO	74
3.1.4.8	CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN DEL HILO EXTRUIDO	74
3.1.4.8.1	CÁLCULO DEL ÁREA DEL AGUJERO	74
3.1.4.8.2	CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN DEL HILO EXTRUIDO	74
3.1.4.9	CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA.....	75
3.1.4.10	CÁLCULO DE LAS PRESIONES EN LA EXTRUSORA.....	75
3.1.4.10.1	CÁLCULO DE LA PRESIÓN MÁXIMA.....	75
3.1.4.10.2	CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE OPERACIÓN.....	75

Pp:

3.1.4.11	CÁLCULO DE LA FUERZA DEL HUSILLO.....	76
3.1.4.12	CÁLCULO DEL CAUDAL VOLUMÉTRICO DE LA BOMBA PARA EL ENFRIAMIENTO DEL HILO EXTRUIDO	76
3.1.4.12.1	CÁLCULO DEL FLUJO MÁSSICO DEL PET	76
3.1.4.12.2	CÁLCULO DEL FLUJO MÁSSICO DEL AGUA	76
3.1.4.12.3	CÁLCULO DEL CAUDAL VOLUMÉTRICO DE LA BOMBA.....	77
3.1.4.13	CÁLCULO DEL BALANCE DE MASA.....	77
3.1.4.14	CÁLCULO DEL BALANCE DE ENERGÍA.....	78
3.1.4.14.1	CÁLCULO DE LA POTENCIA O TRABAJO W	78
3.1.4.14.2	CÁLCULO DEL CALOR QUE SE DEPOSITA EN EL SUMIDERO q_1	78
3.1.4.14.3	CÁLCULO DEL CALOR GENERADO POR LAS RESISTENCIAS q_2	79
3.1.4.14.4	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DEL EXTRUSOR	79
3.1.4.15	CÁLCULO DEL % DE RENDIMIENTO EN TODO EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PELLETS.....	79
3.1.4.16	CÁLCULO DE LA EFICIENCIA EN TODO EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PELLETS.....	80
3.2	RESULTADOS.....	80
3.3	PROPUESTA DE DISEÑO	81
3.3.1	DISEÑO DE LA EXTRUSORA DE PLÁSTICO PET	82
3.4	ANÁLISIS DE COSTOS.....	83
3.4.1	COSTOS DE INVERSIÓN	83

Pp:

3.4.1.1	RECURSOS MATERIALES	83
3.4.2	COSTOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE RECICLADO DE PET EN LA ESPOCH.....	84
3.4.2.1	COSTOS DE INVERSIÓN DE LA PLANTA PARA PELLETIZADO .	84
3.4.2.2	COSTOS DE OPERACIÓN.....	84
3.4.2.3	COSTO DE LOS INSUMOS A UTILIZARSE DURANTE LA PRODUCCIÓN MENSUAL	85
3.4.2.4	COSTO DEL KILOGRAMO DE PELLETS	86
3.5	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	87

CAPITULO IV

4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	89
4.1	CONCLUSIONES	89
4.2	RECOMENDACIONES	90
	ANEXOS	906

INDICE DE ANEXOS

ANEXO:	Pp:
I DENSIDAD DE ALGUNOS PLÁSTICOS EN ESTADO FUNDIDO	97
II INTERVALOS DE VELOCIDAD DE CORTADURA	98
III PROPIEDADES MECÁNICAS DEL POLIETILENTEREFTALATO	99
IV PROPIEDADES TERMICAS DEL POLIETILENTEREFTALATO	100
V PROPIEDADES QUIMICAS DELPOLIETILENTEREFTALATO	101
VI SIMULACION DE LA MAQUINA DE EXTRUSION	102
VII HUSILLO Y CAMISA.....	103
VIII TINA DE RECEPCION DE LOS HILOS DE PET	104
IX RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	105
X TOLVA DE ALIMENTACION.....	106
XI TABLERO DE CONTROL.....	107
XII SISTEMA DE RECIRCULACION	108
XIII MAQUINA DE EXTRUSION.....	109
XIV ALIMENTACIÓN DE LAS ESCAMAS DE PET	110
XV HILO DE PET	111
XVI PELLETS.....	112
XVII DIMENSIONAMIENTO DEL EXTRUSOR.....	113

INDICE DE FIGURAS

FIGURA:	Pp:
1.2.2-1 MÁQUINA DE EXTRUSIÓN DE UN HUSILLO	32
1.2.9.1-1 SECCIÓN DE LA MÁQUINA DE EXTRUSIÓN MOSTRANDO LAS DIVERSAS ZONAS.....	35
1.2.13.1-1 TIPOS DE TOLVAS.....	38
1.2.13.1-2 TORNILLO DE ALIMENTACIÓN	38
1.2.13.2-1 RESISTENCIAS ELÉCTRICAS MONTADAS EN EL CAÑÓN	39
1.2.13.2-2 RESISTENCIAS ELÉCTRICAS	39
1.2.13.3-1 PLATO ROMPEDOR.....	40
1.2.13.4-1 GARGANTA DE ALIMENTACIÓN.....	41
1.2.13.5-1 TORNILLO DE UNA EXTRUSORA	42
1.2.13.5.2-1 VARIACIÓN DEL GRADIENTE DE PRESIÓN ($G_p = P/L$) EN UN EXTRUSOR DE HUSILLO SIMPLE, SEGÚN MORTON	44
1.2.13.6-1 CABEZAL DEL EXTRUSOR	44
1.3.19-1 ENFRIAMIENTO DE LOS HILOS EXTRUIDOS DE PET	54
3.1.4.14-1 BALANCE DE ENERGÍA.....	78
3.1.4.15-1 RENDIMIENTO GENERAL	79
3.1.4.16-1 EFICIENCIA GENERAL	80

INDICE DE TABLAS

TABLA:	Pp:
1.1.3-1 CARACTERÍSTICAS DEL PET VIRGEN Y RECICLADO -----	28
1.1.4.1-1 RANGOS DE TEMPERATURA DE FUSIÓN VÍTREA (°C) PARA POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS Y ELASTÓMEROS -----	29
1.2.12-1 RELACIÓN DEL TAMAÑO DE EXTRUSORA CONTRA EL EMPUJE AXIAL DE RETENCIÓN DEL HUSILLO-----	37
1.2.13.5-1 TAMAÑO DEL TORNILLO Y ESPACIO ENTRE EL BARRIL -----	42
1.2.13.5-2 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LOS HUSILLOS, EN mm -----	43
2.2.3.1-1 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE RENDIMIENTO DE LA EXTRUSORA DE PET -----	63
2.3.2-1 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES DE EXTRUSIÓN. $T_{Prec.} = 260^{\circ}C$; $T_{Ext} = 240^{\circ}C$ -----	65
2.3.2-2 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES DE EXTRUSIÓN. $T_{Prec.} = 260^{\circ}C$; $T_{Ext} = 225^{\circ}C$ -----	65
2.3.2-3 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES DE EXTRUSIÓN. $T_{Prec.} = 260^{\circ}C$; $T_{Ext} = 235^{\circ}C$ -----	66
2.3.2-4 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES DE EXTRUSIÓN. $T_{Prec.} = 260^{\circ}C$; $T_{Ext} = 250^{\circ}C$ -----	66
2.3.2-5 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES DE EXTRUSIÓN-----	67
2.4-1 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE PRECALENTAMIENTO DE LA EXTRUSORA-----	67
2.4-2 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO DE LA EXTRUSORA -----	68

TABLA:**Pp:**

2.4-3 IDENTIFICACIÓN DE LAS TEMPERATURAS EN TODO EL PROCESO DE EXTRUSIÓN A 250 °C -----	68
2.5-1 DATOS ADICIONALES PARA LA OBTENCIÓN DE PELLETS -----	69
3.2-1 DATOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DE EXTRUSIÓN DE LAS ESCAMAS DE PET -----	80
3.3-1 DIMENSIONAMIENTO DE LA EXTRUSORA -----	81
3.4.1.1-1 RECURSOS MATERIALES -----	83
3.4.2.1-1 COSTO DE LOS EQUIPOS -----	84
3.4.2.2-1 COSTO DE OPERACIÓN -----	85
3.4.2.3-1 COSTO DE LOS INSUMOS -----	85
3.4.2.4-1 PRODUCCIÓN DE RESIDUOS SOLIDOS POR DÍA- ESPOCH -----	86
3.4.2.4-2 COSTOS TOTALES -----	86
3.4.2.4-3 COSTO DEL KILOGRAMO DE PELLETS -----	87

RESUMEN

Se Diseñó y se Construyó un Extrusor de Tornillo para la obtención de Pellets de botellas plásticas de polietilen-tereftalato (PET), recicladas en el interior de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, el equipo funcionará en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH; para minimizar la contaminación ambiental.

Para el diseño del equipo se utilizó cálculos de ingeniería aplicando normas, reglas, leyes o principios establecidos. Para su construcción y ensamblado se ocupó los siguientes componentes que son: tolva de alimentación, husillo o tornillo, camisa, resistencias eléctricas de 220 v, motor-reductor de 2 HP, tina de enfriamiento, olla de recirculación, bomba de recirculación, tablero de control y una base o soporte con un perfil estructural rectangular de acero inoxidable.

Una vez construida y ensamblada la extrusora se realizaron 4 pruebas para la validación del mismo, teniendo como resultado una eficiencia del 90 % con un rendimiento del 94% y el producto obtenido que son los pellets podemos reutilizarlos como materia prima para otros procesos productivos como la fabricación de fundas plásticas, industria textil, rellenos de almohadas, alfombras, edredones y hasta tapizados para la industria automotriz.

Equipos como los extrusores son útiles para disminuir los impactos ambientales que generan las botellas plásticas de PET. Por lo que se recomienda la implementación de esta línea de producción en instituciones donde exista una gran cantidad de consumo de materiales plásticos.

SUMMARY

It designed and made up a screw extruder to obtain pellets of plastic bottles made of polietilen-tereftalato (PET), which are recycled at Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. The equipment will operate at the laboratory of Unit Operations of Chemical Engineering School of the Faculty of Sciences ESPOCH with the purpose to reduce environmental pollution.

For equipment design engineering calculations were used applying forms, laws and regulations. To make up and assembly it, the following components were used: hopper, screw, casing, electrical resistors that work with 220V, gear motor of 2PH, plastic tub cooling, recirculation pump, control electronic board and a support base which contains a rectangular structural tube made of stainless steel. After that the screw extruder was made up. It applied four tests to evaluate its effectiveness, obtaining as result efficiency of 90%, a performance of 94% and the obtained pellets are reused as raw material to other productive process in the textile industry like the production of plastic boxes, carpets, duvets, to fill pillows and tapestry – making for cars.

Equipments as screw extruders are useful to reduce damages in the environment that are generated by plastic bottles made of PET that is why it recommends to implement this kind of production at institutions where the consumption of plastic materials is excessive.

INTRODUCCION

La extrusión de botellas plásticas recicladas de Polietilen-tereftalato (PET), consiste en calentar y dilatar el material plástico, previamente triturado, lavado y secado para luego hacerlo pasar por un orificio moldeador; es decir es uno de los métodos utilizados para dar forma a los materiales plásticos con perfiles relativamente sencillos.

Con la extrusión se realiza el mayor volumen de producción de polímeros, ya que no se usa solamente para la producción de barras, tubos, láminas y películas en materiales termoplásticos, sino también para el mezclado minucioso de todas las clases de plásticos y para la producción de gránulos.

Desde el punto de vista de los plásticos, la extrusión es claramente uno de los procesos más importantes de transformación; éste se lleva a cabo en máquinas denominadas extrusoras o extrusores. Aunque existen extrusoras de diversos tipos, las más utilizadas son las de tornillo o de husillo simple.

El Diseño y Construcción de un Extrusor de Tornillo para la obtención de Pellets de Botellas Plásticas se fundamentó en el aprovechamiento de las botellas de PET recicladas a nivel interno de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO; convirtiéndoles a estos materiales en productos reutilizables, ayudando así a la disminución de la contaminación del ambiente.

ANTECEDENTES

Miles de botellas de plástico son tiradas todos los días en los basureros municipales, calles, ríos, playas, terrenos suburbanos y en los más apartados espacios campestres, dañando y poniendo en peligro los ecosistemas, además de ser un elemento que tapa las coladeras, favoreciendo las inundaciones, sin saber que este material se puede reciclar y con ello proteger al ambiente.

El uso de las botellas de PET en el mundo ha venido creciendo inmensamente en los últimos 35 años dada su utilidad y se estima que en la actualidad es al menos 170 millones de toneladas, de los cuales casi el 78% corresponde a termoplásticos y el restante 22% a termofijos. Se considera que el 36% en peso se procesa mediante extrusión, 32% moldeo por inyección, 10% moldeo por soplado, 6% calandrado, 5% revestimiento, 3% moldeo por compresión y 8% otros.

En el Ecuador se fabrican 1400 millones de botellas y apenas el 39% de esa cifra se recicla. Hoy en Ecuador existen unas 2000 microempresas que se dedican a la recolección y tratamiento de materiales reciclables.

Uno de los factores que más está contribuyendo al desarrollo del reciclado del PET es la variedad de aplicaciones existentes, lo que determina que exista una importante demanda de este producto. Entre las más relevantes está la fibra textil, fibra para alfombra, relleno de edredón, las láminas para fabricación de blisters y cajas, los flejes para productos voluminosos, los envases para productos no alimentarios, los envases multicapa para alimentos y los envases para alimentos.

Un hogar promedio suele consumir un mínimo de dos botellas de plástico al día, con un máximo que podría llegar a las cinco botellas, si son grandes bebedores de gaseosas y si también compran agua embotellada pueden llegar a un consumo de 15 botellas, eso hace un total de 5475 botellas de plástico al año de una sola familia. La ESPOCH desecha 60 Kg de botellas plásticas de PET por día.

El equipo de extrusión de botellas plásticas PET recicladas, es el único en la FACULTAD DE CIENCIAS DE LA ESPOCH; el mismo que completa la línea de equipos necesarios para la producción de pellets.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente el laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOCH no cuenta con un equipo de extrusión de plástico, por lo que se ha visto la necesidad de diseñar y construir un equipo para la producción de pellets a partir de botellas plásticas recicladas a nivel interno de la institución.

El principal problema ambiental del PET en la ESPOCH es su disposición, ya que una vez que se convierte en residuo, es notoria su presencia en los cauces de corrientes superficiales y en el drenaje provocando taponamiento y dificultades en los procesos de desazolve, pues se está hablando de una montaña de basura plástica de recipientes desechados; sin embargo, estas botellas se pueden reciclar y reutilizar, sin dañar el ambiente. Su actual disposición no sólo representa un problema ecológico, sino también un dramático desperdicio de un material con gran potencial de reutilización.

Mediante esta reutilización de botellas plásticas PET, se contribuirá en la minimización de la contaminación del ambiente y se podrá obtener pellets, los mismos que a través de otros procedimientos permitirán obtener diversos artículos textiles como: ropa variada, relleno de almohadas, edredones, colchas, tapizados para la industria automóvil, etc. Este equipo además fomentará el aprendizaje de los estudiantes de Ingeniería Química, de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH; mediante la práctica, reforzando así los conocimientos expuestos en la cátedra de Operaciones Unitarias.

OBJETIVOS

GENERAL

Diseño y Construcción de un extrusor de tornillo para la obtención de pellets de botellas plásticas de PET recicladas.

ESPECÍFICOS

- Identificar las variables presentes en el proceso de extrusión de las escamas de PET.
- Efectuar los cálculos de ingeniería para el Diseño de un Extrusor de tornillo.
- Dimensionar el equipo de extrusión para la obtención de pellets de botellas plásticas PET recicladas.
- Realizar pruebas de funcionamiento y validación del equipo.

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1. MARCO TEÓRICO

1.1 PET

“El Polietilen-tereftalato o PET está constituido de petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de PET es 64% de petróleo, 23% de derivados líquidos del gas natural y 13% de aire. A partir del petróleo crudo se extrae el paraxileno y se oxida con el aire para dar ácido tereftálico. El etileno, que se obtiene principalmente a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar el etilenglicol. La combinación del ácido tereftálico y el etilenglicol produce como resultado el PET.

Entre las aplicaciones más utilizadas del PET tenemos: Botellas de gaseosas, agua, aceite y vinos; envases farmacéuticos; tejas; películas para el empaque de alimentos; cuerdas, cintas de grabación; alfombras; zuncho; rafia; fibras.”¹

1.1.1 RECICLADO DE LOS PLÁSTICOS

“Los materiales se reciclan de muchas maneras; por ejemplo, una porción del polímero que resulta un desecho proveniente de un proceso de manufactura (conocido como remolido) se utiliza en las plantas de reciclaje. El reciclaje de los materiales termoplásticos es relativamente sencillo y se practica extensamente.

Para los productos PET (símbolo de reciclaje “PETE”, a causa de problemas de marcas registradas), el número es el 1. Para el HDPE, policloruro de vinilo PVC, LDPE, PP y PS los números son 2, 3, 4, 5 y 6 respectivamente. Otros plásticos se identifican con el número 7.

Los plásticos termofijos y elastómeros son más difíciles de reciclar, aunque pueden aun así volver a utilizarse. En vista de la característica limitada de los petrolíferos, de la amenaza del calentamiento del globo terráqueo y de la necesidad de llegar a tener un entorno más limpio, es importante hacer un uso cuidadoso y procurar el reciclaje de todo tipo de materiales.”²

¹ULTIMAS ESTADISTICAS DEL CONSUMO DEL PET EN EL ECUADOR
http://www.minambiente.gov.co/documentos/guia_ambiental_proceso_basico_para_transf_plastico.pdf

²ASKELAND, Donald R. (2004) Ciencia e Ingeniería de los materiales; p.p. 687-712.

1.1.2 PROPIEDADES DEL PET RECICLADO MECÁNICAMENTE

“Las diferencias en las propiedades del PET reciclado mecánicamente comparadas con las del PET virgen pueden ser atribuidas principalmente a la historia térmica adicional experimentada por el material reciclado, la cual da como resultado un decremento en el peso molecular, junto con un incremento en el ácido carboxílico, color y nivel de acetaldehído.

Estudios han demostrado que el RPET (PET reciclado) posee un módulo de Young menor, mayor elongación a la rotura y mayor resistencia al impacto que el PET virgen. Así, el RPET es más dúctil mientras el PET virgen es más frágil; este es un resultado de las diferencias en la cristalinidad entre los materiales.”³

1.1.3 CARACTERÍSTICAS DEL PET Y RPET

TABLA 1.1.3-1

CARACTERÍSTICAS DEL PET VIRGEN Y RECICLADO

Propiedad	PET virgen	RPET
Módulo de Young [MPa]	1890	1630
Resistencia a la rotura [MPa]	47	24
Elongación a la rotura [%]	3,2	110
Resistencia al impacto [Jm^{-1}]	12	20
IV (dlg^{-1})	0.72 – 0.84	0.46 – 0.76
Temperatura de fusión ($^{\circ}\text{C}$)	244 - 254	247 - 253
Peso molecular (g mol^{-1})	81600	58400

Fuente: ESTADÍSTICAS DE LAS BOTELLAS PLÁSTICAS DE PET
<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/proceso-de-reciclaje-del-pet.html>

³ ESTADÍSTICAS DE LAS BOTELLAS PLÁSTICAS DEL PET
<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/proceso-de-reciclaje-del-pet.html>

1.1.4 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LOS TERMOPLÁSTICOS

“Las propiedades de los termoplásticos cambian en función de la temperatura. Es necesario saber la forma en que ocurren estos cambios, ya que pueden ayudarnos a diseñar mejores componentes y guiar el tipo de técnicas de procesamiento que deban utilizarse. Una vez que se hayan enfriado por debajo de la temperatura de fusión, los materiales termoplásticos pueden ser amorfos o cristalinos.

1.1.4.1 POLÍMEROS LÍQUIDOS

Los materiales termoplásticos, por lo común, no se funden a una temperatura precisa. En vez de ello, existe, por lo general, un rango de temperaturas en el cual ocurre la fusión, dichos rangos se indican en la siguiente tabla:

TABLA 1.1.4-1

RANGOS DE TEMPERATURA DE FUSIÓN VÍTREA (°C) PARA POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS Y ELASTÓMEROS

Polímeros	Temperatura de fusión (°C)	Temperatura de Transición vítrea (T _g) (°C)	Temperatura de procesamiento (°C)
Polímeros por adición			
Poliétileno de baja densidad (LD)	98-115	-90 a -25	149-232
Poliétileno de alta densidad (HD)	130-137	-110	177-260
Cloruro de Polivinilo	175-212	87	
Polipropileno	160-180	-25 a -20	190-288
Poliestireno	240	85 a 125	
Poliacrilonitrilo	320	107	
Politetrafluoroetileno (teflón)	327		
Policlorotrifluoroetileno	220		
Polimetilmetacrilato (acrílico)		90 a 105	
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	110-125	100	177-260
Polímeros por condensación			
Acetal	181	-85	
Nylon 6,6	243-260	49	260-327
Acetato de celulosa	230		
Policarbonato	230	149	271-300
Poliéster	255	75	
Poliétileno de tereftalato (PET)	212-265	66 a 80	227-349
Elastómeros			
Silicona		-123	
Polibutadieno	120	-90	
Policloropreno	80	-50	
Poliisopreno	30	-73	

Fuente: ASKELAND, Donald R. (2004) *Ciencia e Ingeniería de los materiales*; p.689.

1.1.4.2 TEMPERATURA DE DEGRADACIÓN

A temperaturas muy altas puede destruirse los enlaces covalentes entre los átomos dentro de la cadena lineal y el polímero puede quemarse o carbonizarse. En los polímeros termoplásticos, la descomposición se presenta en el estado líquido; en los termoestables, en el estado sólido. Cuando los plásticos se queman, generan humo, lo cual es peligroso.”⁴

1.1.4.3 LA VISCOSIDAD DE LOS PLÁSTICOS

Los plásticos fundidos difieren mucho en sus viscosidades. Además, la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura y al aumentar la velocidad de corte (es decir, la velocidad de flujo). Por lo tanto, es muy importante mantener un adecuado control de la temperatura y de la velocidad de corte (velocidad de rotación del husillo) para lograr que el plástico fundido salga siempre del extrusor con la misma consistencia.

Por otro lado, entre mayor sea la viscosidad, mayor será el consumo de energía.

Así como la viscosidad depende de la temperatura y de la velocidad de flujo, también depende del peso molecular del plástico. La viscosidad aumenta al aumentar el peso molecular.”⁵

1.1.4.4 FUENTES DE CALENTAMIENTO

“La importancia de un cuidadoso control de temperatura en las operaciones de extrusión hace que haya que insistir mucho en el carácter de la fuente de calor, ya sea éste un medio directo, un sistema eléctrico o un líquido de transmisión térmica.

1.1.4.5 FACTORES EN UN SISTEMA DE CALENTAMIENTO

- El sistema debe proporcionar una temperatura al menos de 20 °C, superior a la que se requiere para las temperaturas máximas de operación.
- Debe comunicar la máxima transmisión de calor en el menor tiempo, para proteger a los plásticos que tengan una vida térmica muy limitada.

⁴ ASKELAND, Donald R. (2004) Ciencia e Ingeniería de los materiales; p.p. 687-712.

⁵ RAMOS, Luis F. (1993). Extrusión de plásticos; 188p.

- Debe poderse enfriar la máquina a una velocidad suficiente para evitar la descomposición de los materiales sensibles al calor.
- Debe ser sencillo de proyecto para hacer mínimas la conservación y la limpieza y para economizar espacio.
- Debe basarse en el uso de la fuente calorífica más barata que pueda encontrarse en la localidad.”⁶

1.2 EXTRUSIÓN

“Se llama extrusión el proceso en el cual se hace pasar a presión un material por una matriz para producir artículos de sección transversal constante y longitud indefinida. Si bien en la industria de los plásticos se limita por lo general a los materiales termoplásticos.”⁷

1.2.1 ETIMOLOGÍA DE EXTRUSIÓN

“La palabra extrusión viene del latín, “extrudere” que significa forzar un material a través de un orificio. La extrusión es un proceso industrial, que permite obtener barras y perfiles de diferentes formas, generalmente complejas.”⁸

1.2.2 EXTRUSOR DE UN SÓLO HUSILLO

“Por lo general son máquinas universales empleadas para mezclar, plastificar, granular materiales, fabricar películas, láminas, tubos y artículos de configuración compleja.

Existen numerosos tipos y tamaños de máquinas que difieren entre sí por las características y forma constructiva, a saber: clase de material a transformar y configuración del artículo, diámetro y longitud del husillo, potencia total y específica de calentamiento del cilindro.”⁹

“En la siguiente figura se muestra esquemáticamente una extrusora de un husillo. Examinando el dibujo podemos ver claramente que el motor eléctrico 1, montado en la parte posterior de la máquina, se transmite el movimiento de giro por medio del

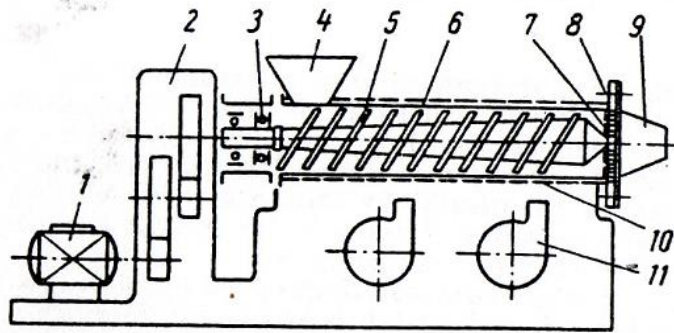
⁶SIMONDS, Herbert R. (1972). Extrusión de plásticos, gomas y metales; p.p. 126-215

⁷WAGANOFF, N.P. (1969). Transformación de plásticos; p.p. 45-125.

⁸QUE ES LA EXTRUSIÓN
<http://etimologias.dechile.net/?extrusio.n>

⁹ASKELAND, Donald R. (2004) Ciencia e Ingeniería de los materiales; p.p. 687-712.

reductor 2, al husillo 5, que recoge el material de la tolva de carga 4 en forma de gránulos, polvo, cinta o masa caliente en donde la mezcla, plastifica, comprime y lo desplaza por el canal helicoidal a lo largo del cilindro 6.



Fuente: SABGORODNY, V.K. (1973). *Transformación de plásticos*; p.3.

Fig.1.2.2-1 MÁQUINA DE EXTRUSIÓN DE UN HUSILLO

Es gracias al husillo, que se consigue la homogenización del termoplástico fundido y su extrusión a través de las mallas filtrantes 7, rejilla 8 y cabezal o hilera perfiladora 9.

El cilindro está dividido en varias zonas autónomas donde la temperatura se controla y regula automáticamente.

Con la finalidad de evitar accidentes desagradables los calentadores van cerrados con la cubierta 10. Generalmente, para refrigerar las zonas calientes del cilindro, se emplean los ventiladores 11.

El cojinete axial 3, montado en el extremo izquierdo del husillo, soporta convenientemente los esfuerzos axiales que surgen al girar el husillo.¹⁰

1.2.3 VENTAJAS

- Es el proceso más importante de obtención de formas plásticas en volumen de producción.
- Producción a corto plazo.
- Alta productividad.
- Tiene buena flexibilidad para cambios de productos sin necesidad de hacer inversiones mayores.

¹⁰SABGORODNY, V.K. (1973). *Transformación de plásticos*; p.p. 1-41.

- Operación continua.
- Posibilidad de combinación de colores.
- El costo de la maquinaria de extrusión es moderado, en comparación con otros procesos como inyección, soplado o calandrado.

1.2.4 LIMITACIONES

- Las piezas a obtener son de sección transversal constante.
- La mayoría de productos requieren procesos posteriores de acabado.

1.2.5 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE UNA EXTRUSORA

- “Producción máxima (Kg/hora).
- Potencia de la extrusora y presión máxima admisible de salida.
- Facilidad de limpieza (cilindro autolimpiable, etc.)
- Facilidad de manejo y de control.
- Variedad de accesorios.
- Material por tratar.

1.2.6 DATOS TÉCNICOS POR TENER EN CUENTA

- Producción (Kg/hora, variable según la densidad del polímero).
- Relación L/D (longitud/diámetro, a partir de 20 para grandes producciones).
- Husillo: número, diseño, material.
- Velocidad de giro (rpm).
- Par motor: torque (define la presión de cabeza).
- Zonas de calefacción.
- Material del cilindro.

- Diseño del cilindro: una sola chimenea de desgasificación o más.
- Consumo de agua (L/h).
- Consumo eléctrico (kw/h).
- Dimensiones de la máquina.¹¹

1.2.7 IMPORTANCIA DE LA FRICCIÓN

“Las fuerzas que actúan sobre el compuesto de extrusión se deben a la fricción contra las cuatro áreas de las superficies de confinamiento, es decir:

- a) contra la superficie del cilindro entre las partes planas del tornillo
- b) contra la parte frontal del tornillo
- c) contra la parte posterior de la rosca.”¹²

1.2.8 HINCHAMIENTO DEL EXTRUIDO

“Es un efecto elástico bien conocido por todo aquel que ha operado un extrusor, donde se observa que la sección transversal del extruido es mayor que la sección transversal del dado.

Se han propuesto diversas teorías para explicar este hinchamiento, pero quizá la más aceptada es la que asume que las moléculas se orientan (o alinean) al fluir por el dado y se retraen inmediatamente al salir a la atmosfera. Bajo circunstancias normales, el hinchamiento del extruido puede reducirse de la siguiente forma:

- a) Disminuyendo la velocidad de extrusión.
- b) Aumentando la temperatura del plástico fundido.
- c) Aumentando la longitud paralela del dado.
- d) Aumentando la velocidad de jalado de extruido.”¹³

¹¹MORALES, J.E. (2010). Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos; p.p. 153-257.

¹²SIMONDS, Herbert R. (1972). Extrusión de plásticos, gomas y metales; p.p. 126-215

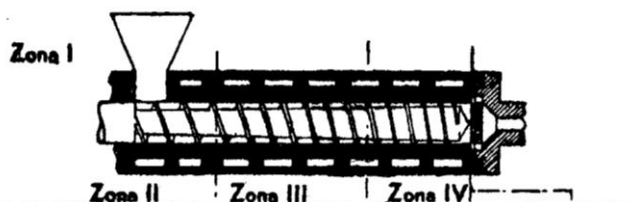
¹³RAMOS, Luis F. (1993). Extrusión de plásticos; 188p.

1.2.9 ZONAS DE LA EXTRUSORA

1.2.9.1 ZONA DE ALIMENTACIÓN

“En esta parte ocurre el transporte de gránulos sólidos y comienza la elevación de temperatura del material.”¹⁴

“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. Los filetes son pronunciados, con objeto de transportar una gran cantidad de material al interior del extrusor.



	Zona II	Zona III	Zona IV
Plástico	Casi sólido	Semisólido	Flujo plástico
Viscosidad	$N \approx \infty$	Cae rápidamente	N - K
Temp. plástico	Frío	Calor rápido	Por encima de la máquina
Presión	Rápido aumento	Rápido aumento hasta cerca del máximo	Ligero aumento puede bajar
Fuente de presión	Fricción	Fricción y viscosidad	Viscosidad
Posible análisis	Si	Muy difícil	Si

Fuente: SIMONDS, Herbert R. (1972). *Extrusión de plásticos, gomas y metales*; p.207

Fig.1.2.9.1-1SECCIÓN DE LA MÁQUINA DE EXTRUSIÓN MOSTRANDO LAS DIVERSAS ZONAS.

1.2.9.2 ZONA DE COMPRESIÓN O PLASTIFICACIÓN

En esta zona, los gránulos de polímero son comprimidos y están sujetos a fricción y esfuerzos cortantes, se logra una fusión efectiva. Como las profundidades de los álabes no son constantes, las diferencias de diseño dependen del tipo de material por procesar, ya que los plásticos tienen un comportamiento distinto al fluir. El polímero se funde por acción mecánica en combinación con la elevación de su temperatura por medio del calentamiento del cañón. La acción mecánica incluye los esfuerzos de corte (cizalla) y el arrastre, que empuja el polímero hacia la boquilla, e implica un incremento en la presión.

¹⁴QUE ES LA EXTRUSIÓN

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/extrusion-de-materiales-plasticos.html>

1.2.9.3 ZONA DE DOSIFICACIÓN O BOMBEO

En la mayoría de los casos, esta zona es mucho menor a la profundidad del 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.”¹⁵

“El plástico en esta zona, se comporta casi como un líquido viscoso. Se está homogeneizando y se está aproximando a una temperatura uniforme. Las medidas de temperatura muestran que junto al terminal del tornillo éste puede recalentarse por encima de la temperatura de la camisa por efecto de la fricción. La fuerza de avance neta en esta zona es pequeña e incluso puede hacerse negativa en algunos casos, según el diseño del tornillo y la adherencia de los gránulos.”¹⁶

1.2.10 EQUIPOS PARA LA EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS

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

a) Extrusoras de desplazamiento positivo:

- Extrusoras de pistón
- Bombas de extrusión (bombas de engranaje)

b) Extrusoras de fricción viscosa:

- Extrusora de tambor rotatorio
- Extrusora de rodillos
- Extrusora de tornillo.”¹⁷

1.2.11 FUNCIONES DE UN EQUIPO DE EXTRUSIÓN

Los equipos de extrusión cumplen diferentes funciones, dependiendo del fin especificado para su operación. En general, las principales funciones de una extrusora son:

¹⁵MORALES, J.E. (2010). Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos; p.p. 153-257.

¹⁶SIMONDS, Herbert R. (1972). Extrusión de plásticos, gomas y metales; p.p. 126-215

¹⁷QUE ES LA EXTRUSIÓN

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/extrusion-de-materiales-plasticos-ii.html>

- Recibir y almacenar el polímero
- Transportar el material sólido
- Calentar y comprimir el polímero
- Homogenizar
- Generar la presión necesaria para la obtención del producto final
- Extruir el semielaborado.

1.2.12 SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA DEL EXTRUSOR

“La máquina de extrusión de tornillo sencillo necesita un sistema motriz para funcionar: consiste en un motor de velocidad variable, un mecanismo de transmisión de engranes que permite girar al husillo en un rango adecuado de velocidad, un conjunto de cojinetes de aguante para absorber el impacto de empuje hacia atrás del husillo.

Algunos de los componentes mecánicos importantes de la extrusora son el sistema y los cojinetes de apoyo que soportan el empuje axial del husillo hacia atrás, y el sistema motriz, constituido por el motor, la transmisión y el reductor de velocidad.

De acuerdo con Anguita (1977), delante del husillo se han medido presiones de hasta 500 kg/cm² pero lo más normal es encontrar presiones de unos 350 kg/cm². Con los datos anteriores armó la siguiente tabla.”¹⁸

TABLA 1.2.12-1

RELACIÓN DEL TAMAÑO DE EXTRUSORA CONTRA EL EMPUJE AXIAL DE RETENCIÓN DEL HUSILLO

Tamaño de la extrusora (diámetro de husillo en mm)	Empuje axial (toneladas métricas)
45	0.85
60	1.65
90	3.50
120	6.00
150	10.00
200	17.00
250	28.00

Fuente: MORALES, J.E. (2010). *Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos*; p. 231

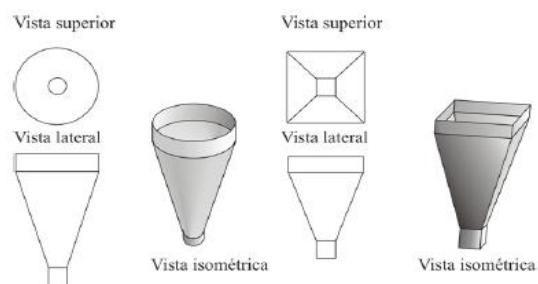
¹⁸MORALES, J.E. (2010). *Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos*; p.p. 153-257.

1.2.13 COMPONENTES DE LA EXTRUSORA

1.2.13.1 TOLVA

“Es el depósito de materia prima, en donde el material plástico es colocado en forma de pellets o gránulos para la alimentación continua de la máquina extrusora.

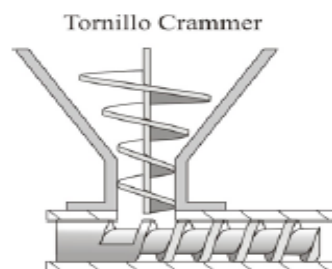
Debe tener dimensiones apropiadas para ser completamente eficaz; malos diseños, principalmente en los ángulos de bajada de material, pueden provocar estancamiento del material y paros inesperados en la producción.



Fuente: DISEÑO DE UNA MAQUINA RECICLADORA DE PET
<http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

Fig.1.2.13.1-1 TIPOS DE TOLVAS

En materiales de fácil compactación, una tolva que posea un sistema vibratorio puede fraccionar el material formado y permitir la caída del plástico, pero si aun así se presentan problemas con el material a procesar, una tolva que posea un tornillo puede ser la solución para lograr la adecuada alimentación.



Fuente: DISEÑO DE UNA MAQUINA RECICLADORA DE PET
<http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

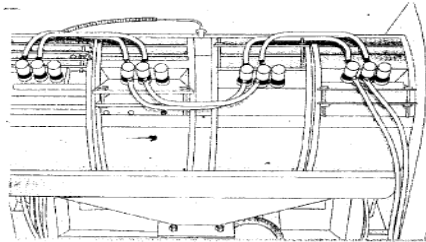
Fig.1.2.13.1-2 TORNILLO DE ALIMENTACIÓN

Además existen tolvas con sistemas de secado que son usadas para eliminar la humedad del material que va a ser procesado.

1.2.13.2 CILINDRO, BARRIL O CAÑÓN

“El cilindro debe ser lo suficientemente sólidos como para soportar presiones de hasta 70 MN/m² (meganewtons \approx 700 Kg/cm²), resistentes a los efectos térmicos para aguantar temperaturas de hasta 400 °C y lo suficientemente resistentes al desgaste y a la corrosión.”¹⁹

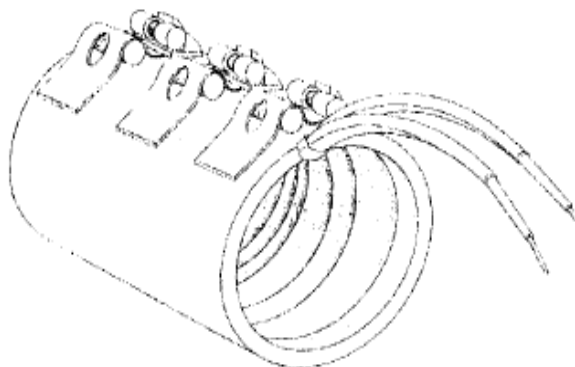
“El interior del cilindro es revestido con una camisa de alta rigidez de su superficie para la cual se usa el acero nitrogenado. También se hacen camisas de dos caños concéntricos, revistiéndose el interior con aleaciones muy duras, como por ejemplo “xaloy” (Co 38%, Ni 38%, Cr 8%, Mo 6%, Si 4%, C 3% y B 3%), “Hasteloy” y otras.”²⁰



Fuente: MORALES, J.E. (2010). *Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos*; p.240

Fig.1.2.13.2-1 RESISTENCIAS ELÉCTRICAS MONTADAS EN EL CAÑÓN DE UN EXTRUSOR

El barril posee resistencias eléctricas que proporcionan parte de la energía térmica que el plástico requiere para ser fundido. El conjunto de resistencias, en algunos casos va complementado con un sistema de enfriamiento que puede ser un flujo líquido o por ventiladores de aire. Todo el sistema de calentamiento se controla desde un tablero, donde la temperatura de proceso se establece en función del tipo de material y del producto deseado.



Fuente: MORALES, J.E. (2010). *Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos*; p.239

Fig.1.2.13.2-2 RESISTENCIAS ELÉCTRICAS

¹⁹SABGORODNY, V.K. (1973). *Transformación de plásticos*; p.p. 1-41.

²⁰WAGANOFF, N.P. (1969). *Transformación de plásticos*; p.p. 45-125.

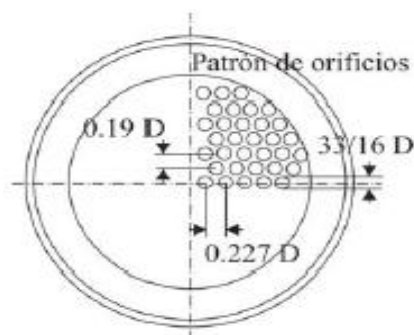
Para evitar pérdidas de calor a lo largo del barril y evitar cambios no deseados en la calidad de la producción, se acostumbra aislar el cuerpo del barril con algún material de baja conductividad térmica como la fibra de vidrio o el fieltro.

“El funcionamiento de una máquina de extrusión depende de la diferencia entre las fuerzas de fricción ejercidas por el material sobre el tornillo y las fuerzas que actúan sobre las paredes del cilindro para conseguir una adecuada plastificación del material. Es deseable aumentar las fuerzas ejercidas sobre la pared del cilindro y disminuir las fuerzas de fricción del tornillo, mientras que se mantiene un buen estado de plastificación dentro del espacio del cilindro.”²¹

1.2.13.3 PLATO ROMPEDOR Y FILTROS

“El plato rompedor se encuentra al final del cilindro. Se trata de un disco delgado de metal con agujeros. El propósito del plato es servir de soporte a un paquete de filtros cuyo fin principal es atrapar los contaminantes para que no salgan con el producto extruido. Los filtros además mejoran el mezclado y homogenizan el fundido. Los filtros van apilados delante del plato rompedor, primero se sitúan los de malla más ancha, reduciéndose el tamaño de malla progresivamente. Detrás se sitúa un último filtro también de malla ancha y finalmente el plato rompedor que soporta los filtros.

Conforme se ensucian las mallas es necesario sustituirlas para evitar una caída de presión excesiva y que disminuya la producción. Por ello, el diseño del plato debe ser tal que pueda ser reemplazado con facilidad.



Fuente: DISEÑO DE UNA MAQUINA RECICLADORA DE PET
<http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

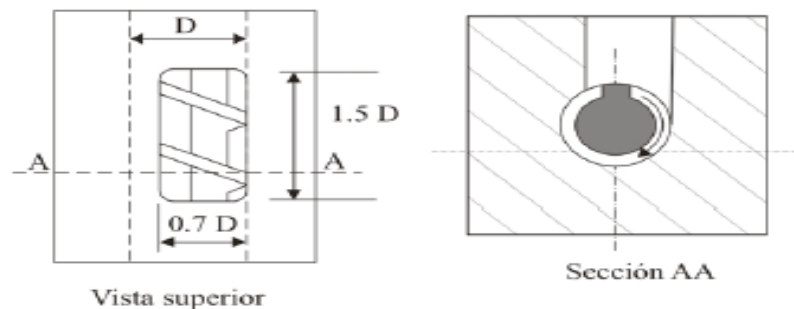
Fig.1.2.13.3-1 PLATO ROMPEDOR

²¹SIMONDS, Herbert R. (1972). Extrusión de plásticos, gomas y metales; p.p. 126-215.

1.2.13.4 GARGANTA DE ALIMENTACIÓN

“El cilindro puede estar construido en dos partes, la primera se sitúa debajo de la tolva y se denomina garganta de alimentación. Suele estar provista de un sistema de refrigeración para mantener la temperatura de esta zona lo suficientemente baja para que las partículas de granza no se adhieran a las paredes internas de la extrusora.

La garganta de alimentación está conectada con la tolva a través de la boquilla de entrada o de alimentación.”²²



Fuente: DISEÑO DE UNA MÁQUINA RECICLADORA DE PET
<http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

Fig.1.2.13.4-1 GARGANTA DE ALIMENTACIÓN

1.2.13.5 TORNILLO O HUSILLO

“El husillo es el órgano fundamental de trabajo de una extrusionadora. Tanto la producción como la aplicación de la extrusionadora dependen del diámetro del husillo, de la relación de su longitud al diámetro ($L:D$), de la velocidad de giro y de las particularidades geométricas del canal helicoidal, perfil de vértice de los filetes y del cabezal, existencia de refrigeración, número de zonas, etc.”²³

“A medida que el material se va moviendo a lo largo del tornillo, aumentan la temperatura y la presión, y el material tiende a hacerse más compacto; es decir, que disminuye su volumen por unidad de peso. Los tornillos largos descargan a mayor presión que los pequeños y, por tanto, la compactación del material se hace mayor. Por consiguiente, el tornillo debe tener un volumen de paso decreciente.”²⁴

²² DISEÑO DE UNA MÁQUINA RECICLADORA DE PET
<http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

²³ SABGORODNY, V.K. (1973). Transformación de plásticos; p.p. 1-41.

²⁴ SIMONDS, Herbert R. (1972). Extrusión de plásticos, gomas y metales; p.p. 126-215

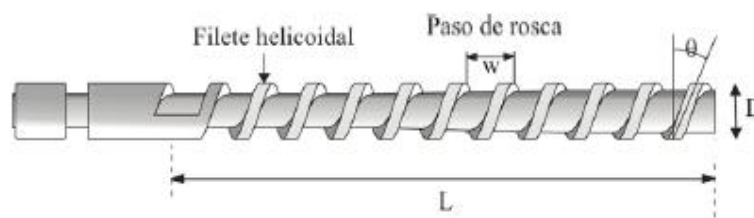
TABLA 1.2.13.5-1

TAMAÑO DEL TORNILLO Y ESPACIO ENTRE EL BARRIL

Tamaño del tornillo mm (pulg)	Espacio mm (pulg)
64 (2.5)	0.05 (0.002)
76 (3)	0.10 (0.004)
114 (4.5)	0.13 (0.005)
152 (6)	0.18 (0.007)

Fuente: Rosato D.V. ExtrudingPlastic

“El tornillo o husillo consiste en un cilindro largo rodeado por un filete helicoidal. El tornillo es una de las partes más importantes ya que contribuye a realizar las funciones de transportar, calentar, fundir y mezclar el material.



*Fuente: DISEÑO DE UNA MAQUINA RECICLADORA DE PET
<http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>*

Fig.1.2.13.5-1 TORNILLO DE UNA EXTRUSORA

El material se va presurizando a medida que avanza por el tornillo, comenzando con presión atmosférica en la tolva y aumentando hasta la salida por la boquilla. La sección de paso del tornillo no es constante, sino que es mayor en la zona de alimentación (mayor profundidad de canal).²⁵

“Los principales parámetros del husillo son: el largo, el diámetro, las dimensiones de las zonas, el perfil de roscado, la luz entre el husillo y el cilindro, la forma de su extremidad.”²⁶

²⁵DISEÑO DE UNA MÁQUINA RECICLADORA DE PET
<http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>

²⁶WAGANOFF, N.P. (1969). Transformación de plásticos; p.p. 45-125.

TABLA 1.2.13.5-2

PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DE LOS HUSILLOS, EN mm

Diámetro D (mm)	Paso t (mm)	Profundidad del canal en la zona de alimentación, h₁ (mm)	Profundidad del canal en la zona de extrusión, h₂(mm)	Anchura de la cresta del filete, e (mm)
32	32	6	1,9	3,8
45	45	8	2,1	5
63	63	9,6	2,4	6,3
90	90	11,2	2,8	9
125	125	13,5	3,2	12
160	160	15	3,7	15

Fuente: SABGORODNY, V.K. (1973). Transformación de plásticos; p.17

1.2.13.5.1 RELACIÓN L/D DEL TORNILLO

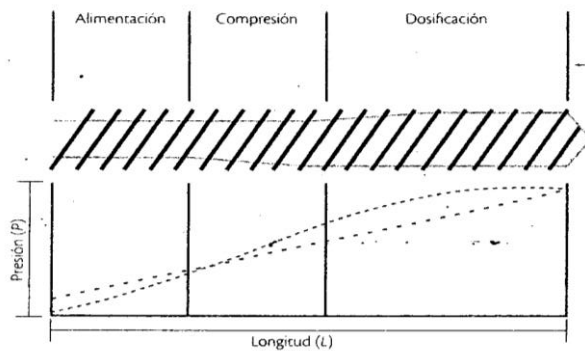
“La definición del factor L/D es la relación entre longitud y diámetro del tornillo. Si el husillo tiene una relación L/D de 16:1, significa que la longitud es 16 veces mayor que el diámetro; si el husillo tiene un diámetro de 2” , su longitud será de 32” .

Para Womer (2005), la relación L/D varía con el proveedor: algunos fabricantes lo definen como la porción “encerrada” del tornillo, o miden la longitud de la hélice desde el lado frontal del puerto de alimentación hasta el final del tornillo. Otros miden la longitud de la hélice desde el centro del puerto de alimentación, y otros miden la longitud “efectiva” o toda la longitud de la hélice.

1.2.13.5.2 VARIACIÓN DEL GRADIENTE DE PRESIÓN EN UN EXTRUSOR DE HUSILLO SIMPLE

De acuerdo con Morton (1993), una consecuencia de que disminuya la profundidad del canal es el incremento de la presión a lo largo del extrusor y ésta es la que impulsa el material fundido a pasar a través del dado.²⁷

²⁷MORALES, J.E. (2010). Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos; p.p. 153-257.



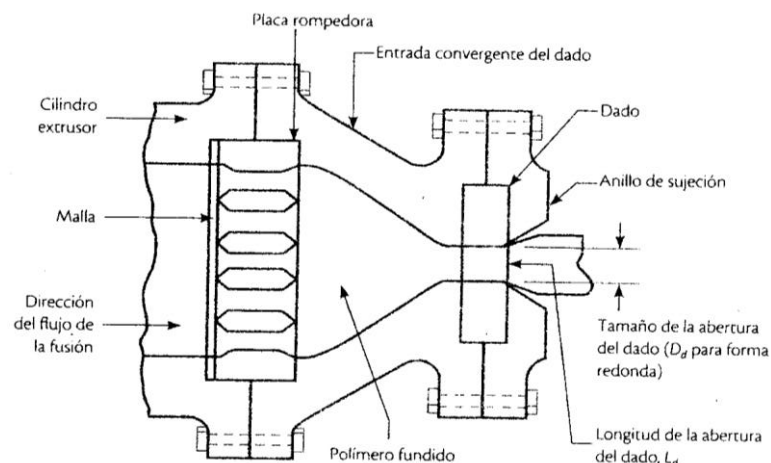
Fuente: MORALES, J.E. (2010). *Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos*; p.244
Fig.1.2.13.5.2-1 VARIACIÓN DEL GRADIENTE DE PRESIÓN ($G_p = P/L$) EN UN EXTRUSOR DE HUSILLO SIMPLE, SEGÚN MORTON

En cualquier operación de extrusión de un material, a medida que éste se va moviendo a lo largo del husillo, aumentan la temperatura y la presión; entre el husillo y el cilindro se origina el cizallamiento del material en el canal del husillo.

1.2.13.6 EL DADO

“El dado (traducción literal del inglés, cabezal y boquilla en español) en el proceso de extrusión es análogo al molde en el proceso de moldeo por inyección, a través del dado fluye el polímero fuera del cañón de extrusión y gracias a éste toma el perfil deseado.

La presión alta que experimenta el polímero antes del dado, ayuda a que el proceso sea estable y continuo, sin embargo, el complejo diseño de los dados es responsable de esta estabilidad en su mayor parte.



Fuente: MORALES, J.E. (2010). *Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos*; p.253
Fig.1.2.13.6-1 CABEZAL DEL EXTRUSOR

Los dados para extrudir polímeros consideran la principal diferencia entre materiales compuestos por macromoléculas y los de moléculas pequeñas, como metales. Los metales permiten ser procesados con esquinas y ángulos estrechos, en cambio los polímeros tienden a formar filos menos agudos debido a sus características moleculares, por ello es más eficiente el diseño de una geometría final con ángulos suaves o formas parabólicas e hiperbólicas.”²⁸

“La presión a la entrada del dado (al final del husillo) es alta y la presión a la salida del dado es baja (atmosférica). Es importante mantener una presión alta en el interior del dado. Esto se logra al diseñar restricciones al flujo en el interior del dado.”²⁹

“Es la placa que se acopla al cañón, y está formada por dos placas: una fija al cañón y otra móvil, en la que se colocan la placa rompedora, una placa soporte o convergente del dado, el dado o matriz y el anillo de sujeción.”³⁰

1.3 DISEÑO DE LA EXTRUSORA

1.3.1 VOLÚMEN DE LA TINA DE ENFRIAMIENTO

Es el espacio ocupado por el agua en la tina de enfriamiento, que sirve para reducir la temperatura a la que salen los hilos de PET.

$$V = b * a * h \quad \text{Ec. 1.3.1 – 1}$$

Donde:

V = Volumen de la tina de enfriamiento (L)

b = Longitud de la tina (m)

a = Ancho de la tina (m)

h = Altura de la tina (m)

El volumen en la industria se utiliza para saber las medidas exactas que se deben envasar en un recipiente determinado, porque toda la producción debe tener la misma.

Además se aplica en el hogar para saber la cantidad de aditivos que se puede adicionar a una cocción respecto a la cantidad existente en el recipiente.

²⁸QUE ES LA EXTRUSIÓN

http://es.wikipedia.org/wiki/Extrusi%C3%B3n_de_pol%C3%ADmero

²⁹RAMOS, Luis F. (1993). Extrusión de plásticos; 188p.

³⁰MORALES, J.E. (2010). Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos; p.p. 153-257.

1.3.2 VOLÚMEN DE LA OLLA DE RECIRCULACIÓN

Es el espacio ocupado por el agua en la olla de recirculación, que sirve para almacenar el fluido que permanecerá en constante movimiento.

$$V = \pi * \frac{Dt^2}{2} * h \quad \text{Ec. 1.3.2 - 1}$$

Donde:

Dt = Diámetro de la olla de recirculación (cm)

h = Altura de la olla de recirculación (cm)

V = Volumen de la olla de recirculación (L)

Se puede utilizar en la arquitectura, en donde se considera al volumen como la base que contiene el espacio del trabajo arquitectónico. Además se aplica en los compuestos químicos para saber la medida de reactivos que se deben adicionar a un compuesto.

1.3.3 NÚMERO DE FILETES DEL HUSILLO

Es el número de hélices que se enroscan en paralelo sobre el núcleo del tornillo o husillo.

$$\frac{L}{D} : \text{Relacion longitud/diametro del husillo}$$

$$\# \text{ de filetes} = \frac{L}{D} \quad \text{Ec. 1.3.3 - 1}$$

Donde:

L = Relación longitud (mm)

D = Diámetro del husillo (mm)

Es utilizado en extrusoras de tornillo o husillo simple y varía según el tipo de material por tratar.

1.3.4 ÁNGULO DE HÉLICE DEL CANAL

Es el ángulo formado por el borde del canal en espiral y una línea paralela a la línea central del tornillo. Este ángulo se determina a partir de:

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{t}{\pi * D} \quad \text{Ec. 1.3.4 - 1}$$

Donde:

D = Diámetro de la variable del canal

t = El paso del husillo (cm)

π = Angulo de hélice de canal

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{t}{\pi} \quad \text{Ec. 1.3.4 - 2}$$

Son de vital importancia para extrusores con husillos no muy especializados; donde siempre se utilizará un ángulo $\varphi = 17.65^\circ$ para cualquier tipo de diámetro cumpliéndose que $t = D$.

1.3.5 FLUJO DE ARRASTRE O DE FRICCIÓN (Q_D o α)

Es aquel que se da debido a la fricción del material con el tornillo y con las paredes del cilindro; además es el principal responsable del movimiento del material desde la tolva de alimentación hasta la boquilla.

$$\alpha = \frac{\pi * m * D * h \left(\frac{t}{m} - e \right) \cos^2 * \varphi}{2} \quad \text{Ec. 1.3.5 - 1}$$

Donde:

D = Diámetro del husillo (cm)

m = Número de canales del husillo

h = Profundidad del canal en la zona de bombeo (cm)

t = Paso del husillo (cm)

e = Anchura de la cresta del filete (cm)

$\cos\varphi$ = Función trigonométrica del coseno del ángulo. (grados)

α = Flujo de arrastre o de fricción (cm^3)

Por lo general es muy utilizado en extrusores de tornillo simple para transportar el material por tratar desde la zona de alimentación hasta la zona de dosificación o bombeo.

1.3.6 FLUJO DE PRESIÓN (Qp o β)

Es opuesto al flujo de arrastre y debido a la diferencia de presión entre la tolva y el cabezal de la máquina, es originada por la restricción que impone la boquilla o el plato rompedor.

$$\beta = \frac{m * h^3 \frac{t}{m} - e \operatorname{sen}\varphi * \operatorname{cos}\varphi}{12 * L} \quad \text{Ec. 1.3.6 - 1}$$

Donde:

β = Flujo de Presión (cm³)

m = Número de canales del husillo

h = Profundidad del canal en la zona de bombeo (cm)

t = Paso del husillo (cm)

e = Anchura de la cresta del filete (cm)

cosφ = Función trigonométrica del coseno del ángulo. (grados)

senφ = Función trigonométrica del seno del ángulo. (grados)

L = Longitud del husillo (cm)

Se aplica para extrusores de tornillo, debido a que, se puede estudiar la presión que existe entre la tolva de alimentación y el dado.

1.3.7 CÁLCULO DE LA HOLGURA DEL FILETE (δ)

Es el espacio que existe entre la cresta del filete del husillo y la superficie interior del cilindro. Generalmente se suele emplear husillos de diámetro constante, manteniendo una holgura entre el husillo y el cilindro de 0.002D.

$$\delta = 0.002 * D \quad \text{Ec. 1.3.7 - 1}$$

Donde:

δ= Holgura del filete (cm)

D= Diámetro del husillo (cm)

Se utiliza en extrusores de tornillo o husillo simple y doble; pero siempre considerando que cuando la holgura es grande el material se mezcla con mayor efectividad, pero disminuye el avance del mismo por aumentar el flujo inverso del material.

1.3.8 FLUJO DE FILTRACIÓN (Q_L o γ)

Es aquel que reduce la producción por pérdidas de material entre las holguras del tornillo-barril y tiene lugar entre el cilindro y el filete del tornillo. Es también opuesto al flujo de arrastre y originado por el gradiente de presión a lo largo del tornillo.

$$\gamma = \frac{\pi^2 * D^2 * \delta^3 * \tan \varphi}{10 * e * L} \quad \text{Ec. 1.3.8 - 1}$$

Donde:

δ = Holgura del filete (cm)

$\tan \varphi$ = Función trigonométrica de la tangente del ángulo. (grados)

D = Diámetro del husillo (cm)

e = Anchura de la cresta del filete (cm)

L = Longitud del husillo (cm)

Q_L = Flujo de Filtración (cm^3)

Tiene utilidad en extrusoras para comprobar la importancia del desgaste de los filetes, lo cual es necesario para el control de las pérdidas en la producción.

1.3.9 CONSTANTE TOTAL DE LA CABEZA (k)

Es aquella que se obtiene cuando el cabezal se divide convencionalmente en sucesivas zonas de diferente configuración, a esta constante se le conoce también como coeficiente de la forma geométrica, estableciendo para un canal cilíndrico la siguiente ecuación:

$$k = \frac{\pi * d^4}{128 * L} \quad \text{Ec. 1.3.9 - 1}$$

Donde:

K = Constante total de la cabeza (cm^3)

d = diámetro del canal del dado (cm)

L = Longitud del canal del dado (cm)

Por lo general se utiliza en extrusores de tornillo simple.

1.3.10 REVOLUCIONES DEL HUSILLO (n)

Es el número de vueltas o rotaciones completadas cada minuto por el tornillo en el interior del cilindro que gira alrededor de un eje, impulsado por un motor-reductor.

$$v = \frac{\pi * D * n}{h_2 * 1s} \quad \text{Ec. 1.3.10 - 1}$$

$$n = \frac{v * h_2 * s}{\pi * D} \quad \text{Ec. 1.3.10 - 2}$$

Donde:

v = Velocidad de cortadura (s^{-1})

h_2 = Profundidad del canal en la zona de extrusión (mm)

D = Diámetro del husillo (mm)

n = Revoluciones del husillo (r.p.m.)

Es utilizado para muchas especificaciones significativas, como por ejemplo, el diámetro, la masa y el esfuerzo de torsión en fórmulas de ingeniería, para calcular los caballos de fuerza, la velocidad lineal, razones de engranaje y la velocidad tangencial.

1.3.11 FLUJO VOLUMÉTRICO

Es el volumen del líquido viscoso que pasa a través de una sección transversal, que en este caso es el cilindro, en la unidad de tiempo

$$Q = \frac{\alpha * k}{k + \beta + \gamma} n \quad \text{Ec. 1.3.11 - 1}$$

Donde:

α = Flujo de arrastre (cm^3)

k = Constante total de la forma geométrica de la cabeza perfiladora (cm^3)

β = Flujo de Presión (cm^3)

Q_L = Flujo de Filtración (cm^3)

n = Revoluciones del husillo (rpm)

Q = Flujo volumétrico (cm^3/min)

Es usado para tener la información en la transferencia de productos, eficacia de los procesos, razón de reacción, razón de producción, entre otras.

1.3.12 ÁREA DEL AGUJERO DEL DADO

Es una medida de extensión del agujero del dado por donde sale el hilo de PET luego de la extrusión.

$$A = \pi * r^2 \quad \text{Ec. 1.3.12 - 1}$$

Donde:

A = Área del agujero del dado (m²)

r = Radio del agujero del dado (mm²)

En extrusión se utiliza para tener diferentes valores de áreas como es el caso del, diámetro interno y externo del cilindro.

1.3.13 VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN DEL HILO EXTRUIDO

Es el desplazamiento que realiza el hilo extruido de PET, en una unidad determinada de tiempo.

$$V = \frac{Q}{A} \quad \text{Ec. 1.3.13 - 1}$$

Donde:

V = Velocidad de producción del hilo extruido (m/s)

Q = Flujo volumétrico (m³/s)

A = Área del agujero del dado (m²)

En la industria se puede utilizar para determinar caudales de un fluido; además para determinar la cantidad de producto obtenido.

1.3.14 POTENCIA REQUERIDA

Es la rapidez con que se efectúa la extrusión, es decir, el trabajo por unidad de tiempo (Potencia = Trabajo/tiempo).

$$N = 32 * E^{-5} * Q * C * T_m - T_o \quad \text{Ec. 1.3.14 - 1}$$

Donde:

T_m = Temperatura de trabajo de extrusión (°C)

T_o = Temperatura ambiente (°C)

Q = Flujo volumétrico (Kg/h)

C = Capacidad calorífica del PET (J/Kg°C)

N = Potencia (HP)

En extrusión se utiliza para dimensionar el motor-reductor el cual mueve los ejes que tienen los transmisores de movimiento como son los engranes y las poleas.

1.3.15 PRESIÓN MÁXIMA

Es aquella que se genera en la parte delantera del husillo cumpliendo un papel importante en el proceso y en el acabado del material.

$$P_{MAX} = \frac{6 * \pi * D * L * n * \mu}{h^2 * \tan\varphi} \quad \text{Ec. 1.3.15 - 1}$$

Donde:

D = Diámetro del husillo (m)

L = Longitud del husillo (m)

n = Revoluciones del husillo (rev/s)

μ = Viscosidad efectiva (Pa.s)

h = Altura del husillo en la zona de dosificación o bombeo (m)

Se usa en extrusores de husillo simple, para determinar la presión máxima que va a soportar una extrusora.

1.3.16 PRESIÓN DE OPERACIÓN

Es la presión a la que vamos a trabajar para obtener los hilos de PET y posteriormente los pellets.

$$P_{op} = \frac{2 * \pi * \mu * D^2 * n * h * \text{sen}\varphi * \text{cos}\varphi}{\left(\frac{R^4}{2 * L_d}\right) + \left(\frac{D * h^3 * \text{sen}^2\varphi}{3 * L}\right)} \quad \text{Ec. 1.3.16 - 1}$$

Donde:

μ = Viscosidad efectiva (N/m²)

D = Diámetro del husillo (m)

n = Revoluciones del husillo (rev/s)

h = Altura en la zona de dosificación (m)

R = Radio del alma del husillo (m)

L = Longitud del husillo (m)

Se aplica en extrusores de tornillo simple.

1.3.17 FUERZA DEL HUSILLO

Es la acción o influencia capaz de modificar el estado de movimiento del tornillo; en donde el motor reductor imprime una aceleración, modificando su velocidad. Para nuestro caso aplicaremos la fórmula empírica dada por Savgorodni que involucra una constante (K), cuyo valor en el sistema internacional es de $K = 9550$ Newton. Metro.

$$Mg = 9550 * \frac{N}{n} \quad \text{Ec. 1.3.17 - 1}$$

Donde:

Mg = Fuerza del husillo (N.m)

N = Potencia del motor en (Kw)

n = Número de revoluciones del husillo (rev/min)

Se puede aplicar con facilidad para determinar la fuerza que ejerce un tornillo dentro de un cilindro en extrusores de tornillo simple.

1.3.18 FLUJO MÁSIKO DEL PET

Es la velocidad a la que la masa del producto extruido pasa a través del cilindro y el dado.

$$Q = \frac{m}{\rho} \quad \text{Ec. 1.3.18 - 1}$$

$$m = Q * \rho \quad \text{Ec. 1.3.18 - 2}$$

Donde:

Q = Caudal volumétrico (m^3/s)

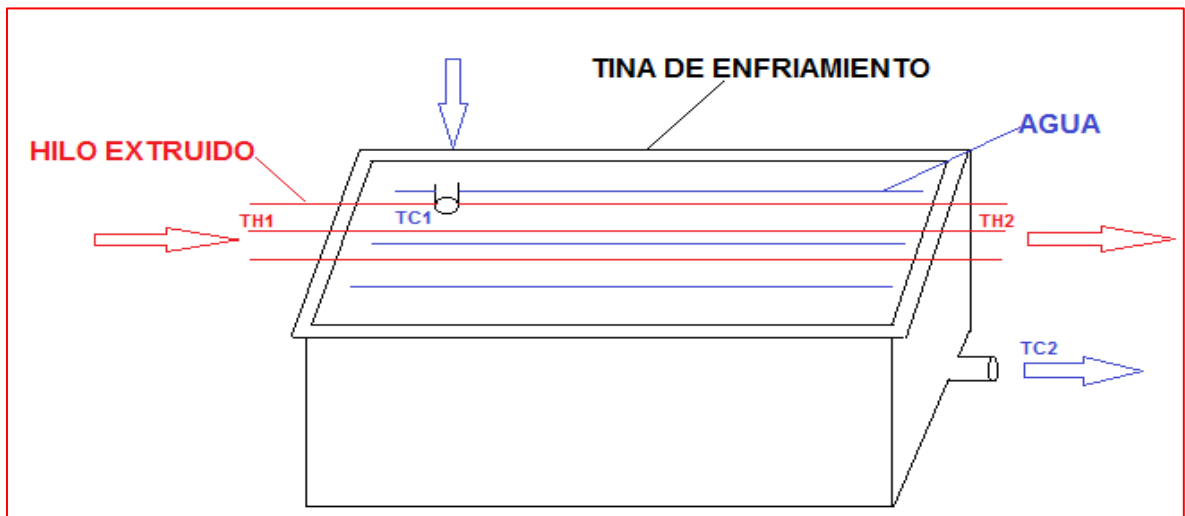
m = Flujo másiko del PET (Kg/s)

ρ = Densidad cristalina del PET (Kg/m^3)

Se emplea en todo tipo de fluidos que atraviesan una sección transversal de área en un ducto por unidad de tiempo.

1.3.19 FLUJO MÁSIKO DEL AGUA

Es la velocidad a la que el agua pasa a través de la tina de enfriamiento, con el fin de reducir la temperatura con la que sale el producto extruido del dado.



Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

Fig.1.3.19-1 ENFRIAMIENTO DE LOS HILOS EXTRUIDOS DE PET

Donde:

T_{C1} = Temperatura de entrada del H_2O a la tina de enfriamiento ($^{\circ}C$)

T_{C2} = Temperatura de salida del H_2O de la tina de enfriamiento ($^{\circ}C$)

T_{H1} = Temperatura del hilo extruido a la entrada de la tina de enfriamiento ($^{\circ}C$)

T_{H2} = Temperatura del hilo extruido a la salida de la tina de enfriamiento ($^{\circ}C$)

Los datos para calcular el flujo másico del agua son:

$$T_{C1} = 20 \text{ }^{\circ}C \quad T_{C2} = 21 \text{ }^{\circ}C \quad T_{H1} = 170 \text{ }^{\circ}C \quad T_{H2} = 22 \text{ }^{\circ}C$$

$$C_{p_{H_2O}} = 4,212 \text{ KJ/Kg}^{\circ}C \quad C_{p_{PET}} = 1,35 \text{ KJ/Kg}^{\circ}C \quad \rho_{H_2O} = 998,29 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q = m C_p T_{sale} - T_{entra} \quad \text{Ec. 1.3.19 - 1}$$

Entonces:

$$Q = m C_p T_{C2} - T_{C1} \text{ agua} \quad \text{Ec. 1.3.19 - 2}$$

$$Q = m C_p T_{H1} - T_{H2} \text{ PET} \quad \text{Ec. 1.3.19 - 3}$$

Donde:

Q = Transferencia de Calor (KJ/s)

m = Flujo másico (Kg/s)

C_p = Calor específico (KJ/Kg $^{\circ}C$)

Igualamos las 2 ecuaciones debido a que la transferencia de energía es la misma, entonces se tiene:

$$m C_p T_{C2} - T_{C1} \text{ agua} = m C_p T_{H1} - T_{H2} \text{ PET} \quad \text{Ec. 1.3.19 - 4}$$

Se emplean en todo tipo de recirculación para medir la velocidad del fluido al atravesar una zona.

1.3.20 CAUDAL VOLUMÉTRICO DE LA BOMBA

Es el volumen de agua que pasa en el sistema de recirculación en un tiempo determinado.

$$Q = \frac{m}{\rho} \quad \text{Ec. 1.3.20 - 1}$$

Donde:

m = Flujo másico del H₂O (Kg/s)

ρ = Densidad del H₂O a 20 °C (Kg/m³)

Q = Caudal volumétrico de la bomba (L/min)

Se aplica para fluidos que atraviesan una superficie de sección transversal como: tubos y canales.

1.3.21 BALANCE DE MASA

Es un método matemático utilizado principalmente en Ingeniería Química. Se basa en la ley de conservación de la materia (la materia ni se crea ni se destruye, solo se transforma), que establece que la masa de un sistema cerrado permanece siempre constante. La masa que entra en un sistema debe salir del sistema o acumularse dentro de él, así:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Acumulación}$$

$$E = S + A \quad \text{Ec. 1.3.21 - 1}$$

Donde:

E = Masa de las escamas de PET a ser extruidas (Kg)

S = Masa de los hilos de PET extruidos (Kg)

A = Masa del material que se acumula en el tornillo y camisa (Kg)

En la industria el balance de masa se utiliza para identificar los flujos másicos que se mueven en un proceso y nos sirven para determinar las cantidades que tendremos en las salidas o en las entradas.

1.3.22 ECUACIÓN PARA EL BALANCE DE ENERGÍA UTILIZANDO LA EFICIENCIA

Es considerado como la igualdad de 2 ecuaciones de eficiencia, mismas que permiten determinar el calor que se pierde o se va al sumidero.

$$\epsilon = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} \quad \text{Ec. 1.3.22 - 1} \quad \text{equivale} \quad \epsilon = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad \text{Ec. 1.3.23 - 2}$$

Igualamos:

$$1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad \text{Ec. 1.3.22 - 3}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{Ec. 1.3.22 - 4}$$

Donde:

E = Eficiencia (%)

Q_1 = Calor que se deposita en el sumidero (Kw)

Q_2 = Calor generado por las resistencias (Kw)

T_1 = Temperatura generada por las resistencias eléctricas (°C)

T_2 = Temperatura alrededor de la extrusora (°C)

Es muy común su uso en máquinas térmicas como las extrusoras de tornillo, ya sea simple o doble.

1.3.23 ECUACIÓN GENERAL PARA EL BALANCE DE ENERGÍA DEL EXTRUSOR

Es aquel que intercambia materia y energía con el entorno en un sistema abierto. Aplicando el primer principio de la termodinámica, el incremento de energía del sistema en un intervalo de tiempo es:

$$\Delta E_{sistema} = Q - W + \sum_{entrada} \left(\frac{1}{2} v^2 + gz + H \right)_{entrada} + \sum_{salida} \left(\frac{1}{2} v^2 + gz + H \right)_{salida} \quad \text{Ec. 1.3.23 - 1}$$

Para la ecuación anterior consideramos:

$v = 0$ No existe velocidad debido a que la extrusora se encuentra estable

$gz = 0$ Porque la altura no existe en el dispositivo

$\Delta U = \Delta H$ Energía interna = Entalpía

Entonces la ecuación general nos queda:

$$Q_1 + Q_2 - W = 0 \quad \text{Ec. 1.3.23 - 2}$$

$$W = Q_2 - Q_1 \quad \text{Ec. 1.3.23 - 3}$$

$$1,491Kw = Q_2 - Q_1 \quad \text{Ec. 1.3.23 - 4}$$

$$Q_2 = 1,491Kw + Q_1 \quad \text{Ec. 1.3.23 - 5}$$

Donde:

Q_1 = Calor que se deposita en el sumidero (Kw)

Q_2 = Calor generado por las resistencias (Kw)

W = Potencia o Trabajo (Kw)

Es aplicable para máquinas térmicas, las mismas que permiten conocer la cantidad de calor que entra al extrusor y la cantidad de calor que se pierde.

1.3.24 CALOR QUE SE DEPOSITA EN EL SUMIDERO

Es el calor que se va a perder durante el proceso de extrusión. Reemplazando la ecuación 1.3.23-5 en la ecuación 1.3.22-4 se tiene:

$$\frac{Q_1}{1,491Kw + Q_1} = \frac{T_1}{T_2} \quad \text{Ec. 1.3.24 - 1}$$

Donde:

Q_1 = Calor que se deposita en el sumidero (Kw)

T_1 = Temperatura generada por las resistencias eléctricas (°C)

T_2 = Temperatura alrededor de la extrusora (°C)

Se utiliza en máquinas térmicas y extrusoras.

1.3.25 CALOR GENERADO POR LAS RESISTENCIAS

Es aquel que se produce debido a que la corriente eléctrica es un flujo de electrones los cuales se están desprendiendo y van a ocupar un lugar positivo, se quedan en ese lugar hasta que llegue otro, en donde se produce un choque y los hace mover, debido al choque de estos electrones, se produce energía la cual se transforma en calor.

$$Q_2 = 1,491Kw + Q_1 \quad \text{Ec. 1.3.25 - 1}$$

Donde:

Q_1 = Calor que se deposita en el sumidero (Kw)

Q_2 = Calor generado por las resistencias (Kw)

Un importante número de equipos utilizados en laboratorios químicos, recurren a la resistencia eléctrica como fuente de energía para la generación de calor en los mismos; este es el caso de, por ejemplo, estufas eléctricas para secado y ensayo de materiales, para cultivos, para germinación, baños termostáticos, planchas calefactoras, hornos eléctricos muflas, hornos eléctricos tubulares, etc.

1.3.26 EFICIENCIA DEL EXTRUSOR

Es un factor que indica el grado de pérdida de energía, trabajo o potencia del extrusor. Es un principio físico fundamental al igual que la conservación de masa, que es aplicado para determinar las cantidades de energía que es intercambiada y acumulada dentro del extrusor.

$$\epsilon = \frac{W}{Q_2} \quad \text{Ec. 1.3.26 - 1}$$

Donde:

E = Eficiencia (%)

Q_2 = Calor generado por las resistencias (Kw)

W = Potencia o Trabajo (Kw)

Es aplicable para maquinas extrusoras de tornillo o husillo simple, en donde la energía puede transformarse de unas formas a otras (mecánica, térmica, química, etc.), lo que obliga a considerar este aspecto en las ecuaciones.

1.3.27 PORCENTAJE DE RENDIMIENTO EN TODO EL PROCESO DE LA PRODUCCIÓN DE PELLETS

Es la cantidad de producto total o pellets que se obtuvo luego de diferentes Operaciones Unitarias como son: Triturado, Lavado, Secado y Extrusado.

$$\% \text{ Rendimiento Total} = \frac{\text{Cantidad de pellets obtenido}}{\text{Cantidad de material inicial}} * 100 \quad \text{Ec. 1.3.27 - 1}$$

Donde:

% Rendimiento Total = Porcentaje de Rendimiento de todo el proceso (%)

Cantidad de pellets obtenido = Peso del producto final o pellets (Kg)

Cantidad de material inicial = Peso de las escamas de PET al inicio del proceso (Kg)

1.3.28 EFICIENCIA EN TODO EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PELLETS

Es una razón porcentual que sirve para medir la eficiencia productiva de las maquinas en todo el proceso de extrusión de las escamas de PET.

$$\begin{aligned} \text{Eficiencia Total} \\ = \frac{E. \text{Triturador} + E. \text{Lavador} + E. \text{Secador} + E. \text{Extrusor}}{\text{Número Total de Eficiencias}} \quad \text{Ec. 1.3.28} \\ - 1 \end{aligned}$$

Donde:

E. Triturador = Eficiencia del Triturador (%)

E. Lavador = Eficiencia del Lavador (%)

E. Secador = Eficiencia del Secador (%)

E. Extrusor = Eficiencia del Extrusor (%)

Eficiencia Total = Eficiencia en todo el proceso de producción de pellets (%)

CAPITULO II

PARTE EXPERIMENTAL

2 PARTE EXPERIMENTAL

En el presente estudio se dan unas series de cambios y variaciones con el fin de controlar las diferentes variables durante el proceso de extrusión, que permitieron un correcto dimensionamiento del equipo para la obtención de hilos de PET; los mismos que deben ser cortados manualmente para llegar al objetivo final que es la obtención de pellets o granza.

Para el muestreo correspondiente se procedió a fijar las condiciones de operación del equipo como son: Temperatura de trabajo, Temperatura y Tiempo de Precaentamiento.

2.1 MUESTREO

Para llevar a cabo la validación del equipo de extrusión de botellas plásticas PET se realizó la colecta en 11 lugares estratégicos de la ESPOCH tomando en consideración 7 Facultades, el comedor politécnico, el centro de idiomas, educación física, y el edificio central.

La toma de muestreo se dio colocando recipientes correctamente etiquetados para ser recolectados, los mismos que pasaron por los procesos de: triturado, lavado, secado y extrusado.

El muestreo se ha efectuado con un método simple con frecuencia de 1 vez por día, por un lapso de 4 días con un total de 4 ensayos.

2.2 MÉTODOS

En este trabajo se utilizó como procesos lógicos la inducción y la deducción debido a que permiten conocer los sucesos más importantes durante la obtención de pellets y además serán de gran utilidad para el análisis de datos y toma de decisiones, analizando las variables que presenta el extrusor de PET para llegar a lo general que está identificado como la construcción, funcionamiento y rendimiento del equipo en cuestión.

2.2.1 MÉTODO INDUCTIVO

Partiendo del diagnóstico que permite reducir la contaminación del ambiente, se procedió a la recolección de las botellas plásticas tipo PET a nivel interno de la

ESPOCH, para posteriormente convertirlos en pellets. Estos envases de plástico previamente pasaron por diferentes Operaciones Unitarias como: Triturado, Lavado, Secado y Extrusado para de esta forma llegar al objetivo propuesto.

2.2.2 MÉTODO DEDUCTIVO

En el desarrollo del estudio se parte de fundamentos y principios de Termodinámica, Operaciones Unitarias y Transferencia de Calor. En este método se estudia todo sobre la extrusión de plásticos, así como las características del producto final o pellets, para de esa forma determinar si el objetivo propuesto es alcanzado.

2.2.3 TÉCNICAS

La técnica que se utilizó para el trabajo de graduación se basa en el porcentaje de rendimiento; mismo que facilitó su desarrollo y el cumplimiento de nuestro objetivo.

2.2.3.1 DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE RENDIMIENTO DE LA EXTRUSORA DE PET

TABLA 2.2.3.1-1

DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE DE RENDIMIENTO DE LA EXTRUSORA DE PET

FUNDAMENTO	EQUIPOS Y MATERIALES	PROCEDIMIENTO	CÁLCULO
<p>Es la cantidad de producto total extruido o pellets que se obtuvo luego de la Operación Unitaria de Extrusión.</p>	<p>Equipo de extrusión de PET Termómetro Agua Balanza Cronómetro Hojuelas de plástico PET Tijeras</p>	<p>Enchufar el interruptor de la extrusora en una red de corriente eléctrica de 220v y se enciende la máquina a una temperatura de precalentamiento de 260 °C por un lapso de 60min. Una vez que el tornillo alcance su temperatura óptima de trabajo se regula nuevamente la temperatura a 250 °C que será nuestra temperatura de trabajo y presionamos el botón para encender el motor-reductor por un tiempo de 5min sin material. Añadimos a la tina de enfriamiento 70L de agua a temperatura ambiente (20°C). Colocamos las escamas de PET en la tolva de alimentación para empezar el proceso de extrusión, encendemos la bomba de recirculación del agua y esperamos hasta que el material extruido salga del dado. Se recepta el material en la tina con agua; la misma que se lo hace de forma manual e inmediatamente procedemos a llevar manualmente el hilo de PET por debajo del agua. Cortamos los tallarines de PET de forma manual. Una vez que se ha terminado la materia prima se debe dejar la máquina en funcionamiento por unos 10 minutos aproximadamente, hasta que no exista una carga considerable para el motor, lo que representa que se lo puede apagar sin problema alguno. Finalmente procedemos a sacar el tapón de la tina para liberar el agua que se utilizó en la extrusión.</p>	$\%R = \frac{P_f}{P_i} \times 100$ <p>Donde: P_i= Peso inicial de la muestra (Kg). P_f= Peso final de la muestra después de la extrusión (Kg).</p>

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

2.3 DATOS EXPERIMENTALES

2.3.1 DIAGNÓSTICO

Las pruebas realizadas en el presente estudio, proporcionan datos de temperatura de extrusión, tiempo de fusión, revoluciones del husillo, cantidad de PET utilizado, temperatura de precalentamiento, tiempo de precalentamiento y estado, para lo cual se preparó muestras pequeñas las mismas que fueron expuestas a diferentes temperaturas y tiempos de precalentamiento para obtener los mejores resultados en el proceso de extrusión.

Una parte importante fue la etapa de precalentamiento que varía de 260 °C- 270 °C, misma que permitió limpiar los restos de PET que se encontraban entre el tornillo y la camisa producto de pruebas anteriores.

Las botellas de PET utilizadas para el funcionamiento del equipo fueron recolectadas en el interior de la ESPOCH, previamente pasando por diferentes operaciones unitarias como son: triturado, lavado, secado y extrusado.

Con la línea de equipos para obtener pellets se contribuyó a la disminución de la contaminación de plásticos; ya que se convirtió a las botellas de PET en productos reutilizables.

2.3.2 DATOS

En las siguientes tablas se muestran los datos obtenidos en las diferentes pruebas de extrusión, en donde se detalla la variación de las variables del proceso y se especifica la apariencia visual de los hilos de PET luego del extrusado, siendo E excelente, B bueno, R regular y M malo para el producto final.

TABLA 2.3.2-1

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES DE EXTRUSIÓN. $T_{Prec.} = 260^{\circ}\text{C}$; $T_{Ext.} = 240^{\circ}\text{C}$

Precalentamiento del extrusor: 30min a $T = 260^{\circ}\text{C}$				
Ensayo	Cantidad de PET(Kg)	Temperatura de extrusión ($^{\circ}\text{C}$)	Revoluciones del tornillo	Estado
1	1	240	75	R

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

TABLA 2.3.2-2

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES DE EXTRUSIÓN. $T_{Prec.} = 260^{\circ}\text{C}$; $T_{Ext.} = 225^{\circ}\text{C}$

Precalentamiento del extrusor: 60min a $T = 260^{\circ}\text{C}$				
Ensayo	Cantidad de PET(Kg)	Temperatura de extrusión ($^{\circ}\text{C}$)	Revoluciones del tornillo	Estado
1	1	225	75	R

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

TABLA 2.3.2-3

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES DE EXTRUSIÓN. $T_{Prec.} = 260^{\circ}\text{C}$; $T_{Ext}=235^{\circ}\text{C}$

Precalentamiento del extrusor: 60min a $T= 260^{\circ}\text{C}$				
Ensayo	Cantidad de PET(Kg)	Temperatura de extrusión ($^{\circ}\text{C}$)	Revoluciones del tornillo	Estado
1	1	235	75	B

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

TABLA 2.3.2-4

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LAS VARIABLES DE EXTRUSIÓN. $T_{Prec.} = 260^{\circ}\text{C}$; $T_{Ext}=250^{\circ}\text{C}$

Precalentamiento del extrusor: 60min a $T= 260^{\circ}\text{C}$				
Ensayo	Cantidad de PET(Kg)	Temperatura de extrusión ($^{\circ}\text{C}$)	Revoluciones del tornillo	Estado
1	1	250	75	E

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

TABLA 2.3.2-5

DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS MEDIANTE LA VARIACIÓN DE LAS
VARIABLES DE EXTRUSIÓN

Precalentamiento del extrusor a diferentes temperaturas					
Ensayo	Cantidad de PET(Kg)	Temperatura de extrusión (°C)	Temperatura de precalentamiento (°C)	Tiempo de precalentamiento (min)	Estado
1	1	240	260	30	R
2	1	225	260	60	R
3	1	235	260	60	B
4	1	250	260	60	E

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

2.4 IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES

TABLA 2.4-1

IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE PRECALENTAMIENTO DE LA
EXTRUSORA

Variable	Valor	Unidad
Temperatura de precalentamiento	260	°C
Tiempo de precalentamiento	60	min

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

TABLA 2.4-2

IDENTIFICACIÓN DE LAS VARIABLES DE FUNCIONAMIENTO DE LA EXTRUSORA

Variable	Valor	Unidad
Temperatura de extrusión	250	°C
Revoluciones del tornillo	75	r.p.m.

*Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014***TABLA 2.4-3**

IDENTIFICACIÓN DE LAS TEMPERATURAS EN TODO EL PROCESO DE EXTRUSIÓN A 250 °C DE OPERACIÓN

Temperatura	Valor	Unidad
Temperatura en la zona de alimentación	85	°C
Temperatura en la zona de compresión	250	°C
Temperatura en la zona de dosificación	170	°C
Temperatura de entrada del H ₂ O a la tina de enfriamiento	20	°C
Temperatura de salida del H ₂ O de la tina de enfriamiento	21	°C
Temperatura de las Hojuelas de PET	23	°C
Temperatura del hilo extruido a la entrada de la tina de enfriamiento	170	°C
Temperatura del hilo extruido a la salida de la tina de enfriamiento	22	°C
Temperatura Ambiente	23	°C

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

2.5 DATOS ADICIONALES

TABLA 2.5-1

DATOS ADICIONALES PARA LA OBTENCIÓN DE PELLETS

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad amorfa	1,370	g/cm ³
Densidad cristalina	1,455	g/cm ³
Punto de fusión	260	°C
Cp del PET (Calor específico)	1,35	KJ/Kg °C
Cp del H ₂ O (Calor específico)	4,212	KJ/Kg °C
Densidad del H ₂ O a 20 °C	998.29	Kg/m ³
Capacidad calorífica del PET	1200-1350	J/Kg°C

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

CAPITULO III

CÁLCULOS Y RESULTADOS

3 DISEÑO

3.1 CÁLCULOS

3.1.1 CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA TINA DE ENFRIAMIENTO

De la Ecuación 1.3.1-1 se tiene:

$$V = b * a * h$$

$$V = 0,3 * 1,22 * 0,15$$

$$V = 0,0549m^3 * \frac{1000L}{1m^3} = 54,9L$$

Se incrementa 5cm=0,05m de la altura como factor de seguridad del 25%, entonces:

$$V = 0,3 * 1,22 * 0,2$$

$$V = 0,0732m^3 * \frac{1000L}{1m^3} = 73,2L$$

3.1.2 CÁLCULO DEL VOLUMEN DE LA OLLA DE RECIRCULACIÓN

De la Ecuación 1.3.2-1 se tiene:

$$V = \pi * \frac{Dt^2}{2} * h$$

$$V = 3,1416 * \frac{47^2}{2} * 40$$

$$V = 69397,944cm^3 * \frac{1m^3}{100cm^3} * \frac{1000L}{1m^3} = 69,39L$$

3.1.3 CÁLCULO DEL NÚMERO DE FILETES DEL HUSILLO O TORNILLO

De la Ecuación 1.3.3-1 se tiene:

$$\# \text{ de filetes} = \frac{L}{D}$$

$$\# \text{ de filetes} = \frac{50}{5,08} = 9,843$$

3.1.4 CÁLCULO DEL FLUJO VOLUMÉTRICO

3.1.4.1 CÁLCULO DEL ÁNGULO DE HÉLICE DE CANAL

De la Ecuación 1.3.4-2 se tiene:

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

$$\varphi = 17,65^\circ$$

3.1.4.2 CÁLCULO DEL FLUJO DE ARRASTRE O DE FRICCIÓN (Q_D ó α)

Reemplazando los valores con $m = 1$, $t = 3,6\text{cm}$ y $e = 0,9\text{cm}$. De la Ecuación 1.3.5-1 se tiene:

$$\alpha = \frac{\pi * m * D * h}{2} \frac{\frac{t}{m} - e \cos^2 * \varphi}{2}$$

$$\alpha = \frac{\pi * 1 * 5,08 * 0,1}{2} \frac{\frac{3,6}{1} - 0,9 \cos^2(17,65)}{2}$$

$$\alpha = \frac{3,1416 * 1 * 5,08 * 0,27 * 0,9080}{2} = 1,956\text{cm}^3$$

3.1.4.3 CÁLCULO DEL FLUJO DE PRESIÓN (Q_P ó β)

De la Ecuación 1.3.6-1 se tiene:

$$\beta = \frac{m * h^3}{12 * L} \frac{\frac{t}{m} - e \operatorname{sen} \varphi * \cos \varphi}{2}$$

$$\beta = \frac{1 * 0,1^3}{12 * 50} \frac{\frac{3,6}{1} - 0,9 \operatorname{sen}(17,65) * \cos(17,65)}{2}$$

$$\beta = \frac{1 * 0,001 * 5,08 * 0,3032 * 0,9529}{600} = 2,447 \times 10^{-6} \text{cm}^3$$

3.1.4.4 CÁLCULO DEL FLUJO DE FILTRACIÓN (Q_L o γ)

3.1.4.4.1 CÁLCULO DE LA HOLGURA DEL FILETE (δ)

De la Ecuación 1.3.7-1 se tiene:

$$\delta = 0,002 * D$$

$$\delta = 0,002 * 5,08$$

$$\delta = \mathbf{0,01016cm}$$

3.1.4.4.2 CÁLCULO DEL FLUJO DE FILTRACIÓN (Q_L o γ)

De la Ecuación 1.3.8-1 se tiene:

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

$$\gamma = \frac{\pi^2 * (5,08)^2 * (0,01016)^3 * \tan(17.65)}{10 * 0,9 * 50}$$

$$\gamma = \frac{9,8697 * 25,8064 * 1,049x10^{-6} * 0,3182}{450} = \mathbf{1,888x10^{-7}cm^3}$$

3.1.4.5 CÁLCULO DE LA CONSTANTE TOTAL DE LA CABEZA (k)

De la Ecuación 1.3.9-1 se tiene:

$$k = \frac{\pi * d^4}{128 * L}$$

$$k = \frac{\pi * (5)^4}{128 * 4} = \mathbf{3,835cm^3}$$

3.1.4.6 CÁLCULO DE LAS REVOLUCIONES DEL HUSILLO

Según la figura que se encuentra en el anexo II para el polímero a usar la velocidad de cortadura es de alrededor 200 (s^{-1}).

De la Ecuación 1.3.10-2 se tiene:

$$n = \frac{v * h_2 * s}{\pi * D}$$

$$n = \frac{200 * 1 * 1s}{3,1416 * 50,8}$$

$$n = 1,254 \frac{rev}{s} * \frac{60s}{1min} = 75,24 rpm$$

3.1.4.7 CÁLCULO DEL FLUJO VOLUMÉTRICO

De la Ecuación 1.3.11-1 se tiene:

$$Q = \frac{\alpha * k}{k + \beta + \gamma} n$$

$$Q = \frac{1,956 * 3,835}{3,835 + 2,447 \times 10^{-6} + 1,888 \times 10^{-7}} * 75,24$$

$$Q = 147,17 \frac{cm^3}{min}$$

Transformamos a Kg/h, para lo cual utilizamos la densidad cristalina del PET que es 1,455g/cm³:

$$1,455 \frac{g}{cm^3} * \frac{1 Kg}{1000 g} = 1,455 \times 10^{-3} \frac{Kg}{cm^3}$$

$$1,455 \times 10^{-3} \frac{Kg}{cm^3} * 147,17 \frac{cm^3}{min} * \frac{60min}{1 h} = 12,85 \frac{Kg}{h}$$

3.1.4.8 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN DEL HILO EXTRUIDO

3.1.4.8.1 CÁLCULO DEL ÁREA DEL AGUJERO

Teniendo en cuenta que el diámetro del hilo es de 8mm.

De la Ecuación 1.3.12-1 se tiene:

:

$$A = \pi * r^2$$

$$A = 3,1416 * (4)^2$$

$$A = 50,265mm^2$$

$$50,265mm^2 * \frac{1m^2}{1 \times 10^6 mm^2} = 5,027 \times 10^{-5} m^2$$

3.1.4.8.2 CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE PRODUCCIÓN DEL HILO EXTRUIDO

Se toma en cuenta el flujo volumétrico que es 147,17cm³/min.

De la Ecuación 1.3.13-1 se tiene::

$$147,17 \frac{cm^3}{min} * \frac{1m^3}{1x10^6 cm^3} * \frac{1min}{60s} = 2,452x10^{-6} m^3/s$$

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{2,452x10^{-6}}{5,027x10^{-5}}$$

$$V = 0,049 m/s$$

$$V = 4,9 cm/s$$

3.1.4.9 CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA

De la Ecuación 1.3.14-1 se tiene:

$$N = 32 * E^{-5} * Q * C * T_m - T_o$$

$$N = 32 * E^{-5} * 12,85 * 1350 * (250 - 20)$$

$$N = 1276,776W * \frac{0,001Kw}{1W} * \frac{1HP}{0,7457Kw} = 1,713HP$$

Lo más óptimo es utilizar un motor-reductor de 2HP.

3.1.4.10 CÁLCULO DE LAS PRESIONES EN LA EXTRUSORA

3.1.4.10.1 CÁLCULO DE LA PRESIÓN MÁXIMA

De la Ecuación 1.3.15-1 se tiene:

$$P_{MAX} = \frac{6 * \pi * D * L * n * \mu}{h^2 * \tan\varphi}$$

$$P_{MAX} = \frac{6 * 3,1416 * 0,0508 * 0,10 * 1,254 * 250}{(0,001)^2 * \tan(17,65)}$$

$$P_{MAX} = 94,35 MN/m^2$$

3.1.4.10.2 CÁLCULO DE LA PRESIÓN DE OPERACIÓN

De la Ecuación 1.3.16-1 se tiene:

$$P_{op} = \frac{2 * \pi * \mu * D^2 * n * h * \text{sen}\varphi * \text{cos}\varphi}{\left(\frac{R^4}{2 * L_d}\right) + \left(\frac{D * h^3 * \text{sen}^2\varphi}{3 * L}\right)}$$

$$P_{op} = \frac{2 * 3,1416 * 250 * 0,0508^2 * 1,254 * 0,001 * \text{sen}(17,65) * \text{cos}(17,65)}{\left(\frac{(0,001)^4}{2 * 0,009}\right) + \left(\frac{0,0508 * 0,001^3 * \text{sen}^2(17,65)}{3 * 0,50}\right)}$$

$$P_{op} = 22,384 \frac{MN}{m^2}$$

3.1.4.11 CÁLCULO DE LA FUERZA DEL HUSILLO

De la Ecuación 1.3.17-1 se tiene:

$$Mg = 9550 * \frac{N}{n}$$

$$Mg = 9550 * \frac{1,277}{75,24} = 162,086 N.m$$

3.1.4.12 CÁLCULO DEL CAUDAL VOLUMÉTRICO DE LA BOMBA PARA EL ENFRIAMIENTO DEL HILO EXTRUIDO

3.1.4.12.1 CÁLCULO DEL FLUJO MÁSSICO DEL PET

Para obtener este flujo másico tomamos como datos la densidad cristalina que es 1,455 g/cm³ y el caudal volumétrico obtenido anteriormente de 147,17 cm³/min, entonces:

$$1,455 \frac{g}{cm^3} * \frac{1Kg}{1000g} * \frac{1x10^6 cm^3}{1m^3} = 1455Kg/m^3$$

$$147,17 \frac{cm^3}{min} * \frac{1m^3}{1x10^6 cm^3} * \frac{1min}{60s} = 2,452x10^{-6} m^3/s$$

De la Ecuación 1.3.18-1 se tiene:

$$Q = \frac{m}{\rho}$$

$$m = Q * \rho$$

$$m = 2,452x10^{-6} * 1455$$

$$m = 0,00356Kg/s$$

3.1.4.12.2 CÁLCULO DEL FLUJO MÁSSICO DEL AGUA

De la Ecuación 1.3.19-4 se tiene:

$$m Cp T_{c2} - T_{c1} \text{ agua} = m Cp T_{H1} - T_{H2} \text{ PET}$$

$$m * 4,212 * 21 - 20 \text{ agua} = 0,00356 * 1,35 * (170 - 22) \text{ PET}$$

$$m = \frac{0,00356 * 1,35 * (170 - 22)}{4,212 * 21 - 20}$$

$$m = 0,168 \text{ Kg/s}$$

3.1.4.12.3 CÁLCULO DEL CAUDAL VOLUMÉTRICO DE LA BOMBA

Tomamos en cuenta como un dato adicional la densidad del agua a 20 °C = 998,29 Kg/m³

De la Ecuación 1.3.20-1 se tiene:

$$Q = \frac{m}{\rho}$$

$$Q = \frac{0,168}{998,29}$$

$$Q = 1,682 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 1,682 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} * \frac{1000 \text{ lt}}{1 \text{ m}^3} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}} = 10,092 \text{ L/min}$$

3.1.4.13 CÁLCULO DEL BALANCE DE MASA

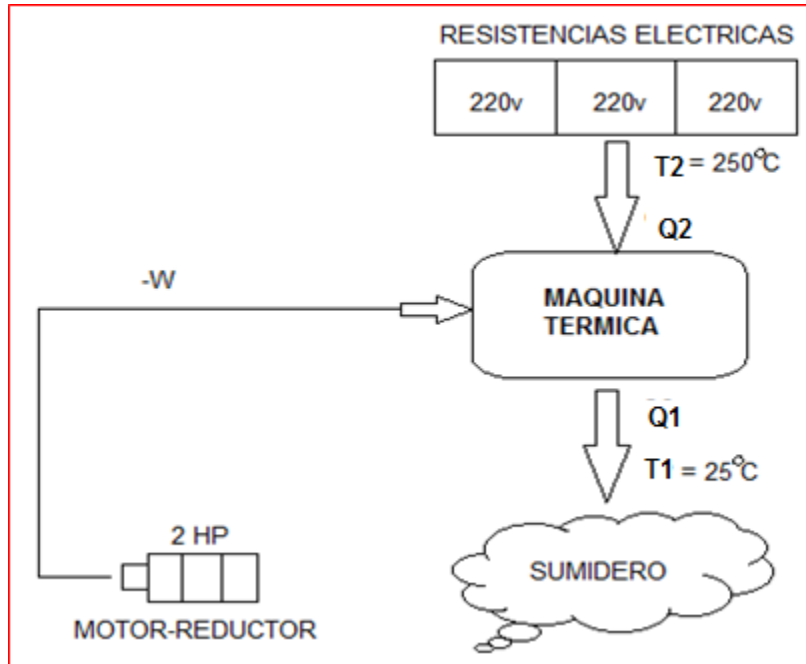
De la Ecuación 1.3.21-1 se tiene:

$$E = S + A$$

$$12,85 \text{ Kg} = 12,1 \text{ Kg} + 0,75 \text{ Kg}$$

$$12,85 \text{ Kg} = 12,85 \text{ Kg}$$

3.1.4.14 CÁLCULO DEL BALANCE DE ENERGÍA



Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

Fig.3.1.4.14-1 BALANCE DE ENERGÍA

3.1.4.14.1 CÁLCULO DE LA POTENCIA O TRABAJO W

$$2 \text{ HP} * \frac{745,7 \text{ w}}{1 \text{ HP}} * \frac{0,001 \text{ Kw}}{1 \text{ w}} = 1,491 \text{ Kw}$$

3.1.4.14.2 CÁLCULO DEL CALOR QUE SE DEPOSITA EN EL SUMIDERO Q_1

De la Ecuación 1.3.24-1 se tiene:

$$\frac{Q_1}{1,491 + Q_1} = \frac{T_1}{T_2}$$

$$\frac{Q_1}{1,491 + Q_1} = \frac{25}{250}$$

$$\frac{Q_1}{1,491 + Q_1} = 0,1$$

$$Q_1 = 0,1(1,491 + Q_1)$$

$$Q_1 = 0,1491 + 0,1Q_1$$

$$Q_1 - 0,1Q_1 = 0,1491$$

$$Q_1 \cdot 1 - 0,1 = 0,1491$$

$$0,9Q_1 = 0,1491$$

$$Q_1 = 0,165 \text{ Kw}$$

3.1.4.14.3 CÁLCULO DEL CALOR GENERADO POR LAS RESISTENCIAS Q_2

De la Ecuación 1.3.25-1 se tiene:

$$Q_2 = 1,491 \text{ Kw} + Q_1$$

$$Q_2 = 1,491 + 0,165$$

$$Q_2 = 1,656 \text{ Kw}$$

3.1.4.14.4 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DEL EXTRUSOR

De la Ecuación 1.3.26-1 se tiene:

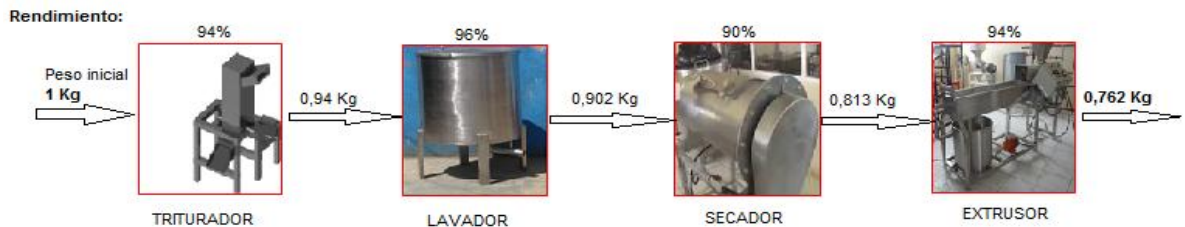
$$\epsilon = \frac{W}{Q_2}$$

$$\epsilon = \frac{1,491}{1,656}$$

$$\epsilon = 0,90 * 100$$

$$\epsilon = 90\%$$

3.1.4.15 CÁLCULO DEL % DE RENDIMIENTO EN TODO EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PELLETS



Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

Fig.3.1.4.15-1 RENDIMIENTO GENERAL

De la Ecuación 1.3.27-1 se tiene:

$$\% \text{ Rendimiento Total} = \frac{\text{Cantidad de pellets obtenido}}{\text{Cantidad de material inicial}} * 100$$

$$\% \text{ Rendimiento Total} = \frac{0,762}{1} * 100$$

$$\% \text{ Rendimiento Total} = 76,2 \%$$

3.1.4.16 CÁLCULO DE LA EFICIENCIA EN TODO EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PELLETS



Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

Fig.3.1.4.16-1 EFICIENCIA GENERAL

De la Ecuación 1.3.28-1 se tiene:

$$\text{Eficiencia Total} = \frac{E. \text{Triturador} + E. \text{Lavador} + E. \text{Secador} + E. \text{Extrusor}}{\text{Número Total de Eficiencias}}$$

$$\text{Eficiencia Total} = \frac{85 + 91,6 + 87,6 + 90}{4} = 88,55\%$$

3.2 RESULTADOS

TABLA 3.2-1

DATOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO DE EXTRUSIÓN DE LAS ESCAMAS DE PET

Ensayo	Peso inicial (Kg)	Peso Final (Kg)	Tiempo (min)	Revoluciones del husillo (r.p.m.)	% Rendimiento
1	1	0,93	4	75	93
2	1,5	1,425	7	75	95
3	2	1,9	9	75	95

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

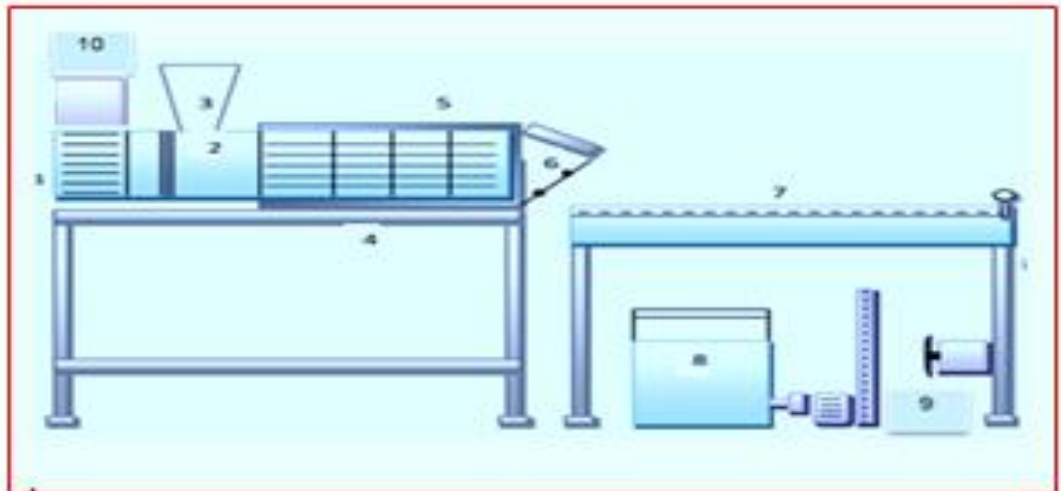
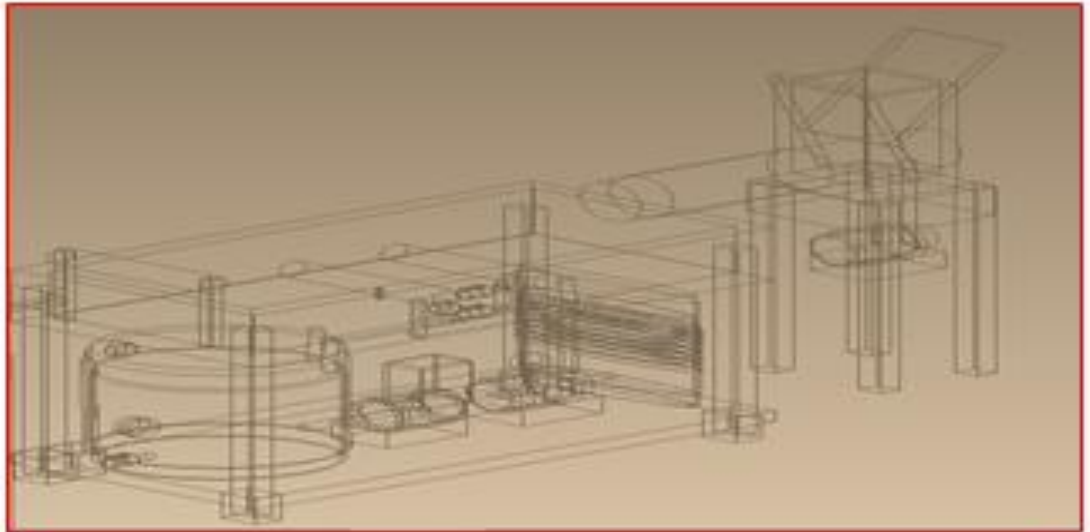
3.3 PROPUESTA DE DISEÑO

TABLA 3.3-1
DIMENSIONAMIENTO DE LA EXTRUSORA

DESCRIPCIÓN	VARIABLE	INDICADOR
TORNILLO O HUSILLO		
Longitud	0,5	m
Diámetro	0,0508	m
# de filetes	10	-
Altura en la zona de alimentación	0,008	m
Altura en la zona de compresión	0,006	m
Altura en la zona de dosificación	0,001	m
Paso	0,036	m
Ancho de la cresta	0,009	m
CAMISA O BARRIL		
Longitud	0,5	m
Diámetro	0,0513	m
MOTOR-REDUCTOR		
Potencia requerida	2	HP
Revoluciones	75	r.p.m.
TINA DE ENFRIAMIENTO		
Largo	0,3	m
Ancho	1,22	m
Altura	0,2	m
Volumen	73,2	L
OLLA DE RECIRCULACIÓN		
Diámetro	0,47	m
Radio	0,265	m
Altura	0,4	m
Volumen	69,39	L
HILO EXTRUIDO		
Área	$5,027 \times 10^{-5}$	m ²
Velocidad	0,049	m/s
CAUDAL VOLUMETRICO DE LA BOMBA		
Flujo másico PET	0,00356	Kg/s
Flujo másico H ₂ O	0,168	Kg/s
Caudal Bomba	10,092	L/min

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

3.3.1 DISEÑO DE LA EXTRUSORA DE PLÁSTICO PET



1.- Motor-reductor

2.- Tomillo o Husillo Sinfín

3.- Tolva de alimentación

4.- Camisa o Barril

5.- Resistencias Eléctricas

6.- Boquilla

7.- Tina de enfriamiento

8.- Olla de recirculación

9.- Bomba de agua

10.- Tablero de Control

3.4 ANÁLISIS DE COSTOS

3.4.1 COSTOS DE INVERSIÓN

3.4.1.1 RECURSOS MATERIALES

TABLA 3.4.1.1-1

RECURSOS MATERIALES

DENOMINACIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL (\$)
Motor-Reductor	1	480,00	480,00
Husillo y Camisa	1	800,00	800,00
Plancha de acero inoxidable AISI 340 (1.5mm)	2	250,00	500,00
Resistencias Eléctricas	3	80,00	240,00
Sistema Eléctrico	1	1000,00	1000,00
Motor 1Hp	1	110,00	110,00
Enchufe (trifásico)+ cable	1	37,00	37,00
Piñones	2	50,00	100,00
Cadena y candados	1	35,00	35,00
Cabezal de extrusión	1	30,00	30,00
		TOTAL (USD)	3332,00

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

3.4.2 COSTOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA PLANTA DE RECICLADO DE PET EN LA ESPOCH

Se tiene proyectado que la planta para la producción de pellets funcione en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la ESPOCH; la misma que contaría con las siguientes máquinas para llegar al producto final: trituradora, lavadora, secadora y extrusora.

3.4.2.1 COSTOS DE INVERSIÓN DE LA PLANTA PARA PELLETTIZADO

Estos costos son los iniciales del proyecto y consiste en la adquisición de equipos:

TABLA 3.4.2.1-1

COSTO DE LOS EQUIPOS

DENOMINACIÓN	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL (\$)
Triturador	1	2200,00	2200,00
Lavador	1	1533,00	1533,00
Secador	1	2200,00	2200,00
Extrusor	1	4507,50	4507,50
		TOTAL (USD)	10440,50

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

3.4.2.2 COSTOS DE OPERACIÓN

Para determinar los costos operativos para la obtención de pellets, se va indicar la cantidad de trabajadores que requiere la planta, mismos que serán estudiantes egresados de Ingeniería Química de la ESPOCH con su respectiva función a desempeñar y el sueldo unitario mensual; este costo se obtiene teniendo en cuenta que se labora 5 horas diarias, debido a que se produce 60 Kg de PET/día.

TABLA 3.4.2.2-1**COSTO DE OPERACIÓN**

DENOMINACIÓN	# DE PERSONAS	SUELDO UNITARIO (\$)	SUELDO TOTAL (\$)
Recolección de botellas	1	200,00	200,00
Triturado y Lavado	1	200,00	200,00
Secado y extrusado	2	200,00	400,00
Corte de los hilos y empacado de los pellets	1	200,00	200,00
		TOTAL (USD)	1000,00

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

3.4.2.3 COSTO DE LOS INSUMOS A UTILIZARSE DURANTE LA PRODUCCIÓN MENSUAL

TABLA 3.4.2.3-1**COSTO DE LOS INSUMOS**

INSUMO	COSTO TOTAL (\$)
Agua	10,00
Aceite	8,00
Cloro	7,00
Energía Eléctrica	40,00
Mantenimiento mecánico	50,00
TOTAL (USD)	115,00

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

3.4.2.4 COSTO DEL KILOGRAMO DE PELLETS

Según estudios anteriores la ESPOCH produce 60 Kg de PET/día como se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 3.4.2.4 – 1

PRODUCCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS POR DIA – ESPOCH

Componente		Peso (Kg/d)	Porcentaje (%)
Orgánico		118,2	34,21
Plástico	Otros	5,5	1,59
	PET	60	17,37
Vidrio		18,3	5,30
Papel		46,6	13,49
Latas		4,2	1,22
Común		86,1	24,92
Cartón		6,6	1,91
TOTAL		345,5	100,00

FUENTE: BRITO H. / et al, ESPOCH, 2012

Entonces la recolección que alcanzamos al mes es:

$$60 \frac{\text{Kg}}{\text{dia}} * \frac{30 \text{ dias}}{1 \text{ mes}} = 1800 \frac{\text{Kg}}{\text{mes}} * \frac{1 \text{ ton}}{1000 \text{ Kg}} = 1,8 \text{ ton/mes}$$

TABLA 3.4.2.4 – 2

COSTOS TOTALES

DENOMINACIÓN	COSTO TOTAL (\$)
Costos de Operación	1000,00
Costo de los Insumos	115,00
TOTAL (USD)	1115,00

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

TABLA 3.4.2.4 – 3

COSTO DEL KILOGRAMO DE PELLETS

DENOMINACIÓN	CANTIDAD (Kg)	COSTO TOTAL (\$)
Pellets	1	1,30.00
TOTAL (USD)		1,30.00

Fuente: TUBÓN E. / CARRILLO B., 2014

3.5 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La temperatura de trabajo es 250°C medido a nivel de laboratorio, debido a que, la temperatura de fusión del plástico PET varía de 244-255 °C esto hace que la máquina funcione en una forma eficiente para obtener un producto de calidad.

El diseño del extrusor fue determinado a una alimentación máxima de 12,85 Kg/h, la cual se distribuye en cuatro cargas a 3,21 Kg en un tiempo de 15min, como consecuencia que durante ese tiempo se puede realizar una práctica de laboratorio completa y cumpliendo con éxito el reciclaje de desechos plásticos que produce la ESPOCH que es de 60 Kg de PET/día, como se puede dar cuenta cuando se realiza las 4 cargas el flujo volumétrico en 1 hora satisface y permite establecer que el dimensionado es adecuado.

La eficiencia analizada de la máquina es del 90%, la cual, se considera que es relativamente buena para el trabajo de extrusión, se obtuvo este resultado debido a que el calor que ingresa a la camisa por medio de las resistencias no se convierte en su totalidad en trabajo, puesto que siempre se va a tener pérdidas de calor, mismas que van al sumidero.

El porcentaje de rendimiento del extrusor es 94 %, que es bastante considerable, ya que no hubo gran pérdida del material al ser procesado, esto es muy beneficioso ya que se pudo aprovechar casi en su totalidad el plástico reciclado. El 6 % restantes pertenece al material extruido que se queda impregnado en las paredes del cilindro, filetes del tornillo, paso o ancho entre filetes y en el dado.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- El precalentamiento se realizó por un tiempo de 60 min a una temperatura de 260°C, con una temperatura óptima de extrusión de 250°C.
- La presión máxima fue de 94,35 MN/m² con una presión de operación de 22,384MN/m².
- El diseño dió como resultados: número de filetes del husillo 10, longitud del tornillo 0,5 m, diámetro del husillo 0,0508 m, revoluciones del husillo 75,24 rpm, flujo volumétrico 12,85 Kg/h y una potencia requerida 1,713 HP.
- El dimensionamiento del equipo es de 0,9 m de ancho, 2,2 m de largo y 1,3 m de alto; el material utilizado para su construcción es acero inoxidable AISI 304.
- Las pruebas de funcionamiento se realizó verificando los parámetros importantes en el proceso de extrusión tales como: temperatura en la zona de alimentación 85°C, temperatura en la zona de compresión 250°C y la temperatura en la zona de dosificación 170°C.
- La extrusora se validó con un rendimiento del 94 % y una eficiencia del 90%.

4.2 RECOMENDACIONES

- No se debe encender la extrusora antes de que se haya precalentado. Un arranque en “frío” puede ser muy peligroso debido a que se producen muy altas presiones y pueden provocar un accidente. Las presiones pueden subir muy rápidamente y hacer explotar el cabezal.
- Si se enciende la extrusora con partes de plástico aun en su interior, las temperaturas producidas pueden provocar descomposición del plástico. Esto puede causar descoloración del plástico. En un caso más grave, se puede generar un gas, produciendo una presión tan alta que podría hacer explotar el cabezal con el plástico.
- Es muy importante tener procedimientos escritos, para el encendido, arranque, apagado y limpieza de la extrusora. Estos procedimientos deben ser comunicados claramente a todo el personal de operadores, y debe ser seguido estrictamente. Los peligros de seguridad más comunes en extrusión son el calor, las partes móviles, electricidad, pesos y altas presiones.
- Debemos asegurarnos que las partes móviles estén protegidas del contacto del operador con estas. En caso de algún imprevisto se debe pulsar inmediatamente el botón de emergencia de color rojo situado en el panel de control, esto hará que se apague inmediatamente los motores.
- No se deben usar collares o prendas de vestir holgadas, ya que pueden ser capturadas por alguna parte en movimiento, y usar sujetadores de cabello o no tener cabello largo.
- Procurar una buena ventilación en el lugar donde se realice el proceso de extrusión puesto que por el calentamiento del material generalmente se producen gases que pueden ser nocivos para la salud, por lo que sería importante también el uso de una sorbona.
- Luego de haber utilizado el extrusor, debe quedar sin material en el interior del cilindro, ya que el material se enfría y se solidifica, y al tratar de poner en marcha al día siguiente, el husillo puede romperse por la potencia del motor.
- La recepción del material extruido es de forma manual, por lo que se debe estar equipado con guantes de seguridad industrial para evitar quemaduras con el plástico, a la salida del dado.

- Operar la máquina extrusora entre dos personas para evitar cualquier tipo de accidentes y asegurar el correcto control de las variables del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS

- **ASKELAND, Donald R.** Ciencia e Ingeniería de los materiales; 4ta. ed. D.F.México. Thomson, 2004; p.p. 687-712.
- **MORALES, J.E.** Introducción a la ciencia y tecnología de los plásticos; México, Trillas, 2010; p.p. 153-257.
- **RAMOS, LuisF.** Extrusión de plásticos; D.F.México. Limusa, 1993,188p.
- **SABGORODNY, V.K.** Transformación de plásticos; Barcelona-España. Gustavo Gili, 1973; p.p. 1-41.
- **SIMONDS, Herbert R.** Extrusión de plásticos, gomas y metales; 2da. ed. Madrid. Index-River, 1972; p.p. 126-215.
- **WAGANOFF, N.P.** Transformación de plásticos; Buenos Aires-Argentina. Mitre, 1969; p.p. 45-125.

INTERNET

➤ **ANTECEDENTES DE BOTELLAS PLÁSTICAS DE PET EN EL ECUADOR**

<http://www.esmas.com/salud/home/tienesquesaberlo/745305.html>

2013-03-25

➤ **CÁLCULOS QUE SE REALIZA PARA DISEÑAR UNA MÁQUINA DE EXTRUSIÓN**

<http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/444/7/T-ESPE-019478-3.pdf>

2013-04-26

<http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1110/1/668413G633d.pdf>

2013-04-26

<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/12000/1/Tesis%20Juan%20Luis%20Ferret%20C%20200305423.pdf>

2013-04-26

➤ **DETERMINACIONES EN EL LABORATORIO DE PLASTICOS-TECNICAS**

<http://www.ensinger.es/es/informacion-tecnica/identificacion-de-los-plasticos/>

2013-04-26

➤ **DISEÑO DE MAQUINA RECICLADORA DE PET**

<http://gtrevino.files.wordpress.com/2012/02/moldesydados3.pdf>

2013-04-22

➤ **ESTADÍSTICAS DE LAS BOTELLAS PLÁSTICAS DE PET**

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/proceso-de-reciclaje-del-pet.html>

2013-03-25

➤ **QUE ES LA EXTRUSIÓN**

http://es.wikipedia.org/wiki/Extrusi%C3%B3n_de_pol%C3%ADmero

2013-04-22

<http://etimologias.dechile.net/?extrusio.n>

2013-04-22

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/extrusion-de-materiales-plasticos-ii.html>

2013-04-22

➤ **TESIS UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA**

GÓMEZ, Jimmy J., GUTIÉRREZ, Jorge E. Diseño de una extrusora para plástico. (Tesis) (Tec. Mec.), Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnologías. Pereira-Risalda; Noviembre del 2007. 121p.

<repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/1110/1/668413G633d.pdf>

2014-02-01

➤ **ULTIMAS ESTADISTICAS DEL CONSUMO DEL PET EN EL ECUADOR**

http://www.minambiente.gov.co/documentos/quia_ambiental_proceso_basico_para_transf_plastico.pdf

2013-10-22

ANEXOS

ANEXO I

DENSIDAD DE ALGUNOS PLÁSTICOS EN ESTADO FUNDIDO

Densidad de algunos plásticos en estado fundido [g/cm³]		
ABS	Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno	1.00
POM	Polioximetileno (acetal)	1.16
PAN	Poliacrilonitrilo	1.03
CA	Acetato de celulosa	1.04
LDPE	Polietileno de baja densidad	0.76
PA	Poliamidas (nylons)	0.98
uPVC	Poli (cloruro de vinilo rígido)	1.27
PC	Polycarbonato	1.18
PET	Polietilen Tereftalato	1.21
PP	Polipropileno	0.72
PS	Poliestireno	1.00

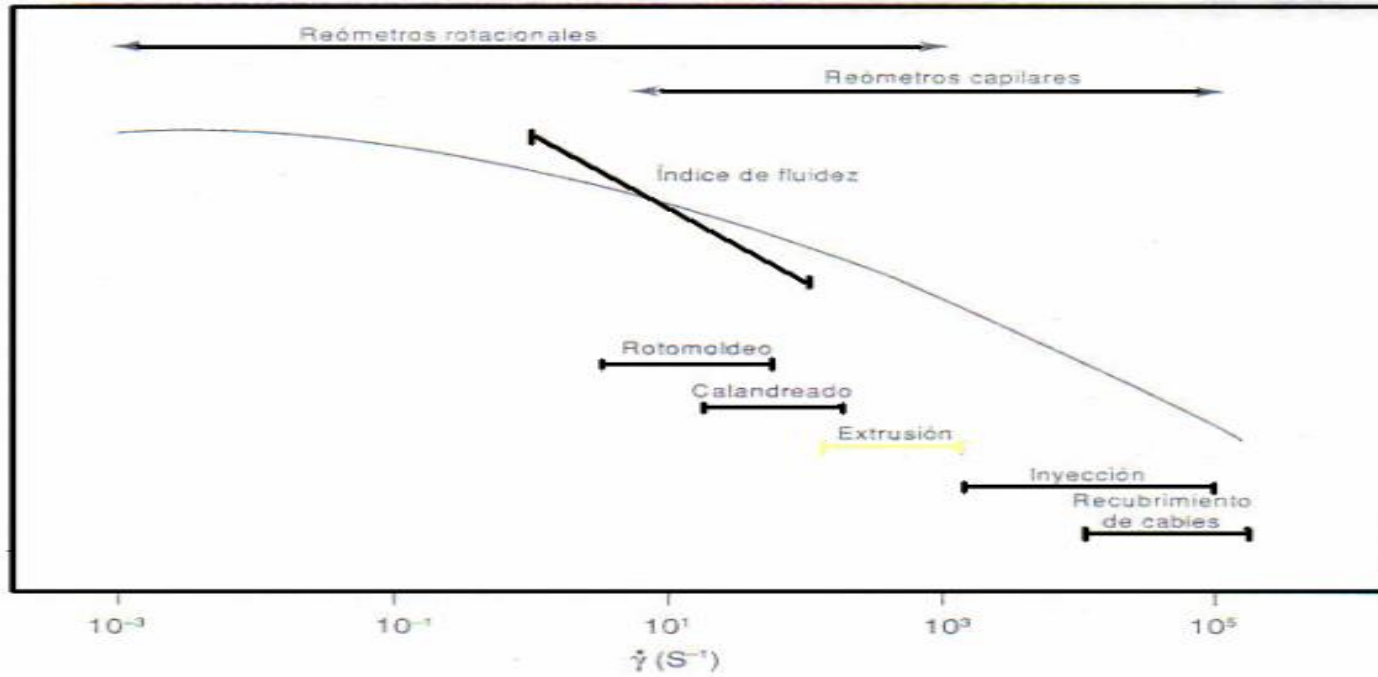
Fuente: RAMOS, L. F. Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Saltillo, Coahuila, México. Primera Edición 1993. Editorial Limusa, S.A. |

(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Densidad de algunos plásticos en estado fundido	o Certificado	FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	Lámina	Escala	Fecha
	o Por Aprobar		1	x: y:	2014-06-09
	o Aprobado				

ANEXO II

INTERVALOS DE VELOCIDAD DE CORTADURA



(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Intervalos de velocidad de cortadura	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Para Información	FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	Lámina	Escala	Fecha
	<input type="checkbox"/> Por Aprobar <input type="checkbox"/> Por calificar		2	x: y:	2014-06-09
	<input type="checkbox"/> Aprobado				

ANEXO III

PROPIEDADES MECÁNICAS DEL POLIETILENTEREFTALATO

PROPIEDADES MECANICAS A 23°C	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
PESO ESPECIFICO	gr/cm ³	D-792	53479	1.39
RESIST. A LA TRACC.(FLUENCIA / ROTURA)	Kg/cm ²	D-638	53455	900 / --
RES. A LA COMPRESION (1 Y 2 % DEF)	Kg/cm ²	D-695	53454	260 / 480
RESISTENCIA A LA FLEXION	Kg/cm ²	D-790	53452	1450
RES. AL CHOQUE SIN ENTALLA	Kg.cm/cm ²	D-256	53453	> 50
ALARGAMIENTO A LA ROTURA	%	D-638	53455	15
MODULO DE ELASTICIDAD (TRACCION)	Kg/cm ²	D-638	53457	37000
DUREZA	Shore D	D-2240	53505	85 - 87
COEF. DE ROCE ESTATICO S/ACERO		D-1894		--
COEF. DE ROCE DINAMICO S/ACERO		D-1894		0.20
RES. AL DESGASTE POR ROCE				MUY BUENA

(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	EXTRUSOR DE PET		
a) Propiedades Mecánicas del Polietilen tereftalato	<input type="radio"/> Certificado	<input type="radio"/> Para Información		Lámina	Escala	Fecha
	<input type="radio"/> Por Aprobar	<input type="radio"/> Por calificar				
	<input type="radio"/> Aprobado		3	x: y:	2014-06-09	

ANEXO IV

PROPIEDADES TÉRMICAS DEL POLIETILENTEREFTALATO

PROPIEDADES TERMICAS	UNIDAD	ASTM	DIN	VALORES
CALOR ESPECIFICO	Kcal/Kg.°C	C-351		0.25
TEMP. DE FLEXION B/CARGA (18.5Kg/cm ²)	°C	D-648	53461	75
TEMP. DE USO CONTINUO EN AIRE	°C			-20 a 110
TEMP. DE FUSION	°C			255
COEF. DE DILATACION LINEAL DE 23 A 100°C	por °C	D-696	52752	0.00008
COEF. DE CONDUCCION TERMICA	Kcal/m.h.°C	C-177	52612	0.25

(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Propiedades térmicas del Polietilen tereftalato	o Certificado	o Para Información	FACULTAD DE CIENCIAS		
	o Por Aprobar	o Por calificar	ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	o Aprobado		REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO		
			Lámina	Escala	Fecha
			4	x: y:	2014-06-09

ANEXO V

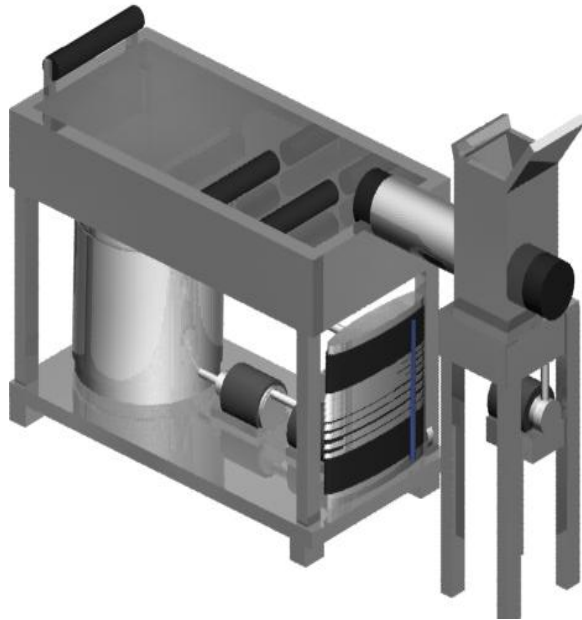
PROPIEDADES QUÍMICAS DEL POLIETILENTEREFTALATO

PROPIEDADES QUIMICAS	OBSERVACIONES
RESISTENCIA A HIDROCARBUROS	BUENA
RESISTENCIA A ACIDOS DEBILES A TEMP. AMBIENTE	BUENA
RESISTENCIA A ALCALIS DEBILES A TEMP. AMBIENTE	BUENA
RESISTENCIA A PROD. QUIMICOS DEFINIDOS	CONSULTAR
EFECTO DE LOS RAYOS SOLARES	ALGO LO AFECTAN
APROBADO PARA CONTACTO CON ALIMENTOS	SI
COMPORTAMIENTO A LA COMBUSTION	ARDE CON MEDIANA DIFICULTAD
PROPAGACION DE LLAMA	MANTIENE LA LLAMA
COMPORTAMIENTO AL QUEMARLO	GOTEA
COLOR DE LA LLAMA	AMARILLO ANARANJADO TIZNADO
OLOR AL QUEMARLO	AROMATICO DULCE

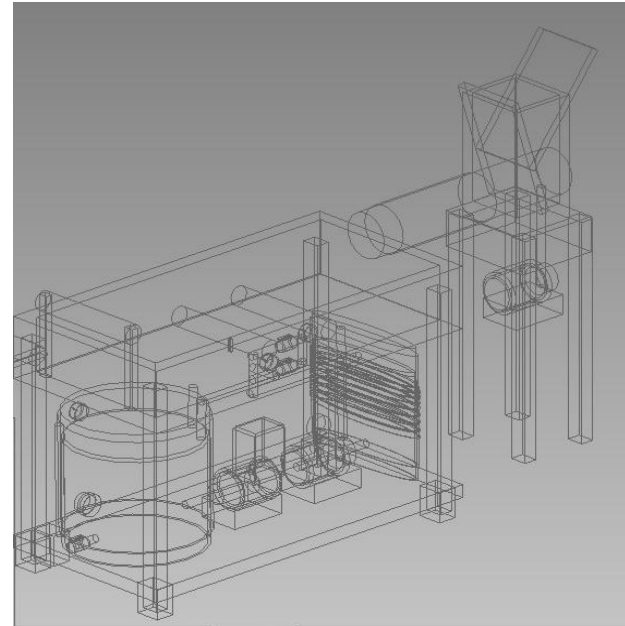
(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Propiedades químicas del Polietilen tereftalato	o Certificado	o Para Información	FACULTAD DE CIENCIAS		
	o Por Aprobar	o Por calificar	ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	o Aprobado		REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO		
			Lámina	Escala	Fecha
			5	x: y:	2014-06-09

ANEXO VI
SIMULACIÓN DE LA MÁQUINA DE EXTRUSIÓN



(a)



(b)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Simulación 1 b) Simulación 2	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Para Información <input type="checkbox"/> Por Aprobar <input type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Aprobado	FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	Lámina	Escala	Fecha
			6	x: y:	2014-06-09

**ANEXO VII
HUSILLO Y CAMISA**



(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Husillo y Camisa	o Certificado	o Para Información	FACULTAD DE CIENCIAS		
	o Por Aprobar	o Por calificar			
	o Aprobado	REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	Lámina	Escala	Fecha
			7	x: y:	2014-06-09

ANEXO VIII

TINA DE RECEPCIÓN DE LOS HILOS DE PET



(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Tina de recepción de los hilos de PET	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Para Información <input type="checkbox"/> Por Aprobar <input type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Aprobado	FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	Lámina	Escala	Fecha
		REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	8	x: y:	2014-06-09

ANEXO IX
RESISTENCIAS ELÉCTRICAS



(a)

NOTAS	CATEGORÍA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Resistencias Eléctricas	o Certificado	o Para Información	FACULTAD DE CIENCIAS	Lámina	Escala	Fecha
	o Por Aprobar	o Por calificar	ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA			
	o Aprobado		REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	9	x: y:	2014-06-09

ANEXO X

TOLVA DE ALIMENTACIÓN



(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Tolva de alimentación	<input type="radio"/> Certificado <input type="radio"/> Para Información	FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	Lámina	Escala	Fecha
	<input type="radio"/> Por Aprobar <input type="radio"/> Por calificar		10	x: y:	2014-06-09
	<input type="radio"/> Aprobado				

ANEXO XI
TABLERO DE CONTROL



(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Tablero de Control	o Certificado	o Para Información	FACULTAD DE CIENCIAS		
	o Por Aprobar	o Por calificar	ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	o Aprobado		REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO		
			Lámina	Escala	Fecha
			11	x: y:	2014-06-09

ANEXO XII
SISTEMA DE RECIRCULACIÓN



(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Sistema de recirculación	o Certificado	o Para Información	FACULTAD DE CIENCIAS	Lámina	Escala	Fecha
	o Por Aprobar	o Por calificar	ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	12	x: y:	2014-06-09
	o Aprobado		REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO			

ANEXO XIII

MÁQUINA DE EXTRUSIÓN DE PET



(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Máquina de extrusión de PET	o Certificado	o Para Información	FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	Lámina	Escala	Fecha
	o Por Aprobar	o Por calificar		REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	13	x: y:

ANEXO XIV

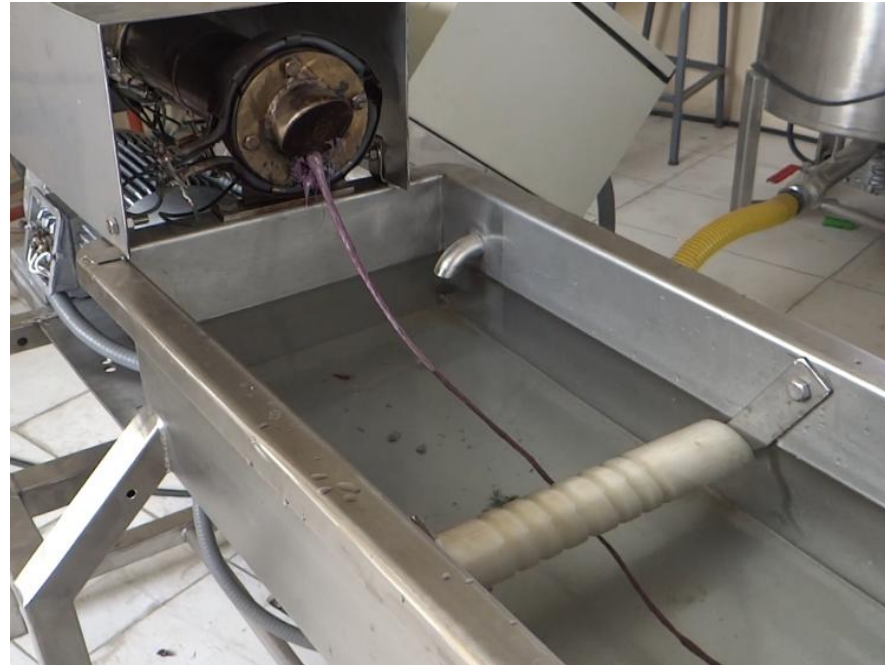
ALIMENTACIÓN DE LAS ESCAMAS DE PET



(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) Alimentación de las escamas de PET	<input type="checkbox"/> Certificado	<input type="checkbox"/> Para Información	FACULTAD DE CIENCIAS		
	<input type="checkbox"/> Por Aprobar	<input type="checkbox"/> Por calificar	ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		
	<input type="checkbox"/> Aprobado	REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	Lámina	Escala	Fecha
			14	x: y:	2014-06-09

ANEXO XV
HILO DE PET



(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	EXTRUSOR DE PET		
a) Hilo de PET	o Certificado	o Para Información		Lámina	Escala	Fecha
	o Por Aprobar	o Por calificar		15	x: y:	2014-06-09
	o Aprobado					

ANEXO XVI

PELLETS

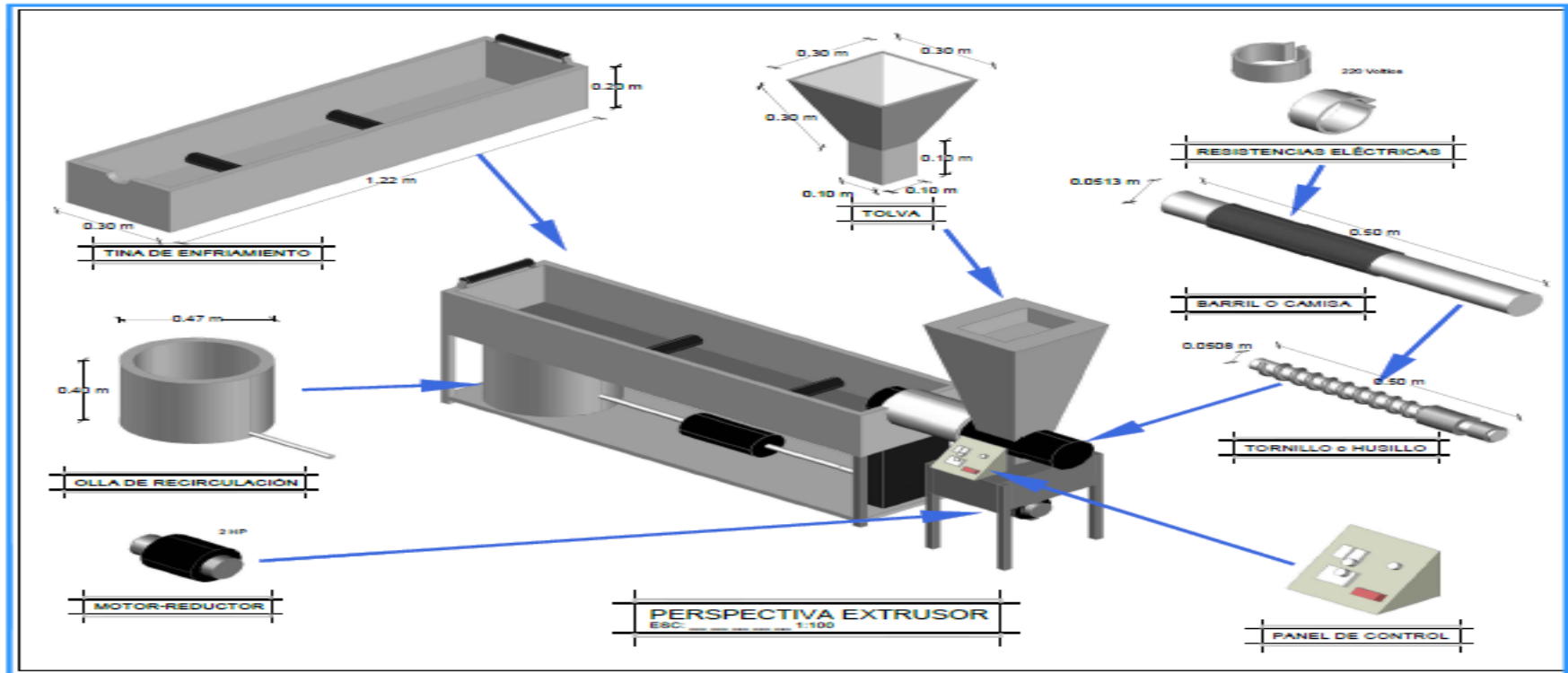


(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	EXTRUSOR DE PET		
a) PELLETS	o Certificado	o Para Información		Lámina	Escala	Fecha
	o Por Aprobar	o Por calificar		16	x: y:	2014-06-09
	o Aprobado					

ANEXO XVII

DIMENSIONAMIENTO DEL EXTRUSOR



(a)

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO	EXTRUSOR DE PET		
a) DIMENSIONAMIENTO DEL EXTRUSOR	<input type="checkbox"/> Certificado <input type="checkbox"/> Para Información <input type="checkbox"/> Por Aprobar <input type="checkbox"/> Por calificar <input type="checkbox"/> Aprobado	FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA REALIZADO POR: EDWIN TUBÓN BYRON CARRILLO	Lámina	Escala	Fecha
			17	x: y:	2014-06-09

