



CAN
C-2

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

“Rediseño de un Molino para Plásticos de Construcción Nacional”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERA MECÁNICA

Presentada por:

María Elisa Cantos Muñoz

GUAYAQUIL-ECUADOR

Año: 2005



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL



D-33715

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Ernesto Martínez, por estar en todo momento, por ser más que una buena guía, un buen amigo. Gracias por enseñarme día a día a cualquier hora, que todo problema tiene solución y toda duda tiene respuesta.

A Patricio Moreno por el tiempo que no dudo en brindarme, por ayudarme en mi camino, no hay palabras para agradecerte.

A mi familia y a mis mejores amigos que sin condiciones me brindaron su apoyo y que me animaron cuando las fuerzas para seguir se agotaban.



CIB-ESPOL

DEDICATORIA

A mi madre porque no dudo cuando tuvo la oportunidad contemplarme mientras yo escalaba hacia mi meta, por estar pendiente cada día de mis pasos, no hay palabras... a mi madre porque ser en la Tierra el ser más maravilloso.

A mi padre por amarme de la forma en que lo hace, por confiar en mí desde mis inicios y por apoyarme en todo momento haciéndome sentir que vale la pena luchar por los ideales.

A mi ñaño por soportarme, por estar en todo momento dándome una palabra de aliento, por ser el niño grandioso que termina siempre haciéndome reír y por ser una joya de un valor incalculable.

A Angelito Barreiro, quien me enseñó el camino y luego fue un pedazo de cielo que desde un vértice del más allá iluminó mi sendero.

A Dios por haberme regalado a mi pequeña y amada familia, quienes hicieron conmigo esta tesis.



CIB-ESPOL

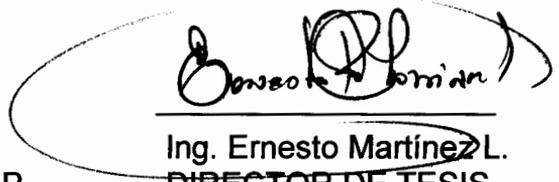


CIB-ESPOL

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



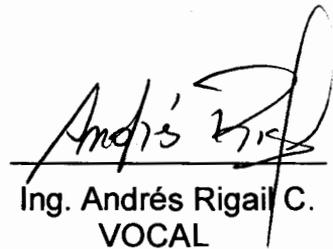
Dr. Alfredo Barriga R.
Delegado del Decano de la FIMCP
PRESIDENTE



Ing. Ernesto Martínez L.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Manuel Helguero G.
VOCAL



Ing. Andrés Rigall C.
VOCAL



CIB-ESPOL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”



CIB-ESPOL

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Ma. Elisa Cantos Muñoz.



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

RESUMEN.

En nuestros días, un factor importante en todas las industrias es mejorar la calidad y el nivel de producción pero todo esto debe estar de la mano con el hecho de minimizar los costos de la misma y de contribuir de alguna forma al cuidado del medio ambiente.

El presente trabajo surgió de la necesidad de una empresa que presta servicios de molienda para materiales plásticos reciclados, esta empresa ha usado la misma maquinaria de trabajo por varios años, aparentemente sin problemas. Empero, el costo por kilogramo de plástico molido resulta elevado ya que el consumo de energía eléctrica es significativo.

El molino tema de este estudio, trabaja a una potencia mayor a la requerida o en su defecto el molino no genera la cantidad de kilogramos de plástico molido por hora que debería entregar según la potencia del motor.

El objetivo del trabajo es mejorar la eficiencia del molino, logrando que el material reciclado permanezca el menor tiempo posible en su interior. Esto

contribuirá a eliminar el cisco, elemento que por su tamaño reducido, al fundirse puede ser contaminante; además se disminuirían los tiempos perdidos por atoramiento del molino, ya que estos se generan por el bajo rendimiento.

El análisis del problema se ha basado en la toma de datos de consumo de energía, en la verificación de la forma de trabajo y en los reportes de producción, estos se han comparado con molinos de características similares pero de tecnología extranjera, los cuales tienen una capacidad de producción un 100% mayor al molino examinado. Por lo que analizaré el diseño y se modificarán las partes que se deban ser modificadas, mejorándose de esta manera los procedimientos de trabajo.

Mejorando la eficiencia del molino se logrará mayor producción de plástico para ser tratado como materia prima de un sinnúmero de productos y se disminuirían por consiguiente los costos de producción por cada kilogramo de plástico molido.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	II
INDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	IV
SIMBOLOGIA.....	V
INDICE DE FIGURAS.....	VI
INDICE DE TABLAS.....	VII
INDICE DE PLANOS.....	VIII
ANTECEDENTES.....	1

CAPITULO 1.

1. ECOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE.....	3
1.1. Acumulación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).....	4
1.2. Destrucción del Medio Ambiente.....	8
1.3. Eliminación de los RSU.....	12
1.4. Otras alternativas de eliminación de los RSU.....	15

CAPITULO 2.

2. PLÁSTICOS.....	25
2.1. Propiedades Generales.....	28
2.1.1 Termoplásticos.....	31
2.1.2 Termoestables.....	38
2.2 Tiempo de Vida Residual.....	42
2.3 Clasificación de los Plásticos.....	44

CAPITULO 3.

3 RECICLAJE.....	47
3.1 Características de los Plásticos.....	50
3.2 Estadísticas de Reciclaje de los Plásticos en Guayaquil.....	54
3.3 Fabricación de diversos artículos en Plástico.....	58
3.4 Plástico Virgen vs. Plástico Reciclado.....	68
3.4.1. Análisis de Costos.....	71

CAPITULO 4.

4 MOLINOS PARA PLÁSTICOS.....	76
4.1. Factores que influyen en la Selección del Molino.....	78
4.2. Estructura de los Molinos.....	86
4.3. Detalles Técnicos.....	93
4.4. Tamaños y potencias.....	96

CAPITULO 5.

5	CARACTERÍSTICAS DEL MOLINO. TEMA DE ESTUDIO.....	100
5.1.	Características del Molino.....	100
5.2.	Rendimiento.....	112

CAPITULO 6.

6	MEJORAS EN EL DISEÑO DEL MOLINO.	
6.1.	Mejoras en el Diseño del Molino.....	114
6.2.	Implementación de los Cambios.....	134
6.3.	Pruebas y Ajustes.....	153
6.4.	Costos.....	154

CAPITULO 7.

7	ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO.....	161
----------	--------------------------------------	------------

CAPITULO 8.

8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	165
----------	--	------------

ANEXOS.

BIBLIOGRAFÍA.

CAPITULO 5.

5	CARACTERÍSTICAS DEL MOLINO. TEMA DE ESTUDIO.....	100
5.1.	Características del Molino.....	100
5.2.	Rendimiento.....	112

CAPITULO 6.

6	MEJORAS EN EL DISEÑO DEL MOLINO.	
6.1.	Mejoras en el Diseño del Molino.....	114
6.2.	Implementación de los Cambios.....	134
6.3.	Pruebas y Ajustes.....	153
6.4.	Costos.....	154

CAPITULO 7.

7	ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO.....	161
----------	--------------------------------------	------------

CAPITULO 8.

8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	165
----------	--	------------

ANEXOS.

BIBLIOGRAFÍA.

ABREVIATURAS

RSU	Residuos Sólidos Urbanos
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
DSU	Desechos Sólidos Urbanos
RDF	Combustible Derivado de los Residuos
PF	Combustible de Polímeros
PEAD	Poliétileno de Alta Densidad
PEBD	Poliétileno de Baja Densidad
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PET	Poliétilentereftalato
PVC	Policloruro de Vinilo
C	Carbono
H	Hidrógeno
O	Oxígeno
N	Nitrógeno
T _g	Temperatura de Transición Vítreo
ABS	Acrlonitrilo-butadieno-estireno
PUR	Poliuretanos Reticulados
EBC	Embotelladora de Bebidas Cítricas
OPS	Poliestireno Biorientado
SPC	Control Estadístico de Proceso
CVS	Aceros de Cromo-Vanadio
E _T	Energía Total
E _i	Energía por unidad de Área Obtenida
A _T	Área Total Obtenida
A _u	Área Unitaria
n	Número de Partículas en una hora
V _u	Volumen Unitario
M _u	Masa Unitaria
N ₁	Velocidad de rotación en el eje del Motor

N_2	Velocidad de rotación en el eje de la Carga
D_1	Diámetro de la polea en el eje del Motor
D_2	Diámetro de la polea en el eje de la Carga
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotrices
A	Área
D	Diámetro
e	Espesor
ρ	Densidad
m_c	Masa de las Cuchillas
m_s	Masa de los Soportes
m_{Ts}	Masa total de los Soportes
d_M	Diámetro Mayor del Árbol de Transmisión
d_m	Diámetro Menor del Árbol de Transmisión
l_M	Longitud del árbol que pertenece al diámetro mayor
l_m	Longitud del árbol que pertenece al diámetro menor
m_{Ta}	Masa Total del Árbol de Transmisión
m_T	Masa Total
S_y	Resistencia a la Fluencia
S_{sy}	Límite de Fluencia Elástico a Cortante
S_{ut}	Resistencia Máxima a la Tensión
I	Inercia
E_p	Energía Potencial
G	Gravedad
r	Radio
M	Masa
δ	Deflexión
E_k	Energía Cinética
ω_n	Frecuencia Natural
E	Módulo de Elasticidad
F	Frecuencia
J	Momento polar de Inercia
τ	Esfuerzo Cortante
N	Factor de Seguridad
H	Altura de la garganta del cordón de Soldadura
S_e	Límite de Resistencia a la Fatiga Corregido
S_{se}	Límite de Resistencia a la Fatiga sin Corregir
T	Torque



ESPOL

F

Fuerza

σ

Esfuerzo por Flexión

F_i

Precarga en el Diseño de Pernos

L_{nah}

Vida ajustada del Rodamiento

C

Carga Dinámica

S_0

Factor de Seguridad mínimo para Rodamientos



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

SIMBOLOGIA

Kg	Kilogramos
Tn	Toneladas
Tn/día	Toneladas por día
Tn/mes	Toneladas por mes
Tn/año	Toneladas por año
MJ/Kg	Mega Joules por Kilogramo
Kg/cm³	Kilogramos por centímetro cúbico
g/cm³	Gramos por centímetro cúbico
Kg/h	Kilogramos por hora
W/m K	Vatios por metro-Kelvin
s	Segundos
KW	Kilo Vatios
mm	Milímetros
m	Metros
rpm	Revoluciones por minuto
V	Voltios
Amp	Amperios
KJ	Kilo Joules
KJ/m²	Kilo Joules por metro cuadrado
KJ/h	Kilo Joules por hora
m²	Metro cuadrado
m³	Metro cúbico
MPa	Mega Pascal
Kg-m²	Kilogramo-metro cuadrado
rad/seg	Radianes por segundo
Hz	Hertz
N	Newton
N-m	Newton-metro
pulg	Pulgadas
ft	Pies
HP	Caballos de Fuerza

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1	Componentes de Desechos Domésticos en la ciudad de Guayaquil. 5
Figura 1.2	Desechos reciclables en la Basura Doméstica. 6
Figura 1.3	Porcentajes de Plásticos Componentes de los RSU. 8
Figura 1.4	Contaminación producida por desechos. 9
Figura 1.5	Contaminación de Plásticos en Guayaquil 10
Figura 3.1	Composición de los desechos sólidos. 48
Figura 3.2	Dificultades del proceso de reciclaje. 49
Figura 3.3	Envases de Alimentos fabricados con PS. 60
Figura 3.4	Vajilla Descartable fabricada con PS. 60
Figura 3.5	Electrodoméstico fabricado con PS. 61
Figura 3.6	Aplicación en la construcción de PVC. 62
Figura 3.7	Aplicación en la Electrónica de PVC. 62
Figura 3.8	Aplicación Médica de PVC. 63
Figura 3.9	Tarjetas hechas con PVC. 63
Figura 3.10	Aplicación Automotriz de PP. 64
Figura 3.11	Aplicación del PP. 65
Figura 3.12	Fundas hechas con PEAD. 66
Figura 3.13	Caños hechos con PEBD. 67
Figura 3.14	Envases para diferentes aplicaciones hechos con PET. 68
Figura 5.1	Molino tema de estudio. 100
Figura 5.2	Vista del Sistema de Cuchillas. 101
Figura 5.3	Modelo de las partículas de plástico cortadas 102
Figura 5.4	Sección longitudinal de las cuchillas. 108
Figura 5.5	Sección transversal de los soportes existentes. 109
Figura 5.6	Árbol de Transmisión 110
Figura 5.7	Corte de Material Plástico con la Sierra Eléctrica 111
Figura 5.8	Potencia Utilizada vs. Cantidad de Plástico 113
Figura 6.1	Primer diseño para soportes. 114
Figura 6.2	Segundo diseño para soportes. 115
Figura 6.3	Rotor existente. 116
Figura 6.4	Análisis de Esfuerzos para el rotor existente. 117
Figura 6.5	Lugar donde se localiza el mayor esfuerzo en el rotor existente. 117

Figura 6.6	Análisis de Deflexiones para el rotor existente.	118
Figura 6.7	Modelo 1 para cambio de rotor.	119
Figura 6.8	Análisis de Esfuerzos para Modelo 1.	119
Figura 6.9	Análisis de Deformaciones para el Modelo 1.	120
Figura 6.10	Modelo 2 para cambio de rotor.	121
Figura 6.11	Análisis de Esfuerzos para Modelo 2.	121
Figura 6.12	Análisis de Deformaciones para el Modelo 2.	122
Figura 6.13	Modelo 3 para cambio de rotor.	123
Figura 6.14	Análisis de Esfuerzos para Modelo 3.	123
Figura 6.15	Análisis de Deformaciones para el Modelo 3.	124
Figura 6.16	Modelo 4 para cambio de rotor.	125
Figura 6.17	Análisis de Esfuerzos para Modelo 4.	125
Figura 6.18	Análisis de Deformaciones para el Modelo 4.	126
Figura 6.19	Diseño de Forma del Rotor Escogido.	128
Figura 6.20	Sección transversal de los nuevos soportes.	129
Figura 6.21	Diseño de la Chaveta.	139
Figura 6.22	Análisis de Fuerzas en el Perno.	144
Figura 6.23	Análisis de Fuerzas para selección de Rodamientos.	148
Figura 7.1	Comparación de Ventajas en cuanto áreas de los dos soportes.	162

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Porcentajes de los Desechos en las Industrias	6
Tabla 2	Comparación de la eliminación de los desechos.	13
Tabla 3	Valor energético de los Plásticos.	20
Tabla 4	Densidad, conductividad térmica y eléctrica de diferentes materiales.	29
Tabla 5	Comparación de Resultados entre los distintos Modelos de Soportes	127
Tabla 6	Puntos Críticos analizados para la Selección de Rodamientos	149
Tabla 7	Costo de Fabricación del Árbol de Transmisión.	155
Tabla 8	Costo de Fabricación de los Soportes de las Cuchillas.	156
Tabla 9	Costo de Fabricación de las cuchillas.	157
Tabla 10	Costo Total de Fabricación del Nuevo Rotor.	160
Tabla 11	Ahorro Total por cada Hora de Trabajo.	163

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1	Ensamble
Plano 2	Corte A-A' (Plano 1)
Plano 3	Tolva
Plano 4	Cámara de Corte
Plano 5	Árbol de Transmisión
Plano 6	Soportes Existentes
Plano 7	Soportes Propuestos
Plano 8	Malla y Depósito
Plano 9	Bases

ANTECEDENTES

El presente trabajo establece una alternativa de solución para el gran problema que constituye en nuestro medio el manejo de desechos plásticos, es muy común observar, en el día a día, la gran cantidad que de estos residuos se genera. Por lo tanto el Reciclaje se ha convertido en una manera eficaz de contribuir con su tratamiento.

El avance tecnológico de nuestros días, obliga a que cada proceso se lleve a cabo de una manera eficiente y segura. El proyecto emprendido surgió de la necesidad de mejorar el proceso de molienda para lograr obtener más producción de plástico en el menor tiempo con menor consumo de energía eléctrica. El molino para plásticos de construcción nacional tiene problemas en su operación, los cuales se originan por su diseño, que hacen que el volumen de producción por hora sea bajo si es comparado con otros molinos importados de similares características.

Los procedimientos de trabajo a más de no ser eficientes son inseguros ya que el operador está sometido a cierto riesgo cada vez que el molino sufre un atoramiento, ya que este debe ser abierto y evacuado de una forma manual. Cabe mencionar que el molino fue construido hace algún tiempo y que la falta de tecnología de esa época puede ser una razón de su deficiencia.

El objetivo principal es lograr que la producción de plástico molido aumente al menos en un 20%, para esto se procederá al análisis de todo el mecanismo y en base a la comparación se procederá al rediseño del molino.

El procedimiento a seguir será mejorar las partes que así lo requieran, para que cuando el molino empiece el proceso de molienda de los diferentes tipos y formas que pueden tener los plásticos no surjan los problemas ya descritos. Así se evaluarán los cambios en el diseño y se realizarán las pruebas finales. Luego de esto, se llevarán a cabo los ajustes que deban hacerse si fuese necesario.

El análisis de costos es un punto importante que también será evaluado, los beneficios a largo plazo contribuirán al desarrollo del país ya que en las bodegas existirá menor cantidad de plástico para ser tratado y se tendrá mayor cantidad de materia prima para ser procesada.

CAPITULO 1

1. ECOLOGIA Y MEDIO AMBIENTE.

Todos los seres vivos tienen una manera de vivir que depende de su estructura y fisiología y también del tipo de ambiente en que viven, de manera que los factores físicos y biológicos se combinan para formar una gran variedad de ambientes en distintas partes de la biosfera. Así, la vida de un ser vivo está estrechamente ajustada a las condiciones físicas de su ambiente y también a las bióticas, es decir a la vida de sus semejantes y de todas las otras clases de organismos que integran la comunidad de la cual forma parte.

La ecología se ocupa del estudio científico de las interrelaciones entre los organismos y sus ambientes, y por tanto de los factores físicos y biológicos que influyen en estas relaciones y son influidos por ellas. Pero las relaciones entre los organismos y sus ambientes no son sino el resultado de la selección natural, de lo cual se desprende que todos los

fenómenos ecológicos tienen una explicación evolutiva. Actualmente la ecología se encarga de preservar la naturaleza y las especies en extinción.

El término ecología está ahora mucho más en la conciencia del público porque los seres humanos comienzan a percatarse de algunas malas prácticas ecológicas de la humanidad en el pasado y en la actualidad.

Es importante que todos conozcamos y apreciemos los principios de este aspecto de la biología, para que podamos formarnos una opinión inteligente sobre temas como contaminación con insecticidas, detergentes, mercurio, eliminación de desechos, presas para generación de energía eléctrica, y sus defectos sobre la humanidad, sobre la civilización humana y sobre el mundo en que vivimos.

1.1. Acumulación de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

La acumulación de residuos sólidos urbanos (RSU) es uno de los más graves problemas que afronta, no solo Guayaquil, sino todas las ciudades en general, que se suscita principalmente por una escasa cultura ambiental y energética en cuanto a reciclaje se refiere.

Hace diez años, en 1994 cada persona en Guayaquil producía 0,6Kg de basura y se producían 1385 Tn diarias de desechos.

Actualmente el promedio de producción de desechos es 0,97Kg por habitante por día, esto es alrededor de 1972 Tn por día. Los componentes globales de basura doméstica son los siguientes:

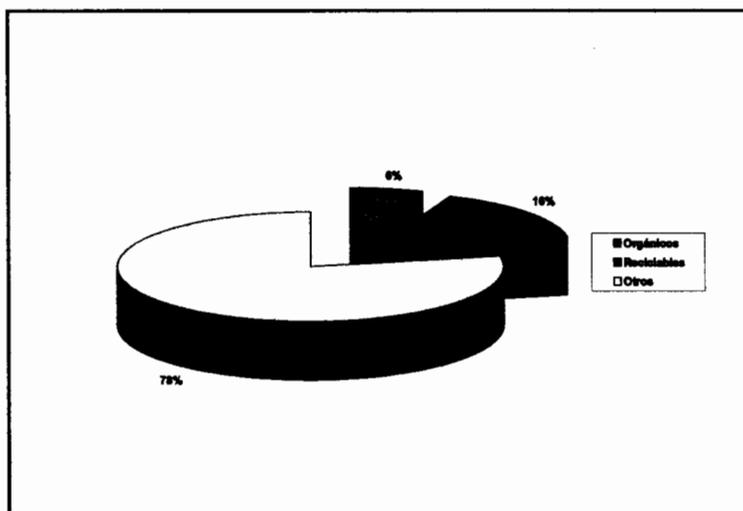


Figura 1.1. Componentes de Desechos Domésticos en la ciudad de Guayaquil⁽¹⁾

En cuanto a las fábricas, los datos del INEC reflejan que la descarga total de desechos de las industrias en 1993 fue de 26981 Tn/año, descompuestos en la siguiente forma:

⁽¹⁾ Tesis de Grado, Jorge Toro.

TABLA 1

PORCENTAJES DE LOS DESECHOS EN LAS INDUSTRIAS

Hierro y Acero	46,69%
Alimentos	51,85%
Otros	1,46%

En cuanto a los desechos reciclables en la basura doméstica el porcentaje se observa así:

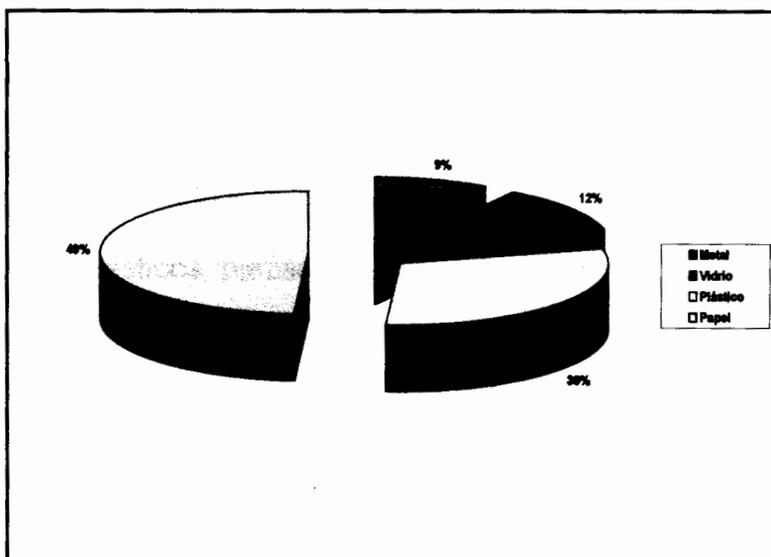


Figura 1.2. Desechos reciclables en la Basura Doméstica ⁽²⁾

⁽²⁾ Tesis de Grado, Jorge Toro.

En el caso de las industrias de las bebidas, que manufacturan cantidades considerables de PET, se tiene que la contaminación por descarga de desechos sólidos que corresponde a las nueve industrias que abarcó el estudio es de 2365 Tn/año.



Cabe resaltar que estos son los últimos datos oficiales de los que dispone el INEC.



Otras cifras revelan que aproximadamente el 20% de los productos plásticos acaban como residuos *en menos de un año, los cuales son*, por lo general embalaje para alimentos, botellas, contenedores y algunos filmes.



Un 35% de los plásticos son usados entre 1 y 10 años a saber artículos domésticos, piezas de autos, etc.

El 45% no se convierte en residuos sino pasados los 10 años, como paradigma están las tuberías y piezas plásticas para la construcción.

En general, los plásticos procedentes de los hogares constan de una mezcla de distintos materiales difíciles de identificar, lo que provoca su aglutinamiento.



En el siguiente gráfico se puede observar los diferentes componentes plásticos de los RSU.

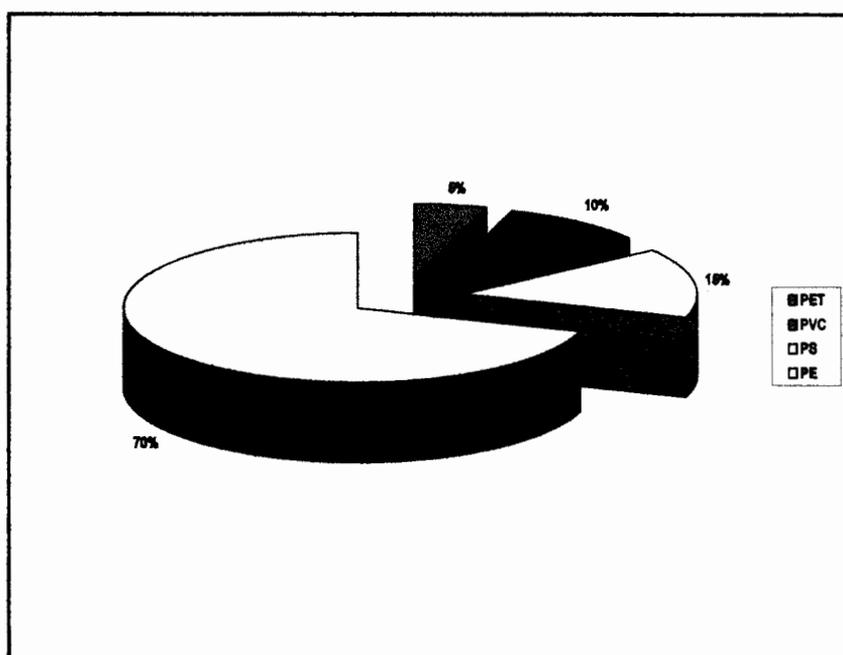


Figura 1.3. Porcentajes de Plásticos Componentes de los RSU.

1.2. Destrucción del Medio Ambiente.

La contaminación es un cambio indeseable en las características físicas, químicas o biológicas de nuestro aire, nuestra tierra y nuestra agua que puede afectar o afecta a la vida humana o de especies deseables; o que puede agotar o deteriorar nuestros recursos de materias primas. Contaminantes son residuos de las cosas que hacemos, usamos o desechamos.

La contaminación aumenta no solo porque al aumentar la población se hace menor el espacio a disposición de cada persona, sino también porque las demandas por persona están aumentando continuamente, de modo que cada una arroja a la basura cada vez más año tras año. Al estar más poblada la Tierra, no hay ya un espacio libre.

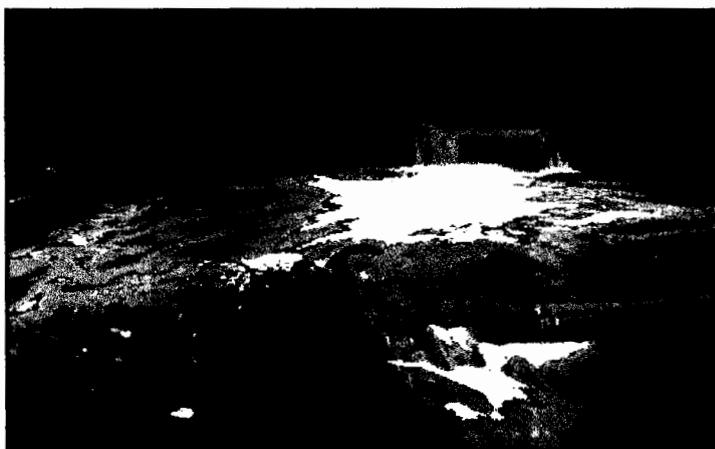


Figura 1.4. Contaminación producida por desechos.

En la década pasada, el incremento en el uso de los plásticos ha llegado a reemplazar materiales como el vidrio y el papel. Son precisamente estos nuevos materiales los que más daño hacen a nuestro ecosistema ya que no son sustancias que la naturaleza pueda descomponer y digerir con facilidad.

Es muy fácil observar en nuestra ciudad las secuelas que estos tipos de materiales han ocasionado:

- ✓ Contaminación del Estero Salado.
- ✓ Rápida saturación del relleno sanitario debido al gran volumen ocupado.
- ✓ Acumulación de envases plásticos en la ciudad.



Figura 1.5. Contaminación de Plásticos en Guayaquil

A inicios del año 2003 el Municipio de Guayaquil emprendió un programa de limpieza del Estero Salado, en su afán de mejorar el ecosistema y ornato de la ciudad, por lo que se han recolectado un total de 545,52Tn de desechos entre los meses de Febrero y Mayo.

Los datos estadísticos con los que cuenta la Municipalidad son mostrados en detalle en el Anexo 1.

Alguna de las leyes que, de una u otra manera pretenden controlar la destrucción del medio ambiente son:

- ✓ Ley de Prevención y Control de la Contaminación, 1976.
- ✓ Reglamento sobre la Prevención y Control de la Calidad del Aire y sus métodos de medición, 1991
- ✓ Reglamento sobre la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental en lo referente al Recurso Suelo, 1992.
- ✓ Reglamento para el Manejo de Desechos Sólidos, 1992.
- ✓ Reglamento que establece las Normas Generales de Emisión para Fuentes Fijas de Combustión y los Métodos Generales de Medición, 1993.
- ✓ Ley de Gestión Ambiental.

1.3. Eliminación de los RSU.

No cabe duda que la recolección de la basura es el servicio urbano que ha experimentado los mayores cambios, mejorando su eficiencia en comparación a épocas anteriores.

Hasta el año de 1993 no se disponía de un lugar técnico sanitario, donde se puede colocar los desechos sólidos de la ciudad. Estos eran quemados (29,5%), arrojados en lugares baldíos y esteros (4,4%) y mayormente en el botadero del Cerro San Eduardo (63,7%).

Para aquel año se contrató al cuerpo de Ingenieros del Ejército para la adecuación y relleno con material de cobertura en el mencionado botadero.

Desde el mes de septiembre de 1994 se implantó en Guayaquil el Relleno Sanitario "Las Iguanas", bajo administración y supervisión de la Municipalidad de Guayaquil.

Hacia 1998 y 2000 algo más del 94% de los desechos sólidos que se generan en el cantón (excepto la Isla Puná), son dispuestos en este relleno sanitario. El sistema comprende la organización de la basura

en celdas, formando capas compactadas y cubriéndolas con material pétreo.

La eliminación de los desechos urbanos, según datos comparativos de Guayaquil en los años 1993 y 2000, indica que las opciones han variado con el transcurso del tiempo, como se indica en la siguiente tabla:

TABLA 2

COMPARACIÓN DE LA ELIMINACIÓN DE LOS DESECHOS.

	Desechos Sólidos 1993	Desechos Sólidos 2000
Relleno Sanitario	0,0%	94,2%
Incineración	0,0%	0,0%
Vertedero Abierto	63,7%	0,8%
Reciclados	2,4%	1,8%
Quemados	29,5%	1,3%
Otros	4,4%	1,9%

Durante el período señalado se han producido cambios radicales que han contribuido en forma decisiva al mejoramiento del aseo urbano y a la imagen misma de la ciudad.

En el siguiente gráfico se visualiza de una mejor manera lo expuesto en la tabla anterior:

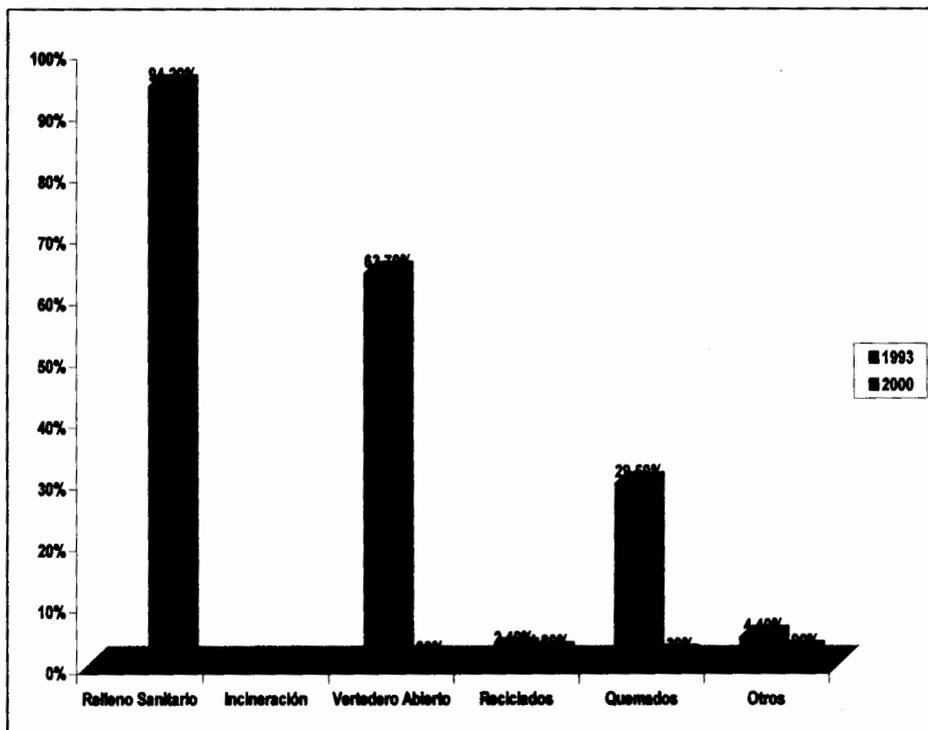


Figura 1.6. Eliminación de los Desechos.

⁽¹⁾ Tesis de Grado, Jorge Toro.

1.4. Otras Alternativas de Eliminación de los RSU.

Las soluciones que se recomiendan tienen relación directa con los plásticos, ya que este tipo de material artificial tiene largos períodos de vida residual en el medio ambiente, pudiendo durar muchos años.



CIB-ESPOL

Se presentan dos géneros como alternativas de solución:

- ✓ Reciclaje.
- ✓ Recuperación de Energía.



CIB-ESPOL

A parte del reciclaje, tema que será tratado en un capítulo posterior, en la ciudad se podrían aprovechar los RSU como una fuente alternativa de combustible cuyo poder calorífico podría variar, dependiendo de la composición porcentual de los desechos utilizados como tal.

Si bien la eliminación de los RSU se realiza también por combustión, en la ciudad no se aprovecha la energía desprendida por tal forma de combustible, por lo que se la presenta como una forma alternativa de



CIB-ESPOL

eliminación de desechos que puede beneficiar enormemente a la ciudad.



CIB-ESPOL

Recuperación de energía de los desechos plásticos.

Aunque algunos plásticos puedan reciclarse, con ventajas para el medio ambiente, muchos desechos plásticos consisten en pequeños objetos dispersos en otros materiales de desecho.

Separar y limpiar esos desechos para su reciclado puede entrañar una carga ambiental mayor que las ventajas de reciclado, incluso antes de tenerse en cuenta el costo económico.

De la misma manera, podría haber residuos del proceso de reciclado que no pueden ser reciclados a su vez.

Si el reciclado no puede justificarse, la recuperación de energía puede ser una forma eficaz en función de los costos de recuperar un valor intrínseco de los recursos.

Cabe señalar sin embargo, que incluso si se recupera la energía de la combustión, la energía necesaria para producir el plástico se pierde. En algunos tipos de plástico, la cantidad de energía necesaria para producir el material es del mismo orden de magnitud que su valor calorífico cuando se incinera.



Los plásticos en general tienen un alto valor energético. Aun los que contienen halógenos tienen un valor energético similar al del papel y el cartón. Cuando se mezclan con otros desechos, los plásticos ayudan a la combustión de desechos húmedos.



La investigación y la práctica de los últimos años han demostrado que, en estrictas condiciones de funcionamiento, los desechos plásticos, incluso cuando la mezcla es rica en PVC, pueden incinerarse de forma segura y eficaz. La combustión consistente, a alta temperatura recupera el máximo de energía del combustible y garantiza la rotura completa de los compuestos orgánicos tóxicos.



El método más eficaz de recuperación de energía (hasta el 85%) es la incineración para producir vapor a alta presión destinado a la generación de electricidad, vapor a baja presión para uso industrial y agua caliente para la calefacción de los hogares. La mayoría de las plantas en las que se recupera energía de los desechos no intentan conseguir los tres niveles anteriormente descritos.



Existen ciertos parámetros que muestra que el impacto ambiental de la recuperación de energía mediante la incineración se ve afectado por cuatro factores claves:

1. La naturaleza de los desechos que se van a incinerar,
2. El control de las condiciones de incineración,
3. La limpieza de los gases de la chimenea y,
4. La eliminación de los residuos.

La naturaleza de las corrientes de desechos plásticos destinados a la *recuperación de energía*.

Los plásticos pueden encontrarse en cuatro tipo de desechos utilizados en procesos de recuperación de energía, cada uno de los cuales presenta su propio valor de recuperación de la energía.

1. Desechos Sólidos Urbanos (DSU) que se relacionan con los residuos sin tratar de los hogares, los desechos de comercios y restaurantes, que se queman en grandes instalaciones de combustión en masa. Los DSU tienen un valor energético de tan sólo 10MJ/Kg y una densidad muy baja. Su contenido en plástico ayuda en la combustión de otro tipo de materiales en la corriente de desechos.
2. Combustible derivado de los residuos (RDF). Se produce al retirar todos los componentes no combustibles, como metales,

vidrios y materiales putrescibles, de los DSU y aglomerar el material combustible restante. Como se trata de unos DSU procesados, el RDF tiene un mayor contenido de desechos plásticos que los DSU y, en consecuencia, un valor energético más alto. Puede ser aceptable desde el punto de vista ambiental el transporte de los RDF a cortas distancias desde el lugar de su fabricación a las instalaciones autorizadas de recuperación de energía.

3. Combustible derivado de los embalajes. Consta principalmente de desechos de papel y plástico que se mantienen de los desechos en general y se procesan en forma de granos para conseguir un valor energético más alto.
4. Combustible de polímeros (PF). Consiste en desechos plásticos solo procedentes de procesos de reciclado o separados de la corriente general de desechos, procesados para producir un combustible con una energía y un contenido de polímeros especificados.

Muchos incineradores no están diseñados para soportar las temperaturas que se generan cuando se utiliza un combustible

con un valor calorífico tan alto y, por lo tanto, debe diluirse con un material con un valor calorífico más bajo. En la tabla siguiente se pueden observar algunos valores caloríficos de los desechos plásticos.

TABLA 3

VALOR ENERGÉTICO DE LOS PLÁSTICOS.

Combustibles/Polímeros	Valor Calorífico (MJ/g)
PEAD-PEBD	45
PP	45
PS	41
<i>PET</i>	23
Carbón	25
PVC	22
PP/ABS/PE-AD (computadoras)	43
Embalaje de Alimentos	45
Embalaje de No Alimentos	37
Parachoques/Depósitos de Combustible	33

Control de las condiciones de incineración.

Las condiciones necesarias para la incineración óptima de materiales son:

1. **Altas temperaturas:** de 900°C a 1000°C para los desechos de hidrocarburos y 1100°C a 1200°C para los desechos halogenados. La Legislación de la Unión Europea requiere una temperatura mínima de 850°C para todos los desechos que contengan más del 1% de sustancias orgánicas halogenadas, expresado en cloro,
2. **Suficiente tiempo de residencia (del gas) en el incinerador.** En promedio se requiere un mínimo de dos segundos,
3. **Buena turbulencia y,**
4. **Exceso de Oxígeno.**

El papel que desempeñan los polímeros clorados en la formación de dioxinas en los incinerados de desechos ha sido una cuestión controvertida. Se ha demostrado que la eliminación de los polímeros clorados de la mezcla de desechos nos da como resultado una

reducción proporcional de la formación de dioxina y que, incluso si se retira todo el PVC de la mezcla de desecho, el cloro restante es suficiente para formar dioxinas a niveles que hace necesario el tratamiento de los gases de chimenea.

Limpieza de los Gases de Chimenea del Incinerador.

Los gases enfriados procedentes de las cámaras de combustión del incinerador contienen una gama de materiales como dióxido de carbono, dióxido de azufre, cloruro o fluoruro de hidrógeno y polvo. Es probable que los materiales orgánicos tóxicos que se formen en los gases de chimenea enfriados se absorban en la superficie de las partículas de polvo. Es esencial separar el polvo de los gases, lo que se hace comúnmente mediante filtros textiles de malla fina. Los incineradores modernos han podido funcionar regularmente con emisiones de dioxinas muy inferiores al nivel de $0,1\text{mg}/\text{m}^3$ que requieren algunos gobiernos. Eso requiere habitualmente equipo adicional de limpieza de los gases, como sistemas basados en carbono activado o catalizadores especiales.

Para cumplir las normas modernas de emisión, es necesario retirar también de los gases de la chimenea el dióxido de azufre, el fluoruro de hidrógeno y el cloruro de hidrógeno. Esto se consigue haciendo

reaccionar a los gases como un álcali sólido húmedo, con soluciones alcalinas o simplemente con agua, lo que dependerá de la ubicación del incinerador. La neutralización de los gases ácidos con yeso húmedo produce un desecho sólido que debe depositarse en un vertedero autorizado. La neutralización de los gases ácidos con bicarbonato de sodio produce una disolución de sales de las que éstas puedan reciclarse en determinadas condiciones. La absorción de los gases ácidos en agua produce una disolución de la que esos gases pueden retirarse y procesarse para su utilización comercial. Tan solo existen unas pocas instalaciones de recuperación de ese tipo.

Eliminación de los Residuos de la Incineración.

Habitualmente, las cenizas volantes procedentes de la limpieza del gas de chimenea contienen materiales, como compuestos de metales pesados, que si se liberan, podrían causar daños al medio ambiente. Estos residuos deben considerarse siempre peligrosos y depositarse únicamente en vertederos autorizados después de realizar ensayos de lixiviación.

A veces se considera ventajoso estabilizar los residuos con cemento antes de depositarlos. La ceniza de fondo de los incineradores puede

ser lo suficientemente inerte como para utilizarse como árido en la construcción de carreteras, pero debe establecerse que son inertes antes de utilizarse de esa forma. El aprovechamiento energético de los plásticos tiene grandes perspectivas futuras debido a los altos valores de energía que se pueda alcanzar, empero, es necesario tener en cuenta que, como producto de la combustión y degradación de los materiales plásticos, podrían emitirse a la atmósfera sustancias nocivas o contaminantes.

CAPITULO 2

2. PLÁSTICOS.

Los plásticos son materiales polímeros plásticos, es decir, que pueden deformarse hasta conseguir una forma deseada por medio de extrusión, moldeo o hilado. Las moléculas pueden ser de origen natural, por ejemplo la celulosa, la cera y el caucho (hule) natural, o sintéticas, como el polietileno y el nailon.

Los plásticos se caracterizan por una alta relación resistencia/densidad, unas propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes. Las enormes moléculas de las que están compuestos pueden ser lineales, ramificadas o entrecruzadas, dependiendo del tipo de plástico. Las moléculas lineales y ramificadas son termoplásticas (se ablandan con el calor), mientras que *las entrecruzadas son termoestables (no se ablandan con el calor).*

Durante milenios el hombre ha conocido y hecho uso de materiales plásticos naturales como el asta, el ámbar y el carey. Esto se ha debido principalmente a sus buenas propiedades y a que la única transformación necesaria para hacer uso de ellos, ya sea como herramienta u ornamento, era el conformado mecánico adecuado para obtener la forma del objeto deseado.

Sin embargo, la historia de los plásticos artificiales es relativamente reciente. Se remonta a 1869, fecha en que John Wesley Wyatt, al intentar fabricar bolas de billar de material sintético, descubrió el celuloide. No obstante, los plásticos no tuvieron una gran repercusión sobre la industria hasta que en el año 1907 el Dr. Leo Baekeland patenta el procedimiento de obtención de una resina fabricada a partir de fenol y formaldehído que, en su honor, recibió el nombre de baquelita. Su descubrimiento estimuló la búsqueda de otros plásticos y dio lugar a una industria que ha llegado a ser una de las diez mayores de EE.UU.

Durante las décadas de los cincuenta y sesenta la producción y el consumo de plásticos crecen desmesuradamente, siendo el momento de mayor apogeo comercial de este campo. Posteriormente el ritmo de crecimiento de la industria del plástico ya ha sido más moderado.

No obstante, los plásticos se han constituido como un material imprescindible en la sociedad actual. Para comprobarlo basta con observar los objetos de cualquier entorno cotidiano y darse cuenta de que están presentes en la mayoría de los bienes y productos: nuestra vestimenta lleva incorporada un alto porcentaje de fibras plásticas; el acabado estético de multitud de elementos se logra gracias al recubrimiento de materiales plásticos como pinturas y barnices; gran parte del mobiliario es de plástico, o bien está recubierto por láminas de melamina; los envoltorios y embalajes de muchos productos son, o llevan incorporado, material plástico; las carcasas u otras estructuras que no deban soportar cargas o esfuerzos muy elevados, suelen ser enteramente plásticas.

En definitiva, la gran mayoría de los objetos que diariamente encontramos a nuestro alrededor están fabricados entera o parcialmente por componentes de plástico: televisores, carpetas, bolígrafos, mecheros, calculadoras, ordenadores, discos, electrodomésticos, coches, aviones; y así podría hacerse una interminable lista de cosas para las que la tecnología actual recurre al empleo de plásticos.

La gran profusión del empleo de materiales plásticos se debe fundamentalmente a que su precio es muy competitivo, y a que sus propiedades son muy ventajosas respecto a otros materiales a los que sustituyen; incluso, han sido imprescindibles para el desarrollo de algunos procesos técnicos.

2.1. Propiedades Generales.

A pesar de la gran variedad en la composición y estructura que pueden presentar los distintos plásticos, hay una serie de propiedades comunes que poseen los plásticos y que los distinguen de otros materiales.

El rango de densidades de los plásticos es relativamente bajo y se extiende desde 0.9 hasta 2.3 g/cm³. Entre los plásticos de mayor consumo se encuentran el PE y el PP, ambos materiales con densidad inferior a la del agua. La densidad de otros materiales es varias veces mayor, como el aluminio con densidad 2.7 g/cm³ o el acero con 7.8 g/cm³. Esta densidad tan baja se debe fundamentalmente a dos motivos; por un lado los átomos que componen los plásticos como C, H, O y N son ligeros, y por otro,

las distancias medias de los átomos dentro de los plásticos son relativamente grandes.

TABLA 4

**DENSIDAD, CONDUCTIVIDAD TÉRMICA Y ELÉCTRICA DE
DIFERENTES MATERIALES.**

Material	Densidad (g/cm³)	Conductividad Térmica (W/mK)	Conductividad Eléctrica (s)
Plásticos	0.9 – 2.3	0.15 – 0.5	
PE	0.9 – 1.0	0.32 – 0.4	
PC	1.0 – 1.2		
PVC	1.2 – 1.4		10 ⁻¹⁵
Acero	7.8	17.50	5.6
Aluminio	2.7	211	38.5
Aire		0.05	

Por otra parte, el valor de la conductividad térmica de los plásticos es sumamente pequeño. Los metales, por ejemplo, presentan conductividades térmicas 2000 veces mayores que los plásticos, esto se debe a la ausencia de electrones libres en el

material. Un inconveniente de la baja conductividad aparece durante la transformación de los plásticos. El calor necesario para transformar los plásticos se absorbe de manera muy lenta y, por otra parte la eliminación del calor resulta igualmente costosa.

Durante el uso de los plásticos, la baja conductividad térmica aparece como una ventaja, pues permite el empleo de estos materiales como aislantes.

Igualmente los plásticos conducen muy mal la corriente eléctrica. Presentan resistencias muy elevadas, y por tanto, bajas conductividades. La resistencia eléctrica es función de la temperatura, y a elevadas temperaturas conducen mejor. Gracias a su elevada resistencia eléctrica los plásticos se utilizan frecuentemente como aislantes eléctricos de aparatos y conducciones que funcionan con corriente o la transportan.

Por otra parte, los termoplásticos amorfos como el PC, PMMA, PVC, resinas de UP presentan transparencia que no difieren mucho del propio vidrio. Su transparencia es aproximadamente del 90% (relación entre la intensidad de la luz transmitida sin desviación y la

luz incidente). La transparencia de los plásticos se puede perder, al menos parcialmente, por exposición a la intemperie o a cambios bruscos de temperatura.

2.1.1. Termoplásticos.

Los materiales termoplásticos son polímeros lineales, que pueden ser ramificados o no y puesto que no se encuentran entrecruzados son polímeros solubles en algunos disolventes orgánicos, son capaces de fundir y son reciclables. Los termoplásticos más frecuentes como PE, PP, PS y PVC se fabrican y emplean en cantidades muy grandes, si los comparamos con los plásticos restantes. Más de la mitad de la cifra total procesada corresponde a los cuatro plásticos citados.

Para que un polímero tenga aplicación como termoplástico debe tener una temperatura de transición vítrea T_g (si se trata de un material amorfo), o una temperatura de fusión T_m (si se trata de un material cristalino), superior a la temperatura ambiente. Por lo general los materiales termoplásticos presentan un buen conjunto de propiedades mecánicas, son

fáciles de procesar, reciclables y bastante económicos. La principal desventaja deriva del hecho de que son materiales que funden, de modo que no tienen aplicaciones a elevadas temperaturas puesto que comienzan a reblandecer por encima de la Tg, con la consiguiente pérdida de propiedades mecánicas.

Dentro de los materiales termoplásticos los más comúnmente usados son:

ABE (acrilonitrilo-butadieno-estireno).- *Muy tenaz, pero duro y rígido; resistencia química aceptable; baja absorción de agua, por lo tanto buena estabilidad dimensional; alta resistencia a la abrasión; se recubre con una capa metálica con facilidad.*

Acetal: *Muy fuerte, plástico rígido usado en ingeniería con estabilidad dimensional excepcional, alta resistencia a la deformación plástica y a la fatiga por vibración; bajo coeficiente de fricción; alta resistencia a la abrasión y a los productos químicos; conserva la mayoría de sus propiedades*

cuando se sumerge en agua caliente; baja tendencia a agrietarse por esfuerzo.



B-ESPOL

Acrílico: Alta claridad óptica; excelente resistencia a la intemperie en exteriores; duro, superficie brillante; excelentes propiedades eléctricas, resistencia química aceptable; disponible en colores brillantes transparentes.



ESPOL

Celulósicos: Familia de materiales tenaces y duros; acetato, propionato, butirato de celulosa y etil celulosa. Los márgenes de las propiedades son amplios debido a las composiciones; disponible con diversos grados de resistencia a la intemperie, humedad y productos químicos; estabilidad dimensional de aceptable a mala; colores brillantes.



ESPOL

Fluoroplásticos: Gran familia de materiales caracterizados por excelente resistencia eléctrica y química, baja fricción y estabilidad sobresaliente a altas temperaturas; la resistencia es de baja a moderada; su costo es alto.



-ESPOL

Nylon (poliamida): Familia de resinas usadas en ingeniería que tienen tenacidad y resistencia sobresalientes al desgaste, bajo coeficiente de fricción y propiedades eléctricas y resistencia química excelentes. Las resinas son higroscópicas; su estabilidad dimensional es peor que la de la mayoría de otros plásticos usados en ingeniería.

Óxido Fenileno: Excelente estabilidad dimensional (muy baja absorción de humedad); con propiedades mecánicas y eléctricas superiores sobre un amplio margen de temperaturas. Resiste la mayoría de los productos químicos, pero es atacado por algunos hidrocarburos.

Poli carbonato: Tiene la más alta resistencia al impacto de los materiales transparentes rígidos; estabilidad en exteriores y resistencia a la deformación plástica bajo carga excelentes; resistencia a los productos químicos aceptable; algunos solventes aromáticos pueden causar agrietamiento al esfuerzo.

Poliéster: Estabilidad dimensional, propiedades eléctricas, tenacidad y resistencia química excelentes, excepto a los ácidos fuertes o bases; sensible al ranurado; no es adecuado para uso en exteriores o en instalaciones para agua caliente; también disponible en los termo fraguantes.

Poliétileno: Amplia variedad de grados: compuestos con densidad baja, mediana y alta. Los tipos BD son flexibles y tenaces. Los tipos MD y AD son más fuertes, más duros y más rígidos; todos son materiales de peso ligero, fáciles de procesar y de bajo costo; poca estabilidad dimensional y mala resistencia al calor; resistencia química y propiedades eléctricas excelentes. También se encuentra en el mercado polietileno de peso molecular ultra-alto.

Poliámidas: Gran resistencia al calor (500°F continuos, 900°F intermitente) y al envejecimiento por el calor. Resistencia al impacto y resistencia al desgaste *altas; bajo* coeficiente de expansión térmica; excelentes propiedades eléctricas; difícil de procesar por los métodos convencionales; alto costo.

Sulfuro de polifenileno: Resistencia sobresaliente química y térmica (450°F continuos); excelente resistencia a baja temperatura; inerte a la mayoría de los compuestos químicos en un amplio rango de temperaturas; inherentemente de lenta combustión. requiere alta temperatura para su proceso.

Polipropileno: Resistencia sobresaliente a la flexión y al agrietamiento por esfuerzo; resistencia química y propiedades eléctricas excelentes; buena resistencia al impacto arriba de 15°F; buena estabilidad térmica; peso ligero, bajo costo, puede aplicársele una capa galvanoplástica.

Poliestireno: Bajo costo, fácil de procesar, material rígido, claro, quebradizo como el cristal; baja absorción de humedad, baja resistencia al calor, mala estabilidad en exteriores; con frecuencia se modifica para mejorar la resistencia al calor o al impacto.

Polisulfona: La más alta temperatura para la deflexión por calor entre los termoplásticos que se procesan por fusión;

requiere alta temperatura de proceso; tenaz (pero sensible al ranurado), fuerte y rígido; propiedades eléctricas y estabilidad dimensional excelentes, a una alta temperatura puede aplicársele una capa galvanoplástica; alto costo.

Poliuretano: Material tenaz, de extrema resistencia a la abrasión y al impacto; propiedades eléctricas y resistencia química buenas; puede obtenerse en películas, modelos sólidos o espumas flexibles; la exposición a la radiación ultravioleta produce fragilidad, propiedades de menor calidad y color amarillo; también hay poliuretanos termofraguantes.

Cloruro de polivinilo: Muchos tipos disponibles; los rígidos son duros, tenaces y tienen excelentes propiedades eléctricas, estabilidad en exteriores y resistencia a la humedad y a los productos químicos; los flexibles son fáciles de procesar, pero tienen propiedades de menor calidad; la resistencia al calor va de baja a moderada para la mayoría de los tipos de PVC; bajo costo.

2.1.2. Termoestables.

Los plásticos termoestables son materiales que adquieren un estado final reticulado (entrecruzado), que hace que el material sea insoluble e incapaz de fundir otra vez. A partir de materias primas de bajo peso molecular se forma, en una primera fase, un producto intermedio (prepolímero), de peso molecular intermedio, no reticulado o muy poco y por tanto todavía capaz de fundir (y por tanto de rellenar un molde).

La reticulación espacial que da lugar a la formación de la macromolécula termoestable tiene lugar por reacción química (curado) durante el moldeo de la pieza, es decir, durante el proceso de transformación. Puesto que no funden y no reblandecen son materiales que presentan muy buenas propiedades a elevadas temperaturas. Junto con su alta resistencia térmica presentan alta resistencia química, rigidez, dureza superficial, buena estabilidad dimensional, etc.

Sin embargo el empleo de estos materiales ha ido disminuyendo en los últimos años. Existen numerosas razones por las que ha ocurrido esto. Los termoestables

requieren métodos de transformación lentos, puesto que la reacción de polimerización tiene lugar durante la transformación. Los acabados son pobres comparados con los de la mayoría de los termoplásticos; por lo general las resinas termoplásticas son bastantes opacas y en muchos casos presentan cierta coloración amarillenta.

Los ejemplos más corrientes de estos materiales son los poliuretanos reticulados (PUR), las resinas de fenol-formaldehído (fenoplastos) y las resinas de amina-formaldehído (aminoplastos).

A continuación se exponen algunos de estos materiales:

Alquídicos: Propiedades eléctricas y resistencia al calor excelentes; más fáciles y rápidos de moldear que la mayoría de los termoestables; no son productos volátiles.

Alilos (dialilftalatos): Estabilidad dimensional y propiedades eléctricas sobresalientes; fáciles de moldear, excelente

resistencia a la humedad y a los productos químicos a temperaturas altas.

Amino (urea, melamina): Resistencia a la abrasión y a astillarse; buena resistencia a los disolventes; la urea se moldea con mayor rapidez y cuesta menos que la melamina; la melamina tiene una superficie más dura y más alta resistencia al calor y a los productos químicos.

Resinas epóxicas: Resistencia mecánica excepcional, sus propiedades eléctricas y de adhesión superan a la mayoría de los materiales; baja contracción durante el moldeo; algunas fórmulas pueden curarse sin calor o presión.

Fenólicas: Material de bajo costo con buen equilibrio de las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas; limitadas a colores negro y café.

Poliéster: Excelente equilibrio de propiedades, colores ilimitados; transparentes u opacos; no libera volátiles durante

el curado, pero la contracción en el moldeo es alta; se pueden usar moldes de bajo costo sin calor o presión; utilizado ampliamente con refuerzo de vidrio para producir componentes "de fibra de vidrio".

Poliuretano: Puede ser flexible o rígido, dependiendo de la fórmula; presentan excepcional tenacidad y resistencia a la abrasión y al impacto; particularmente adecuado para piezas grandes hechas de espuma, ya sea en tipos rígidos o flexibles; también se produce con fórmulas termoplásticas.

Siliconas: Resistencia al calor (desde -100°F a $+500^{\circ}\text{F}$), propiedades eléctricas y compatibilidad con los tejidos del cuerpo sobresalientes; su curado es mediante una variedad de mecanismos; alto costo; disponible en muchas formas: resinas para laminados, resinas para moldeo, revestimientos, vaciados o resinas vertidas y selladores.

2.2. Tiempo de Vida Residual.

El tiempo de vida residual de los plásticos, depende de cuál sea el tipo de material al cual se hace referencia, ya que varían de un género a otro.

Normalmente en la formulación de los plásticos se incorporan sustancias que impiden, retardan o dificultan su deterioro. Empero, en varios casos, puede ser que se busque el efecto contrario, es decir controlar o acelerar los procesos degradativos.

Existe el concepto general de que todos los plásticos no se pueden degradar por acción de la naturaleza pero se puede clasificar a los polímeros que se degradan en dos grupos: aquellos que lo hacen por la acción ultravioleta (fotodegradables) y los que se degradan bajo la acción de microorganismos (biodegradables), aunque casi siempre se presentan los dos tipos de manera combinada.

En los polímeros denominados fotodegradables, la luz solar induce al desarrollo de una serie de procesos fotoquímicos que conducen a la ruptura de cadenas de los polímeros. El material puede fragilizarse con cierta facilidad y, bajo la acción erosiva del viento y la lluvia,

puede reducirse a pequeños trozos que finalmente son atacados por microorganismos

La biodegradación de los materiales plásticos tiene lugar debido a la acción de microorganismos, los cuales, en presencia de determinados polímeros, son capaces de segregar enzimas que atacan a este material, reduciéndolo inicialmente a pequeñas partes para finalmente digerirlos; pero este proceso demora muchos años.

Existen polímeros biodegradables, tanto de origen natural (polipéptidos como la lana, seda, los polisacáridos como los dextranos, la celulosa, el almidón), como sintético (poliácido láctico, policaprolactona y algunos tipos de poliuretanos).

Se puede decir del PET que cuando es utilizado en botellas, láminas para el envasado de alimentos, cuerdas, cintas de grabación poseen una vida útil de 5 años y un tiempo de vida residual de unos 50-70 años.

En alfombras, cuerdas para neumáticos de vehículos, fibras poseen una vida útil de 10 años e igualmente 50-70 años de vida residual.

2.3. Clasificación de los Plásticos.

Se puede establecer la siguiente clasificación de los plásticos:

- ✓ Por el proceso de polimerización
- ✓ Por la forma en que pueden procesarse y;
- ✓ Por su naturaleza química.

Polimerización.

Por el proceso de polimerización, los plásticos se pueden clasificar en polímeros de condensación y polímeros de adición. Las reacciones de condensación producen diferentes longitudes de polímeros, mientras que las reacciones de adición producen longitudes específicas. Por otro lado, las polimerizaciones por condensación generan pequeñas cantidades de subproductos, como agua, amoníaco y etilenglicol, mientras las reacciones de adición no producen ningún subproducto. Algunos polímeros típicos de condensación son el nailon, los poliuretanos y los poliésteres. Entre los polímeros de adición se encuentran el polietileno, el polipropileno, el policloruro de vinilo y el poliestireno. Las masas moleculares

medias de los polímeros de adición son generalmente mayores que las de los polímeros de condensación.

Posibilidades de procesado.

El plástico se procesa de formas distintas, según sea termoplástico o termoestable. Los termoplásticos, formados por polímeros lineales o ramificados, pueden fundirse. Se ablandan cuando se calientan y se endurecen al enfriarse. Lo mismo ocurre con los plásticos termoestables que están poco entrecruzados. No obstante, la mayoría de los termoestables ganan en dureza cuando se calientan; el entrecruzado final que los vuelve rígidos se produce cuando se ha dado forma al plástico.

Naturaleza química.

La naturaleza química de un plástico depende del monómero (la unidad repetitiva) que compone la cadena del polímero. *Por ejemplo,* las poliolefinas están compuestas de monómeros de olefinas, que son hidrocarburos de cadena abierta con al menos un doble enlace. El polietileno es una poliolefina. Su monómero es el etileno. Otros tipos de polímeros son los acrílicos (como el polimetacrilato), los

poliestirenos, los halogenuros de vinilo (como el policloruro de vinilo), los poliésteres, los poliuretanos, las poliamidas (como el nailon), los poliéteres, los acetatos y las resinas fenólicas, celulósicas o de animales.

CAPITULO 3

3. RECICLAJE

El tema dominante en la industria de los plásticos han sido los desechos. Estamos bajo severas presiones por parte de instituciones gubernamentales, grupos ecológicos y la ciudadanía para disminuir drásticamente la cantidad de desechos plásticos que van a parar a los rellenos sanitarios. Si no se resuelve este problema, pronto, cada segmento de la industria, incluyendo los fabricantes de resinas, los moldeadores y los usuarios finales, se verán afectados adversamente.

Al lado de los programas de reciclaje iniciados por los productores de resinas, unas cuantas pequeñas compañías contratistas han organizado la recuperación de desechos plásticos, no desde una postura defensiva sino porque ven el reciclaje como una oportunidad económica. Ciertos desechos plásticos, en particular la variedad mezclada, se convertirán directamente en productos como postes para empalizadas, paradas de

automóviles, estacas, etc. Sin embargo, muchos proyectos de reciclaje están orientados a seleccionar los distintos materiales y convertirlos en materia prima para aplicaciones de moldeo y de extrusión. A medida que estos proyectos se vayan haciendo la realidad, millones de kilos de plástico estarán disponibles para ser utilizadas como materia prima.

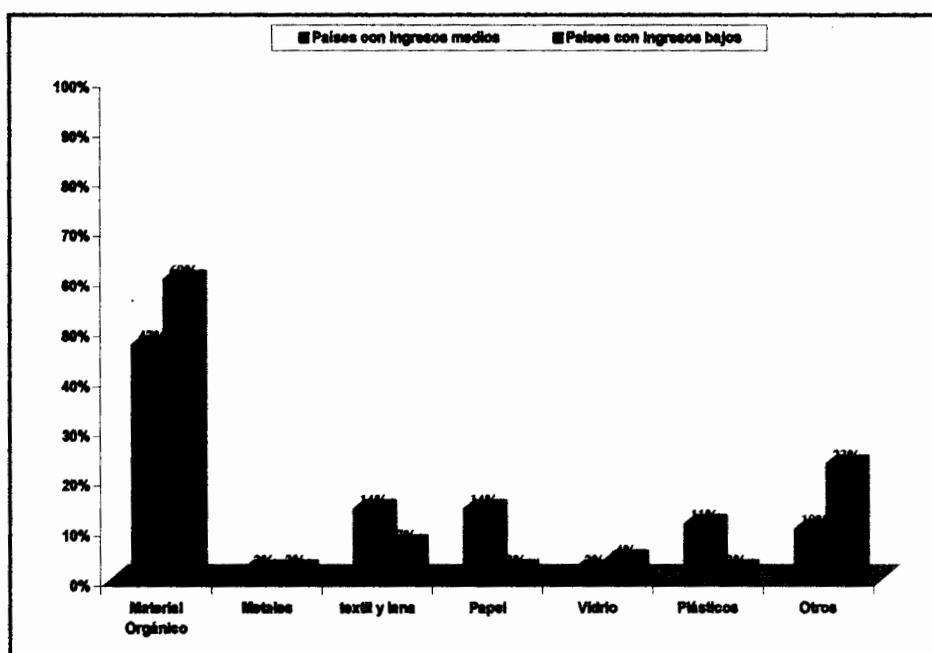


Figura 3.1. Composición de los desechos sólidos.⁽¹⁾

¿A dónde va todo este material? Los mercados tienen que identificarse y desarrollarse. ¿Estos kilos de material recuperado en el mercado harán

⁽¹⁾ Tesis de Grado, Jefferson Salazar.

impacto en la estructura de precios históricamente cíclica de ciertos polímeros, hasta el punto en que ablanden el precio del material virgen y el reciclaje se vuelva antieconómico? La facilidad de colaboración, la consistencia de un lote a otro, la contaminación, la continuidad de los despachos; parecería interminable la lista de obstáculos que limitan la variedad del reciclaje. El problema más difícil de superar es la actitud mental de muchos diseñadores e ingenieros que rechazan categóricamente el uso de plásticos reciclados en sus productos. Ellos han cerrado la puerta a la posibilidad de que los polímeros regenerados no comprometan su producto, ofreciendo un beneficio, o talvez incluso mejorándolo.

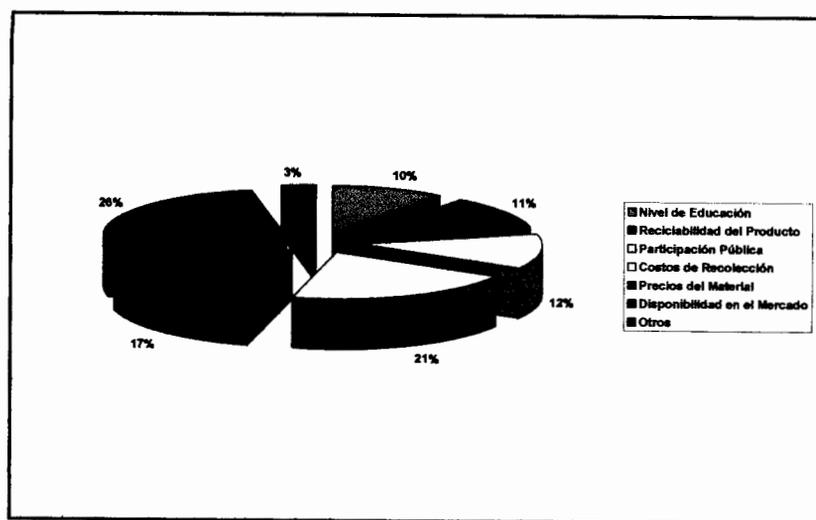


Figura 3.2. Dificultades del proceso de reciclaje.

(1) Tesis de Grado, Jefferson Salazar.

Es un misterio el porqué algunos ingenieros han establecido esta regla arbitraria para los plásticos mientras eximen otros materiales de construcción como el aluminio, el acero, el cobre, etc. Cuando se especifica una plancha de acero o una tubería, ¿se pregunta "cuál es el contenido reciclado"? Si se necesita aluminio, ¿se pregunta por los tarros de cerveza reciclados que haya en la aleación? Creo que no. Lo importante son las propiedades y características de desempeño del metal. El criterio para las especificaciones de los plásticos, como en el caso de otros materiales de construcción, sería: ¿los parámetros de desempeño son adecuados para la aplicación? Si el material es o no reciclado no debería ser un problema.

3.1. Características de los Plásticos.

Estamos asistiendo a un verdadero cambio estructural en el campo del consumo de alimentos y bebidas. Los envases actuales permiten un acceso casi ilimitado a todo tipo de productos, sin incidencia de las restricciones estacionales de alimentos como frutas y verduras. Los envases plásticos permiten ofrecer la posibilidad de saborear platos muy elaborados en sólo segundos merced a la economía de tiempo que significan el freezer y el horno microondas. *La larga cadena que va desde la producción del alimento hasta el consumidor es asegurada en gran medida en su conservación, higiene,*

preservación, transporte, presentación en góndola y llegada al domicilio gracias a los envases plásticos, salvaguardando calidad y frescura a lo largo del tiempo.

Los plásticos significan una gran contribución al Desarrollo Sustentable y a la mejora de la Calidad de Vida permitiendo que alimentos, bebidas y medicamentos lleguen a una cada vez mayor cantidad de habitantes.

En su origen, el envase plástico tuvo la función de contener o envasar un producto, pero hoy desempeña varias funciones específicas más al servicio de los alimentos:

Inertes: Los plásticos son químicamente inertes, lo que permite envasar con absoluta seguridad medicamentos, alimentos y bebidas como agua, lácteos, gaseosas, hortalizas, frutas, fiambres, carnes, pescados, productos de conserva, etc. O en el campo de la salud: vacunas, remedios, vitaminas, sangre, suero, plasma, etc.

Livianos: Sin dejar de contener el mismo volumen y peso de un determinado producto, el packaging plástico es cada vez más liviano gracias al desarrollo de nuevos diseños. En comparación con otros

materiales es más fácil de manipular por parte del consumidor, que puede transportar más con menos esfuerzo físico. Esta característica de liviandad también tiene su ventaja a la hora de distribuir los alimentos en los negocios y supermercados: se necesitan menos camiones para el transporte del producto que en caso de estar envasados en otro material, esto significa menos uso de combustible, con lo que se disminuye la polución ambiental.

Maleabilidad a baja Temperatura: Las diferentes formas de los envases plásticos pueden ser obtenidas trabajando sin grandes fuentes de calor, lo que da como resultado un ahorro de energía.

Irrompibles: Los envases plásticos son prácticamente irrompibles, lo que evita derrames o daños en los productos alimenticios. Esta cualidad es especialmente importante para el envasado de bebidas carbonatadas (gaseosas).

Versatilidad: Los envases plásticos pueden ser rígidos o flexibles según las necesidades del productor. Se adaptan fácilmente a la forma del alimento, ofreciendo máxima protección con mínimo material. Los envases plásticos pueden ser absolutamente transparentes o ser presentados en atractivos colores.

Higiénicos: Permitiendo que el consumidor vea el producto, su color, frescura, composición sin necesidad de tocarlo, evitando deterioros y cumpliendo con las reglas de higiene, lo que significa cortar la cadena de transmisión de microorganismos responsables de enfermedades que se contagian por vía oral.

Propiedades de Barrera: Utilizando distintas resinas y aditivos logramos diferentes tipos de barrera, consiguiendo por ejemplo, que el oxígeno entre pero que no salga la humedad, o viceversa, o que sea absolutamente hermético. Un ejemplo de esto es el packaging de la carne, que al adherirse a ésta impide la entrada de oxígeno y humedad, lo cual evita su degradación y la preserva por más tiempo.

Buena relación Costo-Beneficio: Los plásticos son económicamente más convenientes porque implican menores costos en términos de tiempo y operatividad en su producción, distribución y uso.

Amigables con el Medio Ambiente: Los materiales plásticos requieren menor consumo de energía para su producción. Por ser livianos permiten ahorro de combustible durante su transporte y

posteriormente una reducción en el peso de la basura, lo que implica menores costos de recolección y una vez transformados en residuos, los plásticos son valorizables a través del reciclado mecánico, químico o mediante la incineración con recuperación energética.

3.2. Estadísticas de Reciclaje de los Plásticos en Guayaquil.

El reciclaje de Plásticos en general, lo efectúan contadas empresas, algunas de las cuales tienen preferencias marcadas por algún tipo de material. Tal es el caso que PROCEPLAS, empresa perteneciente al grupo REIPA, se dedica a la producción de tubería flexible de polietileno, utilizando principalmente como materia prima, fundas plásticas, polietileno de alta y baja densidad y plásticos post-industriales.

El proceso de obtención de dicha materia se basa en cuatro puntos:

1. Los materiales recolectados desde los centros de acopio en la ciudad, son recortadas e introducidas directamente.
2. Se procede al lavado previo de las mismas para desprender impurezas mayores.
3. Un segundo lavado asegurará el grado de limpieza requerido para seguir en el proceso.

4. Secado del material y preparación para su homogenización, aglutinación y paletizado para alimentar a las máquinas.

Las cantidades recolectadas son de aproximadamente 110Tn/mes (peso húmedo) con un 15% de humedad promedio.

La materia prima neta empleada en la fabricación de tubería es material que sale de la aglutinadora, posterior al lavado, 85 Tn/mes (peso húmedo), con una humedad del 2%. La diferencia de 25 Tn/mes se debe a:

- ✓ Extracción de humedad en forma de agua y vapor 57% (14,25 Tn/mes).
- ✓ Suciedad: sedimentos, grasas, restos de metales, etiquetas 42%, aproximadamente 10,5 Tn/mes.
- ✓ Emisión de partículas finas de plástico y sedimentos en el área de ciclones y aglutinadora menor al 1% (1/4 Tn/mes).

La planta labora las 24 horas en jornadas de 12 horas cada una y cuenta con 50 trabajadores.

Su producción está destinada al sector agrícola y agropecuario del país.

En nuestra ciudad hay empresas que manufacturan preferentemente PET, por ejemplo está la Coca-Cola, la cual recoge desperdicios de su propia planta: PET (envases descartables) y REPET (retornables), y los transforma mediante un proceso de molienda. El material reciclado se ve así libre de cualquier contaminación con otros plásticos y suciedad y se obtiene un producto más limpio y homogéneo. Se producen aproximadamente unas 700Tn/año, las mismas que son exportadas a diversos países como China o Grecia dependiendo de la demanda existente.

Otros datos indican que se rechazan 38.583 pre-botellas de PET mensualmente, las mismas que no cumplen con el control de calidad en el proceso de soplado, con un peso promedio de 47g, lo cual arroja 1.813Kg/mes. Esta cantidad representa solamente un 0.92% del total de producción de las pre-botellas, y se infiere que la producción total para el mercado es de 197Tn/mes, solamente en la ciudad de Guayaquil.

Esta manera de reciclar de Coca-Cola, no complica mayormente al material ya que sólo consta de una etapa (molido), por lo cual no es menester rigurosos controles de calidad, aunque sigue la línea tradicional de comercializar solamente materia prima sin incrementar al producto valor agregado, lo cual ha sido desde siempre una de las falencias de las pseudo industrias ecuatorianas.

En el caso de Embotelladora de Bebidas Cítricas (EBC), existe un desperdicio promedio de 3.000 botellas al día, con un peso medio de 34g. Esto representa 3.060Kg/día, los cuales pueden recolectarse directamente de la fábrica sin los inconvenientes de la mezcla con otros materiales.

Aunque el porcentaje de desperdicio con relación a la producción total no se logró determinar, estimaciones pertinentes permiten cifrarlo en 1,5% con lo cual se tiene una producción de 204Tn/mes, solo en envases no retornables.

Los desperdicios generados por la empresa, son enviados directamente al relleno sanitario. El material no se recicla ni se vende a ninguna compañía dedicada a esta actividad.

Sucede el mismo caso con Bebidas del Pacífico (Pepsi Cola), cuya producción es 100% de botellas descartables y no realizan reciclado alguno en sus instalaciones; en su defecto, venden parte de sus desechos a empresas dedicadas al reciclaje general.

3.3. Fabricación de diversos artículos en Plástico.

La fabricación de los plásticos y sus manufacturados implica cuatro pasos básicos: obtención de las materias primas, síntesis del polímero básico, obtención del polímero como un producto utilizable industrialmente y moldeo o deformación del plástico hasta su forma definitiva.

Las técnicas empleadas para conseguir la forma final y el acabado de los *plásticos dependen de tres factores: tiempo, temperatura y deformación*. La naturaleza de muchos de estos procesos es cíclica, si bien algunos pueden clasificarse como continuos o semicontinuos. Una de las operaciones más comunes es la extrusión. Una máquina de extrusión consiste en un aparato que bombea el plástico a través de un molde con la forma deseada. Los productos extrusionados, como por ejemplo los tubos, tienen una sección con forma regular. La máquina de extrusión también realiza otras operaciones, como moldeo por soplado o moldeo por inyección.

Otros procesos utilizados son el moldeo por compresión, en el que la presión fuerza al plástico a adoptar una forma concreta, y el moldeo por transferencia, en el que un pistón introduce el plástico fundido a presión en un molde. El calandrado es otra técnica mediante la que se forman láminas de plástico.

Algunos plásticos, y en particular los que tienen una elevada resistencia a la temperatura, requieren procesos de fabricación especiales. Por ejemplo, el politetrafluoretileno tiene una viscosidad de fundición tan alta que debe ser prensado para conseguir la forma deseada, y sinterizado, es decir, expuesto a temperaturas extremadamente altas que convierten el plástico en una masa cohesionada sin necesidad de fundirlo. A continuación se describen las aplicaciones de los plásticos más comunes y usados en el medio.

Aplicaciones del Poliestireno (PS).

Envases de alimentos: Uno de los mayores consumos de poliestireno se encuentra en todo lo relacionado con envases para alimentos; es muy común verlo en potes de productos lácteos, tanto como en bandejas, recipientes y estuches en locales de comida rápida. Pueden ser transparentes, de color, espumados o expandidos.

El OPS (poliestireno biorientado) es también ampliamente usado en estas aplicaciones por su excelente cristalinidad y brillo, que realza la apariencia de los productos dentro del envase.



Figura 3.3. Envases de alimentos fabricados con PS ⁽¹²⁾

Vajilla y bazar: Vajilla descartable, platos, bandejas, vasos, cubiertos, etcétera. Vajilla para avión y artículos de bazar de todo tipo.



Figura 3.4. Vajilla Descartable fabricada con PS ⁽¹²⁾

Electrodomésticos-Electrónicos: Dentro del rubro Electrodomésticos, es importante su utilización en refrigeración: para paneles interiores de heladeras, bandejas y crispers interiores.

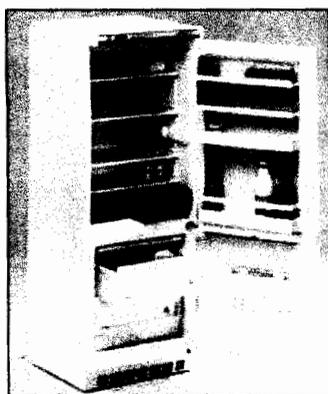


Figura 3.5. Electrodoméstico fabricado con PS ⁽¹²⁾

Otros: Cosmética, juguetería, calzado, placas aislantes para la construcción, separadores de fruta, etc.

Aplicaciones del Policloruro de Vinilo (PVC).

Packaging: Botellas para agua y jugos, frascos y potes (alimentos, fármacos, cosmética, limpieza, etc.). Láminas o films (golosinas, alimentos). Blisters (fármacos, artículos varios).

Construcción: Tubos de agua potable y evacuación, ventanas, puertas, persianas, zócalos, pisos, paredes, láminas para impermeabilización (techos, suelos), canalización eléctrica y para telecomunicaciones, papeles para paredes, etc.



Figura 3.6. Aplicación en la construcción de PVC ⁽¹²⁾

Mobiliario: Muebles de jardín (reposeras, mesas, etc.); piezas para muebles (manijas, rieles, burletes, etc.); placas divisorias.

Electricidad y Electrónica: Partes de artefactos eléctricos, Aislamiento de cables, Cajas de distribución, Enchufes, Carcazas y partes de computadoras.

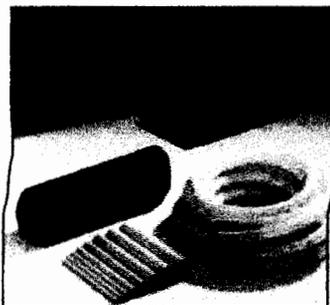


Figura 3.7. Aplicación en la Electrónica de PVC ⁽¹²⁾

Aplicaciones médicas: Tubos y bolsas para sangre y diálisis, catéteres, válvulas, delantales, botas, etc.

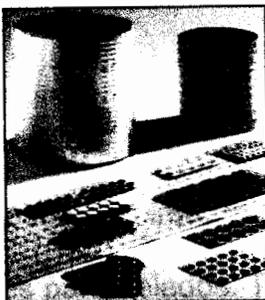


Figura 3.8. Aplicación Médica de PVC ⁽¹²⁾

Vestimenta y anexos: Calzado (botas, zapatillas), ropa de seguridad, ropa impermeable, guantes, marroquinería (bolsos, valijas, carteras, tapicería).

Automotriz: Tapicería, paneles para tablero, apoyabrazos, protección anticorrosiva y antivibratoria, etc.

Varios: Tarjetas de crédito, juguetes, mangueras, etc.



Figura 3.9. Tarjetas hechas con PVC ⁽¹²⁾

Aplicaciones del Polipropileno (PP).

Industria alimenticia: Envases realizados con film biorientado: snacks, golosinas, galletitas y panificados.

Envases rígidos fabricados por inyección o termoformado: manteca, margarina, quesos, postres, yogurt, alimentos envasados para microondas, envases para helados. Tapas inyectadas para todo tipo de alimentos. Bidones para agua mineral y botellas sopladas para jugos.

Industria automotriz: Por su versatilidad es considerado como el plástico de opción para dicha industria. Paragolpes, frentes de tableros, baterías, parantes internos, baguetas externas e internas, revestimientos internos y otras autopartes.

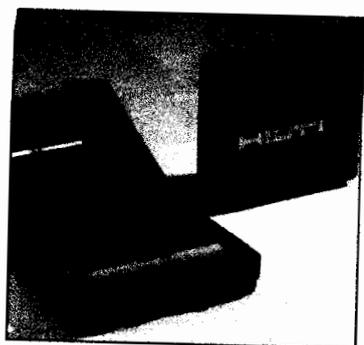


Figura 3.10. Aplicación Automotriz de PP ⁽¹²⁾

Industria de la construcción: Caños para agua caliente y fría, accesorios, baldes para pintura, alfombras y sus bases, etcétera.

Aplicaciones medicas y de higiene personal: Jeringas descartables, indumentaria quirúrgica, pañales descartables, toallas higiénicas, etc.

Agroindustria: Contenedores de rafia para envasamientos de semillas, fertilizantes, hortalizas, azúcar.

Aplicaciones para el hogar: Muebles de jardín, juguetes, recipientes herméticos, envases de videocassettes, film para envasar cassettes de audio, video y cigarrillos, envases de productos de limpieza, electrodomésticos, macetas, correas para bolsos, manijas, etcétera.

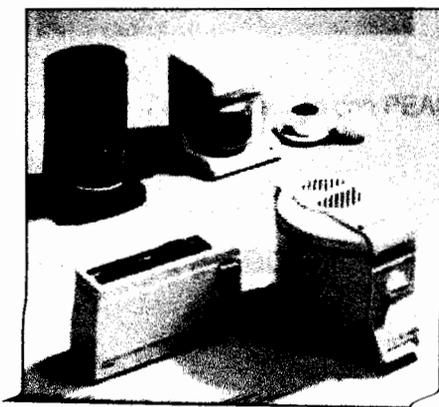


Figura 3.11. Aplicación del PP ⁽¹²⁾

Aplicaciones del Polietileno (PE).

Polietileno de Alta Densidad (PEAD).

Película Termocontraíble.

Envasamiento automático.

Bolsas industriales.

Film para Agro.

Bolsas de Uso General.

Cables eléctricos.



Figura 3.12. Fundas hechas con PEAD ⁽¹²⁾

Polietileno de Baja Densidad (PEBD).

Caños.

Envases soplados, botellas.

Bidones.

Contenedores Industriales.

Cajones.

Bolsas supermercado.

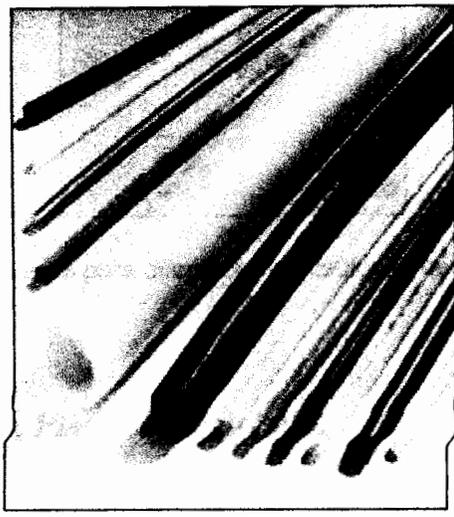


Figura 3.13. Caños hechos con PEBD ⁽¹²⁾

Aplicaciones del Polietilenotereftalato (PET).

Film: Radiografías, tapes de video y audio.

Fibra: Alfombras, ropa, telas para decoración, (cortinados, ropa de cama, tapicería, etc).

Packaging: Bebidas (gaseosas, agua mineral, jugos, etc.), comidas, perfumería y cosméticos, productos para el hogar, licores y productos farmacéuticos.



Figura 3.14. Envases para diferentes aplicaciones hechos con PET ⁽¹²⁾

3.4. Plástico Virgen vs. Plástico Reciclado.

En un principio, la mayoría de los plásticos se fabricaban a partir de resinas de origen vegetal, como la celulosa (del algodón), el furfural (de la cáscara de la avena), aceites de semillas y derivados del almidón o del carbón. La caseína de la leche era uno de los materiales no vegetales utilizados. A pesar de que la producción del nailon se basaba originalmente en el carbón, el aire y el agua, y de que el nailon 11 se fabrica todavía con semillas de ricino, la mayoría de los plásticos se elaboran hoy con derivados del petróleo. Las materias primas derivadas del petróleo son tan baratas como abundantes. No obstante, dado que las existencias mundiales de petróleo tienen un límite, se han investigando otras

fuentes de materias primas, como la gasificación del carbón y el reciclaje.

Se dice que el plástico reciclado puede incluso mejorar un producto. ¿Cómo? La idea fija cuando se consideran materiales reciclados es evaluarlos como un sustituto de un material de la misma familia de polímeros.

Una alternativa inteligente no es solamente considerar estos tipos de sustituciones, sino considerar el reemplazo de un polímero virgen que tiene propiedades físicas más bajas con un polímero reciclado de otra familia de polímeros que presenta mejores propiedades físicas. Por ejemplo sustituir un ABS para alto calor, alto impacto, con un policarbonato reciclado o de reemplazar un poliestireno de alto impacto con un ABS reciclado. Si se puede hacer una sustancia de estas, no solo el producto mejorará, sino que probablemente se obtendrán más beneficios económicos.

¿Por qué un fabricante de piezas plásticas consideraría el empleo de material reciclado? Usualmente la respuesta es el precio. En este punto de la evolución del reciclaje de plásticos, los mercados para los polímeros recuperados son básicamente las aplicaciones existentes.

El reciclaje está en el negocio de la sustitución de materiales. Muchos de nosotros estamos familiarizados con productos que inicialmente son de un material y con el tiempo, por razones de competitividad, terminan siendo de un material menos costoso. Las propiedades se comprometieron para ahorrar costos sin afectar la integridad del producto.

Hay dos preguntas que siempre hacen los clientes que utilizan una cantidad significativa de material. La primera es: ¿Tendré el material cuando lo necesite? La segunda, ¿Cómo se fabrica un material compuesto que satisfaga nuestros estándares y sea consistente de un lote a otro? La respuesta a la primera pregunta se basa en la estabilidad y los volúmenes de desechos generados por una corriente particular de basuras garantizadas por el reciclador. La segunda respuesta es mucho más compleja; primero que todo la información del SPC (Control Estadístico del Proceso) y las certificaciones del material no llegan con el desecho entrante, *parte del proceso de conversión de desecho incluye la identificación y clasificación del material.* Luego, el proceso e conversión en una mezcla para moldeo debe tener en cuenta variables y problemas potenciales asociados con el desecho.

3.4.1. Análisis de Costos.

La gran mayoría de los termoplásticos son derivados de los hidrocarburos es decir petróleo crudo o gas natural. Aquí se muestran algunos ejemplos de composición de algunos termoplásticos.

El polietileno se produce a partir del Etileno que es un derivado del Petróleo o del Gas Natural.

El etileno, que se obtiene a partir de derivados del gas natural, es oxidado con aire para formar etilenglicol.

El Polietilenotereftalato está hecho de petróleo crudo, gas y aire. Un kilo de Polietilenotereftalato está compuesto por 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 Polietilenotereftalato se hace combinando el ácido tereftálico y el etilenglicol

El Policloruro de Vinilo está compuesto de los siguientes elementos sencillos: cloro (derivado de la sal común) en un 57 % y etileno en un 43 %.

El polipropileno se produce a partir de petróleo por un proceso de polimerización, donde cortas cadenas de productos químicos (llamados monómeros) se unen en presencia de un catalizador que posibilita la formación de cadenas largas llamadas polímeros.

Es decir, se tiene que con el incremento del precio del petróleo, los plásticos directamente se ven relacionados con un alza en su valor. Actualmente el balance económico refleja que se considera positiva, en vista que los precios del barril del petróleo estarán sobre los 20 dólares.

En el mercado internacional, el precio de la tonelada de plástico incoloro virgen es de 1000 dólares.

El PET es sin duda el mayor problema en nuestra ciudad, una vez reciclado, el PET incoloro cuesta 600 dólares y el verde 450 dólares.

Desde el punto de vista económico, esto supone un ahorro promedio de más de 50% del costo para las empresas que usan estos materiales.

Es cierto también que las personas que se dedican a este negocio no hacen mucha diferencia entre los diferentes tipos de plástico existentes y por esto su precio es casi siempre el mismo.

Un clasificador recoge y vende el plástico en 100 dólares la tonelada, que es una cantidad irrisoria si los comparamos con los 600 dólares que cuesta el plástico reciclado ya procesado.

El Reciclaje ha tomado mucha importancia, no sólo en nuestro país sino en el mundo entero. Se puede de manera limpia recuperar casi todos los productos hechos con plástico, con la simple fórmula de que ellas tengan un precio significativo de retorno. En otras palabras, haciendo que todos los productos, desde determinada capacidad, sean retornables.

El envase descartable es negocio sólo para el que lo produce, importa y vende, y da ciertas oportunidades a las

embotelladoras, pero todo el resto de la sociedad pierde y mucho. Pierde el consumidor, pues lo paga y no recupera su valor; pierde el ambiente, que lo debe soportar en las calles, en el saneamiento, en los cursos de agua, en los vertederos, etcétera; y pierde la economía del país, porque importa materia prima cara a 1.000 dólares la tonelada que se usa solamente una vez y se tira.

CAPITULO 4

4. MOLINOS PARA PLÁSTICOS.

El incremento de la recuperación de plásticos, tanto de desperdicios de producción como de residuos urbanos, confiere un nuevo protagonismo a los molinos que se emplean para su reducción a tamaños moldeables. No existen diferencias considerables entre los destinados a una u otra aplicación, pero en todos los casos deben presentar unas características definidas que se resumen a continuación.

Existen diferentes tipos de molinos que se utilizan para la reducción de tamaños de diversos materiales: granos, áridos, cargas, pigmentos y otros, pero los molinos para plásticos difieren de éstos en tres características importantes. En primer lugar, no deben propiamente moler (desgarrar, triturar), sino cortar, porque existe un tamaño óptimo de partícula a obtener, lo más parecido al de la granza, y los tamaños inferiores y el polvo que se genere no son en todos los casos

directamente aprovechables. También es importante que la densidad aparente sea similar a la de la granza, y que su granulometría sea homogénea.

En segundo lugar, deben tener una gran capacidad de disipación de calor, puesto que si la energía cinética del corte resulta en un incremento excesivo de la temperatura del polímero, éste se degrada y de incorporarse al moldeo produce partes defectuosas y, en el caso de recuperados de la fabricación de cuerpos huecos o película de alta calidad, poros que inutilizan el producto tanto para su comercialización como, en muchos casos, para el reaprovechamiento de las piezas defectuosas mediante una nueva molienda.

Finalmente, además de disipar el calor, los molinos deben evitar en lo posible su generación adicional por rozamiento de las partes o trozos de material alimentado en movimiento con las partes estáticas de la máquina, que produciría idénticos efectos.

Independientemente de su función, debe tenerse en cuenta que los molinos de recuperación de desechos de fabricación se ubican al lado de las propias máquinas de producción. Por tanto, debe considerarse

también su nivel acústico, a fin de que el de ambos no exceda el admisible en una instalación productiva.

4.1. Factores que Influyen en la Selección del Molino.

Hace 10 ó 15 años, la molienda de materiales plásticos no era considerada una operación de alta tecnología. Aún hoy, algunos procesadores persisten en pensar que la operación de reducir el tamaño de los materiales plásticos no requiere una consideración especial si la máquina con que se cuenta es lo suficientemente grande como para recibir cualquier tipo de desperdicio que se lance en ella. Pero, si se descuida la importancia que tiene el molino en la eficiencia global de la producción y en la calidad del producto, estas propiedades se pueden perjudicar. Si el procesador está alimentado material molido en el proceso, debe poner atención a la manera cómo se está tratando el material en el momento en que ocurre la reducción del tamaño.

El procesador puede lograr del 20 al 40% de mejoramiento en la calidad del producto y en eficiencia de molienda si agudiza su capacidad de seleccionar al molino para la planta. Se puede comenzar adquiriendo un entendimiento claro del tipo de material a

ser molido: su composición, dureza, sensibilidad al calor, forma física (partes completas, canales de inyección, retales, rollos, o pilas de restos de películas), tamaño, espesor de pared y temperatura. También se debe considerar cómo y a qué velocidad el desperdicio es obtenido. Todos estos factores ayudan a determinar el tamaño más apropiado de máquina para moler, tipo de alimentación, diseño de la cámara, configuración del rotor y las cuchillas, velocidad del rotor, potencia del motor, tamaño de la malla, y sistema de extracción el material molido.

Eliminar los finos.

El primer objetivo en el proceso de molienda es lograr un tamaño de material molido uniforme y que en tamaño se acerque a aquel de la resina virgen, y con un mínimo de finos. Entre más se acerque la densidad del molido a aquella de la resina virgen, menores serán los problemas con la alimentación de los dos materiales en proporción consistente. El tamaño del gránulo afecta la densidad al granel más de lo que puede afectar la gravedad específica del material. Además, un reciclado limpio con pocos finos ayuda a mantener más limpias las mallas de la tolva cargadora y también ayuda a prevenir la formación de puentes en los recibidores de vacío.

Una correcta selección del molino ajusta el diseño del rotor y las cuchillas, los espacios libres de las cuchillas, la velocidad del rotor y el tamaño de la malla a las propiedades del material a alimentar y a su forma física. Se debe poner especial atención a los siguientes puntos.

El material importa.

Muchos tipos de diseño de molino dependen del material que se quiere procesar. Los materiales suaves, flexibles y con capacidad de absorber energía generalmente producen las partículas más uniformes. Los materiales rígidos y frágiles tienden a fracturarse bajo el impacto de las cuchillas rotatorias y van a generar tamaños de partículas menos uniformes.

También son críticos el tamaño, la forma, el espesor del material que se alimenta al molino. *Las partes delgadas deben ser cortadas de una manera diferente a las tortas de extrusión o a la tubería de pared gruesa.* Materiales de gran volumen pero livianos, de pared delgada como botellas, también son retos para la eficiencia de los molinos.

No se puede olvidar la temperatura del material que se alimenta al molino. Los materiales tibios suelen ser menos frágiles y se cortan más fácilmente. Ejemplos de materiales tibios son las purgas y las tortas de arranque de las extrusoras, equipos de moldeado por soplado, prensas de inyección o termoformadoras. Los requerimientos de torque pueden ser significativamente menores que los que se necesitan para procesar el mismo material frío. Sin embargo, el plástico no debe estar muy caliente porque ensucia las cuchillas de corte, tapa los huecos de la malla, y a la vez, reduce la eficiencia del molino.

La alimentación del molino.

Los materiales se pueden introducir al molino a mano, por banda transportadora, con un robot, una tolva de gravedad o de manera forzada, en forma de rollos o con un alimentador de tornillo. La forma de hacerlo está determinada por la geometría del material y otros factores.

Se debe evaluar el empleo de una tolva de alimentación en áreas de seguridad del operario. La mayoría de los equipos de seguridad en los molinos de hoy involucran activadores eléctricos que previenen el

acceso a la tolva de alimentación y a la malla hasta que los rotores dejen de girar. Los molinos más viejos no tienen sistemas de seguridad incorporados y son inherentemente inseguros para las personas que *trabajan con ellos*.

Hay dos tipos básicos de diseños de cámaras. El popular de alimentación tangencial, que coloca el rotor en una posición desviada de la abertura de alimentación de tal manera que el alimento es dirigido hacia abajo, a las cuchillas rotatorias; en una posición tangencial al círculo de corte. Este estilo de cámara se prefiere para moler botellas, gabinetes inyectados de televisores y otros artículos voluminosos de pared delgada. La cámara de corte tangencial proporciona un mayor radio de mordida, por lo cual resulta ser la forma más eficiente para lograr las mayores producciones y molidos limpios a partir de los materiales mencionados. Entre más tangencial sea la alimentación, mayor es la mordida de las cuchillas, y a la vez menor es la posibilidad de que el material de vueltas en la cámara antes que sea molido totalmente.

Por otro lado, los molinos de caída directa sobre la tolva y la cámara de corte alimentan el material perpendicularmente al círculo de corte,

y se recomienda para moler artículos de pared gruesa. Este diseño imparte un tipo de mordida pequeña, y es menos factible estrellar el artículo en fragmentos u obtener trozos demasiados grandes que puedan parar el rotor.

Un número de fabricantes de molinos hacen modelos híbridos que ofrecen un cierto grado de flexibilidad al combinar los beneficios de los diseños de la alimentación tangencial y la de caída directa. Una cama adicional de cuchillas ubicada en la posición correcta puede reducir el tamaño de la mordida. Una consideración separada pero importante es si el material es alimentado continuamente o de manera intermitente.

¿En qué lugar se instalará el molino?

Hay tres tipos básicos de molinos: central, cerca de la prensa y debajo de ella. Cada uno de ellos ofrece beneficios y desventajas. Una unidad central puede manejar partes voluminosas así como grandes cantidades de pequeñas y generalmente, sirven a un número determinado de líneas o prensas en la planta. De esta manera se aísla el ruido en un área separada.

El molino central se usa generalmente como un aparato fuera de línea localizado en su propio cuarto para aislar el ruido. Debido a su papel de reducir cualquier tamaño del material, se convierte en un agente de potencial contaminación sino se limpia apropiadamente. Ya que su función es procesar los productos más grandes, la limpieza entre trabajos se convierte en una tarea muy importante. También se debe reservar un espacio de almacenamiento para inventarios de desperdicios en espera de ser molidos y al mismo para el material ya procesado. Otra necesidad es la de transportar los desperdicios desde donde es producido al molino y del material molido de regreso a las líneas de proceso.

Los molinos bajo la prensa constituyen una alternativa a la centralización. El desperdicio puede ser alimentado directamente por gravedad desde una máquina de procesamiento sin requerir un transportador o manejo manual. Los molinos con transportadores sin fin en una oportunidad fueron populares entre las máquinas bajo la prensa, para la molienda de retales de inyección. Hoy en día son menos populares porque ofrecen un grado de inseguridad inherente. Aunque se diseñan y marcan para uso exclusivo bajo la prensa, los operadores generalmente los emplean cerca de la prensa. De esta manera, el tornillo sin fin queda expuesto abiertamente y representa

un riesgo para cualquiera que trate de limpiarlo cuando se atasca cuando está en operación. Aunque se puede colocar una tolva sobre la abertura del tornillo sin fin para protección en contra de accidentes, las tolvas usualmente quedan abiertas a la entrada de objetos extraños que puedan caer en el sin fin y la cámara de corte. Los molinos de tornillo sin fin pueden tener elementos de seguridad para trabajar únicamente bajo la prensa, pero estos elementos pueden ser retirados o pasados por alto por los operarios.

Los molinos de posición vertical para operar cerca de la prensa con aparatos robotizados de alimentación son los más preferidos y seguros. *Se debe pensar en tener molinos cerca de la prensa para* minimizar el manejo de desperdicio, eliminar espacio extra de almacenamiento y reducir la contaminación, dedicando cada molino a cada material específico. Generalmente, estos molinos son más pequeños y fáciles de limpiar. Pueden ser transportables de una máquina a otra. La desventaja de este tipo de molinos es que puede producir ruidos en la planta sino se aísla apropiadamente. Un caso especialmente aplicable para el molino cerca de la prensa es el de *procesamiento de materiales frágiles porque permite que el desperdicio sea molido mientras todavía está tibio, lo que hace más* fácil de moler sin producir finos. El nivel de ruido puede ser

disminuido con un menor consumo de energía, porque en este caso se requiere menor potencia en el corte.

4.2. Estructura de los Molinos.

Básicamente, están constituidos por una tolva de alimentación del material, cuya abertura inferior define la capacidad volumétrica del molino. También la define el diámetro del rotor, que a su vez es indicativo del volumen de piezas que se alimentan. Ésta da acceso a la cámara de molienda, en que se encuentra un rotor portacuchillas y un estator con otras cuchillas, produciéndose entre ambas en el corte del material.

En la parte inferior de la cámara se encuentra un tamiz que define la granulometría del producto a obtener, preestablecido por la holgura entre las cuchillas del estator y las del rotor. Este último recircula el material cuyo tamaño exceda al de las aberturas del tamiz.

Debajo del tamiz hay otra tolva, de salida, en que se recoge el material molido y se transporta por diversos sistemas al exterior de la máquina.

La carga de la tolva de entrada se efectúa por diversos métodos, que dependen de que el material sea en forma de bloques sólidos y de su tamaño, de perfilería o tubos, de cable, de película o de cuerpos huecos. Puede efectuarse manualmente, mediante cinta transportadora, transporte vibratorio o neumático, o tornillo sinfín. Este último es particularmente adecuado para efectuar una pre-reducción de tamaño de cuerpos huecos, cuyo gran volumen en relación a su peso exigiría una boca de entrada a la cámara de tamaño excesivo.

En caso de alimentación forzada pueden emplearse rodillos, en particular para la fabricación de película o tubo flexible o corrugado, o bien vía canales mediante un empujador hidráulico, por ejemplo para tubería de polietileno.

Otro condicionante del sistema de alimentación es que se molturen *materiales fríos o calientes. En este último caso se limitan también* los tipos de molinos adecuados, que deben estar diseñados para evitar el incremento de la temperatura del material.

La extracción del molturado puede utilizar diversos sistemas, como cintas o tornillo sinfín, pero suele preferirse un sistema neumático

que puede transportarlo a un silo de almacenaje, que cuando el material debe alimentar una extrusora de regranulación o un sistema similar se combina con un tornillo sinfín que regula la cantidad de material alimentado. Pero, en caso de alimentación en línea, puede dirigirse directamente a la máquina.

Finalmente, la práctica totalidad de los molinos son transportables para situarlos en la proximidad de las máquinas en que, por sus condiciones actuales de trabajo, pueden producirse desechos, como es el caso de arranque de los procesos de inyección o extrusión. Puede convenir que la altura de la boca de entrada sea inferior a la de salida de la máquina de moldeo, por lo que la salida del molino queda a un nivel muy bajo y condiciona el sistema de extracción del molturado.

Dentro de la máquina existen tres componentes cuya selección afecta directamente la calidad del molido producido. Estos son el rotor, las cuchillas rotatorias y estacionarias y la malla. Adicionalmente, también se debe poner atención a los factores de operación como la velocidad de las cuchillas y el espaciamiento entre ellas y la malla.



Los tres tipos de rotores son: el abierto, el cerrado (o sólido) y el escalonado. Los rotores abiertos proporcionan un flujo de aire sin restricciones a través de la cámara de corte y, por lo tanto, son escogidos con frecuencia para moler resinas sensibles al calor o materiales que al momento de ser alimentados al molino están todavía muy calientes.



Los rotores cerrados o sólidos no tienen espacios abiertos entre las cuchillas rotacionales y el eje, proporcionando un arreglo de montaje mucho más resistente y adicionando inercia al corte de partes gruesas, tales como tortas de purga, especialmente las que están frías.



Los rotores escalonados se ofrecen en configuraciones cerradas o semicerradas y son excelentes para cortar las partes más pesadas o de pared más gruesa. Un rotor helicoidal segmentado combina las ventajas de los rotores abiertos o cerrados, proporcionan más corte por vuelta y requieren menor potencia en cantidades de producción comparables.

Para aplicaciones de trabajo pesado, las poleas con volantes incrementan la inercia del rotor y constituyen una manera de aumentar la fuerza de corte sin tener que aumentar la potencia del motor. Un mayor número de motores o el aumento de su potencia, no solamente son más costosos que la implementación de los volantes, sino que aumentan el consumo de electricidad.

Hoy en día se prefieren las cuchillas colocadas en forma sesgada porque actúan como las tijeras cuando cortan. Este tipo de arreglo de la cuchilla es superior al tradicional, proporcionando una mayor capacidad de producción con menor consumo de potencia, menor generación de ruidos, y reduce la formación de finos y polvo. El corte tipo tijera se logra desviando en un ángulo pequeño al rotor o a la cama de cuchillas. Este tipo de diseño produce una acción de corte en tajadas o por cizalla, en un área de impacto más reducida que la que se encuentra en las cuchillas colocadas en posición derecha; que corta a lo largo de todo el ancho de la cuchilla en un solo golpe.

El ángulo de la punta de corte puede afectar la fuerza de corte. Las puntas de ángulos pequeños son romas y, por lo tanto, aplicables

para trabajar con materiales frágiles. Las puntas de ángulos grandes y afiladas se emplean para cortar materiales suaves y tenaces.

Muchos diseño de molinos ofrecen solamente dos camas de cuchillas estacionarias. El empleo de tres y cuatro camas de cuchillas en algunos tamaños de molinos puede aumentar significativamente la capacidad de producción, ya que también se aumenta el número de cortes por revolución. El aumento del número de cuchillas en el rotor puede tener un efecto similar.

El espaciamiento entre las cuchillas rotatorias y la cama de cuchillas es crucial para el desempeño de la operación de tamaño. Entre más pequeño sea este espaciamiento, más limpio y eficiente será el corte. Los espaciamientos cortos son recomendados especialmente para los materiales blandos y dúctiles.

Las camas de cuchillas ajustables son valiosas porque en la mayoría de los casos cuando se saca filo a las cuchillas de los rotores, su tamaño se reduce y, por lo tanto, se acorta el círculo de corte. Para mantener un espaciamiento entre cuchillas óptimo, es necesario ajustar la cama de cuchillas estacionaria acercándolas a las cuchillas

de los rotores. Al tiempo que se resuelve este problema, otro se mantiene y es de la distancia más grande de las cuchillas del rotor y la malla. Piezas de material molido grandes pueden obstruir los objetos de la malla, reduciendo así la capacidad del molino y aumentando la generación de finos y polvo porque una menor área de la malla es operativa.

Las cuchillas ajustables en el rotor (un elemento de diseño bastante nuevo) permiten mantener los espaciamientos lo suficientemente pequeños y constantes, aun después de un afilado de las cuchillas estacionarias acercándolas a las cuchillas de los rotores. Un rotor helicoidal y escalonado también podrá mantener un espaciamiento uniforme después de un afilamiento de las cuchillas del rotor puesto que esta operación no afecta el diámetro exterior. La facilidad de ajustar las cuchillas asegura el mantenimiento de productividades máximas, especialmente cuando se procesan películas, láminas u otra clase de materiales de pared delgada.

El filo de las cuchillas es también muy importante tanto para la calidad del material molido como para el desempeño del molino. Por lo tanto, debe establecerse un programa de mantenimiento periódico

para establecer el nivel de afilado de las cuchillas y de desgaste de las mismas, de una manera regular. La frecuencia de afilado de las cuchillas depende de la abrasividad del material que se corta (los materiales cargados y reforzados son los peores), y de la composición de la aleación de acero de la cual están hechas las cuchillas. Los aceros para las cuchillas, generalmente, están diseñados para proveer tenacidad o resistencia al desgaste. Para los materiales no abrasivos y suaves, las cuchillas están hechas de aceros de Cromo-Vanadio (CVS), los cuales son tenaces y resistentes al astillamiento pero se desgastan más rápidamente que otros aceros para herramientas.

4.3. Detalles Técnicos.

Las principales diferencias entre los diversos fabricantes de molinos suelen centrarse en la sujeción de las cuchillas al rotor y en la disposición de las del estator, descritas sin emitir juicios de valor.

La forma tradicional de sujeción de las cuchillas es mediante taladros que permiten fijarlas al rotor mediante tornillos con muy poca holgura.

Posteriormente se han desarrollado sistemas de fijación mediante cuñas, que permiten evitar el taladrado de las cuchillas. En el primer caso, no existe posibilidad de desplazamiento de las cuchillas por

errores durante su fijación y, en el segundo, se eliminan eventuales tensiones residuales del tratamiento alrededor de los taladros.

El tamaño y disposición de las cuchillas en el rotor es otra variable; pueden ser cuchillas de la misma longitud del rotor o de unas fracciones de esta longitud, con lo que pueden situarse las cuchillas radialmente de forma escalonada con un desfase circunferencial unas de otras, lo que puede mejorar el rendimiento de la operación. Algunos molinos anchos permiten un galgado exterior, para después fijarlo sobre soportes.

Otro punto a que se debe atender es a la protección de los rodamientos del rotor, que a su vez cumple también la función de evitar que se atasquen partes del plástico a molturar contra las paredes laterales de la cámara, evitando así el calentamiento por *fricción del material*.

La disposición de la cuchilla del estator puede ser paralela con respecto al eje del rotor o ligeramente inclinada. Para obtener el denominado efecto tijera, que permite un corte más progresivo, deben estar inclinadas tanto la cuchilla del estator como, en

ocasiones, la del rotor. Pero este efecto depende, también, de la velocidad del rotor.

Otros aspectos a considerar son la evacuación del calor de la energía cinética de corte y la absorción del ruido generado. Este último aspecto será objeto, probablemente, de un importante desarrollo en los próximos años. En la actualidad, las técnicas empleadas son paralelas a las que se utilizan en un campo tan distinto como la construcción de propulsores para misiles o cohetes portadores de satélites, y se basan en la construcción de materiales de pared múltiple con distintos grados de amortiguación de la vibración.

La evacuación del calor puede efectuarse por aire forzado sobre el cuerpo de la cámara o los alabes que se incorporan al rotor, o refrigerando por agua el eje del rotor y, eventualmente, la zona del estator, zonas en que se produce la mayor cantidad de fricción. En los molinos mayores puede incorporarse al circuito un intercambiador de calor.

Asimismo, la separación y evacuación de polvo y grados

excesivamente pequeños del material tendrá importancia en función de la aplicación final del material recuperado.

4.4. Tamaños y Potencias.

Un solo tamaño no es para todos los casos.

Si se escoge una máquina muy pequeña, puede que sea necesario tener que cortar las partes manualmente o con una sierra para poder introducirla en el molino. Esta es una labor que demanda mucha mano de obra y que a la vez es peligrosa.

Cuando se especifica un molino, es mejor sobredimensionarlo tanto en tamaño como en su potencia. La tolva de alimentación debe tener las dimensiones apropiadas para recibir la parte más grande a ser procesada, sin tener que cortarla de antemano. El tratar de ahorrar dinero especificando un molino más pequeño, cuya cámara de corte es demasiado cerrada en tamaño para el material que se procesa, frecuentemente genera problemas de alimentación y atrasos que consumen el tiempo y atención del operario. Definitivamente, le costará más dinero al procesador en el largo plazo si tiene que orientar las partes de cierta manera para poder alimentar la cámara del molino.

En función de la capacidad de admisión del molino, que se mide por el de la boca de entrada de la cámara de trituración, la potencia instalada varía entre 1,12kW y 373kW y los tamaños, desde un mínimo de 200mm hasta cerca de 2.000mm de ancho.

La administración de las grandes potencias puede exigir un control electrónico del funcionamiento del equipo y, en los molinos de grandes dimensiones, el accionamiento de la tolva, parrilla y otros cuerpos de peso importante puede efectuarse mediante un conjunto de motorreductor/tornillo sinfín o pistones hidráulicos, para lo que se debe equipar a la máquina con la correspondiente central. Existen otros procedimientos particulares de cada fabricante para dar solución a estas necesidades, por ejemplo, mediante accionamientos manuales compensados.

La selección de un molino debe efectuarse, además de la consideración del tamaño máximo de las partes a molturar, teniendo en cuenta de que se trata de una máquina de trabajo muy duro, por lo que la simplicidad de diseño y el exceso de potencia y robustez son cualidades nada desdeñables a la hora de garantizar a largo plazo un funcionamiento sin problemas.

Menos revoluciones para mayor velocidad.

Para aumentar la producción de material molido uniforme, la solución es un molino diseñado para velocidades de rotor más bajas. Las velocidades de corte más bajas le dan a cada partícula molida una mayor oportunidad de pasar por la malla. Con un rotor del alta velocidad, las más partículas con más susceptibles de ser arrastradas dentro de la cámara y convertidas en finos por la acción de los cortes repetitivos. En el caso de los materiales abrasivos, las velocidades más lentas del rotor reducen el desgaste de las cuchillas y de la cámara.

La velocidad de las puntas de las cuchillas es en parte función del diámetro del rotor y, por lo tanto, dos molinos con círculos diferentes de corte que giran a las mismas revoluciones por minuto deben producir resultados diferentes. Normalmente, las velocidades de los rotores son constantes, pero se puede adicionar al molino un aparato opcional para variar la velocidad y así proporcionar una mayor flexibilidad. Infortunadamente, no existen reglas para predecir la velocidad de rotor óptima. La mayoría de los proveedores de molinos ofrecen pruebas de laboratorio donde se puede determinar la velocidad óptima del rotor para cada aplicación.

Cuando se opera a velocidades más bajas. Las mallas con huecos más pequeños y de pared más delgada proporcionan tamaños de partícula más uniformes a una mayor capacidad de producción. Por el contrario, a velocidades más altas del rotor, se requiere contar con huecos más grandes para mantener la capacidad de producción; pero los huecos más grandes incrementan el rango de tamaños de partícula producido, particularmente cuando el material es frágil. Aunque los tamaños de los huecos dependen mucho de la composición del material y del tamaño del molino.

CAPITULO 5

5. CARACTERISTICAS DEL MOLINO. TEMA DE ESTUDIO.

5.1. Características del Molino.

El molino para plásticos tema de mi estudio se muestra a continuación.



Figura 5.1: Molino tema de estudio

Este molino opera con un motor trifásico que tiene una velocidad de rotación de 1160 rpm, en conexión Δ , con un voltaje de 220 V y una intensidad de corriente nominal de 44 Amp.

La cámara de corte tiene un sistema tipo tijera, diseñado de esta manera para reducir el consumo de energía y la formación de calor y polvo. La tolva tiene una forma tal que permite la alimentación perpendicular al círculo de corte.

El rotor tiene una gran masa para permitir un corte homogéneo, esto hace que la energía consumida para moverlo sea elevada. La potencia requerida para mover la gran masa que constituye el rotor se analizará también en este capítulo.



Figura 5.2: Vista del Sistema de Cuchillas

La energía requerida para el corte es pequeña y se obtiene por medio del análisis que se detalla a continuación.

La energía de impacto necesaria para cortar plástico es de $16\text{KJ/m}^{2(4)}$, es así que para hallar la potencia requerida para cortar el plástico se modela un triángulo que tiene las dimensiones mostradas en la figura. Se lo hace de esta manera porque la forma final obtenida es irregular y la malla utilizada tiene perforaciones de 8mm. Este resultado se obtuvo en base al trabajo de campo.

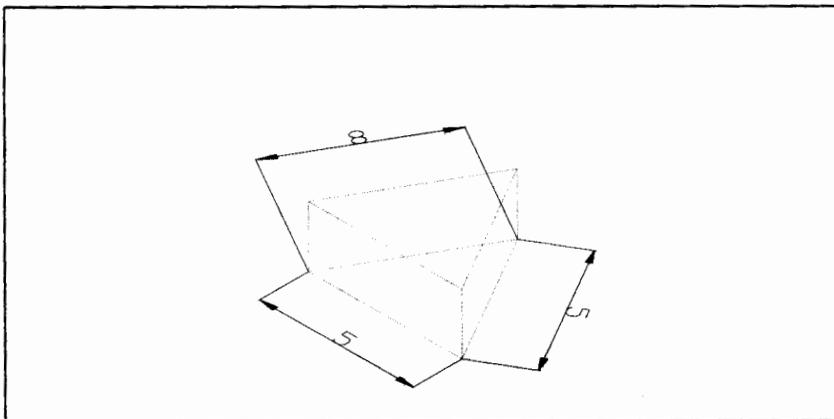


Figura 5.3: Modelo de las partículas de plástico cortadas

La energía total se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$E_T = \frac{E_i A_T}{n}$$

Donde:

E_T = Energía total (kJ)

E_i = Energía por unidad de área obtenida (kJ/m²)

A_T = Área total obtenida (m²)

n = Eficiencia del molino.

Se tiene como referencia que la eficiencia energética de los molinos para plásticos es de 20-30%, esto se debe a que cuando se hace el corte del material este no se realiza en una sola revolución del motor sino que el material sigue girando hasta que se realiza el corte total y puede caer.

Puedo asumir entonces que la eficiencia de un molino extranjero es del 30% y como el molino examinado genera por hora el 50% de la producción que debería según sus características puedo asumir también que la eficiencia de este molino esta alrededor del 15%.

El área total obtenida luego de la molienda se halla por medio de:

$$A_T = A_u n$$

Donde:

A_u = Área unitaria (m²)

n = Número de partículas en una hora

Para calcular el área total de corte se debe hallar el área unitaria de cada partícula molida.

$$A_u = (5 + 8 + 5)(2) = 36 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{M_T}{M_u}$$

Donde:

M_T = Masa total

M_u = Masa unitaria

$$M_u = \rho V_u$$

Donde:

V_u = Volumen Unitario

$$V_u = \frac{b \times h}{2} \times e = \frac{(5 \times 5)}{2} \times 2$$

$$V_u = 25 \text{ mm}^3$$

La masa unitaria se obtiene sabiendo que la densidad del PEAD es de 950 Kg/m^3 . Se utiliza este material ya que la densidad del PET es

menor.

$$M_u = 950(25 * 10^{-9}) = 23.75 * 10^{-6} \text{ Kg}$$

Se desea moler 200 Kg/h para mejorar de esta manera la eficiencia del molino:

$$n = \frac{200}{23.75 * 10^{-6}} = 8.42 * 10^6 \text{ partículas}$$

El área total obtenida por el corte es:

$$A_T = 36 * 10^{-6} \times 8.42 * 10^6 = 303 \text{ m}^2$$

Esta es el área total de plástico molido que se obtiene en una hora.

Con este resultado calculo la energía total de corte:

$$E_T = \frac{16(303)}{0.15} = 32320 \text{ KJ / h}$$

Por tanto,

$$P = \frac{32320 \text{ KJ / h}}{3600 \text{ seg}} = 9 \text{ KW}$$

Para selección de motores es conveniente utilizar un factor de seguridad de 1.1, por las sobrecargas que podrían generarse y dañar el motor.

$$P = 9 \times 1.1 = 10kW$$

Esta es el valor de la potencia requerido para obtener 200Kg/h pero con una eficiencia del 15%. Con los cambios que se mostrarán más adelante para el rediseño se calcula llegar a una eficiencia del 25% al menos, tomando en consideración que los molinos extranjeros tienen una eficiencia del 30%.

Para este fin se obtiene que la Potencia consumida por hora es la siguiente:

$$E_T = \frac{16(303)}{0.25} = 19392KJ / h$$

Por tanto,

$$P = \frac{19392KJ / h}{3600seg} = 5.4KW$$

$$P = 5.4 \times 1.1 = 6kW$$

Este valor de potencia se ha reducido en un 33% y es el que se necesitaría para moler 200Kg/h.

Las dimensiones de las poleas encargadas de la reducción de velocidad son 155mm y 390mm respectivamente, de lo cual se obtiene la velocidad de rotación del árbol, al cual están unidos los soportes de las cuchillas.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1}$$

$$N_2 = \frac{N_1 D_1}{D_2} = \frac{1160 * 0.155}{0.39}$$

$$N_2 = 460rpm$$

Se tiene entonces que la velocidad de rotación del árbol es 460 rpm.

El rotor es abierto, es decir proporcionan un flujo de aire sin restricciones a través de la cámara de corte, tiene espacios libres entre cada soporte de las cuchillas. El rotor cuenta con tres cuchillas y se tienen dos cuchillas fijas.

Las cuchillas cuya sección se muestra a continuación, tiene una masa total de 8,5Kg, son maquinadas en Acero AISI 01 las cuales

son sometidas a un proceso de recocido a 780°C y a un tratamiento de temple a 850°C. Estos procesos se realizan para que la cuchilla alcance mayor tenacidad.

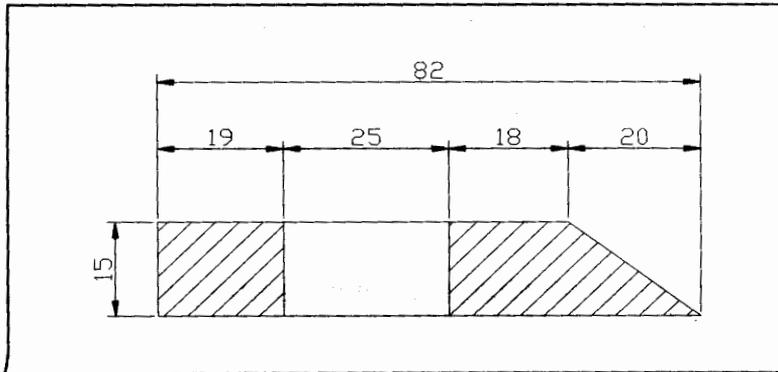


Figura 5.4: Sección longitudinal de las cuchillas.

El ángulo de inclinación del filo de las cuchillas es de 37° y la inclinación de su forma tipo tijera es 3°.

La masa total de las cuchillas móviles es igual a:

$$m_{Tc} = m_c \times 3$$

$$m_{Tc} = 25.5 \text{ Kg}$$

El rotor cuenta con cuatro soportes con la siguiente sección transversal:

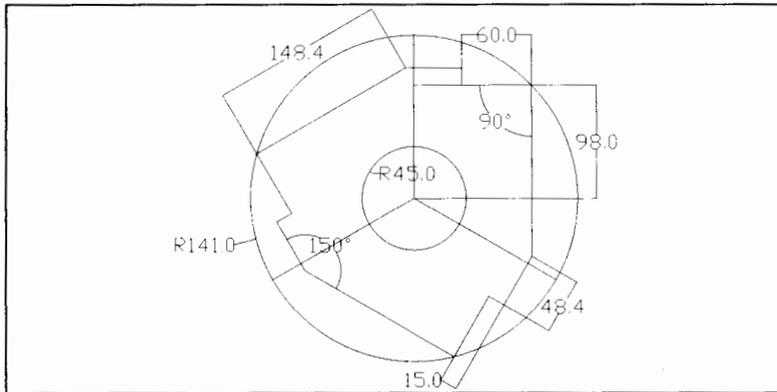


Figura 5.5: Sección transversal de los soportes existentes.

La masa de cada soporte se obtiene a partir de los siguientes datos:

$$A = 34466 \text{ mm}^2 = 0.0345 \text{ m}^2$$

$$e = 38.1 \text{ mm} = 0.0381 \text{ m}$$

$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

$$m_s = A_s \times e \times \rho$$

$$m_s = 0.0345(0.0381)(7850)$$

$$m_s = 10,6 \text{ Kg}$$

$$m_{Ts} = m_s \times 4$$

$$m_{Ts} = 10,6 \times 4 = 42,4 \text{ Kg}$$

Para el árbol de transmisión se obtiene su masa total en base a los siguientes datos:

$$d_M = 0,09 \text{ m}$$

$$d_m = 0,075 \text{ m}$$

$$l_M = 0,38 \text{ m}$$

$$l_m = 0,29\text{m}$$

$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

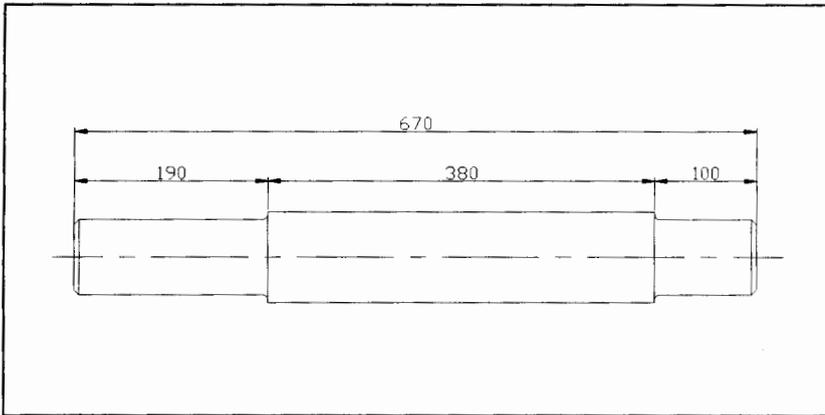


Figura 5.6: Árbol de transmisión.

El área total es la suma de las áreas transversales de las dos *secciones del árbol*:

$$m_{Ta} = (A_M l_M + A_m l_m) \times \rho$$

$$m_{Ta} = \left(\frac{\pi(0.09)^2}{4} (0.38) + \frac{\pi(0.075)^2}{4} (0.29) \right) \times 7850$$

$$m_{Ta} = 29 \text{ Kg}$$

La masa total del conjunto se obtiene sumando los valores calculados, esto es:

$$m_T = m_a + m_s + m_c$$

$$m_T = 25.5 + 42.4 + 29$$

$$m_T = 97 \text{ Kg}$$

El material que es alimentado al molino debe ser cortado previamente por los operadores con una sierra eléctrica, de modo que el proceso es peligroso ya que por un pequeño descuido, el operador podría sufrir un grave accidente. Este peligro se da sobre todo cuando el material a molturar son tortas recogidas de algún proceso de fabricación del plástico, ya que estas son de dimensión irregular pequeña y deben ser cortadas con ayuda de la sierra. El peligro es menor cuando el material a molturar son canastas de mayor tamaño.



Figura 5.7: Corte de Material Plástico con la Sierra Eléctrica.

5.2. Rendimiento.

El rendimiento del molino existente es 110 kg/h cuando las cuchillas se encuentran en perfectas condiciones y se reciclan gavetas.

Cuando el material utilizado son tortas de polietileno provenientes de un proceso de extrusión, el rendimiento es de 150 kg/h, pero el material debe estar previamente cortado.

Además se produce polvillo por cuanto el material recorre un tiempo mayor al requerido. Por lo tanto se debe mejorar la forma de las cuchillas y los soportes de las mismas para mejorar el rendimiento además se verificará las otras características del equipo tales como velocidad, diámetro del árbol, tamaño de soportes, inclinación de cuchillas, etc.

A continuación se muestra un gráfico con los valores típicos para la potencia requerida. vs. capacidades de molienda.

El gráfico muestra la potencia requerida de un molino que procesa típicamente 250 kg/h, con lo que se puede observar que la potencia existente es baja.

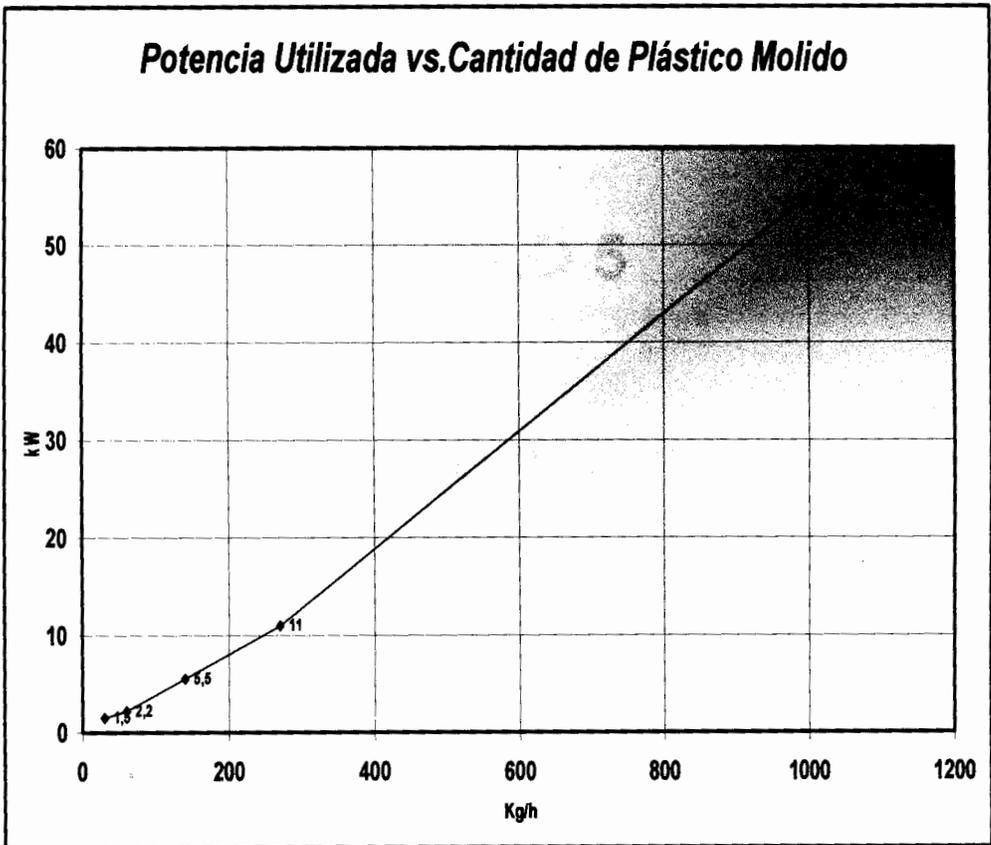


Figura 5.8: Potencia Utilizada vs. Cantidad de Plástico

Como se observa en el gráfico la capacidad típica de un molino que utiliza un motor de 11 kW es de aproximadamente 250 kg/h, con lo que se puede concluir que la eficiencia de molino existente es baja, por tanto puede ser mejorada.

CAPITULO 5

5. CARACTERISTICAS DEL MOLINO. TEMA DE ESTUDIO.

5.1. Características del Molino.

El molino para plásticos tema de mi estudio se muestra a continuación.



Figura 5.1: Molino tema de estudio

Este molino opera con un motor trifásico que tiene una velocidad de rotación de 1160 rpm, en conexión Δ , con un voltaje de 220 V y una intensidad de corriente nominal de 44 Amp.

La cámara de corte tiene un sistema tipo tijera, diseñado de esta manera para reducir el consumo de energía y la formación de calor y polvo. La tolva tiene una forma tal que permite la alimentación perpendicular al círculo de corte.

El rotor tiene una gran masa para permitir un corte homogéneo, esto hace que la energía consumida para moverlo sea elevada. La potencia requerida para mover la gran masa que constituye el rotor se analizará también en este capítulo.

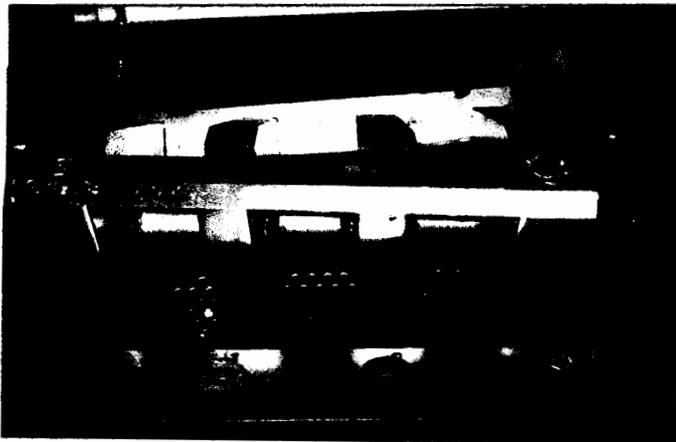


Figura 5.2: Vista del Sistema de Cuchillas

La energía requerida para el corte es pequeña y se obtiene por medio del análisis que se detalla a continuación.

La energía de impacto necesaria para cortar plástico es de $16\text{KJ/m}^{2(4)}$, es así que para hallar la potencia requerida para cortar el plástico se modela un triángulo que tiene las dimensiones mostradas en la figura. Se lo hace de esta manera porque la forma final obtenida es irregular y la malla utilizada tiene perforaciones de 8mm. Este resultado se obtuvo en base al trabajo de campo.

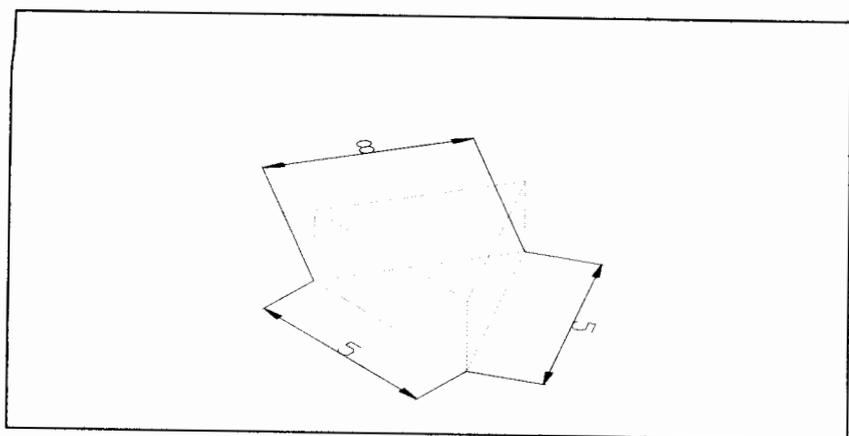


Figura 5.3: Modelo de las partículas de plástico cortadas

La energía total se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$E_T = \frac{E_t A_T}{n}$$

Donde:

E_T = Energía total (kJ)

E_i = Energía por unidad de área obtenida (kJ/m²)

A_T = Área total obtenida (m²)

n = Eficiencia del molino.

Se tiene como referencia que la eficiencia energética de los molinos para plásticos es de 20-30%, esto se debe a que cuando se hace el corte del material este no se realiza en una sola revolución del motor sino que el material sigue girando hasta que se realiza el corte total y puede caer.

Puedo asumir entonces que la eficiencia de un molino extranjero es del 30% y como *el molino examinado genera por hora el 50% de la producción que debería según sus características* puedo asumir también que la eficiencia de este molino esta alrededor del 15%.

El área total obtenida luego de la molienda se halla por medio de:

$$A_T = A_u n$$

Donde:

A_u = Área unitaria (m²)

n = Número de partículas en una hora

Para calcular el área total de corte se debe hallar el área unitaria de cada partícula molida.

$$A_u = (5 + 8 + 5)(2) = 36 \text{ mm}^2$$

$$n = \frac{M_T}{M_u}$$

Donde:

M_T = Masa total

M_u = Masa unitaria

$$M_u = \rho V_u$$

Donde:

V_u = Volumen Unitario

$$V_u = \frac{b \times h}{2} \times e = \frac{(5 \times 5)}{2} \times 2$$

$$V_u = 25 \text{ mm}^3$$

La masa unitaria se obtiene sabiendo que la densidad del PEAD es de 950 Kg/m^3 . Se utiliza este material ya que la densidad del PET es de 1370 Kg/m^3 por tanto para esta la cantidad de partículas será menor.

$$M_u = 950(25 * 10^{-9}) = 23.75 * 10^{-6} \text{ Kg}$$

Se desea moler 200 Kg/h para mejorar de esta manera la eficiencia del molino:

$$n = \frac{200}{23.75 * 10^{-6}} = 8.42 * 10^6 \text{ partículas}$$

El área total obtenida por el corte es:

$$A_T = 36 * 10^{-6} \times 8.42 * 10^6 = 303 \text{ m}^2$$



CIB-ESPOL

Esta es el área total de plástico molido que se obtiene en una hora.

Con este resultado calculo la energía total de corte:

$$E_T = \frac{16(303)}{0.15} = 32320 \text{ KJ / h}$$

Por tanto,

$$P = \frac{32320 \text{ KJ / h}}{3600 \text{ seg}} = 9 \text{ KW}$$



CIB-ESPOL



CIB-ESPOL

Para selección de motores es conveniente utilizar un factor de seguridad de 1.1, por las sobrecargas que podrían generarse y dañar el motor.

$$P = 9 \times 1.1 = 10kW$$

Esta es el valor de la potencia requerido para obtener 200Kg/h pero con una eficiencia del 15%. Con los cambios que se mostrarán más adelante para el rediseño se calcula llegar a una eficiencia del 25% al menos, tomando en consideración que los molinos extranjeros tienen una eficiencia del 30%.

Para este fin se obtiene que la Potencia consumida por hora es la siguiente:

$$E_T = \frac{16(303)}{0.25} = 19392 KJ / h$$

Por tanto,

$$P = \frac{19392 KJ / h}{3600 seg} = 5.4 KW$$

$$P = 5.4 \times 1.1 = 6kW$$

Este valor de potencia se ha reducido en un 33% y es el que se necesitaría para moler 200Kg/h.

Las dimensiones de las poleas encargadas de la reducción de velocidad son 155mm y 390mm respectivamente, de lo cual se obtiene la velocidad de rotación del árbol, al cual están unidos los soportes de las cuchillas.

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{D_2}{D_1}$$

$$N_2 = \frac{N_1 D_1}{D_2} = \frac{1160 * 0.155}{0.39}$$

$$N_2 = 460rpm$$

Se tiene entonces que la velocidad de rotación del árbol es 460 rpm.

El rotor es abierto, es decir proporcionan un flujo de aire sin restricciones a través de la cámara de corte, tiene espacios libres entre cada soporte de las cuchillas. El rotor cuenta con tres cuchillas y se tienen dos cuchillas fijas.

Las cuchillas cuya sección se muestra a continuación, tiene una masa total de 8,5Kg, son maquinadas en Acero AISI 01 las cuales

son sometidas a un proceso de recocido a 780°C y a un tratamiento de temple a 850°C. Estos procesos se realizan para que la cuchilla alcance mayor tenacidad.

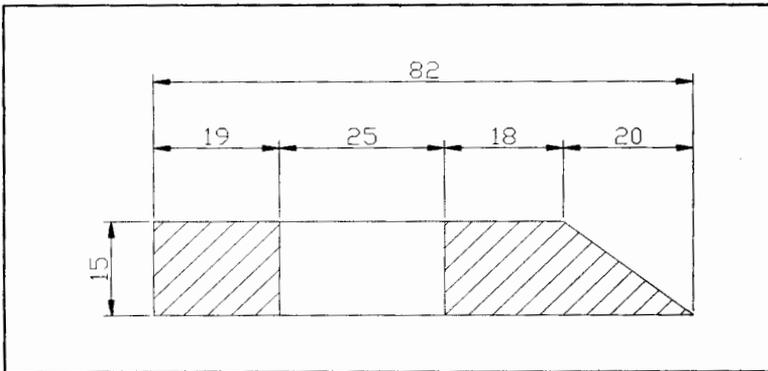


Figura 5.4: Sección longitudinal de las cuchillas.

El ángulo de inclinación del filo de las cuchillas móviles es de 37° y la inclinación de su forma tipo tijera es 3°.

Las cuchillas fijas tienen un espesor de 7.5 mm

La masa total de las cuchillas móviles es igual a:

$$m_{Tc} = m_c \times 3$$

$$m_{Tc} = 25.5 \text{ Kg}$$

El rotor cuenta con cuatro soportes con la siguiente sección transversal:

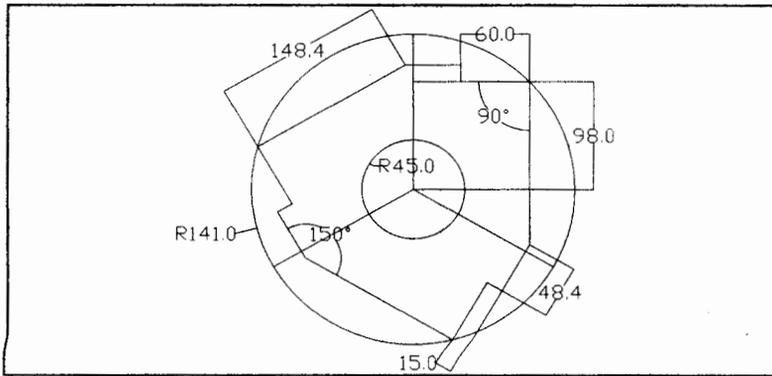


Figura 5.5: Sección transversal de los soportes existentes.

La masa de cada soporte se obtiene a partir de los siguientes datos:

$$A = 34466 \text{ mm}^2 = 0.0345 \text{ m}^2$$

$$e = 38.1 \text{ mm} = 0.0381 \text{ m}$$

$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

$$m_s = A_s \times e \times \rho$$

$$m_s = 0.0345(0.0381)(7850)$$

$$m_s = 10,6 \text{ Kg}$$

$$m_{Ts} = m_s \times 4$$

$$m_{Ts} = 10,6 \times 4 = 42,4 \text{ Kg}$$

Para el árbol de transmisión se obtiene su masa total en base a los siguientes datos:

$$d_M = 0,09 \text{ m}$$

$$d_m = 0,075\text{m}$$

$$l_M = 0,38\text{m}$$

$$l_m = 0,29\text{m}$$

$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

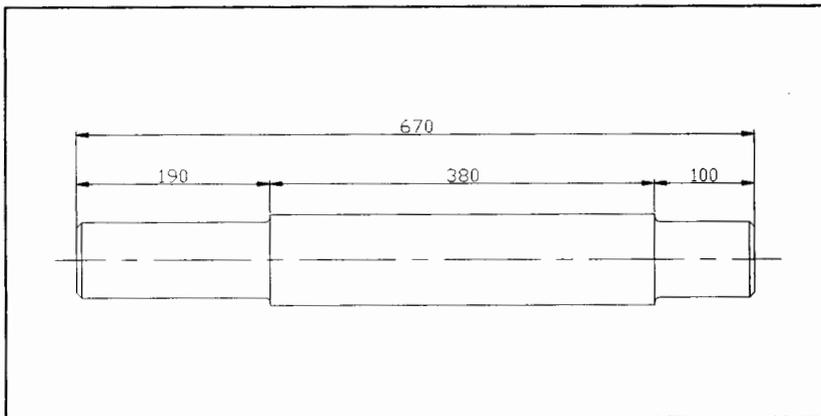


Figura 5.6: Árbol de transmisión.

El área total es la suma de las áreas transversales de las dos secciones del árbol:

$$m_{Ta} = (A_M l_M + A_m l_m) \times \rho$$

$$m_{Ta} = \left(\frac{\pi(0.09)^2}{4} (0.38) + \frac{\pi(0.075)^2}{4} (0.29) \right) \times 7850$$

$$m_{Ta} = 29 \text{ Kg}$$

La masa total del conjunto se obtiene sumando los valores calculados, esto es:

$$\begin{aligned}m_T &= m_a + m_s + m_c \\m_T &= 25.5 + 42.4 + 29 \\m_T &= 97 \text{ Kg}\end{aligned}$$

El material que es alimentado al molino debe ser cortado previamente por los operadores con una sierra eléctrica, de modo que el proceso es peligroso ya que por un pequeño descuido, el operador podría sufrir un grave accidente. Este peligro se da sobre todo cuando el material a molturar son tortas recogidas de algún *proceso de fabricación del plástico*, ya que estas son de dimensión irregular pequeña y deben ser cortadas con ayuda de la sierra. El peligro es menor cuando el material a molturar son canastas de mayor tamaño.



Figura 5.7: Corte de Material Plástico con la Sierra Eléctrica.

5.2. Rendimiento.

El rendimiento del molino existente es 110 kg/h cuando las cuchillas se encuentran en perfectas condiciones y se reciclan gavetas. Cuando el material utilizado son tortas de polietileno provenientes de un proceso de extrusión, el rendimiento es de 150 kg/h, pero el material debe estar previamente cortado.

Además se produce polvillo por cuanto el material recircula un tiempo mayor al requerido. Por lo tanto se debe mejorar la forma de las cuchillas y los soportes de las mismas para mejorar el rendimiento además se verificará las otras características del equipo tales como velocidad, diámetro del árbol, tamaño de soportes, inclinación de cuchillas, etc.

A continuación se muestra un gráfico con los valores típicos para la potencia requerida. vs. capacidades de molienda.

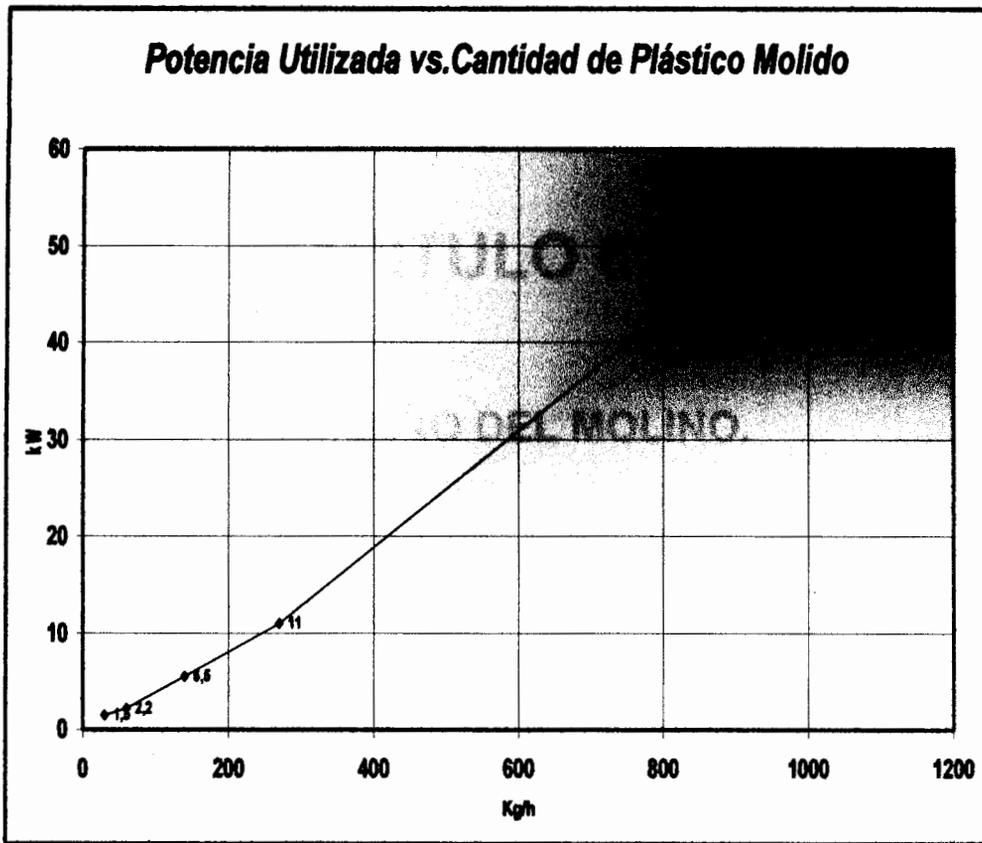


Figura 5.8: Potencia Utilizada vs. Cantidad de Plástico

Como se observa en el gráfico la capacidad típica de un molino que utiliza un motor de 11 kW es de aproximadamente 250 kg/h, con lo que se puede concluir que la eficiencia de molino existente es baja, por tanto puede ser mejorada.

CAPITULO 6

6. MEJORAS EN EL DISEÑO DEL MOLINO.

6.1. Mejoras en el Diseño del Molino.

El rediseño del molino se basa en aumentar la cantidad de kilogramos de plástico molido, disminuyendo la cantidad de energía eléctrica consumida por hora.

El primer elemento a mejorar son los soportes de las cuchillas. El primer diseño de forma que se propone se muestra a continuación:

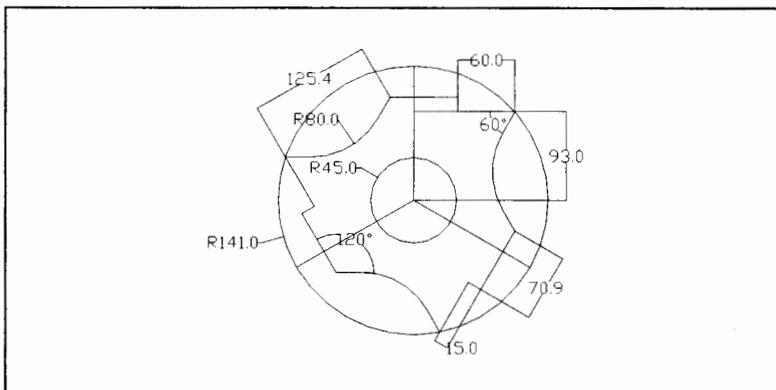


Figura 6.1: Primer diseño para soportes.

La ventaja de este diseño es que se tiene una mayor área de agarre, por tanto la capacidad del molino aumentará. Una mejor opción se muestra a continuación:

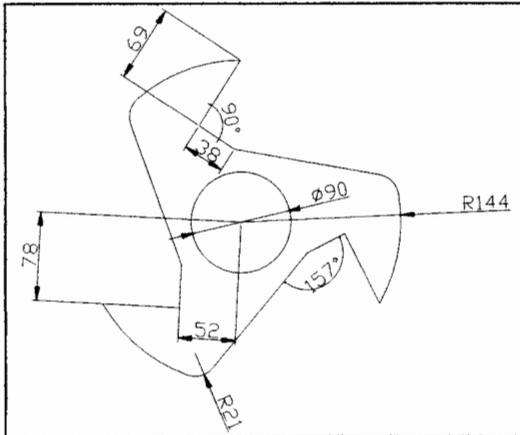


Figura 6.2: Segundo diseño para soportes.

En este diseño se tiene una mayor área de agarre que en el primer diseño. Debido a la ubicación de las cuchillas se tendrá un ángulo de corte más favorable para la molienda. Los pernos de sujeción de las cuchillas trabajan menos ya que los soportes absorben parte de la carga necesaria para que las cuchillas se mantengan en su lugar. Finalmente hay menos concentradores de esfuerzos debido a que el contorno de los soportes es más "suave". Por tanto, por las razones expuestas anteriormente, se selecciona el segundo diseño para los soportes de las cuchillas.

Para realizar el diseño del rotor, lo que incluye árbol de transmisión, soportes y cuchillas, se utiliza un programa para análisis de elementos finitos.

Por medio del análisis de esfuerzos, deformaciones e inercia, de las diferentes alternativas de solución mostradas, se escoge el diseño final más conveniente. Las consideraciones tomadas por el análisis son las siguientes: La velocidad de rotación es 460 rpm y acero cuya densidad es igual a 7850 Kg/m^3 .

Los diferentes modelos y los resultados de evaluarlos son mostrados a continuación, pero al inicio se evalúa el rotor existente.

Modelo existente.

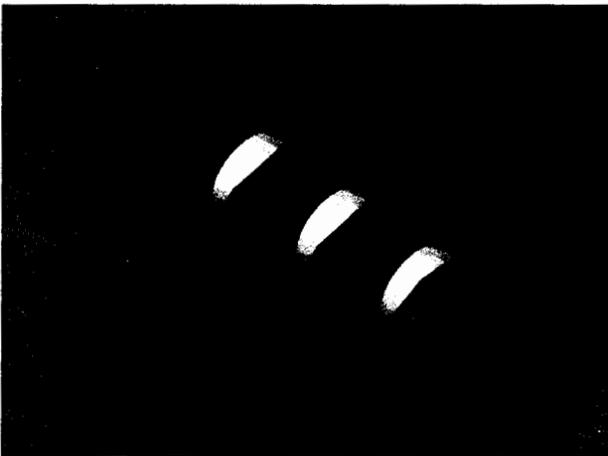


Figura 6.3: Rotor existente.

En la figura se observa claramente que los mayores esfuerzos se localizan en la zona donde existe el cambio de sección:

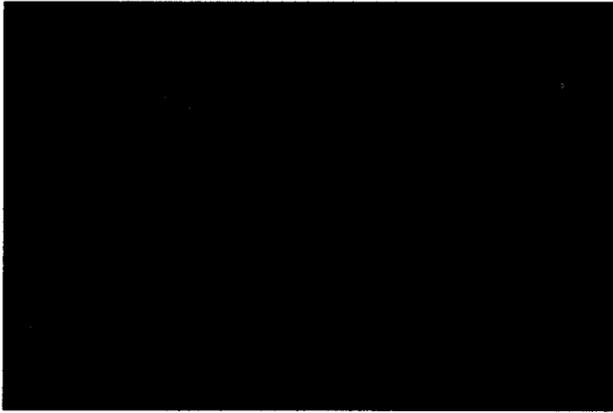


Figura 6.4: Análisis de Esfuerzos para el rotor existente.

El esfuerzo máximo que se registra es de 123MPa, con lo que se concluye que el conjunto no fallará por fluencia ya que el valor de $S_y=421\text{MPa}$.



Figura 6.5: Lugar donde se localiza el mayor esfuerzo en el rotor existente.

La deformación máxima con los datos suministrados es $3.25 \cdot 10^{-2} \text{mm}$ y el árbol se observa de la siguiente manera:

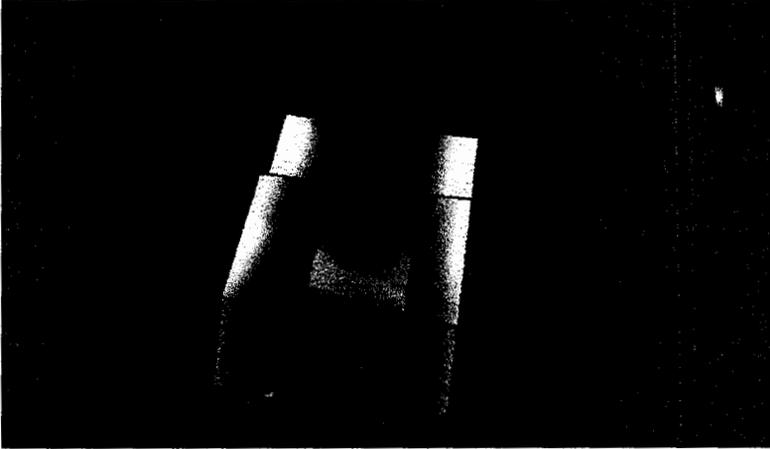


Figura 6.6: Análisis de Deflexiones para el rotor existente.

Como la forma es complicada la inercia es calculada por medio del programa Mechanical Desktop, pero con las cuchillas colocadas en los soportes. La inercia del conjunto $I = 0.496 \text{ Kg-m}^2$.

Modelo 1.

La primera alternativa es la siguiente, un rotor con solo dos soportes en los extremos, para disminuir la masa del mismo. El espesor de los soportes es 50mm y el árbol de transmisión sigue siendo de 90mm y se usará para todos los análisis.

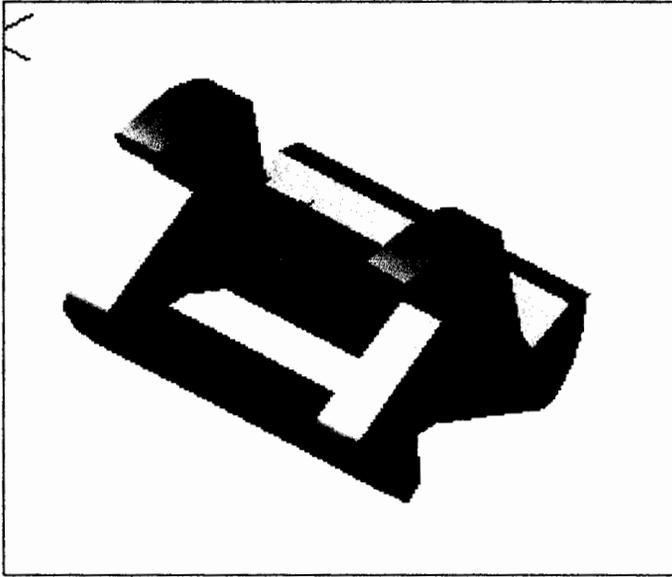


Figura 6.7: Modelo 1 para cambio de rotor.

La gráfica siguiente muestra las áreas de mayor esfuerzo que se localiza en la curvatura que tienen los soportes y el valor máximo de esfuerzo es 3.63 MPa.

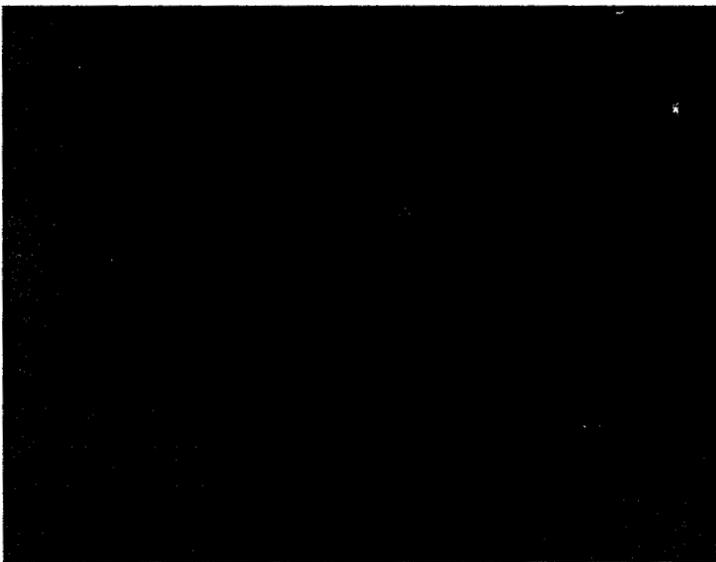


Figura 6.8: Análisis de Esfuerzos para Modelo 1.

Las deformaciones están ubicadas en el centro de las cuchillas y es lógico ya que en este punto ellas no se encuentran apoyadas. La deformación máxima es $5.6 \cdot 10^{-3}$ mm y es un valor pequeño.



Figura 6.9: Análisis de Deformaciones para el Modelo 1.

La inercia del conjunto es igual a $0,323 \text{Kg-m}^2$.

Modelo 2.

Otro diseño analizado es el siguiente:

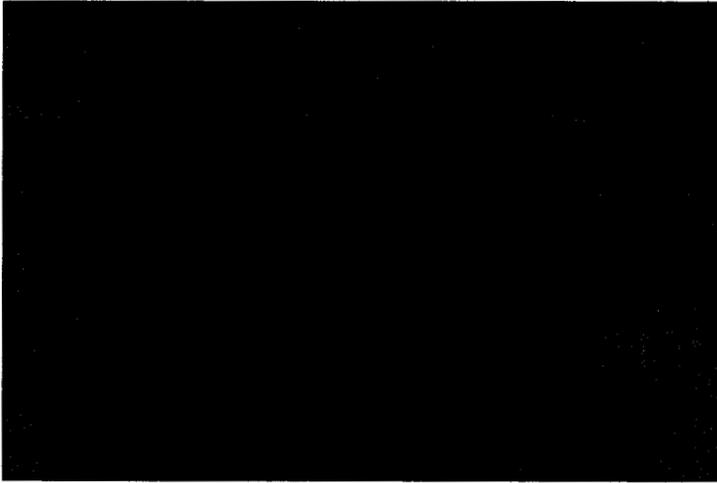


Figura 6.10: Modelo 2 para cambio de rotor.

En este caso los esfuerzos máximos se localizan en la curvatura interior que tienen los nuevos soportes pero su valor es mucho menor que el hallado para el rotor existente 1.27MPa.

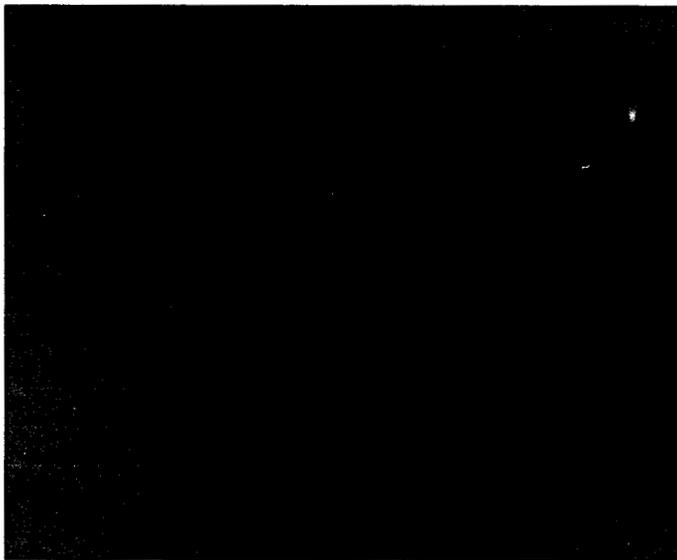


Figura 6.11: Análisis de Esfuerzos para Modelo 2.

Las deformaciones halladas para este rotor están alrededor de $1.65 \cdot 10^{-3} \text{mm}$, valor inferior al hallado con el rotor existente. En el gráfico siguiente se observa como ocurren las deformaciones en el conjunto diseñado.

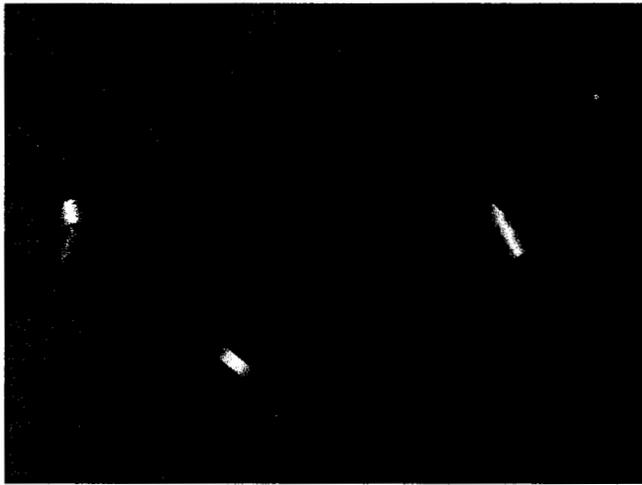


Figura 6.12: Análisis de Deformaciones para el Modelo 2.

La inercia del conjunto con respecto al eje de rotación es $0.325 \text{Kg} \cdot \text{m}^2$.

Modelo 3.

El siguiente modelo tiene tres soportes y cada uno con un espesor de 50mm.

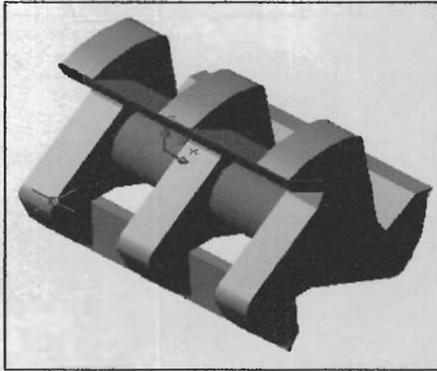


Figura 6.13: Modelo 3 para cambio de rotor.

El esfuerzo máximo de Von Mises es 1.4 MPa, que es un valor pequeño y menor que el calculado para el modelo anterior y se localiza en la curvatura que tienen los soportes.

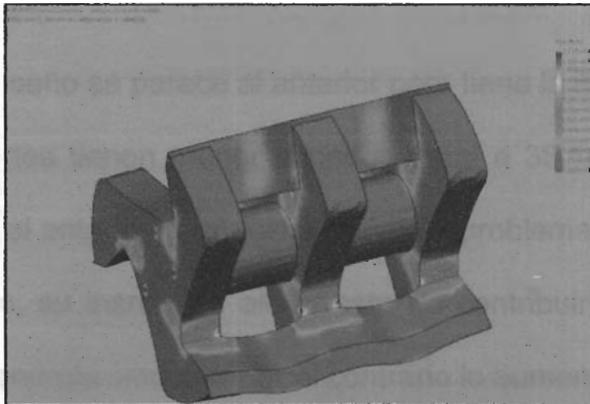


Figura 6.14: Análisis de Esfuerzos para Modelo 3.

La deformación máxima $7.6 \cdot 10^{-4}$ mm, localizada en los centros de las cuchillas, que son sostenidas en los soportes.

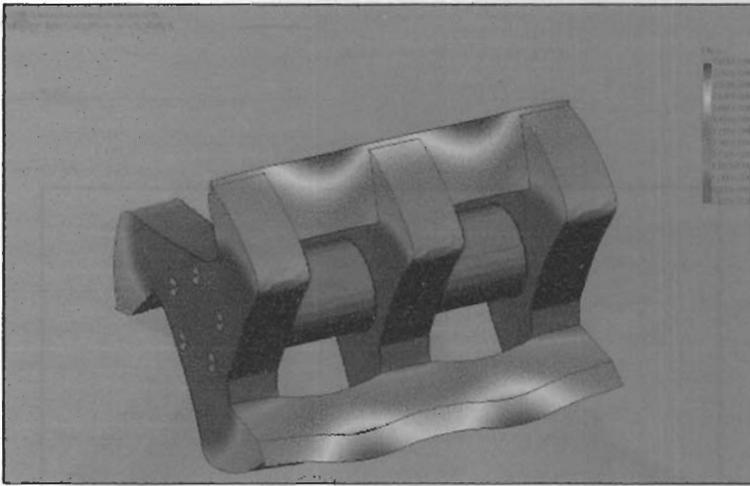


Figura 6.15: Análisis de Deformaciones para el Modelo 3.

La inercia del sistema es igual a $0,423 \text{ Kg-m}^2$.

El siguiente diseño se parece al anterior pero tiene la modificación de que los soportes tienen menor espesor, igual a 38.1mm, ya que a pesar de que el anterior no muestra mayores problemas por esfuerzo y deformación, su inercia es alta y esto no contribuiría a reducir el consumo de energía sino que por el contrario lo aumentaría.



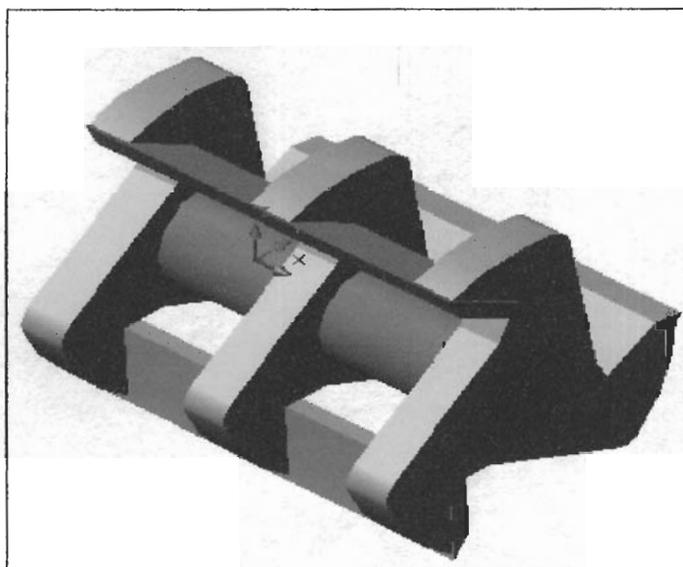
Modelo 4.

Figura 6.16: Modelo 4 para cambio de rotor.

El esfuerzo máximo de Von Mises es 1.8 MPa, que es un valor pequeño que no representa un problema mayor.

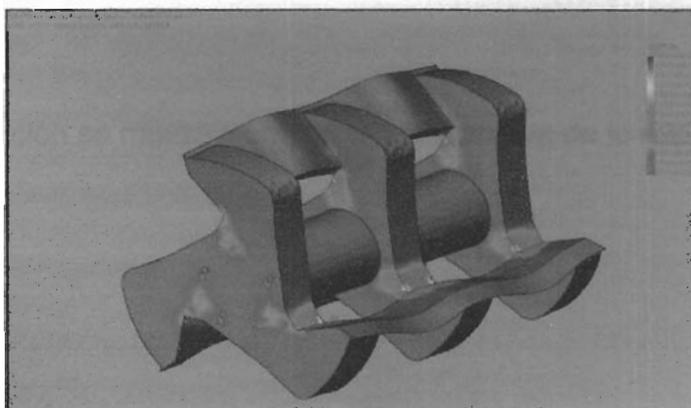


Figura 6.17: Análisis de Esfuerzos para Modelo 4.

La deformación máxima es $1.01 \cdot 10^{-3}$ mm, y se muestra en los centros de las cuchillas.

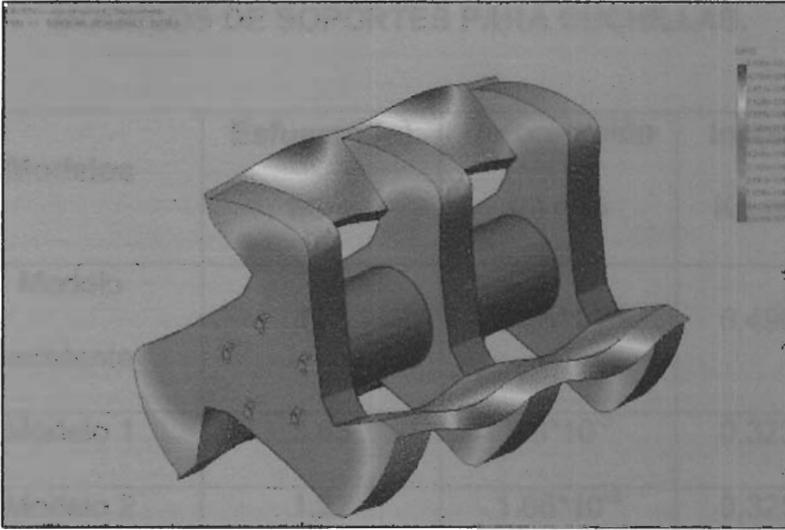


Figura 6.18: Análisis de Deformaciones para el Modelo 4.

La inercia del conjunto es igual a 0.354 Kg-m^2 , siendo esta menor que la anterior.

A continuación se muestra una tabla comparativa de lo expuesto.

TABLA 5

**COMPARACION DE RESULTADOS ENTRE LOS DISTINTOS
MODELOS DE SOPORTES PARA CUCHILLAS.**

Modelos	Esfuerzo (σ) MPa	Deformación (δ) mm	Inercia Kg-m²
Modelo existente	123	$3.25 \cdot 10^{-2}$	0.496
Modelo 1	3.63	$5.6 \cdot 10^{-3}$	0.323
Modelo 2	1.27	$1.65 \cdot 10^{-3}$	0.325
Modelo 3	1.4	$7.6 \cdot 10^{-4}$	0.423
Modelo 4	1.8	$1.01 \cdot 10^{-3}$	0.354

El modelo 4 es escogido porque presenta las mejores cualidades combinadas, el esfuerzo de Von Mises no aumenta en forma significativa, la deformación es pequeña y la inercia se encuentra en un valor medio con respecto a los demás diseños.

El diseño de forma del nuevo rotor se muestra a continuación:

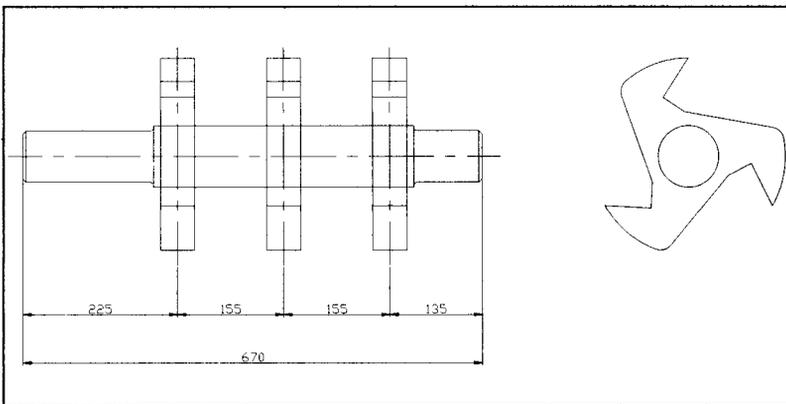


Figura 6.19: Diseño de Forma del Rotor Escogido.

En este diseño las cuchillas son sostenidas en tres soportes en lugar de cuatro, los soportes tienen igual espesor a los existentes, dos de ellos se encuentran ubicados en los extremos y el tercero en el centro.

La masa de cada cuchilla es 8.5Kg y la masa total de las cuchillas móviles es igual a:

$$m_{Tc} = m_c \times 3$$

$$m_{Tc} = 8.5 \times 3$$

$$m_{Tc} = 25.5 \text{ Kg}$$

El rotor cuenta con tres soportes para cuchillas con la siguiente sección transversal:

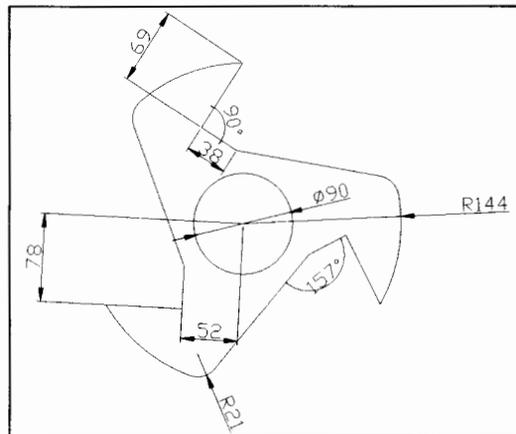


Figura 6.20: Sección transversal de los nuevos soportes.

La masa de cada soporte se obtiene a partir de los siguientes datos:

$$A = 27168 \text{mm}^2 = 0.0272 \text{m}^2$$

$$e = 38.1 \text{mm} = 0.0381 \text{m}$$

$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

$$m_s = A_s \times e \times \rho$$

$$m_s = 0.0272(0.0381)(7850)$$

$$m_s = 8.1 \text{Kg}$$

$$m_{Ts} = m_s \times 3$$

$$m_{Ts} = 8.1 \times 3 = 24.3 \text{Kg}$$

Para el árbol de transmisión se obtiene la masa total en base a los siguientes datos:

$$d_M = 0,09 \text{m}$$

$$d_m = 0,075 \text{m}$$

$$l_M = 0,38\text{m}$$

$$l_m = 0,29\text{m}$$

$$\rho = 7850 \text{ Kg/m}^3$$

El área total es la suma de las áreas transversales de las dos secciones del árbol:

$$m_{Ta} = (A_M l_M + A_m l_m) \times \rho$$

$$m_{Ta} = \left(\frac{\pi(0.09)^2}{4} (0.38) + \frac{\pi(0.075)^2}{4} (0.29) \right) \times 7850$$

$$m_{Ta} = 29 \text{ Kg}$$

La masa total del conjunto se obtiene sumando los valores calculados, esto es:

$$m_T = m_a + m_s + m_c$$

$$m_T = 29 + 24.3 + 25.5$$

$$m_T = 79 \text{ Kg}$$

En el diseño de árboles debe efectuarse un análisis de vibraciones. Es conveniente para este fin utilizar un programa de elementos finitos, para conseguir un valor de frecuencia natural correcto, sin embargo en las etapas de diseño resulta fácil y rápido usar un método para determinar por lo menos una aproximada frecuencia

natural del diseño propuesto. El método de Rayleigh llena este cometido. Este método iguala las energías potenciales y cinéticas en el sistema.

La energía potencial aparece bajo forma de energía de deformación en la flecha flexionada, y es máximo en la deflexión mayor. La energía cinética es máxima cuando la flecha en vibración pasa a través de una posición sin flexionar a máxima velocidad.

La energía potencial total almacenada a la deflexión máxima es la suma de las energías potenciales de cada masa agrupada:

$$E_p = \frac{g}{2} (m_1 \delta_1 + m_2 \delta_2 + m_3 \delta_3)$$

Donde las deflexiones se toman positivas, sin importar la forma de la curva de deflexión.

La energía cinética total es la suma de las energías cinéticas individuales:

$$E_k = \frac{\omega_n^2}{2} (m_1 \delta_1^2 + m_2 \delta_2^2 + m_3 \delta_3^2)$$

$$y = \frac{wx}{24EI} (2lx^2 - x^3 - l^3)$$

$$y = \frac{420(0.175)}{24(200 \cdot 10^9)(3.22 \cdot 10^{-6})} (2(0.35)(0.175)^2 - (0.175)^3 - (0.35)^3)$$

$$y = 1.27 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

Con la deflexión hallada se procede a calcular la frecuencia natural para compararla con la frecuencia excitadora.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g \sum_{i=1}^n m_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n m_i \delta_i^2}}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{9.8(8.1 \times 1.27 \cdot 10^{-6})}{(8.1 \times (1.27 \cdot 10^{-6})^2)}}$$

$$\omega_n = 976 \text{ rad / seg}$$

$$\omega_n = 976 \frac{\text{rad}}{\text{seg}} \times \frac{60 \text{ seg}}{1 \text{ min}} \times \frac{1 \text{ rev}}{2\pi \text{ rad}} = 9320 \text{ rev / min}$$

La frecuencia excitadora se calcula a partir del número de revoluciones del rotor, teniendo en cuenta que el número de pulsos se obtiene a partir de que en cada revolución se tienen tres pulsos ya que el número de cuchillas móviles es 3, de esta manera se obtiene lo siguiente:

$$\omega_f = 460 \text{ rpm} \times 3 = 1380 \text{ rpm}$$

La relación de la frecuencia natural de vibración y la frecuencia excitadora tiene el siguiente valor:

$$\frac{\omega_n}{\omega_f} = \frac{9320}{1380} = 6.8$$

Este margen es cómodo y es recomendado para este tipo de diseños ya que se evita que haya resonancia.

6.2. Implementación de los Cambios.

Para poder implementar los cambios debe diseñarse los distintos elementos mecánicos en base a las fuerzas y esfuerzos a los que esta sometido el rotor.

Soldadura.

El diseño de la altura de la garganta para la unión soldada se calcula en base al torque al que esta sometido el árbol de transmisión.

El valor del torque es 230N-m.

Entonces la altura se obtiene de la siguiente manera, para análisis estático:

$$J_u = 2\pi r^3 (0.707 h)$$

$$\tau = \frac{Tr}{J_u}$$

$$n = \frac{S_{sy}}{\tau}$$

$$J_u = 2\pi(0.045)^2(0.707h)$$

$$J_u = 4.05 * 10^{-4} h$$

$$\tau = \frac{230(0.045)}{4.05 * 10^{-4} h}$$

$$\tau = \frac{25556}{h}$$

El acero de transmisión es SAE 4140 que tiene un valor de $S_y=421\text{MPa}$ y un $S_{ut}=655\text{MPa}$. El factor de seguridad tomado para el análisis es 3.

$$\tau = \frac{0.577(421 * 10^6)}{3}$$

$$\tau = 81\text{MPa}$$

$$h = \frac{25556}{\tau}$$

$$h = \frac{25556}{81 * 10^6}$$

$$h = 0.3\text{mm}$$

De la misma manera se procede al análisis para verificar que la unión soldada no falla por fatiga.

Se requiere entonces hallar un factor de seguridad para fatiga y las fórmulas están dadas de la siguiente manera:

$$n = \frac{S_{se} S_{su}}{\tau_a S_{su} + \tau_m S_{se}}$$

$$S_{se} = k_a k_b k_c k_d k_e S'_e$$

$$S'_e = 0.504 S_{ut}$$

$$S_{su} = 0.8 S_{ut}$$

$$\tau_a = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{2}$$

$$\tau_m = \frac{\tau_{max} + \tau_{min}}{2}$$

Para hallar el valor de S_{se} se deben hallar los distintos factores de corrección:

$$k_a = A S_{ut}^b$$

Donde las velocidades se toman como positivas.

Igualando estas ecuaciones se obtiene:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{g \sum_{i=1}^n m_i \delta_i}{\sum_{i=1}^n m_i \delta_i^2}}$$

Para una viga con las características del modelo diseñado, la deflexión se calcula de la siguiente manera:

$$y = \frac{wx}{24EI} (2lx^2 - x^3 - l^3)$$

$$w = 4200 \text{ Kg/m}$$

$$l = 0,35 \text{ m}$$

$$d = 0.09\text{m}$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi(0.09)^4}{64} = 3.22 * 10^{-6} \text{ m}^4$$

Por medio de la fórmula establecida se procede a hallar las deflexiones, que para este caso solo sería la del centro, ya que es la que produce la máxima deflexión.

Para un árbol de transmisión maquinado se tienen los siguientes valores de A y b:

$$A=4,51 \text{ y } b=-0,265$$

$$k_a = 4.51(655)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.8$$

El factor de tamaño k_b para diámetros mayores a 51mm, es de 0,65. Como se tiene en este caso el diámetro de 90mm.

El factor de carga k_c es igual a 0.577 para árboles sometidos a torsión.

El factor de temperatura k_d es igual a 1 ya que no se trabaja a temperaturas moderadas.

Por último se obtiene el valor del concentrador de esfuerzo debido al cambio de sección en el árbol. Los valores requeridos para usar la figura anexa al final son los siguientes:

$$\frac{r}{d} = \frac{5}{70} = 0.07$$

$$\frac{D}{d} = \frac{90}{70} = 1.3$$

De esto se obtiene un valor de concentrador de esfuerzo $k_{ts} = 1,5$ y el valor de k_f es:

$$k_f = \frac{1}{1.5} = 0.67$$

$$S'_e = 0.504(655) = 330.12 \text{ MPa}$$

Con estos resultados obtenidos para los factores de corrección obtengo el límite de resistencia a la fatiga:

$$S_{se} = 0.8(0.65)(0.577)(1)(0.67)(330.12)$$

$$S_{se} = 66.4 \text{ MPa}$$

$$S_{su} = 0.8(655)$$

$$S_{su} = 524 \text{ MPa}$$

El valor del esfuerzo máximo es de 81MPa y el esfuerzo mínimo al que esta sometido es de 0MPa, se hallan entonces los valores de esfuerzo alternante y medio.

$$\tau_a = \frac{81 - 0}{2} = 40.5 \text{ MPa}$$

$$\tau_m = \frac{81 + 0}{2} = 40.5 \text{ MPa}$$

Con los resultados obtenidos se procede a hallar el factor de seguridad para el análisis por fatiga:

$$n = \frac{66.4(524)}{40.5(524) + 40.5(66.4)}$$

$$n = 1.5$$

Esto muestra que la altura hallada de 0.3mm puede ser usada y que no fallará, pero se trata de un valor pequeño que no se podría lograr en la práctica y el valor recomendado en estos casos es de 6mm para la altura de la garganta.

Diseño de la Chaveta.

Como es ya conocido en el diseño de una chaveta realiza el análisis de falla por cortante y por aplastamiento.

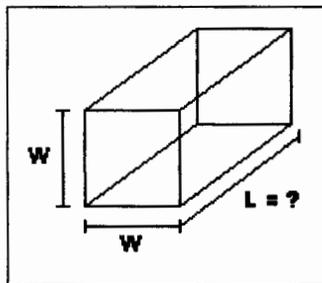


Figura 6.21: Diseño de la Chaveta

El Acero ASTM A36 puede usarse para este diseño, este tiene las siguientes propiedades:

$$S_y = 240\text{MPa}$$

$$S_{sy} = 120\text{MPa}$$

Diseño por cortante:

El esfuerzo cortante es determinado de la siguiente manera:

$$\tau = \frac{S_{sy}}{n}$$

$$\tau = \frac{F}{A}$$

El torque ya conocido de 200N-m y $w = 22\text{mm}$ es usado para calcular la fuerza requerida en base al diámetro del árbol que es de 75mm.

Igualando las ecuaciones anteriores utilizando un factor de seguridad igual a 4 se obtiene el valor de la longitud de la chaveta:

$$\frac{S_{sy}}{n} = \frac{F}{A} = \frac{T}{wl}$$

$$l = \frac{Fn}{S_{sy} w} = \frac{230}{(0.022)120 * 10^6} 4$$

$$l = 0.01\text{m}$$

Aplastamiento:

$$\sigma = \frac{S_y}{n} = \frac{F}{A}$$

$$\frac{S_y}{n} = \frac{F}{A} = \frac{F}{\frac{w}{2}l}$$

$$l = \frac{2Fn}{S_y w} = \frac{2(6600)(4)}{240 * 10^6 (0.022)}$$

$$l = 0.01m$$

Pernos.

El diseño de pernos se presenta a continuación, se realiza el análisis cuando las cuchillas trabajan con carga y cuando trabajan sin carga, ya que lo que se desea obtener son los esfuerzos cortantes y normales por medio de las siguientes expresiones:

$$\tau = \frac{F_x}{A_r}$$

$$\sigma = \frac{F_y}{A_t}$$

Para proceder con estos valores a calcular los esfuerzos de Von Mises:

$$\sigma' = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2}$$

Y luego se obtiene el factor de seguridad:

$$n = \frac{S_y}{\sigma}$$

El análisis para este caso solo se realiza estáticamente ya que, por la forma en que las cuchillas se adaptan a los soportes, el perno esta sometido a compresión.

Para el análisis se toma un perno de grado SAE 5, con un diámetro de 16mm, que esta hecho de un acero de mediano carbono templado y revenido.

Las especificaciones del perno escogido son las siguientes:

$$S_p = 587\text{MPa}$$

$$S_{ut} = 828\text{MPa}$$

$$S_y = 635\text{MPa}$$

$$D_t = 0.563\text{m}$$

$$D_r = 0.0127\text{m}$$

$$A_t = 0.00014\text{m}^2$$

$$A_r = \frac{\pi D_r^2}{4}$$

$$A_r = \frac{\pi(0.0127)^2}{4}$$

$$A_r = 0.00013\text{m}^2$$

El valor de la fuerza resultante que soportan los pernos debido a la fuerza de inercia producido por la masa de las cuchillas se da a continuación:

$$F_2 = m_c r \omega^2$$

$$F_2 = 8.5(0.116)(48)^2$$

$$F_2 = 2272 N$$

Las componentes de la fuerza resultante se obtienen así:

$$F_{2x} = 2272 \text{sen} 48$$

$$F_{2x} = 1700 N$$

$$F_{2y} = 2272 \text{cos} 48$$

$$F_{2y} = 1520 N$$

Para el cálculo de esfuerzos se hallan las fuerzas resultantes y el punto crítico se localiza en las cuchillas que no están cortando ya que la fuerza en el eje x no se contrarresta con la fuerza que genera el impacto al cortar el plástico.

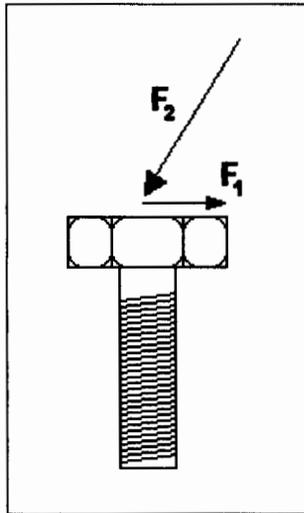


Figura 6.22: Análisis de Fuerzas en el Perno.

Para diseño de pernos, tanto estático como por fatiga, se recomienda un valor de precarga dado por la ecuación:

$$F_i = 0.75 F_p$$

Esta ecuación se usa para conexiones reutilizables, donde:

$$F_p = A_t S_p$$

El valor de precarga se suma al valor resultante de la fuerza en el eje y,

El valor de F_p es:

$$F_p = 0.00014(587 * 10^6)$$

$$F_p = 82180 N$$

Entonces el valor de la precarga es:

$$F_i = 0.75(82180)$$

$$F_i = 61635 \text{ N}$$

Las fuerzas resultantes para el eje x como para el eje y son:

$$F_x = 1700 \text{ N}$$

$$F_y = 1520 + 61635$$

$$F_y = 63200 \text{ N}$$

Por último se obtienen los esfuerzos y el factor de seguridad:

$$\tau = \frac{1700}{0.00013}$$

$$\tau = 13.1 \text{ MPa}$$

$$\sigma = \frac{63200}{0.00014}$$

$$\sigma = 452 \text{ MPa}$$

$$\sigma' = \sqrt{452^2 + 3(13.1)^2}$$

$$\sigma' = 453 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{635}{453}$$

$$n = 1.4$$

Rodamientos.

Para la selección de rodamientos cuando la transmisión de potencia es mediante poleas se deben tomar las siguientes consideraciones.

Para el trabajo que el molino realiza las normas recomiendan que los rodamientos sean cambiados cada 20000 horas. Conociendo entonces este valor de vida útil se debe obtener el valor de carga dinámica para la selección.

La fórmula para obtener la vida ajustada del rodamiento se obtiene así:

$$L_{nah} = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C}{P} \right)^p$$

Donde a_1 es un valor de ajuste por confiabilidad, a_2 es un valor de ajuste por material y a_3 es un valor de ajuste por condiciones de operación. El valor de P es la carga total a la que van a estar sometidos los rodamientos y $p = 3$ para rodamientos de bolas.

Para calcular el valor de P que es la carga estática que puede soportar el rodamiento, se debe tener en cuenta lo siguiente: La carga tangencial sobre las poleas se calcula mediante la siguiente expresión:

$$K_t = \frac{19.1 * 10^6 * HP}{D_p * n}$$

Donde D_p es el diámetro de la polea que transmite la potencia y su valor es de 155mm.

$$K_t = \frac{19.1 * 10^6 * 15}{155 * 1160} = 1593.5 N$$

Para transmisiones de potencia por poleas se considera un factor cuando las cargas de vibración o choque son tomadas en consideración, como en este caso.

$$K_r = f_b K_t$$

Donde f_b es el factor de correa, y para una correa en V se tiene un valor de 2.

$$K_r = 2(1593.5) = 3187 N$$

Es importante analizar también el factor de carga, ya que los datos teóricos obtenidos son muchas veces menores que los datos reales que se obtienen cuando la máquina está operando.

$$K = f_w K_r$$

El valor de f_w es igual a 1.5 para molinos.

$$K_r = 1.5(3187) = 4781N$$

La carga a la que está sometida el árbol es de 4781N. A esto también se suma la fuerza que ejerce la masa de las poleas que es igual a 882N, ya que la polea tiene una masa de 90Kg.

Ahora se procede a analizar el árbol con las cargas a las que está sometido.

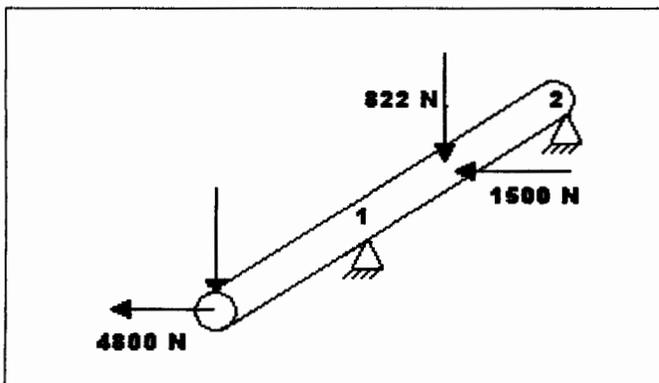


Figura 6.23: Análisis de Fuerzas para selección de Rodamientos.

Los dos puntos dan como resultado lo siguiente:

TABLA 6

PUNTOS CRITICOS ANALIZADOS PARA LA SELECCIÓN DE RODAMIENTOS

Punto 1	Punto 2
$R_x = 3081N$	$R_x = 3219N$
$R_y = 1289N$	$R_y = 34N$

El punto 2 es el más crítico y la fuerza resultante es de:

$$F_r = \sqrt{3081^2 + 1289^2} = 3340N$$

Este es el valor de la carga requerido, procedo entonces a calcular la carga dinámica.

$$L_{nah} = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C}{P} \right)^p \times \frac{10^6}{60n}$$

$$C = \sqrt[3]{\frac{n_{horas} \times F^3 \times 60n}{a_1 a_2 a_3 \times 10^6}}$$

Para una confiabilidad del 95% se tiene un valor de $a_1 = 0.62$.

Para procesos en los que se usan materiales comunes como el acero el factor $a_2 = 1$.

El valor $a_3 = 1$ para temperaturas de trabajo menores a 150°C como es el caso.

$$C = \sqrt[3]{\frac{20000 \times 3340^3 \times 60(460)}{1(1)(0.62) \times 10^6}}$$

$$C = 32131\text{N}$$

Para este valor de carga dinámica y el valor de 75mm de diámetro el rodamiento oscilante de bolas tiene una denominación FAG 2217.

Se escogió un rodamiento oscilante de bolas porque es autoorientable y puede y puede compensar errores de alineación y flexiones en el árbol.

Los soportes para estos rodamientos tienen la denominación FAG SNE 517 Y los manguitos de fijación FAG H317.

Es conveniente hallar el factor de seguridad mínimo requerido en las condiciones de operación que se tiene, para el caso el factor de seguridad mínimo es 1. Este se obtiene de la siguiente manera:

$$S_o = \frac{C_o}{P_{o\max}}$$

Donde C_0 es la capacidad de carga estática del rodamiento que para el escogido es de 49000N y $P_{0 \max} = 3340$ N (valor hallado anteriormente)

$$S_0 = \frac{49000}{3340} = 14.7$$

Este es un valor cómodo que denota que la selección hecha es la correcta.

Bandas.

Para seleccionar el número de bandas se toma en consideración que se tiene las dimensiones de las poleas y las velocidades de rotación. Para poder usar las tablas más fácilmente se tomarán los valores de los diámetros de las poleas en pulgadas, ya que las tablas usadas se encuentran en Sistema Inglés. Los datos a usar son los siguientes:

$$D = 390\text{mm} = 15.35''$$

$$d = 155\text{mm} = 6.1''$$

$$N = 1160\text{rpm}$$

$$n = 460\text{rpm}$$

$$C = 800\text{mm} = 31.5''$$

Donde:

C = Distancia entre centros

Por las condiciones geométricas que se tienen la recomendación es que se use una banda de sección B.

$$L_p = 2C + 1.57(D + d) + \frac{(D - d)^2}{4C}$$

$$L_p = 2(31.5) + 1.57(15.35 + 6.1) + \frac{(15.35 - 6.1)^2}{4(31.5)} = 96.8 \text{ pulg}$$

La velocidad lineal para el cálculo de cuantos bandas se requieren se obtiene así:

$$V = \frac{\pi d N}{12}$$

$$V = \frac{\pi(6.1)(1160)}{12} = 1855 \text{ ft / min}$$

Con esta velocidad se obtiene que cada banda de sección B absorberá 3.46 HP, pero con el factor de corrección por longitud, que para el caso es 0.99 se tiene el siguiente valor de potencia:

$$HP = 0.99(3.46) = 3.43$$

Como no se esta usando toda la potencia del motor sino solo 8KW es decir 10HP, se necesitarán:

$$N = \frac{10}{3.43} = 2.9$$

Es decir un total de tres bandas de sección B, y no 5 cuando se tenía el caso en que se consumían 15HP.

6.3. Pruebas y Ajustes.

Todas las mejoras recomendadas están siendo ejecutadas por el propietario del molino. Luego de la obtención y fabricación de los elementos mecánicos anteriormente descritos y una vez ensamblado el rotor se procede al balanceamiento dinámico del mismo, esto se realiza mediante un análisis de vibraciones. El desbalance residual debe estar dentro de los límites recomendados por el ASME, los cuales dependen de la masa del rotor y velocidad de balanceamiento.

Luego de balancear el rotor se procede al montaje del mismo en el molino existente. Todos los elementos mecánicos deben estar perfectamente alineados para evitar fallas prematuras de los mismos, las bandas deben tener protección para evitar accidentes.

Se debe verificar que los cojinetes estén correctamente engrasados para prevenir pérdidas de energía.

Las cuchillas deben ser colocadas en diferentes ángulos para encontrar cual es la posición óptima de las mismas, de manera que

se obtenga el máximo rendimiento. Esta prueba todavía no ha podido ser realizada ya que la fabricación de los elementos mecánicos no ha concluido.

6.4. Costos.

Para implementar los cambios anteriormente descritos, se necesita realizar una inversión económica justificada con los beneficios que se obtienen con el nuevo diseño.

Los elementos mecánicos que se van a cotizar son los siguientes:

Árbol de transmisión.

Soportes de cuchillas.

Cuchillas.

Pernos y Rodamientos.

Bandas.

Cabe señalar que estos son los elementos constitutivos del rotor en los que se basa el rediseño del molino.

Árbol de transmisión.

El material a utilizar es una barra circular de acero AISI 4340, de 90mm de diámetro y 700 mm de longitud. La masa total es de:

El costo total del árbol de transmisión es:

$$\text{Costo(\$)} = 193 + 132 = 325$$

Soportes de Cuchillas.

El material para los soportes de las cuchillas es acero ASTM A36, y la masa total necesaria para su fabricación es de 66kg, ya que cada torta que se utiliza para fabricar los soportes tiene 300mm de diámetro y un espesor de 38mm, lo cual da una masa de 22Kg. El precio por kilogramo de este material es de \$1.30. Es decir el costo total es:

$$\text{Costo(\$)} = 66 \times 1.30 = 86$$

El costo del maquinado se detalla a continuación:

TABLA 8

COSTO DE FABRICACION DE LOS SOPORTES DE LAS CUCHILLAS

PROCESO	HORAS DE USO	COSTO / HORA	COSTO
Maquinado	60	\$ 6	\$ 360

El costo total de los soportes para las cuchillas es de:

$$\text{Costo(\$)} = 360 + 86 = 446$$

Cuchillas.

Para las cuchillas el material usado es AISI 01 descrito anteriormente, con una sección transversal de 15x82 mm, la masa de cada cuchilla es 8.5Kg, esto da una masa total de 25.5Kg.

El costo por cada Kilogramo de este material es \$7, con lo que se obtiene un costo total de:

$$\text{Costo(\$)} = 25.5 \times 7 = 179$$

El costo del maquinado se detalla a continuación:

TABLA 9

COSTO DE FABRICACION DE LAS CUCHILLAS

PROCESO	HORAS DE USO	COSTO / HORA	COSTO
Maquinado	38	\$ 6	\$ 228
Rectificado (luego de TT)	13	\$ 6	\$ 78
TOTAL			\$ 306

Estas cuchillas son sometidas a un tratamiento de temple cuyo costo es de \$4,5 por kilogramo, es decir:

$$\text{Costo(\$)} = 25.5 \times 4.5 = 115$$

El costo total de las cuchillas es de:

$$\text{Costo(\$)} = 179 + 306 + 115 = 600$$

Pernos y Rodamientos.

El número total de pernos es 6 y cada perno tiene un costo de \$1. El costo total de los pernos es:

$$\text{Costo(\$)} = 6 \times 1 = 6$$

Los rodamientos seleccionados tienen un costo de \$142 cada uno, esto es:

$$\text{Costo(\$)} = 142 \times 2 = 284$$

Los soportes tienen un costo de \$110 cada uno y los manguitos de sujeción tienen un costo de \$31 cada uno.

$$\text{Costo(\$)} = (110 \times 2) + (31 \times 2) = 282$$

Por tanto el total de los pernos y rodamientos es:

$$\text{Costo(\$)} = 6 + 282 + 284 = 572$$

Bandas.

El cálculo del número de bandas da como resultado que se necesitan tres bandas de sección B, cada banda tiene un costo de \$15, entonces,

$$\text{Costo(\$)} = 3 \times 15 = 45$$

El costo total por bandas es \$45.

Ensamble.

Para ensamblar el rotor se necesita soldar los soportes al árbol de transmisión, el costo de la soldadura por cada 25mm de diámetro de árbol (incluidos cordones de penetración y acabado) es de \$3, el diámetro del árbol es de 90mm y en total se realizarán 6 uniones.

Entonces el total es:

$$\text{Costo(\$)} = \frac{3}{25} \times 6 \times 90 = 65$$

La suma total de costos se muestra en la siguiente tabla:

TABLA 10

COSTO TOTAL DE FABRICACION DEL NUEVO ROTOR

Elementos	COSTO
Árbol de Transmisión	\$ 325
Soportes de Cuchillas	\$ 446
Cuchillas	\$ 600
Pernos y Rodamientos	\$ 572
Bandas	\$ 45
Ensamble	\$ 65
Balanceo del Rotor	\$ 120
SUBTOTAL	\$ 2173
IVA 12%	\$ 261
TOTAL	\$ 2434

CAPITULO 7

7. ANALISIS COSTO-BENEFICIO.

A continuación se analizarán los beneficios que se obtienen al poner en práctica las mejoras recomendadas en el capítulo anterior.

El primer beneficio que se puede notar es que el rotor, en el cual enfocamos nuestras mejoras, es menos pesado, lo que significa que se utilizará menos material para construir el mismo, por tanto, la inversión inicial reducirá. Además, la inercia del sistema se redujo en un 35%, lo que significa que la energía necesaria para mover la masa a la velocidad requerida se redujo en igual proporción, ya que hay una relación lineal entre estas variables.

Con la nueva forma de los soportes para las cuchillas mostrada en la siguiente figura se obtiene mayor área de agarre de material en comparación con los soportes existentes en el molino actual. Otra ventaja

de los nuevos soportes es que el ángulo de incidencia de las cuchillas mejora la capacidad de corte.

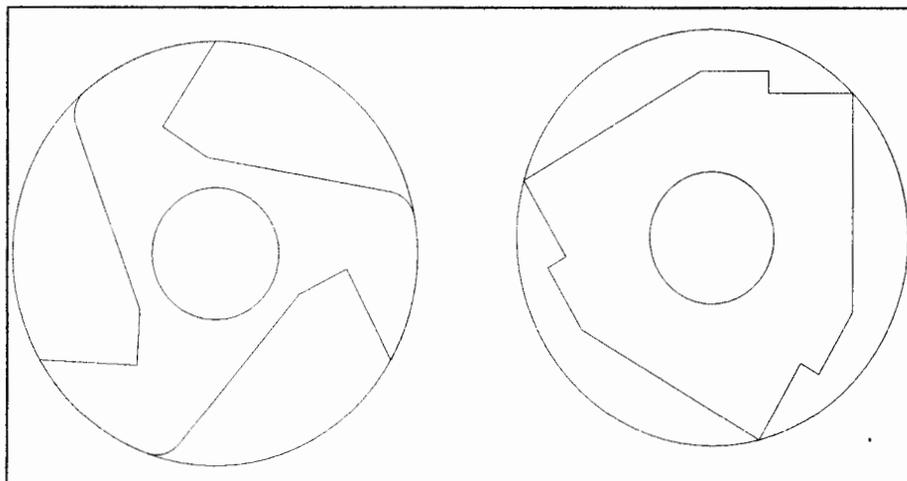


Figura 7.1: Comparación de Ventajas en cuanto áreas de los dos soportes.

El rediseño fue hecho en base a una capacidad de 200 kg/h, por tanto, teóricamente, se obtiene un aumento de 80 kg/h, lo cual representa un 67%.

El costo de un molino nuevo con similares características es de aproximadamente \$ 8,000, en cambio es costo total de las mejoras es de alrededor de \$2500.

Considerando que el KW/h tiene un costo de \$0.08 y que solo se espera requerir 6kW en lugar de 10KW para el funcionamiento del molino, se tendrá un ahorro de:

$$\$ = 0.08 * 4 = 0.32$$

A esto se suma que se van a producir 200Kg/h en lugar de 120Kg/h, lo que da una diferencia de 80Kg/h, esto a un costo de \$0.09 el kilogramo da un valor total de:

$$\$ = 0.09 * 80 = 7.20$$

La siguiente tabla muestra el beneficio económico obtenido debido a las mejoras implementadas:

TABLA 11

AHORRO TOTAL POR CADA HORA DE TRABAJO

AHORRO DE ENERGÍA	0.32 \$/h
AUMENTO DE PRODUCCION	7.20 \$/h
TOTAL	7.52 \$/h

Con estos resultados se obtiene el número de horas que se debe trabajar para recuperar la inversión inicial de \$2500.

$$\# \text{ horas} = \frac{2000}{7.52} = 332$$

Lo que significa que la inversión se puede recuperar en 40 días laborables, trabajando 8 horas diarias a la máxima capacidad.

CAPITULO 8

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES.

- © Los programas de educación para preservar nuestro ambiente, han logrado que el Reciclaje de los Plásticos tome auge en los últimos tiempos. Es por esto que la maquinaria usada para procesar el plástico reciclado es aún motivo de investigación. En nuestro país las empresas que procesan plástico tienen molinos similares al que fue tema de estudio de esta tesis en cuanto a estructura como a rendimiento.

- © La cantidad de residuos plásticos generados demuestra que siempre se contará con materia prima y que esta maquinaria trabajará todo el tiempo contribuyendo así al cuidado de nuestro medio ambiente.

- © El área de los soportes diseñados permitirá que el material reciclado permanezca el menor tiempo posible en el molino, logrando de esta que se elimine el cisco que constituía un gran problema.

- © La aplicación en la práctica del diseño del nuevo rotor es una inversión pequeña si se compara con los beneficios que se obtendrán a futuro, se logrará obtener mayor cantidad de materia prima para ser procesada y se reducirá consumo de energía.

- © El proceso de construcción no necesita el uso de tecnología avanzada y está siendo construido actualmente.

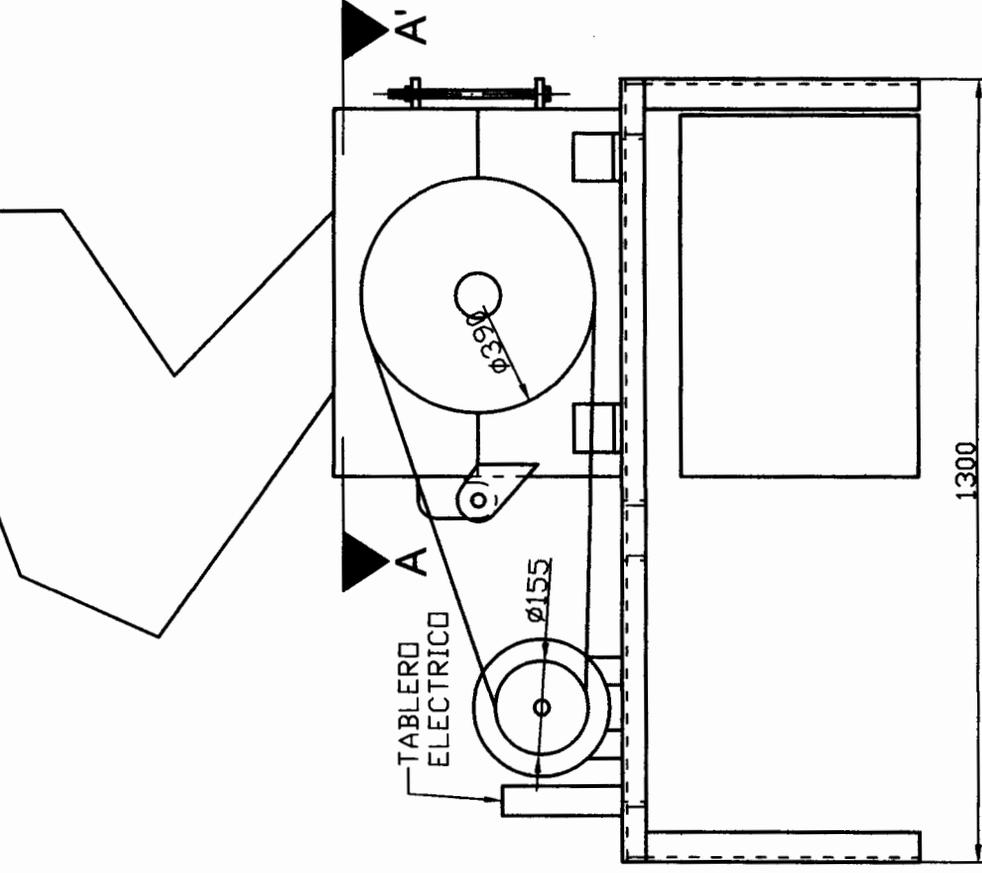
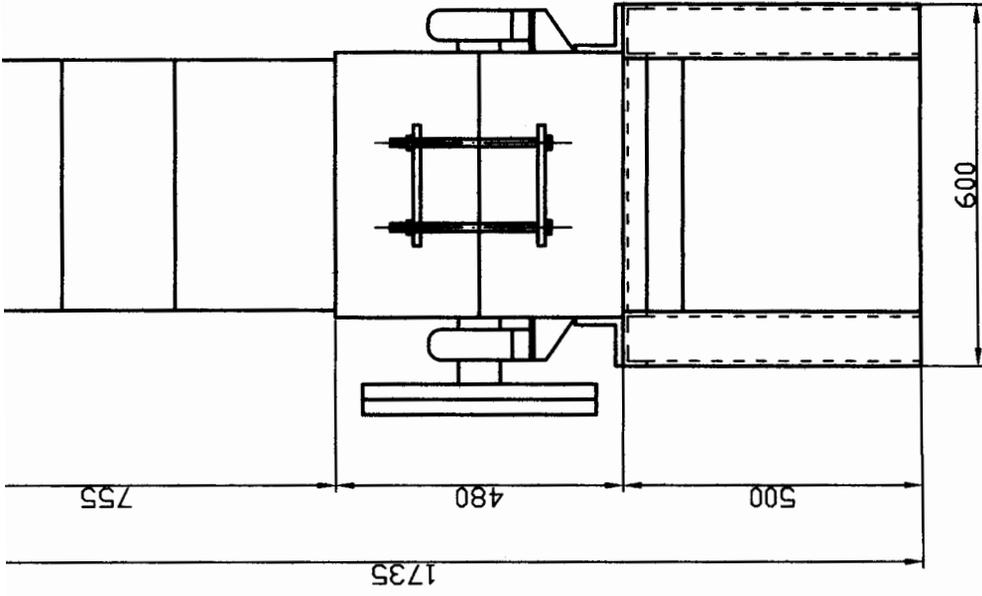
- © El costo de inversión es recuperado rápidamente como ya se demostró, lo cual indica que el proyecto es viable y económicamente rentable.

RECOMENDACIONES.

- ® Las cuchillas están hechas de un acero para trabajo en frío AISI 01, pero estas tienden a fallar rápidamente, como recomendación se puede someter la cuchilla a un tratamiento de nitruración luego de ser

maquinadas, de esta manera se logra una mayor tenacidad y por tanto mayor tiempo de vida.

- ® Se puede acotar a lo dicho ya de las cuchillas que se podría aumentar el espesor de las mismas, se recomendaría 18 ó 22mm para que de esta manera aumenten su vida útil.
- ® Luego de cálculos realizados en los que se demuestra que la energía requerida para la operación del molino rediseñado es menor que la requerida para el molino existente, cuando el interesado realice las pruebas que así lo demuestren, se puede recomendar que el motor sea disminuido a 6 kW, lo cual concuerda con la curva mostrada en el capítulo 5.
- ® Para dar mayor versatilidad al molino se puede hacer un diseño de tolva deslizante, de tal forma que esta permita la alimentación perpendicular al círculo de corte así como la alimentación tangencial, de esta manera se pueden moler tortas y botellas, con el mismo molino.



TABLERO ELECTRICO

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCION

ESPOL

Plano: 1

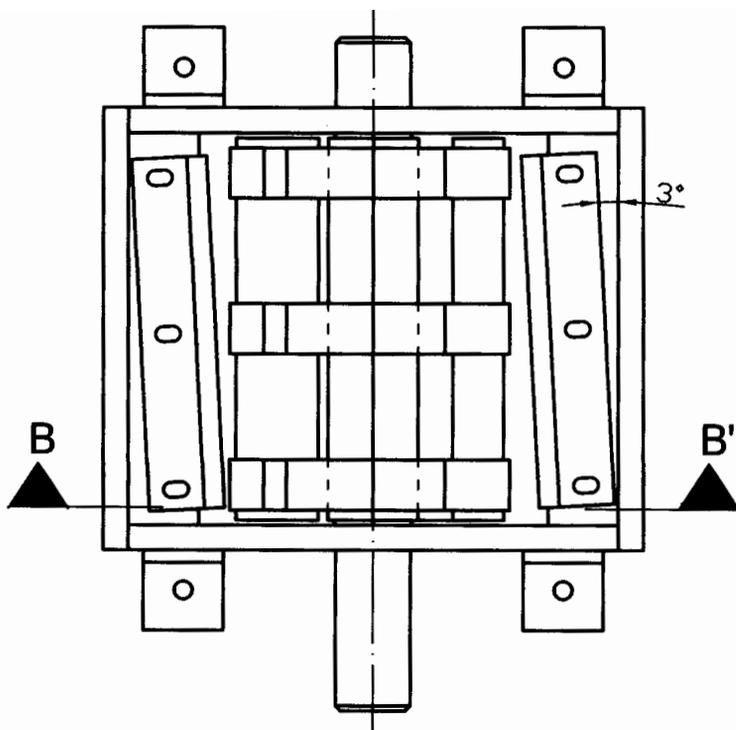
Sistema:



ESCALA: 1:12.5

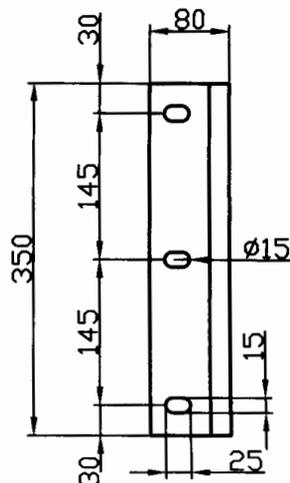
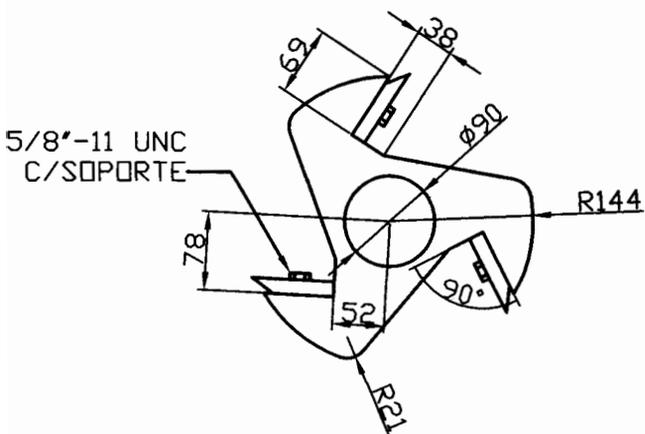
ENSAMBLE

Nombre: MARIA ELISA CANTOS MUÑOZ

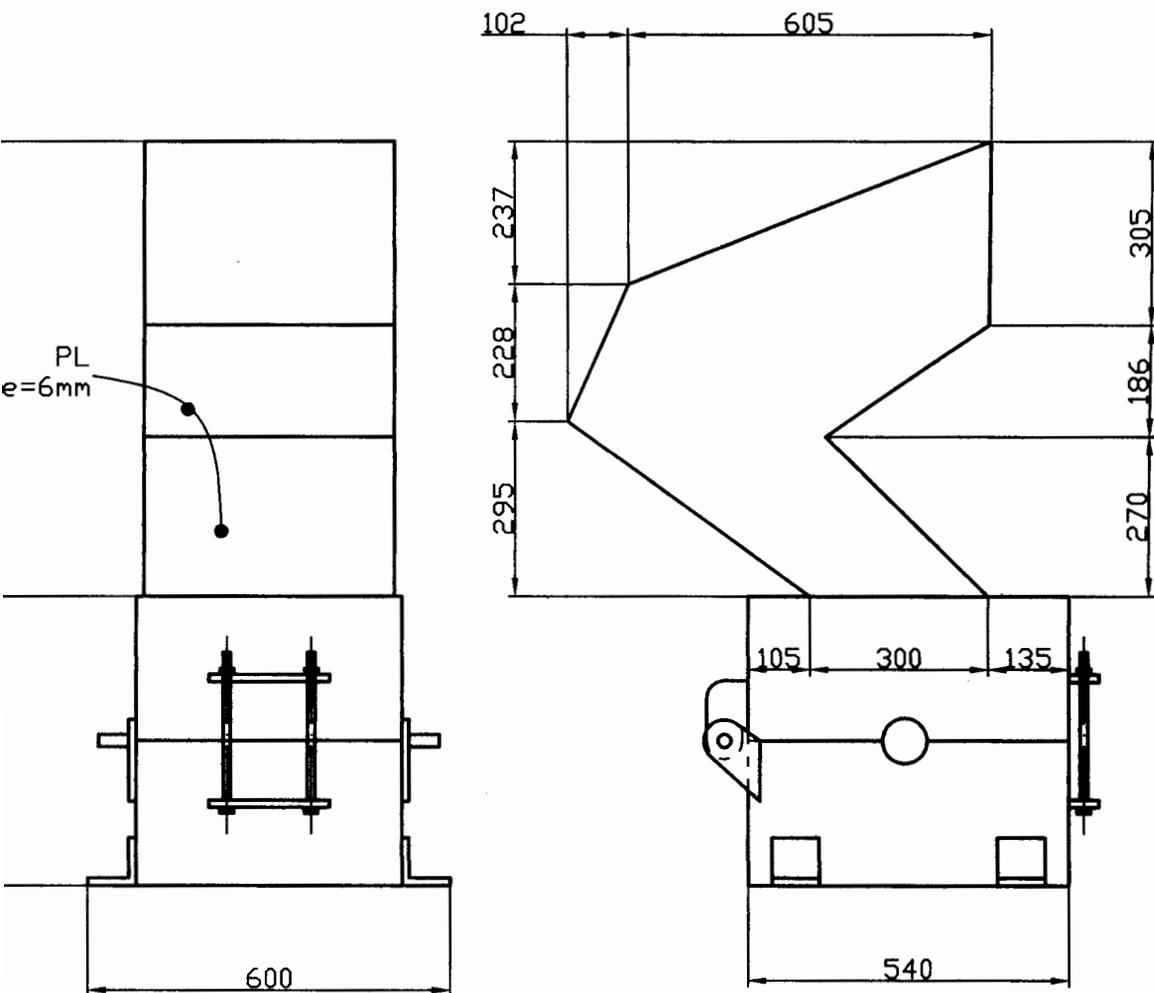


CORTE B-B'

CUCHILLAS

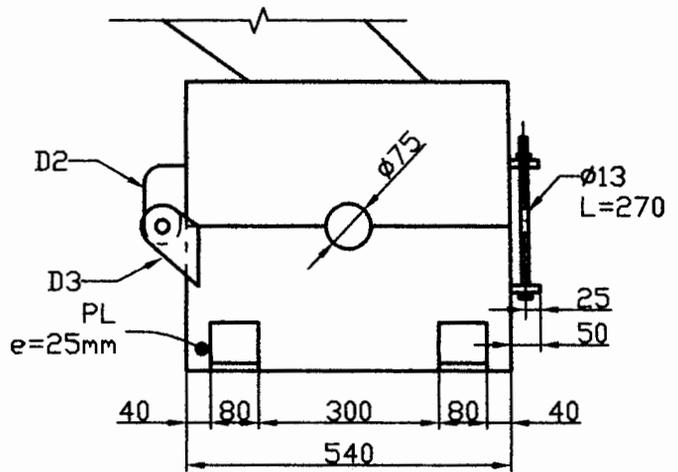
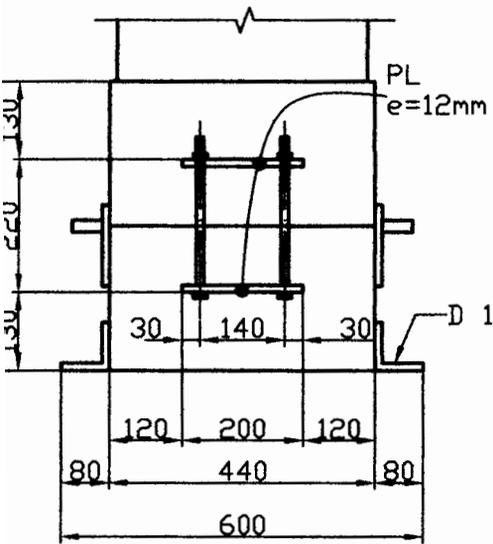


ESPOL		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCION	
Plano: 2	Sistema:	CORTE A-A' (PLANO 1)	
ESCALA: 1:7.5	Nombre: MARIA ELISA CANTOS MUÑOZ		

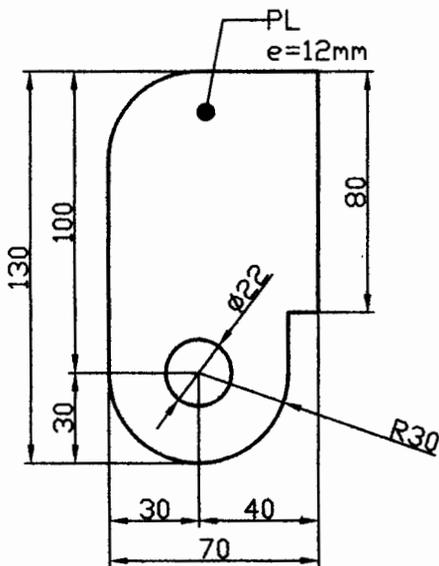


ESPOL		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCION	
Plano: 3	Sistema:	TOLVA	
ESCALA: 1:12.5		Nombre: MARIA ELISA CANTOS MUÑOZ	

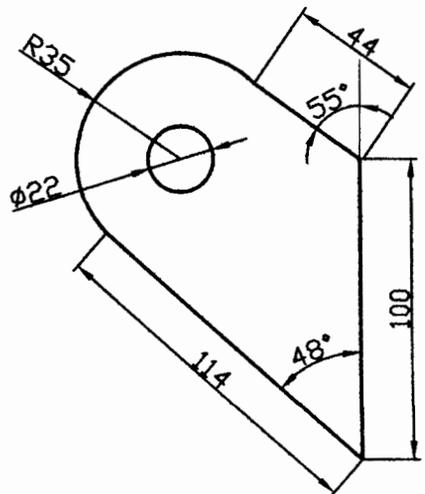
CARCAZA
ESCALA 1:12.5



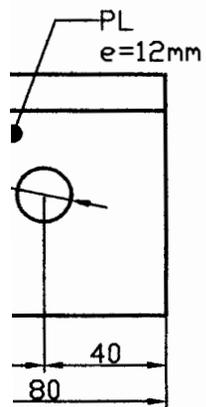
DETALLE D2
ESCALA 1:2.5



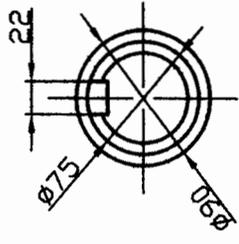
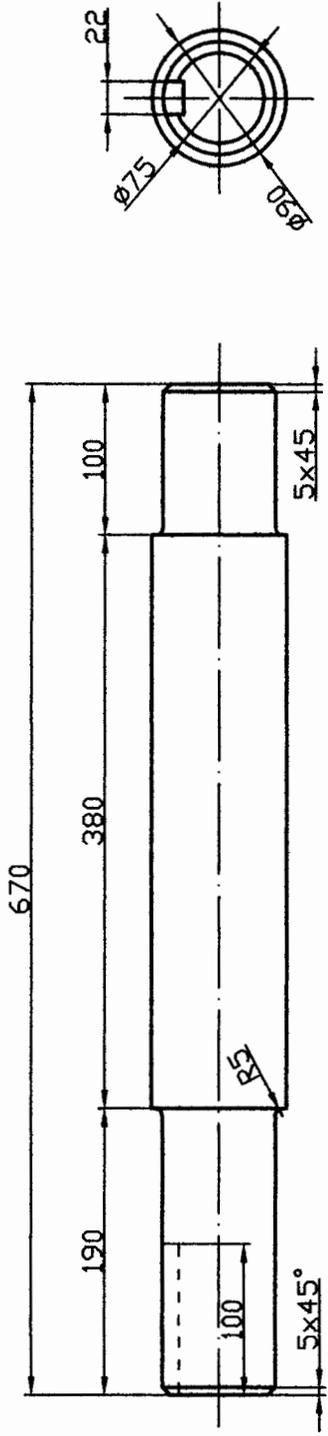
DETALLE D3
ESCALA 1:2.5



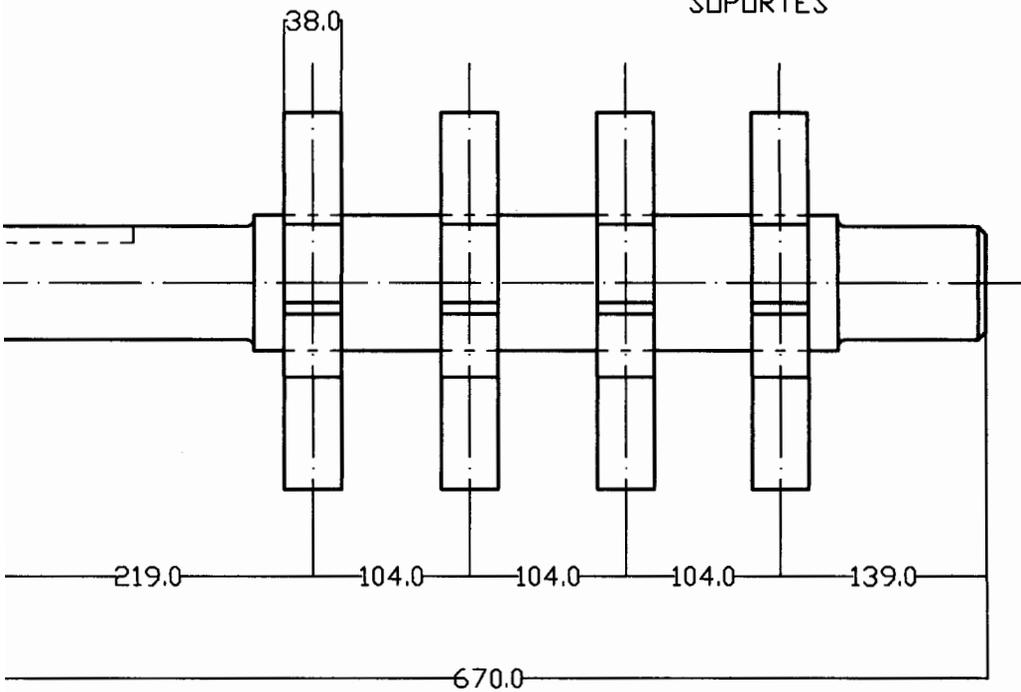
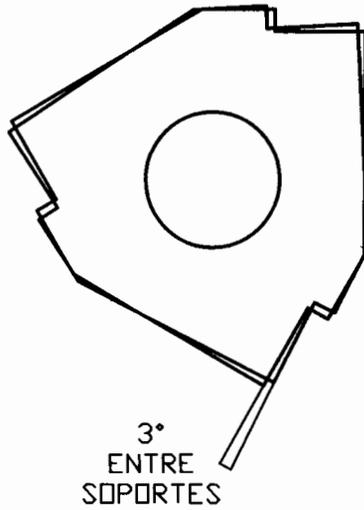
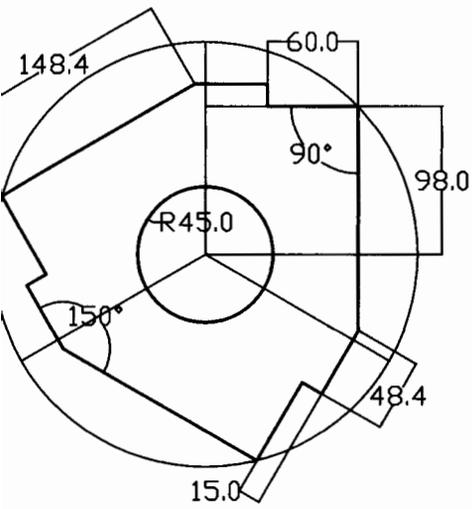
DETALLE D1
ESCALA 1:2.5

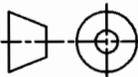


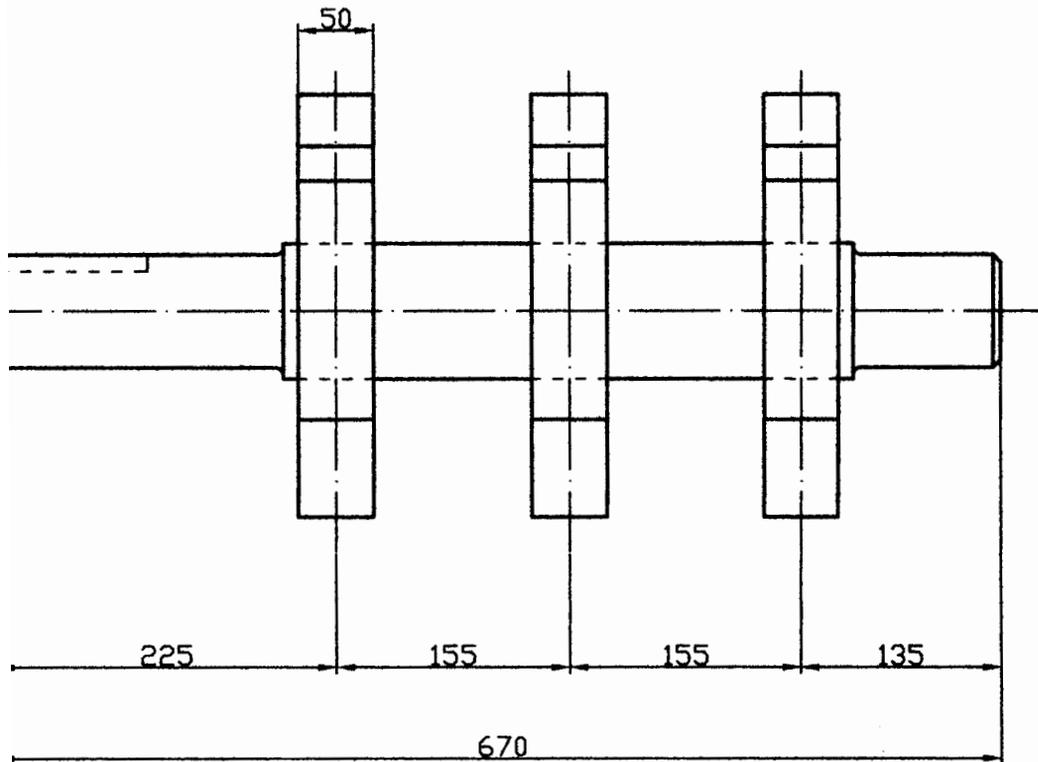
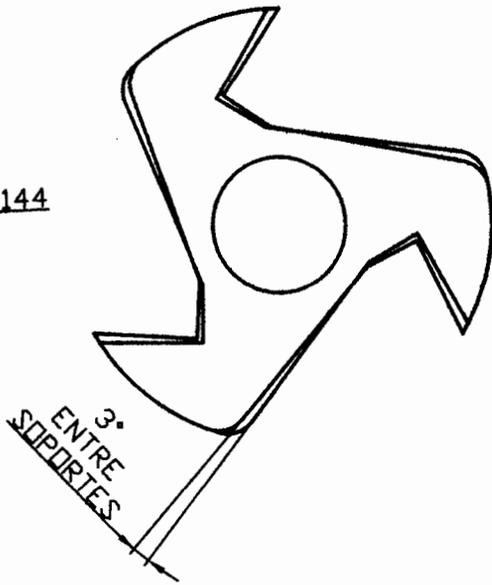
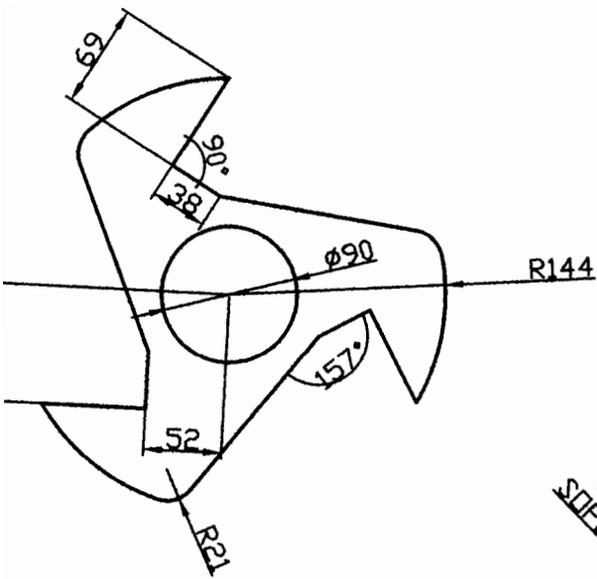
ESPOL		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCION	
Plano: 4	Sistema:	CAMARA DE CORTE	
ESCALA: INDICADAS			



ESPOL		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCION	
Plano: 5	Sistema:	ARBOL DE TRANSMISION	
ESCALA: 1:5		Nombre: MARIA ELISA CANTOS MUÑOZ	

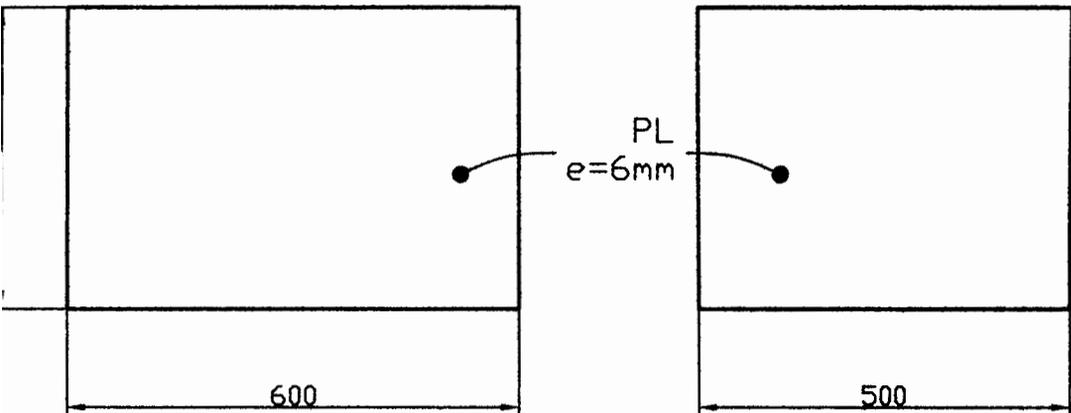


ESPOL		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCION	
Plano: 6	Sistema: 	SOPORTES EXISTENTES	
ESCALA: 1:5	Nombre: MARIA ELISA CANTOS MUÑOZ		

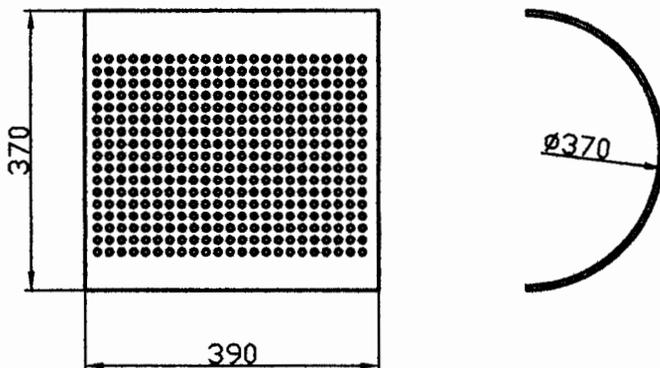


ESPOL		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCION
Plano: 7	Sistema: 	SOPORTES PROPUESTOS
ESCALA: 1:5	Nombre:	MARIA ELISA CANTOS MUÑOZ

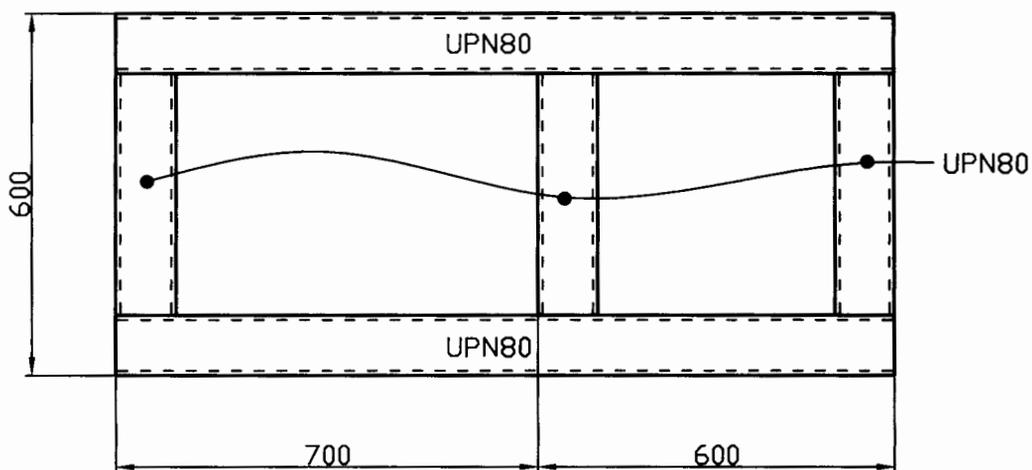
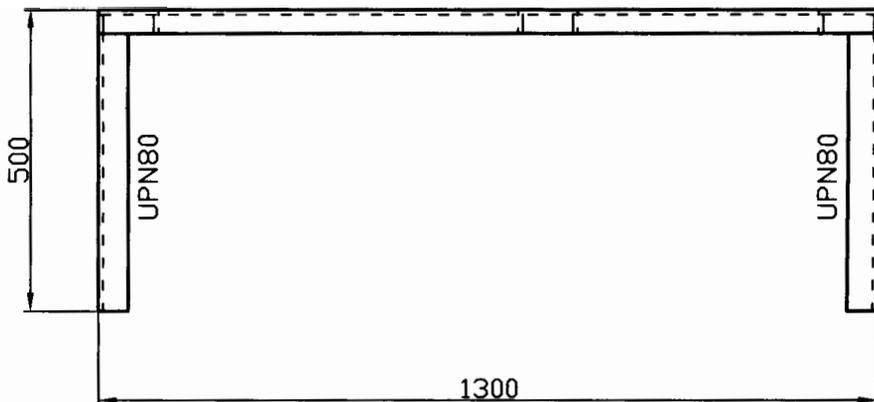
DEPÓSITO DE MATERIAL MOLIDO



MALLA



ESPOL		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCION	
Plano: 8	Sistema:	MALLA Y DEPOSITO	
ESCALA: 1:10	Nombre: MARIA ELISA CANTOS MUÑOZ		



ESPOL		FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y CIENCIAS DE LA PRODUCCION	
Plano: 9	Sistema: 	BASES	
ESCALA: 1:12.5	Nombre: MARIA ELISA CANTOS MUÑOZ		

ANEXOS

ANEXO 1

Datos Estadísticos de Recolección de Basura

COMPOSICION FISICA DE LA BASURA (en peso) M.I. MUNICIPALIDAD DE GUAYAQUIL 1992

TIPO DE DESECHO	%
Putrescibles	58,90
Papel y Cartón	9,70
Plásticos	8,00
Madera	4,70
Metales	2,60
Vidrio	2,40
Textiles	2,20
Des. de Jardín	1,70
Otros *	9,80
TOTAL	100,00

Otros: Comprende los desechos de construcción, tierra y pequeñas cantidades de cueros y cauchos.

FUENTE: PROYECTO RELLENO SANITARIO LAS IGUANAS, MANUAL DE OPERACION Y MANTENIMIENTO

**COMPARATIVO DE COMPOSICION FISICA DE RESIDUOS SOLIDOS
CIUDAD DE GUAYAQUIL
AÑO 1996**

COMPOSICION FISICA		VALORES EN PORCENTAJE	
		FUENTE GENERADORA	DISPOSICION FINAL
CLAVE	SUBPRODUCTOS	PROMEDIO	PROMEDIO
1	ALGODON	0,00	0,00
2	CARTON		
2.1	TETRABRIK	0,11	0,14
2.2	CORRUGADO	0,34	0,68
2.3	OTROS CARTONES	1,66	2,18
3	CUERO	0,05	0,07
4	RESIDUO FINO	1,48	0,65
5	ENVASE DE CARTON ENCERADO	0,00	0,00
6	FIBRA DURA VEGETAL	0,20	0,60
7	FIBRA SINTETICA	0,05	0,38
8	HUESO	0,11	0,38
9	HULE	0,13	0,17
10	LATA DE ALUMINIO	0,06	0,07
11	LOZA Y CERAMICA	0,27	0,10
12	MADERA	0,66	0,54
13	MATERIAL DE CONSTRUCCION	0,20	0,06
14	MATERIAL FERROSO		
14.1	LATA METALICA	0,85	0,79
14.2	ALAMBRE	0,02	0,02
14.3	OTROS	0,08	0,00
15	MATERIAL NO FERROSO	0,00	0,00
16	PAPEL		
16.1	PERIODICO Y REVISTAS	4,09	3,84
16.2	HIGIENICO	2,77	6,54
16.3	BOND Y OTROS	1,47	3,61
17	PANAL DESECHABLE	1,88	2,05
18	PLASTICO PPL CULA	3,84	5,03
19	PLASTICO RIGIDO		
19.1	PET (POLIETILEN TERFALATO)	0,30	0,28
19.2	HOPE (POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD)	0,08	0,33
19.3	PVC (CLORURO DE POLIVINILO)	0,06	0,33
19.4	LDPE (POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD)	0,03	0,00
19.5	PS (POLIESTIRENO)	0,32	0,43
19.6	PP (POLIPROPILENO)	0,19	0,17
19.7	ACETATO DE CELULOSA	0,06	0,03
19.8	NO IDENTIFICADOS	1,02	1,23
20	POLIURETANO	0,07	0,07
21	POLIESTIRENO EXPANDIDO	0,10	0,10
22	RESIDUOS DE JARDINERIA	20,18	24,27
23	RESIDUOS ALIMENTICIOS	39,50	38,01
24	TRAPOS	1,86	1,72
25	VIDRIO DE COLOR		
25.1	AMBAR	0,00	0,70
25.2	ESMERALDA	0,43	0,10
25.3	GEORGIA	0,06	0,45
25.4	PLANO	0,00	0,00
26	VIDRIO TRANSPARENTE	1,48	1,26
27	OTROS	2,02	0,89
	SUBTOTAL	97,95	98,27
	PERDIDAS	2,04	1,73
	TOTAL	100,00	100,00

FUENTE: DIRECCION DE MEDIO AMBIENTE, "ESTUDIO DE UN PROGRAMA DE RECICLAJE EN LA FUENTE Y EN EL SITIO DE DISPOSICION FINAL DE LOS DERECHOS SOLIDOS", REALIZADOS POR CONSORCIO ISTA - CPR, RANCHO SECO #127, MEXICO D.F. TELF. 571-6813 FAX: 571-8745, J.P. ARENAS 322 GUAYAQUIL - ECUADOR TELF. 310-332 FAX: 313-483

Anexo 2.

Propiedades de Algunos Plásticos.

Material	Densidad, g/cm ³	Resistencia a la tensión × 1.000 psi*	Resistencia al impacto, ftz, ft lb/in †	Rigidez dieléctrica, V/mill ‡	Máxima temperatura de uso	
					F	C
Poliétileno:						
Baja densidad	0,92-0,93	0,9-2,5	...	480	100-212	52-100
Alta densidad	0,95-0,96	2,9-5,4	0,4-14	480	175-250	80-120
PVC rígido, clorado	1,49-1,58	7,5-9	1,0-5,6	230	230	110
Polipropileno de propósito general	0,90-0,91	4,8-5,5	0,4-2,2	650	225-300	107-150
Estireno-acrilonitrilo (SAN)	1,08	10-12	0,4-0,5	1,775	140-220	60-104
ABS, propósito general	1,05-1,07	5,9	6	385	160-200	71-93
Acrílico, propósito general	1,11-1,19	11,0	2,3	450-500	130-230	54-110
Colúcido, acetato	1,2-1,3	3-8	1,1-6,8	250-600	140-220	60-104
Poli tetrafluoroetileno	2,1-2,3	1-4	2,5-4,0	400-500	550	288

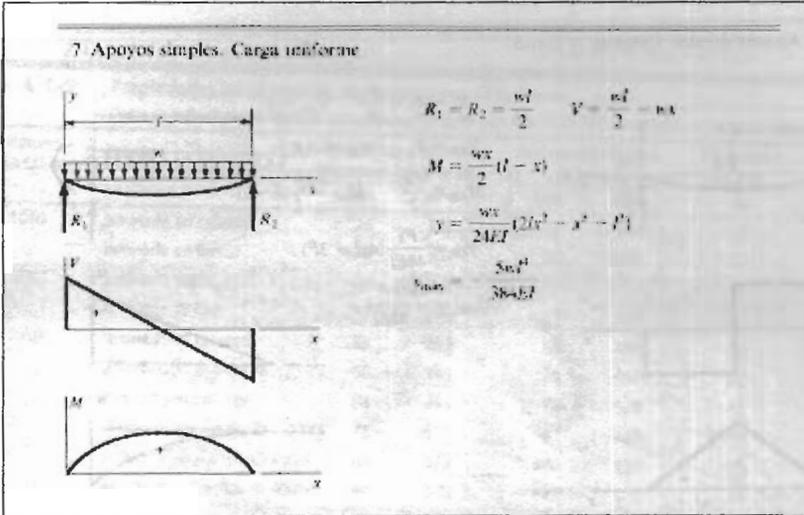
* 1.000 psi = 6,9 MPa.
† Ensayo de impacto Izod. 1 ft - lb/in = 53,38 J/m.
‡ 1 V/mill = 39,4 V/mm.
Fuente: Materials Engineering, mayo 1972.

Material	Densidad g/cm ³	Resistencia a la tensión × 1.000 psi*	Resistencia al impacto, Izod, pie lb/pulg †	Resistencia dieléctrica V/mill ‡	Máxima temperatura de uso (sin carga)	
					F	C
Nylon 6,6	1,13-1,15	9-12	2,0	385	180-300	82-150
Poliacetato, horno	1,42	10	1,4	320	195	90
Policarbonato	1,2	9	12-15	380	250	120
Poliéster:						
PET	1,37	10,4	0,8	...	175	80
PBT	1,31	8,0-8,2	1,2-1,3	590-700	250	120
Oxido de polifenileno	1,06-1,10	7,8-9,6	5,0	400-500	175-220	80-105
Polisulfona	1,24	10,2	1,2	425	300	150
Sulfuro de polifenileno	1,34	10	0,3	595	300	260

* 1.000 psi = 6,9 MPa.
† Ensayo de impacto de Izod. 1 pie-lb/pulg. = 53,38 J/m.
‡ 1 V/mill = 39,4 V/mm.

Anexo 3.

Deflexión una viga con carga distribuida.



120	1.20	1.20
130	1.30	1.30
140	1.40	1.40
150	1.50	1.50
160	1.60	1.60
170	1.70	1.70
180	1.80	1.80
190	1.90	1.90
200	2.00	2.00

Anexo 4.

Propiedades Mecánicas de algunos Aceros.

TABLA C-9 Propiedades mecánicas de algunos aceros al carbono

Datos de varias fuentes. * Valores aproximados. Consulte a los fabricantes de los materiales para información más precisa

Número SAE/AISI	Estado	Limite elástico a la tensión (convencional al 2%)		Resistencia máxima a la tensión		Elongación en 2 in %	Dureza Brinell
		lpsl	MPa	lpsl	MPa		
1010	laminado en caliente	26	179	47	324	28	95
	laminado en frío	44	303	53	365	20	105
1020	laminado en caliente	30	207	55	379	25	111
	laminado en frío	57	393	68	469	15	131
1030	laminado en caliente	38	259	68	469	20	137
	normalizado @ 1 650°F	50	345	75	517	32	149
	laminado en caliente	64	441	76	524	12	149
	templado y revenido @ 1 000°F	75	517	97	669	28	255
	templado y revenido @ 800°F	84	579	106	731	23	302
	templado y revenido @ 400°F	94	648	123	848	17	495
	templado y revenido @ 400°F	94	648	123	848	17	495
1035	laminado en caliente	40	276	72	496	18	143
	laminado en frío	67	462	80	552	12	163
1040	laminado en caliente	42	290	76	524	18	149
	normalizado @ 1 650°F	54	372	86	593	28	170
	laminado en frío	71	490	85	586	17	170
	templado y revenido @ 1 200°F	63	434	92	634	29	192
	templado y revenido @ 800°F	80	552	110	758	21	241
	templado y revenido @ 400°F	86	593	113	779	19	262
1045	laminado en caliente	45	310	82	565	16	163
	laminado en frío	77	531	91	627	12	179
1050	laminado en caliente	50	345	90	621	15	179
	normalizado @ 1 650°F	62	427	108	745	20	217
	laminado en frío	84	579	100	689	10	197
	templado y revenido @ 1 200°F	78	538	104	717	28	235
	templado y revenido @ 800°F	115	793	156	1 089	13	444
	templado y revenido @ 400°F	117	807	163	1 124	9	514
1060	laminado en caliente	54	372	98	676	13	200
	normalizado @ 1 650°F	61	421	112	773	18	229
	templado y revenido @ 1 200°F	76	524	116	800	23	229
	templado y revenido @ 1 000°F	97	669	140	983	17	277
	templado y revenido @ 800°F	111	765	156	1 076	14	311
1095	laminado en caliente	66	455	120	827	10	248
	normalizado @ 1 650°F	72	496	147	1 014	9	13
	templado y revenido @ 1 200°F	80	552	130	896	21	269
	templado y revenido @ 800°F	112	772	176	1 213	12	353
	templado y revenido @ 600°F	118	814	183	1 262	10	375

* SAE Handbook, Society of Automotive Engineers, Warrendale Pa.; Metals Handbook, American Society for Metals, Materials Park, Ohio

Características aproximadas. Consulte a los fabricantes de los materiales para información más precisa.

Número SAE/AISI	Estado	Límite elástico a la tensión (convencional al 2%)		Resistencia máxima a la tensión		Elongación en 2 in %	Dureza Brinell o Rockwell
		kpsi	MPa	kpsi	MPa		
1340	recocido	63	434	102	703	25	204HB
	templado y revenido	100	752	125	862	21	250HB
4027	recocido	47	324	75	517	30	150HB
	templado y revenido	113	779	132	910	12	264HB
4130	recocido @ 1 450°F	52	359	81	558	28	156HB
	normalizado @ 1 650°F	63	434	97	669	25	197HB
	templado y revenido @ 1 200°F	102	703	118	814	22	245HB
	templado y revenido @ 800°F	173	1 193	186	1 282	13	380HB
	templado y revenido @ 400°F	212	1 462	236	1 627	10	41HB
4140	recocido @ 1 450°F	61	421	95	655	26	197HB
	normalizado @ 1 650°F	95	655	148	1 020	18	302HB
	templado y revenido @ 1 200°F	95	655	110	758	22	230HB
	templado y revenido @ 800°F	165	1 138	181	1 248	13	370HB
	templado y revenido @ 400°F	238	1 641	257	1 772	8	510HB
4340	templado y revenido @ 1 200°F	124	855	140	965	19	280HB
	templado y revenido @ 1 000°F	156	1 076	170	1 172	13	360HB
	templado y revenido @ 800°F	198	1 365	213	1 469	10	430HB
	templado y revenido @ 600°F	230	1 586	250	1 724	10	486HB
6150	recocido	59	407	96	662	23	192HB
	templado y revenido	148	1 020	157	1 082	16	314HB
E740	recocido	60	414	95	655	25	190HB
	templado y revenido	133	917	144	993	18	288HB
H-11	recocido @ 1 600°F	53	365	100	689	25	96HRB
	templado y revenido @ 1 000°F	250	1 724	295	2 034	9	55HRC
L-2	recocido @ 1 425°F	74	510	103	710	25	96HRB
	templado y revenido @ 400°F	260	1 793	290	1 999	5	54HRC
L-6	recocido @ 1 425°F	55	379	95	655	25	93HRB
	templado y revenido @ 1 600°F	260	1 793	290	1 999	4	54HRC
P-20	recocido @ 1 425°F	75	517	100	689	17	97HRB
	templado y revenido @ 400°F	205	1 413	270	1 862	10	52HRC
S-1	recocido @ 1 475°F	60	414	100	689	24	96HRB
	templado y revenido @ 400°F	275	1 896	300	2 068	4	57HRC
S-5	recocido @ 1 450°F	64	441	105	724	25	96HRB
	templado y revenido @ 400°F	280	1 931	340	2 344	5	59HRC
S-7	recocido @ 1 525°F	55	379	93	641	25	95HRB
	templado y revenido @ 400°F	210	1 448	315	2 172	7	58HRC
A-8	recocido @ 1 550°F	65	448	103	710	24	97HRB
	templado y revenido @ 1050°F	225	1 551	265	1 827	5	52HRC

©McGraw-Hill, Inc. 1990. Reimpreso.

Anexo 5.

Propiedades Físicas de algunos Materiales de Ingeniería.

TABLA C-1 Propiedades físicas de algunos materiales de Ingeniería

Datos provenientes de varias fuentes. * Estas propiedades son esencialmente similares para todas las aleaciones del material específico

Material	Módulo de elasticidad E		Módulo de rigidez C		Razón de Poisson ν	Peso específico γ	Densidad de masa ρ	Gravedad específica
	Mpsi	GPa	Mpsi	GPa				
Aleación de aluminio	10.4	71.7	3.9	26.8	0.34	0.10	2.8	2.8
Cobre al berilio	18.5	127.6	7.2	49.4	0.29	0.31	8.3	8.3
Latón, bronce	16.0	110.3	6.0	41.5	0.33	0.31	8.6	8.6
Cobre	17.5	120.7	6.5	44.7	0.35	0.32	8.9	8.9
Hierro fundido gris	15.0	103.4	5.9	40.4	0.28	0.26	7.2	7.2
Hierro fundido dúctil	24.5	168.9	9.4	65.0	0.30	0.25	6.9	6.9
Hierro fundido maleable	25.0	172.4	9.6	66.3	0.30	0.26	7.3	7.3
Aleaciones de magnesio	6.5	44.8	2.4	16.8	0.33	0.07	1.8	1.8
Aleaciones de níquel	30.0	206.8	11.5	79.6	0.30	0.31	8.3	8.3
Acero al carbono	30.0	206.8	11.7	80.8	0.28	0.28	7.8	7.8
Aleaciones de acero	30.0	206.8	11.7	80.8	0.28	0.28	7.8	7.8
Acero inoxidable	27.5	189.6	10.7	74.1	0.29	0.28	7.8	7.8
Aleaciones de titanio	16.5	113.8	6.2	42.4	0.34	0.16	4.4	4.4
Aleaciones de zinc	12.0	82.7	4.5	31.1	0.33	0.24	6.6	6.6

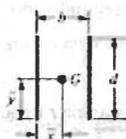
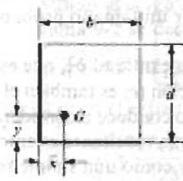
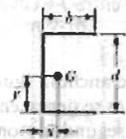
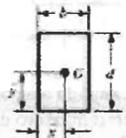
* Properties of Some Metals and Alloys, International Nickel Co., N.Y., Metals Handbook, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.

Anexo 6.

Valores de Momento Polar de Inercia unitarios para distintas formas de uniones soldadas.

de Superficie.

Propiedades a la torsión de juntas soldadas de filete*

SOLDADURA	ÁREA DE GARGANTA	UBICACIÓN DE G	SEGUNDO MOMENTO POLAR DE ÁREA UNITARIO
	$A = 0.707hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = d^3/12$
	$A = 1.414bd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{d(3b^2 + d^2)}{6}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2(b + d)}$ $\bar{y} = \frac{d^2}{2(b + d)}$	$J_u = \frac{(b + d)^3 - 6b^2d^2}{12(b + d)}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b + d}$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{8b^3 + 6bd^2 + d^3}{12} - \frac{b^4}{2b + d}$
	$A = 1.414h(b + d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{(b + d)^3}{6}$
	$A = 1.414\pi br$		$J_u = 2\pi r^3$

*G es el centroide del grupo de uniones de soldadura; h es el tamaño de junta; el plano de momento de torsión coincide con el plano de la página; todas las juntas son de ancho unitario.

Factor de Corrección Anexo 7.

Factores de Corrección para Análisis por Fatiga.

Factor de Superficie.

Factores de acabado de superficies			
ACABADO DE SUPERFICIE	FACTOR a		EXPONENTE b
	kpsi	MPa	
Esmaltado (rectificado)	1.34	1.58	-0.085
Maquinado o estrado en frío	2.70	4.51	-0.265
Laminado en caliente	14.4	57.7	-0.714
Forjado	39.9	272.	0.995

Factor de Tamaño.

$$k_t = \begin{cases} \left(\frac{d}{0.3}\right)^{-0.1133} & \text{in} \quad 0.11 \leq d \leq 2 \text{ m} \\ \left(\frac{d}{7.62}\right)^{-0.1133} & \text{mm} \quad 2.79 \leq d \leq 51 \text{ mm} \end{cases}$$

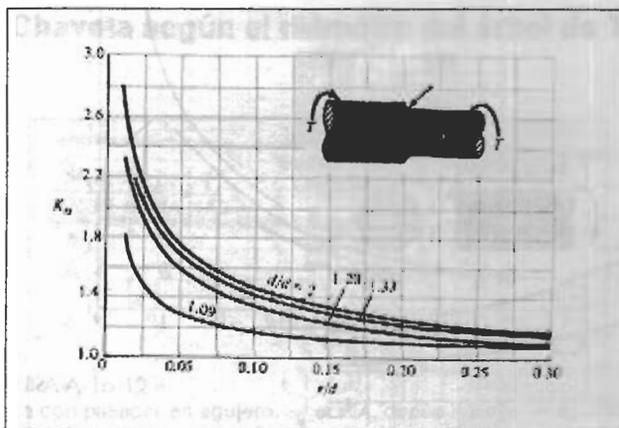
Factor de Carga.

$$k_c = \begin{cases} 0.925 & \text{carga axial} \quad (S_u \leq 220 \text{ kpsi (1520 MPa)}) \\ 1 & \text{carga axial} \quad (S_u > 220 \text{ kpsi (1520 MPa)}) \\ 1 & \text{flexión} \\ 0.577 & \text{torsión y cortante} \end{cases}$$

Factor de Temperatura

TEMPERATURA, °C	S_u/S_{ref}	TEMPERATURA, °F	S_u/S_{ref}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.925	600	0.965
350	0.927	700	0.927
400	0.922	800	0.872
450	0.840	900	0.797
500	0.766	1000	0.698
550	0.670	1100	0.567
600	0.516		

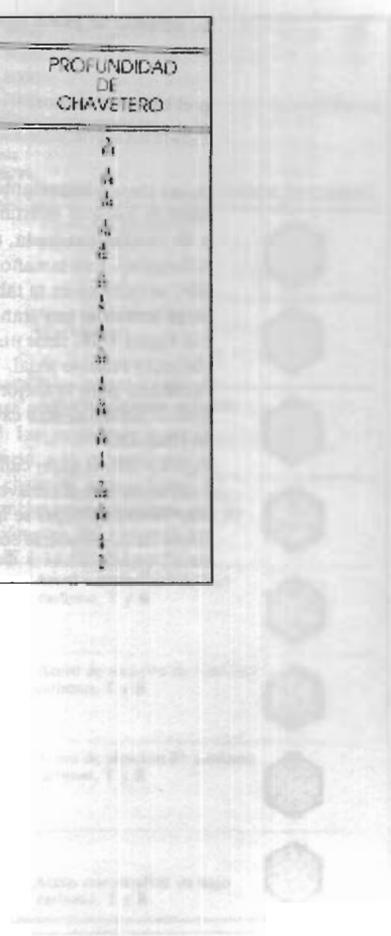
Factor de Concentración de Esfuerzos.



Anexo 8.

Tamaño de Chaveta según el diámetro del árbol de Transmisión.

DIÁMETRO DE EJE MÁS DE HASTA (INCL.)		TAMAÑO DE CHAVETA		PROFUNDIDAD DE CHAVETERO
		w	h	
6	6	3	3	1
6	8	4	4	1
8	8	4	4	1
8	10	5	5	1
10	10	5	5	1
10	12	6	6	1
12	12	6	6	1
12	14	7	7	1
14	14	7	7	1
14	16	8	8	1
16	16	8	8	1
16	18	9	9	1
18	18	9	9	1
18	20	10	10	1
20	20	10	10	1
20	22	11	11	1
22	22	11	11	1
22	24	12	12	1
24	24	12	12	1



Anexo 9.

Especificaciones para el Diseño de Pernos.

Especificaciones SAE para pernos de acero

GRADO SAE Núm.	INTERVALO DE TAMAÑOS, INCLUSIVE in	RESISTENCIA LÍMITE MÍNIMA A LA TENSIÓN kpsi	RESISTENCIA ÚLTIMA MÍNIMA A LA TENSIÓN kpsi	RESISTENCIA DE FLUENCIA MÍNIMA A LA TENSIÓN kpsi	MATERIAL	MARCA DE CABEZA
1	1-11	33	60	36	Acero de mediano o bajo carbono	
2	1-11	55 33	74 60	57 36	Acero de mediano o bajo carbono	
4	1-11	65	115	100	Acero de mediano carbono, estado en frío	
5	1-11 14-15	85 74	120 105	92 81	Acero de mediano carbono, templado y revenado (T y R)	
5.2	1-1	85	120	92	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	
7	1-11	105	133	115	Acero de aleación de mediano carbono, T y R	
8	1-11	120	150	130	Acero de aleación de mediano carbono, T y R	
8.2	1-1	120	150	130	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	

TABLA 14-3 Dimensiones principales de roscas Acme American Standard

Véase la referencia 2 para una información más completa dimensional y de tolerancias

Diámetro mayor (in)	Hilos por pulgada	Paso de rosca (in)	Diámetro de paso (in)	Diámetro menor (in)	Área de esfuerzo a tensión (in ²)
0.250	16	0.061	0.219	0.188	0.032
0.313	14	0.071	0.277	0.241	0.054
0.375	12	0.083	0.333	0.292	0.077
0.438	12	0.083	0.396	0.354	0.110
0.500	10	0.100	0.490	0.400	0.142
0.625	8	0.125	0.561	0.500	0.222
0.750	6	0.167	0.667	0.583	0.307
0.875	6	0.167	0.792	0.708	0.442
1.000	5	0.200	0.900	0.800	0.568
1.125	5	0.200	1.025	0.925	0.747
1.250	5	0.200	1.150	1.050	0.950
1.375	4	0.250	1.250	1.125	1.108
1.500	4	0.250	1.375	1.250	1.353
1.750	4	0.250	1.625	1.500	1.918
2.000	4	0.250	1.875	1.750	2.580
2.250	3	0.333	2.083	1.917	3.147
2.500	4	0.333	2.333	2.167	3.976
2.750	3	0.333	2.583	2.417	4.909
3.000	2	0.500	2.750	2.500	6.412
3.500	2	0.500	3.250	3.000	7.670
4.000	2	0.500	3.750	3.500	10.421
4.500	2	0.500	4.250	4.000	13.354
5.000	2	0.500	4.750	4.500	16.800

Anexo 10.

Factores considerados para la Selección de Rodamientos.

Tabla 5.2 Valores del factor de ajuste por confiabilidad, a_1

Confiabilidad %	L_{10}	Factor de confiabilidad a_1
90	L_{10}	1.00
95	L_{5}	0.62
96	L_{4}	0.51
97	L_{3}	0.44
98	L_{2}	0.35
99	L_{1}	0.21

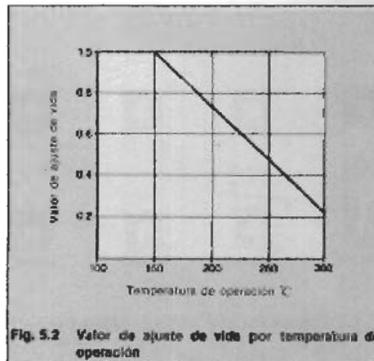


Tabla 5.3 Valores mínimos del factor de seguridad S_0

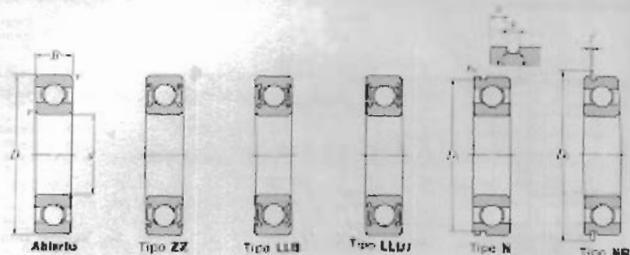
Condiciones de operación	Rodamientos de bolas	Rodamientos de rodillos
Precisión rotacional alta	2	3
Precisión rotacional normal (aplicación universal)	1	1.5
Permisos extremos por precisión rotacional ligera (Velocidad baja, cargas grandes, etc.)	0.5	1

Tabla 6.3 Factor de cadena o correa f_c

Tipo de cadena o correa	f_c
Cadena (vertical)	1.2 - 1.5
Correa en V	1.5 - 2.0
Correa de tiempo	1.1 - 1.3
Correa plana (uso polea de tensión)	2.5 - 3.0
Correa plana	3.0 - 4.0

Tabla B.4 Factor de carga f_c

Magnitud de choque	f_c	Aplicación
Muy poca o nada de choque	1.0 - 1.2	Máquinas eléctricas, máquinas herramientas, instrumentos de medición
Choque liviano	1.2 - 1.5	Vehículos ferroviarios, automóviles, molinos de rodillos, máquinas para trabajar metales, máquinas para fabricar papel, máquinas para mezclar caucho, impresoras, aeronaves, máquinas para textiles, unidades eléctricas, máquinas de oficinas
Choque pesado	1.5 - 3.0	Trituradoras, equipo agrícola, equipo de construcción, grúas



d 65~90 mm

Dimensiones principales mm			Capacidad básica de carga N		Velocidad límite r.p.m. acie			Numeros de rodamientos Tipo							
d	D	B	C_0	C_{0r}	grasa ZZ, LLB	acele ZLB	LU, LLU	abierto	ZZ	LLB	LLU	N	NR		
65	90	13	1	17 400	16 100	7 000	8 200	4 000	6013	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
	100	11	0.5	20 500	19 700	8 500	7 700	—	18013	—	—	—	—	—	
	100	18	1.1	30 500	25 200	8 500	7 700	3 900	6013	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
	120	23	1.5	57 500	46 000	8 500	6 500	3 600	6213	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
	140	30	2.1	92 500	60 000	8 900	5 800	2 300	6313	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
160	37	2.1	111 000	72 500	4 400	5 200	—	6413	—	—	—	—	—		
70	90	10	0.6	12 100	11 900	6 900	8 700	3 800	6014	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
	100	16	1	23 000	21 300	6 500	7 700	3 700	6014	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
	110	13	0.6	24 400	22 600	6 100	7 100	—	16014	—	—	—	—	—	
	110	20	1.1	38 000	31 000	6 100	7 100	3 600	6014	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
	125	24	1.5	62 000	44 000	5 100	5 000	3 400	6214	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
75	150	35	2.1	104 000	60 000	4 600	5 400	2 100	6314	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
	180	42	3	138 000	85 500	4 100	4 800	—	6414	—	—	—	—	—	
	80	90	10	0.6	12 500	12 900	6 400	7 600	3 600	6016	ZZ	LLB	LLU	N	NR
100		16	1	24 400	22 600	6 100	7 200	3 500	6016	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
115		13	0.6	25 000	24 000	5 700	6 700	—	16016	—	—	—	—	—	
115		20	1.1	39 500	33 000	5 700	6 700	3 300	6016	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
130		25	1.5	66 000	49 500	4 800	5 600	3 200	6216	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
85	150	37	2.1	113 000	77 000	4 300	5 000	2 900	6316	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
	180	45	3	138 000	99 000	3 800	4 500	—	6416	—	—	—	—	—	
	90	100	16	0.6	24 800	24 000	5 700	6 700	3 200	6018	ZZ	LLB	LLU	N	NR
110		15	1	24 800	24 000	5 700	6 700	3 200	6018	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
125		14	0.6	25 400	25 100	5 300	6 200	—	16018	—	—	—	—	—	
125		22	1.1	47 500	40 000	5 300	6 200	3 100	6018	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
140		26	2	72 800	53 000	4 500	5 300	3 000	6218	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
95	170	39	2.1	123 000	85 500	4 000	4 700	2 700	6318	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
	200	48	3	164 000	125 000	3 600	4 200	—	6418	—	—	—	—	—	
	100	110	13	1	16 700	15 000	5 700	6 700	3 100	6017	ZZ	LLB	LLU	N	NR
		120	15	1.1	22 000	20 600	5 400	6 300	3 000	6017	ZZ	LLB	LLU	N	NR
		130	14	0.6	25 900	26 200	5 000	5 900	—	16017	—	—	—	—	—
130		22	1.1	49 500	43 000	5 000	5 900	2 900	6017	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
150		28	2	83 800	64 000	4 200	5 000	2 800	6217	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
105	180	41	3	123 000	97 000	3 800	4 500	2 600	6317	ZZ	LLB	LLU	N	NR	
	210	52	4	165 000	128 000	3 400	4 000	—	6417	—	—	—	—	—	
	110	13	1	19 000	19 700	5 400	6 300	3 000	6016	ZZ	LLB	LLU	N	NR	

Anexo 11.

Tablas para la Selección de Bandas.

TABLA 17-0
Secciones de bandas trapeciales (o en V) estándares



SECCIÓN	ANCHO a, in	ESPESOR b, in	MINIMO DIÁMETRO DE POLLA, in	POTENCIAS PARA UNA O MÁS BANDAS, hp
A	1	1/16	3.0	1-10
B	1 1/2	1/8	5.4	1-25
C	2	3/16	9.0	15-100
D	3	1/4	13.0	50-250
E	4	5/16	21.6	100 o mayor

Circunferencias internas de bandas en V estándares

SECCIÓN	CIRCUNFERENCIA, in
A	26, 31, 33, 35, 38, 42, 46, 48, 51, 53, 55, 57, 60, 62, 64, 66, 68, 71, 75, 78, 80, 85, 90, 96, 105, 112, 120, 128
B	35, 38, 42, 46, 48, 51, 53, 55, 57, 60, 62, 64, 65, 66, 68, 71, 75, 78, 79, 81, 83, 85, 90, 93, 97, 100, 103, 105, 112, 120, 128, 131, 136, 144, 158, 173, 180, 195, 210, 240, 270, 300
C	51, 60, 68, 75, 81, 85, 90, 96, 105, 112, 120, 128, 136, 144, 158, 162, 173, 180, 195, 210, 240, 270, 300, 330, 360, 390, 420
D	120, 128, 144, 158, 162, 173, 180, 195, 210, 240, 270, 300, 330, 360, 390, 420, 480, 540, 600, 660
E	180, 195, 210, 240, 270, 300, 330, 360, 390, 420, 480, 540, 600, 660

Fig. 17-7
Potencias nominales en hp de bandas trapeciales (o en V) estándares

SECCIÓN DE BANDA	DIÁMETRO DE PASO DE POLEA, in	VELOCIDAD DE LA BANDA, ft/min				
		1000	2000	3000	4000	5000
A	2.6	0.47	0.62	0.53	0.45	
	3.0	0.66	1.01	1.12	0.93	0.38
	3.4	0.81	1.31	1.57	1.53	1.12
	3.8	0.93	1.55	1.92	2.00	1.71
	4.2	1.03	1.74	2.20	2.38	2.19
	4.6	1.11	1.89	2.44	2.69	2.58
	5.0 o más	1.17	2.03	2.64	2.96	2.89
B	4.2	1.07	1.58	1.68	1.26	0.22
	4.6	1.27	1.99	2.29	2.08	1.24
	5.0	1.44	2.33	2.80	2.76	2.10
	5.4	1.59	2.62	3.24	3.34	2.82
	5.8	1.72	2.87	3.61	3.85	3.45
	6.2	1.82	3.09	3.94	4.28	4.00
	6.6	1.92	3.29	4.23	4.67	4.48
	7.0 o más	2.01	3.46	4.49	5.01	4.90
C	6.0	1.84	2.66	2.72	1.87	
	7.0	2.48	3.94	4.64	4.44	3.12
	8.0	2.96	4.90	6.09	6.36	5.52
	9.0	3.34	5.65	7.21	7.86	7.39
	10.0	3.64	6.25	8.11	9.06	8.89
	11.0	3.88	6.74	8.84	10.0	10.1
	12.0 o más	4.09	7.15	9.46	10.9	11.1
D	10.0	4.14	6.13	6.55	5.09	1.35
	11.0	5.00	7.83	9.11	8.50	5.62
	12.0	5.71	9.26	11.2	11.4	9.38
	13.0	6.31	10.5	13.0	13.8	12.2
	14.0	6.82	11.5	14.6	15.8	14.8
	15.0	7.27	12.4	15.9	17.6	17.0
	16.0	7.66	13.2	17.1	19.2	19.0
	17.0 o más	8.01	13.9	18.1	20.8	20.7
E	16.0	8.68	14.0	17.5	18.1	15.3
	18.0	9.92	16.7	21.2	23.0	21.5
	20.0	10.9	18.7	24.2	26.9	26.4
	22.0	11.7	20.3	26.6	30.2	30.5
	24.0	12.4	21.6	28.6	32.9	33.8
	26.0	13.0	22.8	30.3	35.1	36.7
	28.0 o más	13.4	23.7	31.8	37.1	39.1

Factor de corrección de longitud de banda K_p^*

FACTOR DE LONGITUD	LONGITUD DE BANDA NOMINAL, in				
	BANDAS A	BANDAS B	BANDAS C	BANDAS D	BANDAS E
0.85	Hasta 35	Hasta 46	Hasta 75	Hasta 128	
0.90	38-46	48-60	81-96	144-162	Hasta 195
0.95	48-55	62-75	105-120	173-210	210-240
1.00	60-75	78-97	128-158	240	270-300
1.05	78-90	105-120	162-195	270-330	330-390
1.10	96-112	128-144	210-240	360-420	420-480
1.15	120 o más	158-180	270-300	480	540-600
1.20		195 o más	330 o más	540 o más	660

Factores de servicio sugeridos K_s para transmisiones de bandas en V

CARACTERÍSTICA DEL IMPULSO	FUENTE DE POTENCIA MOTRIZ	
	CARACTERÍSTICA DE MOMENTO TORSIONAL NORMAL	MOMENTO TORSIONAL ALTO O NO UNIFORME
Uniforme	1.0 a 1.2	1.1 a 1.3
Choque ligero	1.1 a 1.3	1.2 a 1.4
Choque mediano	1.2 a 1.4	1.3 a 1.5
Choque fuerte	1.3 a 1.5	1.5 a 1.8

BIBLIOGRAFÍA.

- 1) NORTON ROBERT L., Diseño de Máquinas, Editorial Prentice Hall, primera edición, México 1999.
- 2) MOTT ROBERT L., Diseño de Elementos de Máquinas, Editorial Prentice Hall, segunda edición, México 1995.
- 3) SHIGLEY JOSEPH E., Diseño en Ingeniería Mecánica, Editorial Mc Graw Hill, cuarta edición, México Septiembre de 1990.
- 4) SMITH WILLIAM F., Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales, Editorial Mc Graw Hill, cuarta edición, Madrid 1998.
- 5) PERRY ROBERT H., Manual del Ingeniero Químico, Volumen III, Editorial Mc Graw Hill, séptima edición, séptima edición, Madrid 2001.
- 6) ACEROS BOHLER, Catálogo de productos.

7) IVAN BOHMAN, Catálogo de Productos.

8) NTN, Catálogo de Rodamientos.

9) SALAZAR JEFFERSON, "Diseño y Construcción de una línea de extrusión y peletizado para polietileno de alta densidad y Polipropileno" (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2002).

10) TORO JORGE, "Fabricación de Tejas con PET reciclado" (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2002).

11) Molinos para Plásticos. www.tecnologiadelplastico.com

12) Molinos para Plásticos www.plastunivers.com

13) Tipos y Propiedades de Plásticos. www.plastivida.com.ar

14) Modelos de Molinos. www.cmg.com

15) Plásticos Termoestables. www.monografias.com

16) PROCEPLAS, Reciclaje de Materiales Plásticos Reciclados, Costos.