

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
NOMENCLATURA	xxi
ANEXOS	xxx
RESUMEN	xxxí

### **CAPÍTULO 1: GENERALIDADES**

1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVOS	2
1.3.1 GENERAL	2
1.3.2 ESPECÍFICOS	3
1.4 ALCANCE	3

### **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

2.1 ANÁLISIS DEL PET	5
2.1.1 DEFINICIÓN	5
2.1.2 PROPIEDADES	14

2.1.3	CARACTERÍSTICAS	16
2.1.4	VENTAJAS	18
2.1.5	DESVENTAJAS	19
2.1.6	APLICACIONES	19
2.2	PROCESO DE RECICLAJE MECÁNICO DEL PET	22
2.2.1	SISTEMAS DE RECICLADO	24
2.2.2	APLICACIONES DE RPET (PET RECICLADO)	34
2.3	PROCESO DE EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS	39
2.3.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS	39
2.3.2	EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS	40
2.3.3	DEFECTOS GENERADOS EN EL PROCESO DE EXTRUSIÓN	43
2.3.4	MÁQUINA EXTRUSORA DE TORNILLO SIMPLE	45
<b>CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO</b>		
3.1	ANÁLISIS	81
3.2	SELECCIÓN	83
<b>CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA MÁQUINA EXTRUSORA DE TORNILLO SIMPLE</b>		
4.1	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO	85
4.2	CÁLCULOS DE INGENIERÍA PARA EL DISEÑO DE LOS COMPONENTES MECÁNICOS	87
4.2.1	CÁLCULOS DE INGENIERÍA	87
4.2.2	CALEFACCIÓN Y REGULACIÓN DE TEMPERATURA	117

4.2.3 SELECCIÓN DE COMPONENTES MECÁNICOS	130
4.3 DISEÑO ASISTIDO POR PAQUETES COMPUTACIONALES	136
4.4 SIMULACIÓN Y VERIFICACIÓN DE DISEÑO	144
4.5 SELECCIÓN DE EQUIPOS Y ACCESORIOS NECESARIOS PARA LA MÁQUINA EXTRUSORA	168
4.5.1 COMPONENTES ELÉCTRICOS	168
4.5.2 CONTROLES ELÉCTRICO - ELECTRÓNICOS	171
 <b>CAPÍTULO 5: CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE</b>	
5.1 DIAGRAMA DE OPERACIONES	173
5.2 MANUFACTURA DE TORNILLOS SIMPLES	173
5.2.1 MATERIAL USADO EN LA MANUFACTURA DEL TORNILLO EXTRUSOR	173
5.2.2 ÁLABES O FILETES	174
5.2.3 ZONAS CARACTERÍSTICAS DEL TORNILLO	175
5.2.4 PROFUNDIDAD DEL FILETE EN LA ZONA DE ALIMENTACIÓN	175
5.2.5 PROFUNDIDAD DEL FILETE EN LA ZONA DE DESCARGA O DOSIFICACIÓN	176
5.2.6 RELACIÓN DE COMPRESIÓN	176
5.2.7 LONGITUD	176
5.2.8 RELACIÓN L/D	177
5.2.9 DIÁMETRO	177
5.2.10 PROCESO DE MANUFACTURA DEL TORNILLO	178
5.3 MANUFACTURA DE LA CARCASA Y ESTRUCTURA DE SOPORTE	179
5.3.1 CARCASA	179
5.3.2 ESTRUCTURA SOPORTE	180

5.4 CONEXIONES ELÉCTRICAS Y ELECTRÓNICAS	181
5.5 ENSAMBLE FINAL	182
<b>CAPÍTULO 6: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO</b>	
6.1 SISTEMA MECÁNICO	191
6.2 SISTEMA ELÉCTRICO – ELECTRÓNICO	196
6.3 VERIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO	200
6.3.1 TEMPERATURA ALCANZADA CON LOS CALEFACTORES	200
6.3.2 FLUJO DE MATERIAL FUNDIDO EN EL EXTRUSOR	201
6.3.3 VARIACIÓN DE LA VELOCIDAD ANGULAR DEL TORNILLO PRINCIPAL	202
6.4 CORRECCIÓN DE ERRORES Y CALIBRACIÓN	203
<b>CAPÍTULO 7: ENSAYOS MECÁNICOS</b>	
7.1 ENSAYO DE TRACCIÓN	212
7.1.1 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN	213
7.1.2 ALARGAMIENTO PORCENTUAL	213
7.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS	214
<b>CAPÍTULO 8: RESUMEN ECONÓMICO – FINANCIERO</b>	
8.1 COSTOS DIRECTOS	231
8.1.1 PERSONAL	231
8.1.2 EXTRUSORA CAPACIDAD 1 Kg/h	231
8.2 COSTOS INDIRECTOS	234
8.2.1 MISCELÁNEOS	234
8.3 RESUMEN DEL FINANCIAMIENTO	234

## **CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

9.1 CONCLUSIONES	237
9.2 RECOMENDACIONES	239

## ÍNDICE DE TABLAS

### **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

Tabla 2.1	Características de los tipos de xileno	6
Tabla 2.2	Datos técnicos del PET	16
Tabla 2.3	Resistencia química del PET	17
Tabla 2.4	Aplicaciones comunes del PET	21
Tabla 2.5	Características del PET y RPET	30

### **CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO**

Tabla 3.1	Matriz de análisis de valor para la distribución de puntos ponderados	83
Tabla 3.2	Matriz de decisión	84

### **CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA MÁQUINA EXTRUSORA DE TORNILLO SIMPLE**

Tabla 4.1	Materiales utilizados	167
-----------	-----------------------	-----

### **CAPÍTULO 6: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

Tabla 6.1	Método de prueba de funcionamiento del sistema mecánico	191
Tabla 6.2	Método de prueba de funcionamiento del sistema eléctrico - electrónico	196

### **CAPÍTULO 7: ENSAYOS MECÁNICOS**

Tabla 7.1	Tipos de materiales utilizados para los ensayos	209
Tabla 7.2	Tabla de resultados con material de envases	215
Tabla 7.3	Diagramas obtenidos en el ensayo	215
Tabla 7.4	Tabla de resultados con escamas lavadas	217
Tabla 7.5	Diagramas obtenidos en el ensayo	217
Tabla 7.6	Tabla de resultados con escamas contaminadas	219

Tabla 7.7	Diagramas obtenidos en el ensayo	219
Tabla 7.8	Tabla de resultados con escamas lavadas (segundo grupo de ensayos)	221
Tabla 7.9	Diagramas obtenidos en el ensayo	222
Tabla 7.10	Tabla de resultados con escamas lavadas y secadas	225
Tabla 7.11	Diagramas obtenidos en el ensayo	226

## **CAPÍTULO 8: RESUMEN ECONÓMICO – FINANCIERO**

Tabla 8.1	Pago de personal	231
Tabla 8.2	Costos de materiales y accesorios	231
Tabla 8.3	Costos de mano de obra	233
Tabla 8.4	Gastos varios	234

## ÍNDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Fig. 2.1	Tipos de xileno	6
Fig. 2.2	Compuestos reformados	8
Fig. 2.3	Proceso de esterificación	9
Fig. 2.4	Esquema de esterificación y policondensación de PET	10
Fig. 2.5	Reacción de transesterificación	14
Fig. 2.6	Ciclo de vida de los envases PET	24
Fig. 2.7a	Clasificación de los polímeros según la SPI	25
Fig. 2.7b	Clasificación de los polímeros según la SPI	26
Fig. 2.8	Limpieza y separación de plásticos	28
Fig. 2.9	Proceso de reciclado mecánico avanzado	28
Fig. 2.10	Reciclado químico de envases PET	30
Fig. 2.11	Fractura de la fusión, causada por flujo turbulento en la fusión a través de una aguda reducción a la entrada del dado	43
Fig. 2.12	Perfil de velocidades de la fusión al fluir a través de la abertura del dado, el cual puede conducir el defecto llamado piel de tiburón	44
Fig. 2.13	Formación del tallo de bambú	44
Fig. 2.14	Mecanismo de fusión en el canal del tornillo	47
Fig. 2.15	Flujo de fricción	49
Fig. 2.16	Flujo de retroceso	49
Fig. 2.17	Flujo total	50
Fig. 2.18	Sección transversal de una prensa extrusora típica, con la boquilla hacia abajo	50
Fig. 2.19	Extrusora, con indicación de sus elementos	51
Fig. 2.20	Tornillos de extrusora típicos	52

Fig. 2.21	Componentes principales de una extrusora	54
Fig. 2.22	Zonas por las que atraviesa el material	54
Fig. 2.23	Sección de un cilindro con husillo de un canal, vista general	59
Fig. 2.24	Esquema del desarrollo	59
Fig. 2.25	Desarrollo del husillo	62
Fig. 2.26	Flujo de pérdidas	64
Fig. 2.27	Caída de presión en el husillo	66
Fig. 2.28	Husillo con una zona de compresión creciente	68
Fig. 2.29	Área diferencial $dA_2$	75
Fig. 2.30	Identificación del plástico PET según la SPI	78

### **CAPÍTULO 3: ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO**

Fig. 3.1	Tornillo extrusor, máquina monohusillo	81
Fig. 3.2	Tornillos extrusores, máquinas de doble husillo	82

### **CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA MÁQUINA EXTRUSORA DE TORNILLO SIMPLE**

Fig. 4.1	Influencia de la viscosidad del material	85
Fig. 4.2	Influencia de la velocidad de giro del husillo	86
Fig. 4.3	Influencia de la geometría de la hilera	86
Fig. 4.4	Influencia de la geometría del husillo	87
Fig. 4.5	Sistema de análisis para el balance energético	118
Fig. 4.6	Estructura – soporte	136
Fig. 4.7	Cilindro o camisa	137
Fig. 4.8	Tornillo extrusor	137
Fig. 4.9	Eje motriz	138
Fig. 4.10	Cilindro – alojamiento de rodamientos	138

Fig. 4.11	Soporte anterior de la camisa	139
Fig. 4.12	Soporte posterior de la camisa	139
Fig. 4.13	Tolva con su base	140
Fig. 4.14	Panel metálico	140
Fig. 4.15	Protección de la camisa	141
Fig. 4.16	Protección de las catalinas	141
Fig. 4.17	Cabezal de extrusión	142
Fig. 4.18	Boquilla de extrusión	142
Fig. 4.19a	Ensamble del prototipo	143
Fig. 4.19b	Ensamble del prototipo	143
Fig. 4.20a	Modelación, cargas y restricciones (presión estática máxima)	145
Fig. 4.20b	Mallado (presión estática máxima)	145
Fig. 4.20c	Verificación de diseño – Tornillo (presión estática máxima)	146
Fig. 4.20d	Verificación de diseño – Eje Motriz (presión estática máxima)	146
Fig. 4.21a	Modelación, cargas y restricciones (caída de presión normal)	147
Fig. 4.21b	Mallado (caída de presión normal)	147
Fig. 4.21c	Verificación de diseño – Tornillo (caída de presión normal)	148
Fig. 4.21d	Verificación de diseño – Eje Motriz (caída de presión normal)	148
Fig. 4.22	Reacciones rodamiento de rodillos cilíndrico (caída de presión normal)	149
Fig. 4.23	Reacciones rodamiento de rodillos cónico (caída de presión normal)	149
Fig. 4.24	Vida en ciclos y horas del rodamiento de rodillos cilíndrico	151

Fig. 4.25a	Modelación, restricciones y cargas (presión estática máxima)	152
Fig. 4.25b	Mallado (presión estática máxima)	153
Fig. 4.25c	Verificación de diseño – Tornillo (presión estática máxima)	153
Fig. 4.25d	Verificación de diseño – Eje Motriz (presión estática máxima)	154
Fig. 4.26a	Modelación, restricciones y cargas (caída de presión normal)	154
Fig. 4.26b	Mallado (caída de presión normal)	155
Fig. 4.26c	Verificación de diseño – Tornillo (caída de presión normal)	155
Fig. 4.26d	Verificación de diseño – Eje Motriz (caída de presión normal)	156
Fig. 4.27	Reacciones rodamiento de rodillos cilíndrico (caída de presión normal)	156
Fig. 4.28	Reacciones rodamiento de rodillos cónico (caída de presión normal)	157
Fig. 4.29	Vida en ciclos y horas del rodamiento de rodillos cilíndrico	159
Fig. 4.30a	Modelación sistema extrusor, cargas de potencia calorífica y convección	160
Fig. 4.30b	Mallado sistema extrusor	160
Fig. 4.30c	Temperaturas resultantes luego de 40 minutos de calentamiento	161
Fig. 4.31a	Cabezal de extrusión – Modelación, cargas y restricciones	162
Fig. 4.31b	Cabezal de extrusión – Mallado	162
Fig. 4.31c	Cabezal de extrusión – Verificación de diseño	163
Fig. 4.32a	Boquilla de extrusión – Modelación, cargas y restricciones	163
Fig. 4.32b	Boquilla de extrusión – Mallado	164

Fig. 4.32c	Boquilla de extrusión – Verificación de diseño	164
Fig. 4.32d	Boquilla de extrusión – Verificación de diseño	165
Fig. 4.33a	Camisa – Modelación, cargas y restricciones	165
Fig. 4.33b	Camisa – Mallado	166
Fig. 4.33c	Camisa – Verificación de diseño	166
Fig. 4.34	Braker	168
Fig. 4.35	Contactores trifásicos	169
Fig. 4.36	Pulsador ON/OFF	169
Fig. 4.37	Interruptores	169
Fig. 4.38	Protección de motor	170
Fig. 4.39	Bandas calefactoras	170
Fig. 4.40	Motorreductor	171
Fig. 4.41	Controladores digitales de temperatura	171
Fig. 4.42	Termocupla	172
Fig. 4.43	Variador de frecuencia	172

## **CAPÍTULO 5: CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE**

Fig. 5.1	Tornillo extrusor manufacturado con aleaciones especiales de alta resistencia	174
Fig. 5.2	Fabricación de tornillos con métodos CAD/CAM	178
Fig. 5.3	Tornillo extrusor importado	179
Fig. 5.4	Corte lateral donde se puede observar claramente la camisa	180
Fig. 5.5	Camisa con tubo de ingreso para el material	180
Fig. 5.6	Estructura soporte, camisa y motorreductor	181
Fig. 5.7	Circuitos eléctricos principales	182
Fig. 5.8	Placa soporte ensamblada a la camisa	183

Fig. 5.9	Placas frontal y trasera de soporte soldadas a la camisa	184
Fig. 5.10	Eje motriz y cilindro de alojamiento para los rodamientos	184
Fig. 5.11	Rueda montada sobre el eje motriz. Rodamiento cónico y tornillo	184
Fig. 5.12	Sistema de transmisión de potencia completamente montado	185
Fig. 5.13	Controladores digitales de temperatura sobre el panel metálico	185
Fig. 5.14	Bandas calefactoras	186
Fig. 5.15	Circuitos eléctricos principales	186
Fig. 5.16	Conexión de termocupla	186
Fig. 5.17	Variador de frecuencia para controlar la velocidad de giro	187
Fig. 5.18	Elementos internos del cabezal	187
Fig. 5.19	Cabezal roscado	187
Fig. 5.20	Boquilla roscada	188
Fig. 5.21	Extrusora completamente ensamblada	188
Fig. 5.22	Modelación – ensamble total del prototipo	189
Fig. 5.23a	Elementos internos de la extrusora	189
Fig. 5.23b	Elementos internos de la extrusora	190
Fig. 5.24	Vista explotada del prototipo	190
<b>CAPÍTULO 6: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO</b>		
Fig. 6.1	Bandas de alta potencia y estándares	201
Fig. 6.2	Controladores digitales de temperatura	201
Fig. 6.3	Salida del material extruído	202
Fig. 6.4	Variador de frecuencia	203

Fig. 6.5	Cabezal de extrusión en funcionamiento	204
Fig. 6.6	Boquilla de extrusión en funcionamiento	205
Fig. 6.7	Material reciclado frágil	205
Fig. 6.8	Filamentos transparentes de PET reciclado	206
Fig. 6.9	Filamentos de coloración opaca de PET reciclado	206

## **CAPÍTULO 7: ENSAYOS MECÁNICOS**

Fig. 7.1	Horno mufla	210
Fig. 7.2	Máquina de ensayos	211
Fig. 7.3	Registro de los ensayos en papel milimetrado	212
Fig. 7.4	Probeta de RPET lavado y secado, comportamiento plástico del material	213
Fig. 7.5	Resistencia a la tracción de las probetas de envases con respecto al número de ensayo realizado	216
Fig. 7.6	Alargamiento porcentual de las probetas de envases con respecto al número de ensayo realizado	216
Fig. 7.7	Resistencia a la tracción de las probetas de PET extruido de escamas lavadas con respecto al número de ensayo realizado	218
Fig. 7.8	Alargamiento porcentual de las probetas de PET extruido de escamas lavadas con respecto al número de ensayo realizado	218
Fig. 7.9	Resistencia a la tracción de las probetas de PET extruido de escamas contaminadas con respecto al número de ensayo realizado	220
Fig. 7.10	Alargamiento porcentual de las probetas de PET extruido de escamas contaminadas con respecto al número de ensayo realizado	220
Fig. 7.11	Resistencia a la tracción de las probetas de PET extruido de escamas lavadas con respecto al número de ensayo realizado	224
Fig. 7.12	Alargamiento porcentual de las probetas de PET extruido de escamas lavadas con respecto al número de ensayo realizado	224

Fig. 7.13	Resistencia a la tracción de las probetas de PET extruido de escamas lavadas y secadas con respecto al número de ensayo realizado	230
Fig. 7.14	Alargamiento porcentual de las probetas de PET extruido de escamas lavadas y secadas con respecto al número de ensayo realizado	230

# NOMENCLATURA

## Capítulo 1: GENERALIDADES

HDPE Polietileno de alta densidad

LDPE Polietileno de baja densidad

PP Polipropileno

PVC Policloruro de Vinilo

PET Polietilén tereftalato

## Capítulo 2: MARCO TEÓRICO

TA Ácido terftálico

DMT Terftalato de dimetilo

I.V. Viscosidad Intrínseca

RPET PET reciclado

FDA Food and Drug Administration

SPI Sociedad de la Industria del Plástico

OPP Polietileno orientado

x Ancho de la capa sólida

w Ancho del canal

h	Altura del filete
d	Holgura radial
Q	Caudal volumétrico
L	Longitud
D	Diámetro
$\Theta$	Ángulo de la hélice
N	Velocidad de rotación
P	Presión estática
$\eta$	Viscosidad de la fusión
T	Esfuerzo cortante
$\mu$	Constante de proporcionalidad llamada viscosidad
$\gamma$	Velocidad de cizalla
C	Consistencia del material
n	Medida de la vibración de los fluidos newtonianos
K	Constante total de la boquilla
t	Paso del husillo
Vc	Velocidad circunferencial del cilindro

$V_z$	Componente de la velocidad tangencial a lo largo del canal
$V_x$	Velocidad en la componente x
$dz$	Diferencial de longitud del canal del tornillo
$Q_f$	Flujo de fricción
$Q_r$	Flujo de retroceso
$\delta$	Huelgo radial
$\Delta p$	Diferencia de presión en ambos lados del filete
$e$	Ancho de la cresta del filete
$m$	Es el número de espiras
$G$	Es una constante del flujo de pérdidas
$R_a$	Radio de la abertura
$L_a$	Largo de la abertura
$L_r$	Largo de la rendija
$h_r$	Luz de la rendija
$b$	ancho rendija
$\mu_a$	Viscosidad aparente

$dz1$	Diferencial de potencia consumida a lo largo de la longitud del canal
$V_c$	Velocidad relativa del cilindro
$dF1$	Fuerza necesaria para mantener el movimiento del material en la dirección de $V$
$dF2$	Es la fuerza necesaria para mantener el movimiento del material en la dirección de $V$
$dA2$	Área diferencial
$P_o$	Potencia
$\rho_m$	Densidad del fundido
$C_p$	Capacidad calorífica
$T$	Temperatura
$H_f$	Calor de fusión

#### **Capítulo 4: DISEÑO DE LA MÁQUINA EXTRUSORA DE TORNILLO SIMPLE**

$D_h$	Mayor diámetro
$L_h$	Menor longitud
$L_D$	Mayor longitud de la zona de bombeo
$h_D$	Mayor altura de los filetes del husillo

Lm	Longitud de la zona de bombeo
s	Espesor del filete (en el sentido transversal al canal)
$\alpha$	Ángulo para fluido cónico - cilíndrico
$\lambda$	Viscosidad extensional
i	Relación de compresión
$\rho_f$	Densidad PET fundido a temperatura de tratamiento (248.8 °C)
R	Revoluciones necesarias para llevar el material a la zona de bombeo
Tr	Tiempo de residencia del material
hc	Profundidad media del canal
Pmax	Presión estática máxima
To	Temperatura externa
Ti	Temperatura interna
Ze	Pérdidas por instalaciones eléctricas
Zm	Pérdidas en motores y generadores
$\varepsilon$	Eficiencia del sistema
Pc	Potencia corregida

$E_e$	Energía que entra al cilindro, proviene de los calefactores eléctricos
$E_{ac}$	Energía almacenada por el cilindro
$E_p$	Energía que sale del cilindro hacia el exterior
$E_s$	Energía que sale del cilindro hacia el husillo
$E_e$	Energía que entra al husillo, proviene del cilindro
$E_{ah}$	Energía almacenada por el husillo
$m_c$	Masa del cilindro
$C_{p_c}$	Calor específico del material del cilindro
$\frac{\partial T_c}{\partial t}$	Variación de la temperatura respecto al tiempo
$h$	Coefficiente de transferencia de calor
$A$	Área de transferencia de calor
$T_c(t)$	Temperatura del cilindro, variable con el tiempo
$T_{\infty}$	Temperatura del medio ambiente
$m_h$	Masa del husillo
$C_{p_h}$	Calor específico del material del husillo
$\frac{\partial T_h}{\partial t}$	Variación de la temperatura respecto al tiempo

$h_c$	Coeficiente de transferencia de calor por convección
$h_r$	Coeficiente de transferencia de calor por radiación
$T_f$	Temperatura media de película
$T_s$	Temperatura de la superficie del cuerpo sólido
$Gr$	Número de Grashof
$Nu$	Número de Nusselt
$\Delta T$	Variación de temperatura
$g$	gravedad
$A$	Área de transferencia de calor
$\epsilon_1$	Emisividad de la superficie
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$T_a$	Temperatura absoluta ambiental
$S$	Área de cada zona
$E_s$	Cantidad de calor agregada al polímero
$\delta m / \delta t$	Flujo másico de polímero en la zona
$C_p$	Calor específico del polímero
$T_e$	Temperatura del polímero a la entrada

k	Conductividad térmica
e1	Emisividad del acero a temperatura 533 K
Qnn	Cantidad teórica de calor necesario para elevar 1 kg/h a una temperatura promedio en todo el cilindro o camisa de 260 °C
$\omega_1$	Velocidad angular del motor
$\omega_2$	Velocidad angular a la salida del reductor helicoidal
$\omega_3$	Velocidad angular del eje motriz
kd	Factor de servicio
Ps	Potencia de servicio
Zp	Número de dientes de la catalina piñón
Zr	Número de dientes de la catalina rueda
Cr	Distancia entre centros
Po	Carga equivalente estática
Pq	Carga equivalente dinámica
C	Capacidad dinámica
Co	Capacidad estática
H	Vida básica en horas

## **Capítulo 5: CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE**

CDT            Controladores digitales de temperatura

## **Capítulo 7: ENSAYOS MECÁNICOS**

Li            Longitud inicial

Lf            longitud final

## ANEXOS

ANEXO A	Diagrama de operaciones	242
ANEXO B	Características y propiedades del PET	243
ANEXO C	Aceros utilizados, rodamientos y catalinas	246
ANEXO D	Variador de frecuencia Danfoss 2 HP	255
ANEXO E	Tasas de producción de la máquina extrusora	258
ANEXO F	Costos relacionados con el proceso de extrusión	260
ANEXO G	Artículos y publicaciones relacionados con la extrusión	263
ANEXO H	Recopilación fotográfica	306
ANEXO I	Simulaciones/verificación de diseño adicionales	319
ANEXO J	Planos de la máquina extrusora	324

## RESUMEN

En la actualidad, las crecientes actividades vinculadas a la protección medioambiental han impulsado diferentes sistemas de reciclado de residuos sólidos urbanos. Dentro de los diferentes residuos que llegan a los rellenos sanitarios, un considerable porcentaje, tanto en volumen como en peso, corresponde a los envases fabricados con PET. En nuestro medio no existen empresas que reciclen íntegramente este tipo de polímero debido a sus complejas técnicas de reprocesamiento, pero en países del extranjero, como Estados Unidos y China, existe una gran demanda por el PET reciclado, material que se convierte en la base para la fabricación de textiles principalmente.

El proyecto que se presenta a continuación, consiste en el diseño de un proceso de reciclaje mecánico para los envases fabricados con PET, contemplando todas las etapas involucradas en el reprocesamiento de este material: recolección y selección de los envases, proceso de molienda, lavado y secado de las escamas de PET, y finalmente, proceso de extrusión.

La implementación del proceso de extrusión, surge como alternativa a un proceso de inyección utilizado anteriormente para reciclar PET, el cual arrojó como resultado un RPET (PET reciclado) de tipo frágil, con bajo alargamiento porcentual (0.2–0.3 %) y baja resistencia a la tracción (22–41.4 Kg/cm<sup>2</sup>). La principal ventaja que presenta la extrusión es la continuidad del proceso, mientras que la inyección se ve limitada especialmente por la carrera del elemento impulsor.

La ejecución del proyecto se la realizó de manera experimental, utilizando tres tipos de materia prima para la extrusión: escamas de PET contaminadas, escamas de PET lavadas, y escamas de PET lavadas y secadas en horno. El diseño mecánico de la máquina extrusora monohusillo fue concebido con la idea de obtener RPET en forma de filamentos, los cuales posteriormente fueron

sometidos a un ensayo simple de tracción horizontal, que permitió determinar las características mecánicas básicas del material reciclado.

Una vez finalizados los ensayos destructivos, se observaron los mejores resultados con la extrusión de escamas lavadas y secadas de PET, obteniendo alargamientos porcentuales en un rango de 21,911 a 217,436%, y resistencias a la tracción contabilizadas en un rango de 351,873 a 639,265 [Kg/cm<sup>2</sup>]. Con estos valores se pudo alcanzar el principal objetivo del proyecto, el cual consistía en obtener un material reciclado que presentara un comportamiento de plástico dúctil, y que superara las características mecánicas mínimas requeridas. El punto clave que permitió obtener estos resultados fue el proceso de secado, a través del cual se consiguió eliminar considerablemente la humedad contenida en las escamas lavadas de PET, y por tanto, eliminar la degradación hidrolítica durante el proceso de extrusión.

El proceso implementado para la ejecución de este proyecto se caracteriza por ser un proceso prototipo, es decir, no alcanza un nivel industrial, pero al observar los resultados alcanzados, se puede afirmar que el reciclaje del PET en nuestro país es una realidad viable, tanto en el aspecto técnico como medioambiental.