

# **ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

## **CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **TÍTULO DEL PROYECTO:**

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DESHUMIDIFICADOR DE HOJUELAS DE PET PARA LA EXTRUSORA DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES.”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO**

**REALIZADO POR:**

**MIGUEL EDUARDO MONTENEGRO VILLAVICENCIO  
JORGE ALEJANDRO VALVERDE SANDOVAL**

***DIRECTOR: ING. JOSE PÉREZ***

***CODIRECTOR: ING. CARLOS SUNTAXI***

**Sangolquí, 22 de Marzo del 2010**



## **CERTIFICADO DE LA ELABORACION DEL PROYECTO**

El proyecto de grado titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN DESHUMIDIFICADOR DE HOJUELAS DE PET PARA LA EXTRUSORA DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES.”** fue realizado en su totalidad por los Srs. MIGUEL EDUARDO MONTENEGRO VILLAVICENCIO y JORGE ALEJANDRO VALVERDE SANDOVAL como requerimiento previo para la obtención del Título de Ingeniero Mecánico.

-----  
Ing. José Pérez.

Director

-----  
Ing. Carlos Sntaxi.

Codirector

**Sangolquí, 22 de Marzo del 2010**



## LEGALIZACION DEL PROYECTO

**“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN DESHUMIDIFICADOR DE  
HOJUELAS DE PET PARA LA EXTRUSORA DEL  
LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES.”**

**Elaborado por:**

-----  
Miguel E. Montenegro V.  
CI: 171546153-7

-----  
Jorge A. Valverde S.  
CI: 171521187-4

-----  
Ing. Emilio Tumipamba  
**DIRECTOR DE LA CARRERA**

**Sangolquí, 22 de Marzo del 2010**



## DEDICATORIA

*Dedico este proyecto y todo mi carrera universitaria a Dios por las bendiciones que me ha dado en la vida, a mis padre Miguel Ángel por su sacrificio y apoyo incondicional y especialmente a mi madre Rosita Esperanza que es la que me guía desde el cielo y me da la fuerza de seguir adelante día a día, a mis hermanas Jeaneth , Sofía y Stephanie por su apoyo incondicional y a todos mis amigos los que han estado en las buenas y en las malas brindándome su amistad.*

*Miguel Eduardo Montenegro Villavicencio.*

*El proyecto realizado se lo dedico en primer lugar a Dios que me ha permitido conseguir este objetivo. Con mucho amor y gratitud a mis padres Jorge Valverde y Sylvia Sandoval quienes han sido los pilares fundamentales para alcanzar este logro ya que gracias a su apoyo incondicional, esfuerzo y dedicación fueron el motor que siempre me motivo a seguir adelante, a mis hermanos Sylvia y Byron quienes siempre me brindaron una mano cuando lo necesite, a mi familia en general que siempre estuvo pendiente y dispuesta a ayudar.*

*Jorge Alejandro Valverde Sandoval.*





## **AGRADECIMIENTO**

El agradecimiento sincero a la Escuela Politécnica del Ejército, por habernos dado la oportunidad de prepararnos en sus aulas y laboratorios con anhelo de superación y éxito.

Al Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, por habernos dado todas las facilidades de sus instalaciones para la realización de nuestro proyecto.

A nuestros directores del proyecto por el apoyo y al personal docente de la Carrera de Ingeniería Mecánica por los conocimientos y enseñanzas impartido a lo largo de nuestra formación profesional.

A nuestros compañeros y amigos con los cuales hemos compartido muchas experiencias académicas como de vida.



## TABLA DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE LA ELABORACION DEL PROYECTO.....	iii
LEGALIZACION DEL PROYECTO .....	v
DEDICATORIA.....	vii
AGRADECIMIENTO .....	ix
TABLA DE CONTENIDO .....	xi
LISTADO DE FIGURAS.....	xv
LISTADO DE TABLAS .....	xix
LISTADO DE ANEXOS.....	xxi
NOMENCLATURA UTILIZADA.....	xxiii
RESUMEN .....	xxv
GENERALIDADES.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Definición del Problema .....	2
1.3 <i>Objetivos</i> .....	2
1.3.1 General.....	2
1.3.2 Específicos .....	3
1.4 Alcance .....	3
1.5 Justificación e Importancia.....	3
MARCO TEÓRICO .....	5
2.1 PET (Polietilén Tereftalato).....	5
2.1.1 Propiedades del PET .....	6
2.1.2 Desventajas.....	7
2.1.3 Ventajas.....	8
2.1.4 Características del PET .....	8
2.1.5 Datos técnicos del PET .....	9
2.1.5 Propiedades físicas y procesamiento .....	10
2.2 Proceso del reciclado mecánico del PET.....	12
2.2.1 Ventajas del reciclado mecánico .....	12
2.2.2 Etapas del reciclado mecánico .....	13
2.3 Secado del PET .....	20
2.3.1 Absorción de humedad.....	21

2.3.2 Eliminación de humedad.....	22
2.3.3 Equipo de secado .....	23
2.3.4 Secado del PET .....	24
2.3.5 Principales problemas que deben ser considerados.....	25
2.3.6 Implicaciones prácticas .....	26
2.3.7 Requerimientos del aire de secado.....	27
2.3.8 Humedad retenida de la hojuela seca.....	28
2.4 Transaferencia de calor.....	29
2.4.1 Conducción.....	30
2.4.2 Convección.....	31
2.4.3 Radiación.....	33
2.4.4 Condiciones de contorno de convección.....	33
2.4.5 Conducción unidimensional en el estado estable.....	36
2.4.6 Condiciones de contorno de convección.....	38
2.5 Calefactores .....	40
2.5.1 Funcionamiento.....	41
2.5.2 Transmisión de el calor generado en el conductor.....	41
2.5.3 Construcción .....	42
2.6 Termocuplas.....	42
2.6.1 Termometría.....	43
2.6.2 Termocuplas .....	43
2.6.3 Tipos de Termocuplas.....	44
Propiedades.....	54
2.8 Controles Eléctricos .....	55
2.8.1 tipos de Controles Eléctricos.....	55
2.8.2 Control de Temperatura .....	56
2.9 Ventiladores .....	58
ANALISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.....	63
3.1 Análisis.....	63
3.2 Selección de Alternativas .....	69
DISEÑO.....	71
4.1 Diseño Térmico .....	71
4.1.1 Calor ganado por el sistema .....	71

4.1.1.1 Calor ganado por el PET .....	71
4.1.1.2 Calor ganado por las paredes .....	72
4.1.1.3 Calor ganado por el aire .....	73
4.1.1.4 Calor ganado por el agua .....	77
4.1.2 Calor perdido por el sistema .....	78
4.1.2.1 Calor perdido en la pared cilíndrica .....	78
4.1.3 Calculo de la resistencia .....	87
4.1.4 Calculo del flujo másico del aire para el secado .....	88
4.1.4.1 Selección del ventilador .....	92
4.2 Diseño Eléctrico .....	93
4.2.1 Diagrama de Fuerza .....	94
4.2.2 Diagrama de Control .....	95
CONSTRUCCION Y MONTAJE .....	97
5.1 Diagrama de Procesos .....	97
5.2 Recursos de fabricación .....	99
5.2.1 Materiales .....	99
5.2.2 Mano de obra .....	100
5.2.3 Equipos y herramientas .....	101
5.3 Fabricación de componentes .....	101
5.4 Montaje .....	109
PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO .....	113
6.1 Parámetros de Funcionamiento .....	113
6.2 Instrumentos de medición .....	115
6.3 Procedimiento .....	116
6.3.1 Secado .....	116
6.3.2 Extrusión .....	117
6.4 Levantamiento de datos .....	120
6.5 Pruebas Mecánicas de Producto Reciclado .....	121
6.6 Análisis de resultados .....	126
ANALISIS ECONOMICO FINANCIERO .....	131
7.1 Análisis Económico .....	131
7.2 Análisis Financiero .....	136
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	137

8.1 Conclusiones.....	137
8.2 Recomendaciones.....	138

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1 Diagrama de Proceso Reciclado Mecánico.....	12
Figura 2.2 Pacado de PET .....	14
Figura 2.3 Esquema y forma de un molino convencional para PET .....	14
Figura 2.4 Cinta de transportación para clasificación y separación.....	15
Figura 2.5 Secador centrifugador .....	17
Figura 2.6 Línea de lavado secado centrifugado.....	18
Figura 2.7 Extrusores para PET .....	19
Figura 2.8 Equipo para monofilamento.....	20
Figura 2.9 Hidrólisis del PET .....	21
Figura 2.10 Absorción de la Humedad del PET.....	21
Figura 2.11 Influencia de la Temperatura sobre la Humedad Absorbida	22
Figura 2.12 Efecto de la forma de la Hojuela Secado de PET a 170° ...	26
Figura 2.13 Efectos de la Temperatura de Secado y Humedad Removida	27
Figura 2.14 Dependencia de la Caída de Viscosidad Intrínseca .....	28
Figura 2.15 Relación entre caída de viscosidad y humedad retenida ....	29
Figura 2.16. Flujo de calor a través de una pared .....	31
Figura 2.17. Analogía eléctrica de la pared plana. ....	34
Figura 2.18. Pared plana. ....	36
Figura 2.19. Pared plana compuesta.....	38
Figura 2.20. Analogía eléctrica de la pared plana. ....	39
Figura 2.21 Termocupla.....	43
Figura 2.22 Estructura de un aislante.....	50
Figura 2.23 Panel rígido de lana de roca.....	51
Figura 2.24 Fragmento de poliestireno expandido. ....	53
Figura 2.25 Estructura química del polietileno, a veces representada sólo como $(CH_2-CH_2)_n$ .....	53
Figura 2.26 Muestra de espuma de poliuretano de alta densidad .....	54
FIG. 2.27 Ventiladores con envolvente.....	60
FIG. 2.28 Ventiladores murales .....	60
FIG. 2.29 Ventiladores centrífugos .....	61
Figura 3.1 Esquema de operación de un secador de aire caliente.....	64

Figura 3.2 Esquema de operación de un secador de desecante .....	66
Figura 3.3 Esquema de operación de un secador de aire comprimido .	68
Figura 4.1 Resistencia perdidas pared cilíndrica .....	78
Figura 4.2 Resistencia perdidas pared plana .....	83
Figura 4.3 Programa CYTSoft Psychrometric Chart 2.2 .....	88
Figura 4.4 Carta psicrométrica Altitud y Presión .....	89
Figura 4.5 Carta psicométrica Propiedades Ambiente .....	90
Figura 4.6 Carta psicométrica Propiedades Salida Aire.....	91
Figura 4.7 Panel Eléctrico .....	93
Figura 4.8 Diagrama de Fuerza .....	94
Figura 4.9 Diagrama de Control.....	95
Figura 5.1 Simbología ocupada en la diagramación de procesos.....	98
Figura 5.2 Estructura de la tolva .....	102
Figura 5.3 Diagrama de procesos – construcción de la tolva.....	102
Figura 5.4 Niquelina.....	103
Figura 5.5 Diagrama de procesos – Niquelina .....	104
Figura 5.6 Ducto.....	105
Figura 5.7 Diagrama de procesos – Ducto.....	105
Figura 5.8 Estructura Soporte .....	106
Figura 5.9 Diagrama de procesos – Estructura Soporte.....	106
Figura 5.10 Diagrama de Control.....	108
Figura 5.11 Conexión del ventilador con el ducto. ....	109
Figura 5.12 Estructura de la tolva y canal. ....	109
Figura 5.13 Malla en la tolva. ....	110
Figura 5.14 Equipo.....	111
Figura 6.1 Deshumidificador .....	116
Figura 6.3 Extrusora.....	117
Figura 6.4 Control de Temperatura 190° C .....	117
Figura 6.5 Eliminación de restos .....	118
Figura 6.6 Alimentación de extrusora.....	118
Figura 6.7 Controles de Temperatura de Proceso .....	119
Figura 6.8 Fibra extruida .....	119
Figura 6.9 Maquina Tracción Horizontal .....	121



Figura 6.10 Probeta RPET .....	121
Figura 6.11 Grafica máquina Tracción Horizontal .....	122
Figura 6.12 Escala máquina Tracción Horizontal .....	122
Figura 6.13 Ensayo de Tracción .....	123
Figura 6.14 Diagrama fuerza vs desplazamiento RPET seco y desgasificado.....	123
Figura 6.15 Diagrama fuerza vs desplazamiento RPET húmedo .....	123
Figura 6.16 Diagrama fuerza vs desplazamiento RPET Seco.....	124
Figura 6.17 Ruptura RPET húmedo .....	127
Figura 6.18 Ruptura RPET Seco .....	127



## LISTADO DE TABLAS

Tabla 2.1 Datos técnico del PET .....	9
Tabla 2.2 Coeficientes de convección orientativos .....	32
Tabla 2. 3 Termocuplas .....	48
Tabla 3.1 Criterios de Evaluación .....	69
Tabla 3.2 Evaluación de Alternativas.....	70
Tabla 5.1 Recursos de fabricación (materiales).....	99
Tabla5.2 Recursos de fabricación (mano de obra) .....	100
Tabla5.3 Recursos de fabricación (equipos y herramientas).....	101
Tabla 5.4 Elementos de control. ....	107
Tabla 5.4 Especificaciones técnicas. ....	110
Tabla 6.1 Datos obtenidos de probetas de RPET Húmedo .....	120
Tabla 6.2 Datos obtenidos de probetas de RPET Seco .....	120
Tabla 6.3 Datos obtenidos de probetas de RPET Seco y Desgasificado .....	120
Tabla 6.4 Resultados obtenido del ensayo a tracción RPET Húmedo .....	125
Tabla 6.5 Resultados obtenido del ensayo a tracción RPET seco	125
Tabla 6.6 Resultados obtenido de el ensayo a tracción RPET seco y desgasificado.....	126
Tabla 7.1 Remuneraciones a profesionales.....	131
Tabla 7.2 Costo de equipos y materiales.....	132
Tabla 7.3 Costos de Insumos .....	133
Tabla 7.4 Costos de Mano de obra.....	133
Tabla 7.5 Costos de materiales para los ensayos .....	134
Tabla 7.6 Otros costos directos .....	134
Tabla 7.7 Uso de laboratorio.....	134
Tabla 7.8 Uso de laboratorio.....	135
Tabla 7.9 Materiales e insumos .....	135
Tabla 7.10 Costos de equipos similares en el mercado .....	136



## **LISTADO DE ANEXOS**

Anexo A: Planos

Anexo B: Graficas

Anexo C: Propiedades de los Materiales



## NOMENCLATURA UTILIZADA

A:	Amperios
RPET:	Pet reciclado
V:	Voltios
°C:	Grados centígrados
r:	Radio
h:	Altura
Ac:	Area cilindro
Act:	Area cono truncado
At:	Area tapa
AT:	Área Total
e:	Espesor
$\sigma$ :	Esfuerzo
m:	Masa
Cp:	Calor especifico
Q:	Calor
Lc:	Longitud característica
hi:	Coefficiente de transferencia de calor por convección
k:	Conductividad Térmica
$\mu$ :	Viscosidad

D:	Diámetro tubo
v:	Velocidad
Pr:	Numero de Prandtl
Nu:	Numero de Nusselt
R:	Reynolds
Vs:	Volumen del PET
As:	Área superficie
Bi :	Numero de Biot
E:	Energía
T:	Temperatura
t:	Tiempo
R:	Resistencia
U:	Coeficiente global de transferencia de calor



## RESUMEN

Se realizó el diseño y construcción del deshumidificador de hojuelas de PET para la extrusora del laboratorio de mecánica de materiales con el fin de extraer la humedad del material reciclado y así obtener fibras con mejores propiedades mecánicas que permitirán incursionarnos en nuevos mercados, así como para realizar prácticas en el laboratorio por parte de los estudiantes

El equipo consta de un ventilador, una niquelina, una tolva, un tablero eléctrico y una estructura soporte en la cual descansan todos los elementos correctamente conectados. Para disminuir las pérdidas de calor se realiza el aislamiento respectivo colocando lana de vidrio a lo largo del ducto que contiene la niquelina y alrededor de la tolva que contiene el material a secarse.

La tolva tiene una tapa de acero A36 en la parte superior, sujeta por pernos de 1/4 plg que nos permite hacer el suministro de material (RPET) al interior de la misma. Se debe secar el material por un tiempo determinado (3h) para que el RPET elimine la mayor cantidad de humedad. Luego que se cumpla el secado para sacar el material del interior abrimos la válvula de bola que está colocada en el inferior de la tolva y en un recipiente recolectamos el material seco, el mismo que se lo lleva inmediatamente a la extrusora.

La extrusora debe estar previamente calentada, eliminado el material sobrante y calibrada en las temperaturas adecuadas para obtener una fibra continua. Una vez suministrado el material en la extrusora se enciende el tornillo sin fin estableciendo en el controlador de frecuencia la más óptima para obtener una buena fibra.

Se espera un tiempo hasta obtener las primeras fibras las cuales todavía van a estar mezcladas con material sobrante por ello se deja que salga una cierta cantidad de material para obtener el producto. Una vez obtenidas las fibras se realiza las probetas, se realiza los ensayos de tracción de las mismas en la máquina del laboratorio obteniendo los datos que demuestren el cambio en las propiedades mecánicas.

Con estas pruebas realizadas y los resultados se puede dar cuenta que la fibra ha mejorado considerablemente sus características mecánicas de porcentaje de elasticidad y resistencia a la tracción, llegando así a obtener el principal objetivo del proyecto de grado.

# **CAPITULO 1**

## **GENERALIDADES**

### **1.1 ANTECEDENTES**

El Tereftalato de Polietileno o “Polietileno Tereftalato” más conocido por sus siglas en inglés PET, es un tipo de plástico muy usado en envases de bebidas y textiles. Algunas compañías manufacturan el PET y otros poliésteres bajo diferentes marcas comerciales, por ejemplo, en los Estados Unidos y Gran Bretaña usan los nombres de Mylar y Melinex.

Uno de los materiales de envasado que más ha incrementado su consumo en los últimos años, pues actualmente de las 1200 ton/día de basura que llega a los rellenos sanitarios del Distrito Metropolitano de Quito, el 0.32 % en peso, corresponde al PET, lo que corresponde a 3.8 ton/día, resulta por sus características, especialmente interesante de reciclar, existiendo en el exterior, EU, China, Corea, una importante demanda del producto reciclado para diversas aplicaciones.

El proceso a seguir para el reciclado del Pet en el laboratorio de Mecánica de Materiales es un sistema de producción de varios pasos siendo un sistema manual ,

los cuales se han dado mediante la investigación del reciclado de PET en el proyecto de grado “Estudio experimental del comportamiento mecánico a la flexión de materiales compuestos en bases de fibras de PET reciclado y fibra de vidrio” mediante el cual se puede conocer los parámetros requeridos para que el PET molido se encuentre en las condiciones necesarias para que pueda ser extruido, se debe colocar 370 gr de PET molido en el horno mufla a 180° C durante un periodo de 3 hora para que el R-PET tenga un alargamiento porcentual del 14 % .

El fin del proceso a seguir sobre el Pet reciclado es obtener valores de resistencia a la tracción, resistencia a la compresión y valores de alargamiento porcentual óptimos requeridos.

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

El proceso actual de reciclado de PET que se efectúa en el laboratorio de Mecánica de Materiales de la Escuela Politécnica del Ejército, no es un proceso continuo debido a que el secado del PET se lo realiza en el horno MUFLA del laboratorio de Ciencia de los Materiales por lo que se debe hacer un traslado del material hasta la extrusora. Por esta razón se pretende la implementación de un deshumidificador en la tolva de ingreso del PET a la extrusora.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 GENERAL**

Diseñar y construir un deshumidificador de hojuelas de Pet para la extrusora del Laboratorio de Mecánica de Materiales, realizando un proceso continuo y determinando los parámetros óptimos para la extrusión del Pet

### **1.3.2 ESPECÍFICOS**

- Obtener información teórica sobre el diseño del deshumidificador para la extrusora.
- Analizar y seleccionar la mejor alternativa de diseño para el deshumidificador de la extrusora de PET.
- Realizar el diseño del deshumidificador.
- Construir y montar en su totalidad el deshumidificador en la extrusora del PET para realizar el proceso continuo.
- Realizar pruebas de funcionamiento del equipo
- Variar los parámetros de funcionamiento del equipo para obtener los mejores resultados posibles
- Evaluación del sistema y equipos en conjunto.

### **1.4 ALCANCE**

Implementar un deshumidificador en la extrusora, para la obtención de PET Reciclado, del Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Escuela Politécnica del Ejército.

### **1.5 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

El proceso natural de la degradación de materia hoy en día se ha visto muy perjudicado, ya que existen productos como el plástico cuyo tiempo de degradación es aproximadamente 500 años, impidiendo así que este ciclo se cierre, y dando origen a la contaminación, debido a que los desechos plásticos, por ejemplo de envases de líquidos como el aceite de cocina, no son susceptibles de asimilarse de nuevo en la naturaleza, y esto genera problemas en la recolección de basura ya que los colectores se ven saturados en poco tiempo, teniendo que construirse otros para abastecer toda la demanda de basura existente.

Ante esta realidad, se ha establecido el reciclaje de tales productos de plástico, que ha consistido básicamente en coleccionarlos, limpiarlos, seleccionarlos por

tipo de material y fundirlos de nuevo para usarlos como materia prima adicional, alternativa o sustituta para el moldeado de otros productos.

De esta forma la humanidad ha encontrado una forma adecuada para evitar la contaminación de productos que por su composición, materiales o componentes, no son fáciles de desechar de forma convencional.

Al tener un proceso estructurado de reciclaje de PET en el Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Escuela Politécnica del Ejército y siendo este un proceso por lotes, demanda mayores tiempos de proceso y utilización de mayor mano de obra, ya que se lo hace de manera manual teniendo que hacer un pre secado en un horno para luego ser pasado a la extrusora, buscando mediante este proyecto mejorar y reducir estos parámetros.

Para lograr este objetivo y seguir con este constante mejoramiento de la obtención de PET Reciclado, se pretende adecuar en el proceso existente un deshumidificador que ayude a realizar el pre secado con mayor facilidad, a fin de hacer que este sea continuo, reduciendo tiempo, mano de obra y mejorando las propiedades mecánicas del producto.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 PET (POLIETILÉN TEREFALATO)<sup>1</sup>**

El PET es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo, correspondiendo su fórmula a la de un poliéster aromático. Su denominación técnica es Polietilén Tereftalato o Politereftalato de etileno. Empezó a ser utilizado como materia prima en fibras para la industria textil y la producción de films.

El PET (Poli Etilén Tereftalato) perteneciente al grupo de los materiales sintéticos denominados poliésteres, fue descubierto por los científicos británicos Whinfield y Dickson, en el año 1941, quienes lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras. Se debe recordar que su país estaba en plena guerra y existía una apremiante necesidad de buscar sustitutos para el algodón proveniente de Egipto. Recién a partir de 1946 se lo empezó a utilizar industrialmente como fibra y su uso textil ha proseguido hasta el presente. En 1952 se lo comenzó a emplear en forma de film para el embasamiento de alimentos. Pero la aplicación que le significó

---

<sup>1</sup> <http://www.textoscientificos.com/polimeros/pet>

su principal mercado fue en envases rígidos, a partir de 1976; pudo abrirse camino gracias a su particular aptitud para el embotellado de bebidas carbonatadas.

Es el polímero para el cual los fabricantes de máquinas internacionales han dedicado el mayor esfuerzo técnico y comercial. Efectivamente, los constructores han diseñado con inversiones cuantiosas, equipos y líneas completas perfectamente adaptadas a los parámetros de transformación del PET, cuya disponibilidad accesible a todos los embotelladores, unida a la adecuada comercialización de la materia prima, permitió la expansión de su uso en todo el mundo.

### **2.1.1 PROPIEDADES DEL PET**

Procesable por soplado, inyección, extrusión. Apto para producir frascos, botellas, películas, láminas, planchas y piezas.

Transparencia y brillo con efecto lupa.

Excelentes propiedades mecánicas.

Barrera de los gases.

Biorientable-cristalizable.

Esterilizable por gamma y óxido de etileno.

Costo/ performance.

Totalmente reciclable.

Liviano

Cristalinidad y transparencia, aunque admite cargas de colorantes

Buen comportamiento frente a esfuerzos permanentes

Alta resistencia al desgaste

Muy buen coeficiente de deslizamiento

Buena resistencia química

Buenas propiedades térmicas

Muy buena barrera a CO<sub>2</sub>, aceptable barrera a O<sub>2</sub> y humedad

Compatible con otros materiales barrera que mejoran en su conjunto la calidad barrera de los envases y por lo tanto permiten su uso en mercados específicos

Aprobado para su uso en productos que deban estar en contacto con productos alimentarios

Alta rigidez y dureza



Altísima resistencia a los esfuerzos permanentes

Superficie barnizable

Gran indeformabilidad al calor

Muy buenas características eléctricas y dieléctricas

Alta resistencia a los agentes químicos y estabilidad a la intemperie

Propiedades ignifugas en los tipos aditivados

Alta resistencia al plegado y baja absorción de humedad que lo hacen muy adecuado para la fabricación de fibras.

### **2.1.2 DESVENTAJAS**

Secado

Todo poliéster tiene que ser secado a fin de evitar pérdida de propiedades. La humedad del polímero al ingresar al proceso debe ser de máximo 0.005%

Costo de equipamiento

Los equipos de inyección soplado con biorientación suponen una buena amortización en función de gran producción. En extrusión soplado se pueden utilizar equipos convencionales de PVC, teniendo más versatilidad en la producción de diferentes tamaños y formas.

Temperatura

Los poliésteres no mantienen buenas propiedades cuando se les somete a temperaturas superiores a los 70 grados. Se han logrado mejoras modificando los equipos para permitir llenado en caliente. Excepción: el PET cristalizado (opaco) tiene buena resistencia a temperaturas de hasta 230 ° C.

Intemperie

No se aconseja el uso permanente en intemperie.

### **2.1.3 VENTAJAS**

#### Propiedades únicas

Claridad, brillo, transparencia, barrera a gases u aromas, impacto, termoformabilidad, fácil de imprimir con tintas, permite cocción en microondas.

#### Costo/Performance

El precio del PET ha sufrido menos fluctuaciones que el de otros polímeros como PVC-PP-LDPE-GPPS en los últimos 5 años.

#### Disponibilidad

Hoy se produce PET en Sur y Norteamérica, Europa, Asia y Sudáfrica.

#### Reciclado

El PET puede ser reciclado dando lugar al material conocido como RPET, lamentablemente el RPET no puede emplearse para producir envases para la industria alimenticia debido a que las temperaturas implicadas en el proceso no son lo suficientemente altas como para asegura la esterilización del producto.

### **2.1.4 CARACTERÍSTICAS DEL PET**

#### Biorientación

Permite lograr propiedades mecánicas y de barrera con optimización de espesores.

#### Cristalización

Permite lograr resistencia térmica para utilizar bandejas termoformadas en hornos a elevadas temperaturas de cocción.

#### Esterilización

El PET resiste esterilización química con óxido de etileno y radiación gamma

#### Alternativas ecológicas

#### Retornabilidad

#### Reuso de molienda

Fibras

Polioles para poliuretanos

Poliésteres no saturados

Envases no alimenticios

Alcoholólisis/ Metanólisis

Incineración.

## 2.1.5 DATOS TÉCNICOS DEL PET

Tabla 2.1 Datos técnico del PET

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1,34 – 1.39
Resistencia a la tensión	MPa	59 – 72
Resistencia a la compresión	MPa	76 – 128
Resistencia al impacto, Izod	J/mm	0.01 – 0.04
Dureza	--	Rockwell M94 – M101
Dilatación térmica	10 <sup>-4</sup> / °C	15.2 – 24
Resistencia al calor	°C	80 – 120
Resistencia dieléctrica	V/mm	13780 – 15750
Constante dieléctrica (60 Hz)	--	3.65
Absorción de agua (24 h)	%	0.02
Velocidad de combustión	mm/min	Consumo lento
Efecto luz solar	--	Se decolora ligeramente
Calidad de mecanizado	--	Excelente
Calidad óptica	--	Transparente a opaco
Temperatura de fusión	°C	244 - 254

Fuente: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/pet>

## 2.1.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y PROCESAMIENTO

El PET presenta una estructura molecular con regularidad estructural necesaria para tener un potencial de cristalización. Debido a la presencia de los anillos aromáticos en su cadena, el PET presenta una moderada flexibilidad molecular que se refleja en que su temperatura de transición vítrea se encuentra en torno a los 70-80°C. Esto hace que su capacidad para cristalizar sea controlada por las condiciones de enfriamiento. Así, la densidad del PET puede variar desde 1,33-1,34 g/cm<sup>3</sup> para un material amorfo hasta aproximadamente 1,45-1,51g/cm<sup>3</sup> para el caso semicristalino, éste último particularmente dependiente y proporcional al contenido de dietilenglicol (DEG) que puede generarse durante el proceso de síntesis.

El parámetro de solubilidad del PET es aproximadamente de 21,8 MPa<sup>1/2</sup> lo que lo haría sensible, en mayor o menor grado, a algunos solventes como cetonas, clorados y alcoholes de 4 u 8 carbonos; pero en el caso de los productos semicristalinos, sólo solventes donadores de protones son capaces de interactuar con los grupos ésteres en forma efectiva. Aunque es un polímero polar, sus propiedades como aislante eléctrico a temperatura ambiente son buenas a altas frecuencias, debido a que el material, al estar por debajo de T<sub>g</sub>, tiene restricciones en la orientación de dipolos.

Si una muestra amorfa es calentada cerca de 80°C se induce la cristalización en frío que genera una considerable distorsión dimensional, contracción y opacidad, por lo que limita la temperatura de servicio. Otro factor a tener en cuenta durante el procesamiento es su carácter higroscópico y que en su estado fundido presenta una alta sensibilidad a la degradación hidrolítica de ahí que sea práctica común en la industria realizar ciclos previos de secado a temperaturas mayores a su T<sub>g</sub> (entre 140-160°C) por períodos de hasta 6 horas antes de cualquier etapa de procesamiento.

Otro factor que limitó en sus inicios el moldeo por inyección fue su inherente baja viscosidad del fundido que es altamente sensible a la temperatura, por lo que las temperaturas de procesamiento se encuentran muy cercanas a su T<sub>m</sub> (entre 270-290°C), para evitar el goteo en la boquilla. Parte de este inconveniente ha sido

solucionado al diseñar los equipos tal que incorporen sistemas que controlen el flujo libre a través de la boquilla.

Los primeros productos moldeados correspondieron a piezas en las cuales se promovió la cristalización en forma controlada por la adición de agentes nucleantes y/o empleando altas temperaturas de molde cercanas a los 130-140°C, lo que conduce a una alta rigidez, resistencia al rallado superficial y opacidad, pudiéndose emplear a temperatura entre su T<sub>g</sub> y T<sub>m</sub> sin problemas de distorsión dimensional. Sin embargo, el interés por este tipo de productos se mantuvo limitado hasta que se reconoció la utilidad del refuerzo con la fibra de vidrio, obteniéndose PET semicristalinos destinados principalmente para aplicaciones eléctricas y electrónicas.

Por otro lado, si se desean productos transparentes obtenidos por inyección, es necesario que la temperatura del molde sea menor a 50°C y no usar grados que contengan agentes nucleantes. Sin embargo, a pesar de las buenas propiedades ópticas y mayor tenacidad respecto al caso semicristalino, pierde resistencia química por lo que ha sido limitado o desplazado el uso de estos productos por otras opciones de procesamiento.

El interés definitivo por el uso de PET surgió al descubrir la utilidad de obtener productos biorientados en combinación con la introducción de la copolimerización con ácido isoftálico o 1,4-ciclohexano-dimetanol. Tal combinación permite obtener productos que presentan mejoras en transparencia, tenacidad y propiedades barrera, características esenciales de las botellas y algunos laminados y películas de PET destinados a envases y embalajes.

En este caso se propicia un proceso de cristalización por deformación, que genera una morfología cristalina orientada, muy diferente a la obtenida por un simple calentamiento de una muestra amorfa o durante el enfriamiento en el moldeo por inyección. Si bien la cristalinidad puede alcanzar un 40%, la morfología desarrollada permite conservar la transparencia del PET, mientras que son favorecidas tanto la rigidez y tenacidad del sistema, al igual que las propiedades barreras. Por lo general, estos productos presentan una densidad entre 1,38 y 1,39 g/cm<sup>3</sup>.

## 2.2 PROCESO DEL RECICLADO MECÁNICO DEL PET

La técnica más utilizada en la actualidad para el reciclaje es el reciclado mecánico. Esta consiste en la molienda, separación y lavado de los envases. Las escamas resultantes de este proceso se pueden destinar en forma directa, sin necesidad de volver a hacer pellets, en la fabricación de productos por inyección o extrusión.

La figura siguiente muestra un diagrama de este proceso.



Fuente:[http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado\\_reciclado%20mecanico.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado_reciclado%20mecanico.htm)

Figura 2.1 Diagrama de Proceso Reciclado Mecánico

### 2.2.1 VENTAJAS DEL RECICLADO MECÁNICO

Desde el punto de vista técnico, se puede decir que las plantas de reciclado mecánico requieren inversiones moderadas en cambio las del reciclaje químico requieren inversiones mayores.

El proceso de reciclado mecánico del PET no conlleva contaminación del medio ambiente, con el tratamiento de los efluentes líquidos del proceso se llega a controlar el proceso ambientalmente.

El reciclado mecánico de PET genera un producto de mayor valor agregado y es materia prima para la producción de productos de uso final, generando fuentes de trabajo en toda la cadena de reciclado.

Una de las razones fundamentales para la selección del reciclado mecánico, como alternativa viable para la recuperación de este material, es que existe mercado para el material molido y limpio de este material, como insumo o materia prima para producir otros artículos de uso final. Los mercados asiáticos actualmente compran todo lo que se produzca de este material.

### **2.2.2 ETAPAS DEL RECICLADO MECÁNICO**

El proceso de reciclaje mecánico es fundamentalmente el mismo para los distintos plásticos. Consiste en la separación y/o selección, limpieza y en algunos casos todavía el peletizado, aunque el moldeado por inyección, por compresión o termoformación puede realizarse con el material limpio picado.

#### **Acopio de material**

El acopio es simplemente la recolección del material ya sea en puntos fijos o en recorridos, es importante además puntualizar que un buen sistema de acopio garantizará un buen suministro de materia prima para el resto de los procesos, no debiendo existir cortes de materia prima.

#### **Pacado**

Es común que en las grandes empresas de reciclado el material se compacte para reducir su volumen y así facilitar su transporte y almacenamiento. No obstante, el PET debido a su elevada recuperación elástico-plástica, es difícil de prensar.

Cuando se realiza este proceso, las “pacas” deben ser posteriormente abiertas y picadas tal como llegan a la planta, es decir con tapas y etiquetas, que es una alternativa en el proceso. Sin embargo, cuando a la planta llegan botellas sueltas, si bien el volumen ocupado es mucho mayor, la posibilidad de realizar el desetiquetado y destapado permiten obtener un producto más fácil de tratar constituyéndose en la segunda alternativa del proceso.



Fuente:[http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado\\_reciclado%20mecanico.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado_reciclado%20mecanico.htm)

Figura 2.2 Pacado de PET

### Reducción de tamaño

La reducción de tamaño no es otra cosa que el picado (molido) del material recolectado, cuyo principal objetivo es facilitar la siguiente operación dentro el proceso de reciclado, el cual puede ser la separación de los diferentes tipos de polímeros del material (si es que éste ha sido compactado) y la limpieza del material picado.

Para la reducción de tamaño existen diversos tipos de tecnología según el tamaño al cual se quiera llegar, para el PET puede llegarse a obtener hojuelas de media, un cuarto de pulgada o finalmente polvo, según el diseño y el tipo de molino del que se disponga.



Fuente:[http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado\\_reciclado%20mecanico.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado_reciclado%20mecanico.htm)

Figura 2.3 Esquema y forma de un molino convencional para PET



Hoy en día existe tecnología para procesar y reducir material PET hasta polvo fino usando cámaras criogénicas a partir de nitrógeno líquido, donde el nitrógeno líquido fragiliza considerablemente el material lográndose obtener material fino. Este tipo de tecnología como es de suponerse es bastante costosa, su mayor empleo es para el control de calidad en productos específicos como por ejemplo el control de niveles de acetaldehído en preformas para el soplado de botellas.

## Separación

La separación tiene por finalidad liberar al plástico de interés (en nuestro caso PET) de diferentes tipos de materiales especialmente de los otros tipos de polímeros que estén acompañando al material de interés y también de metales, algunas veces vidrio o papel.

La importancia de la separación radica en que si existiesen otros materiales presentes, éstos podrían perjudicar el proceso de reciclaje o directamente empeorar la calidad del producto final.

Existen métodos de separación automatizada basados en las diferencias de gravedad específica, difracción de rayos x y disolución en solventes.



Fuente:[http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado\\_reciclado%20mecanico.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado_reciclado%20mecanico.htm)

Figura 2.4 Cinta de transportación para clasificación y separación

Otra alternativa es la de tener sistemas de flotación cuando se reducen de tamaño todas las especies a la vez, es decir se puede contar con sistemas de flotación, ya sean éstas equipos Sink and Float a burbujeo o simplemente tinas de flotación vibradoras con bandas transportadoras como las que se muestran. En estas tinas, el PET con una densidad mayor cae al fondo y es recogido por un tornillo sinfín que lo transporta a la siguiente etapa. El otro material que flota es recogido por unas paletas que arrastran desde la superficie el material hacia otra etapa.

### Limpieza

Los flakes de PET están generalmente contaminados con comida, papel, piedras, polvo, aceite, solventes y en algunos casos pegamento. De ahí que tienen que ser primero limpiados en un baño que garantice la eliminación de contaminantes.

El uso de hidrociclones cuando el desecho plástico está muy contaminado es una alternativa, el plástico contaminado es removido al ser ligero ya que flota en la superficie donde es expulsado. Los contaminantes caen al fondo y se descargan. Después del proceso de limpieza, los plásticos se llaman hojuelas limpias o granulado limpio.

El uso de detergentes esta limitado por la cuestión ambiental debido a que los efluentes del proceso o procesos de lavado deben ser tratados para que puedan ser reutilizados nuevamente en el ciclo de lavado. En segundo lugar, es necesario encontrar un adecuado sistema de purificación de las aguas residuales para no contaminar ni dañar el entorno en el cual se desarrolla el proceso de reciclado.

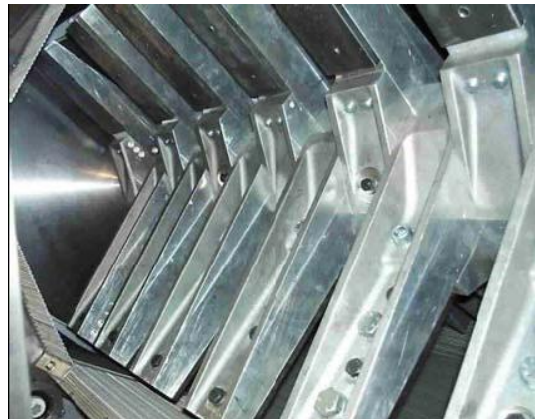
El uso de sosa cáustica para el proceso de lavado es adecuado por las bajas concentraciones necesarias y porque la soda cáustica remanente en disolución se puede reutilizar para otros lavados, simplemente reponiendo la que se pierde en el proceso de lavado.

Sobre este punto ya existen tecnologías y sistemas de recuperación y tratamiento de aguas residuales de procesos de lavado de materiales contaminados que están disponibles.

## Secado

Posterior al ciclo de lavado sigue un proceso de secado el cual debe eliminar el remanente de humedad del material, para que pueda ser comercializado y posteriormente procesado. Pueden usarse secadores centrifugados, es decir tambores especialmente diseñados para extraer la humedad por las paredes externas del equipo.

O también pueden utilizarse secadores de aire, ya sea caliente o frío, que circulando por entre el material picado, eliminen la humedad hasta límites permisibles.



Fuente:[http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado\\_reciclado%20mecanico.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado_reciclado%20mecanico.htm)

Figura 2.5 Secador centrifugador

Otros sistemas se han desarrollado para este proceso, dentro los cuales también están los de procesos simultáneos, los cuales combinan directamente los dos de los anteriormente mencionados. Es decir, sistemas que pueden al mismo tiempo operar como centrífugas con aire en contracorriente.

Procesos que combinan el molido y el lavado o el lavado y el secado, también son posibles y constituyen alternativas del proceso.



Fuente:[http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado\\_reciclado%20mecanico.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado_reciclado%20mecanico.htm)

Figura 2.6 Línea de lavado secado centrifugado

En los casos que se requiera extrema sequedad pueden usarse secaderos térmicos de doble lecho fluido con aire atemperado a 120 hasta 180 °C, durante periodos de entre 2, 4 a 6 horas dependiendo de la capacidad y diseño de los equipos.

### Peletizado

El granulado limpio y seco puede ser ya vendido o puede convertirse en "pellet". Para esto, el granulado debe fundirse y pasarse a través de un cabezal para tomar la forma de espagueti al enfriarse en un baño de agua.

La extrusión puede clasificarse como un proceso continuo, en el cual en todo instante de trabajo normal de un equipo de extrusión se obtiene producto invariable y constante en cualquier punto de su longitud.



Fuente:[http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado\\_reciclado%20mecanico.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado_reciclado%20mecanico.htm)

Figura 2.7 Extrusores para PET

Durante la transformación, la resina alimentada es reblandecida por acción de la temperatura que proviene generalmente de resistencias eléctricas y por la fricción de un elemento giratorio denominado husillo.

En este estado de “fusión” el plástico es forzado e impulsado a salir bajo presión a través de una matriz metálica que le confiere forma definida y sección transversal constante, esta matriz denominada “dado” es la que le da la forma útil al producto para que finalmente éste sea enfriado, favoreciendo su solidificación y confiriéndole estabilidad, evitando así deformaciones posteriores. Una vez frío es cortado en pedazos pequeños llamados "pellets".

Anteriormente el proceso de extrusión cerraba el proceso de reciclado, quedando los pellets como producto final, pero con el tiempo la tecnología que puede incorporar directamente las hojuelas o flakes de PET directamente ha hecho que este paso solo se utilice para la fabricación de fibras, filamentos y en algunos casos película para termoformado.

Por esta razón en los procesos convencionales ya no es necesario llegar al peletizado, sino directamente a los flakes, limpios y sin degradar.



Fuente:[http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado\\_reciclado%20mecanico.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso05pet/reciclado_reciclado%20mecanico.htm)

Figura 2.8 Equipo para monofilamento

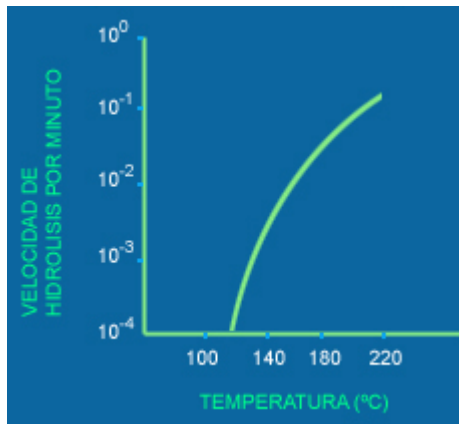
## 2.3 SECADO DEL PET

Un requisito esencial para el proceso de la resina de polietileno tereftalato (PET) es el control cuidadoso del secado del material .

El PET, en forma sólida, absorbe humedad del medio ambiente (semejante a un desecante). Así, durante el almacenaje, la resina absorberá humedad hasta alcanzar el equilibrio. Este valor puede ser tan alto como 0.6% en peso, dependiendo de las condiciones del lugar donde sea almacenado. En la práctica, la resina no absorbe niveles de humedad mayores a 0.2% en peso si se mantiene en un lugar cubierto y durante periodos cortos de tiempo. Sin embargo, para fabricar un buen producto de PET, se requiere reducir la humedad a menos de 0.004% (40 partes por millón) .

La razón para esto, es que a temperaturas superiores al punto de fusión, el agua presente hidroliza rápidamente al polímero, reduciendo su peso molecular así como sus propiedades características.

La hidrólisis puede ocurrir en el sólido desde temperaturas tan bajas como 150°C, aunque a poca velocidad. A medida que la temperatura se incrementa, la velocidad de hidrólisis también aumenta como se muestra en la figura. Existe, sin embargo, un límite de temperatura máxima de secado sin causar una caída excesiva de viscosidad intrínseca (V.I.). En la práctica, desde el punto de vista económico y de eficiencia, las mejores condiciones de secado se alcanzan entre 165°C y 170°C.

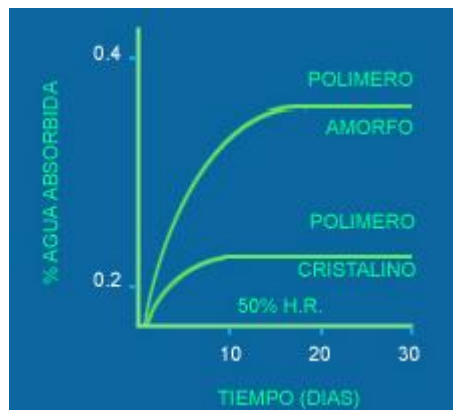


Fuente: <http://www.aprepet.org.mx/>

Figura 2.9 Hidrólisis del PET

### 2.3.1 ABSORCIÓN DE HUMEDAD

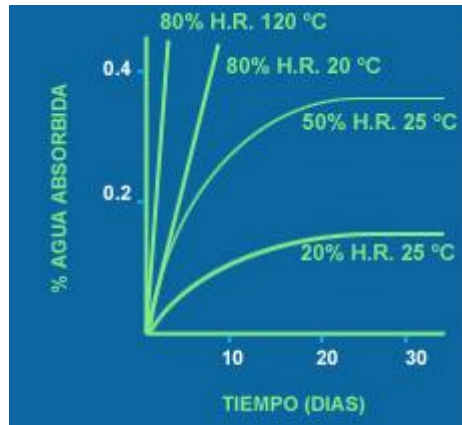
Como ya se indicó, existe absorción de humedad del medio ambiente tan pronto como el granulado de PET sale del proceso final de su elaboración. La velocidad de absorción depende de cuatro factores para un tamaño específico de recorte. Estos son: tiempo, temperatura, humedad atmosférica (punto de rocío) y la cristalinidad de la hojuela. EL PET amorfo absorbe humedad más rápidamente que el PET cristalino. En este sentido, la alta cristalinidad natural (> 50%) confiere un reducción en la velocidad de absorción de humedad, bajo ciertas condiciones, como se indica en la figura.



Fuente: <http://www.aprepet.org.mx/>

Figura 2.10 Absorción de la Humedad del PET

La siguiente figura ilustra la influencia de la temperatura y humedad del medio ambiente sobre la humedad absorbida así como la necesidad de tener cuidado con el almacenaje, el cual de preferencia debe ser bajo cubierta.



Fuente: <http://www.aprepet.org.mx/>

Figura 2.11 Influencia de la Temperatura sobre la Humedad Absorbida

### 2.3.2 ELIMINACIÓN DE HUMEDAD

El proceso inverso a la absorción de humedad, es sin duda el secado. En el caso de PET, la humedad contenida no sólo se encuentra en la superficie sino también es absorbida por el granulado al introducirse en el interior de éste por difusión. Es aquí donde el secado del PET difiere de otros procesos, donde sólo la humedad superficial tiene que ser eliminada .

Debido a esta penetración de humedad, se requiere un tiempo relativamente largo de secado a temperaturas elevadas de operación. Por otro lado, la estructura y tamaño del granulado, influye en la velocidad del secado.

Esto se debe a que el paso que controla el proceso de deshumidificación, es el de difusión de agua a través de la hojuela hasta su superficie. El tiempo de difusión se puede minimizar disminuyendo el tamaño de granulado y con un diseño que aumente el área superficial de contacto de la hojuela con el aire de secado.



Los otros tipos de transferencia de masa que ocurre en el secado de PET son:

1. La transferencia de agua a través del sistema binario sólido / gas.
2. La difusión de vapor de agua dentro de la atmósfera o medio que lo rodea.

Una precaución adicional debe ser considerada con respecto al manejo previo de la hojuela seca antes de la inyección. Como ya se mencionó, el PET es un desecante el cual aumenta su capacidad para captar humedad cuando se incrementa la temperatura. El poliéster seco caliente puede ganar humedad a una velocidad de 5 a 10 ppm por segundo en contacto con aire ambiental, por lo que es esencial que el manejo de la hojuela seca se efectúe con aire cuyo punto de rocío no sea mayor al que tiene el aire de secado. Por lo anterior se recomienda contar con un equipo de prueba para determinar el contenido de humedad retenida en el material.

### **2.3.3 EQUIPO DE SECADO**

El análisis hasta aquí efectuado sobre el secado de PET nos lleva a requerir de un equipo capaz de generar un gas (aire o nitrógeno) con un bajo punto de rocío, con control de temperatura utilizando un proceso mecánico que garantice una variación mínima de temperatura entre el granulado individual y el contacto efectivo gas/sólido. La selección puede ser entre una operación batch o en continuo.

Los secadores tipo batch ya sea con cama fluidizada o por métodos rotatorios, tienen la desventaja de variar de batch a batch provocando cambios potenciales en las características del producto. Además el costo del equipo es incrementado debido a la necesidad de adquirir en forma adicional la tolva de sostenimiento.

Los secadores de proceso continuo tipo columna con movimiento vertical, son usados por algunas compañías, obteniendo buenos resultados en la operación así como en el costo. Los puntos esenciales en la selección de este tipo de secador son asegurar un buen flujo del polímero, distribución uniforme del gas a través del polímero y obtener un gradiente mínimo de temperatura entre la longitud y radio de

la columna. Debido a que la resina está ya cristalizada, no se requiere de un precristalizador antes del secado tal como se requiere con el polímero amorfo.

### **2.3.4 SECADO DEL PET**

Los detalles teóricos sobre el secado de PET son explicados al principio . A continuación se presentan los aspectos más importantes para un buen proceso de secado así como los problemas prácticos y los aspectos que deben ser considerados para asegurar un proceso confiable y eficiente.

Requerimientos claves e implicaciones prácticas

Temperatura correcta de secado.

La temperatura del chip deberá estar entre 150°C y 160°C.

Temperatura correcta del aire de secado

Este no debe exceder de 180°C, medido a la entrada del aire del secador

Punto de rocío correcto del aire de secado

Este no deberá ser mayor de -30°C., siendo recomendable en la práctica valores menores o iguales a -40°C., medido a la entrada del secador.

Adecuado flujo de aire de secado a través de la hojuela.

Muchos secadores operan con flujos de aire de 1 pie<sup>3</sup>/ min. Para 1 lb/hr. De chip inyectado como requerimiento mínimo. Obviamente el flujo de aire debe tener la temperatura y punto de rocío adecuados.

Tiempo de residencia del chip (tiempo de secado).

Se recomienda que el tiempo de residencia para la Resina PET no sea menor a 4 horas, siendo común trabajar entre 6 y 8 horas. El tiempo de secado teórico, puede ser calculado dividiendo la capacidad del secador (Kg) entre la productividad de la máquina (Kg/hr).

### 2.3.5 PRINCIPALES PROBLEMAS QUE DEBEN SER CONSIDERADOS

En una operación eficiente, con un buen cumplimiento de los requerimientos básicos del secado, los problemas deben ser mínimos. Sin embargo, los siguientes puntos deben ser considerados:

#### Filtro del aire

Los filtros protegen al desecante del polvo y su limpieza en forma rutinaria es esencial. Se debe tener mucho cuidado para no dañarlos ya que disminuirá su eficiencia en el secado.

#### Mal funcionamiento

Si ocurre algún bloqueo o falla mecánica del enfriador del aire, se provoca una pérdida de la eficiencia en la capacidad de regeneración del desecante, incrementándose el punto de rocío y disminuyendo su capacidad de captación de humedad.

#### Fallas del calentador

Las fallas en el calentador de aire pueden presentarse debido a:

- a) Incapacidad para alcanzar la temperatura correcta de secado
- b) Incapacidad para alcanzar la temperatura adecuada para la regeneración del desecante

#### Ingreso del aire ambiental

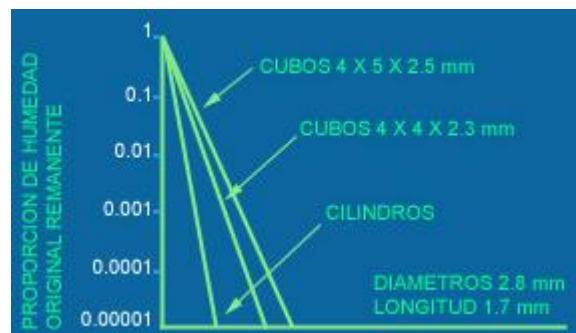
Este se aplica particularmente a sistemas que emplean succión para transportar la hojuela. El aire del medio ambiente siempre estará húmedo comparado con el gas de secado. Si alguna cantidad de este aire es introducido en el sistema, se producirá una variación en el punto de rocío y por lo tanto en la eficiencia del secado. Bajo estas circunstancias, en el caso de remover un componente del secador, se debe tener cuidado al reensamblar la parte, colocando empaques adecuados y probando el sistema contra fugas.

Transporte de la hojuela seca

Si el secador no está colocado encima del inyector, es esencial que los granulados de PET sean transportados con aire seco con una temperatura y punto de rocío equivalente al gas de secado. De no hacerlo así se puede provocar la humidificación del granulado con los subsecuentes efectos negativos sobre su procesamiento, claridad del producto y degradación hidrolítica

### 2.3.6 IMPLICACIONES PRÁCTICAS

Las fallas en el equipo pueden provocar un secado ineficiente, produciendo preformas y envases fuera de especificación así como incremento en los costos de operación.



Fuente: <http://www.aprepet.org.mx/>

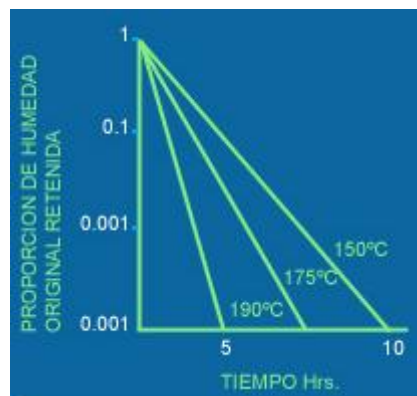
Figura 2.12 Efecto de la forma de la Hojuela Secado de PET a 170°

En este sentido, un flujo de gas con bajo punto de rocío es normalmente utilizado, el cual además de mantener un diferencial en la presión parcial del agua entre la fase sólida y gaseosa, también provee de la transferencia de calor requerido en la dehumidificación. De los tres tipos de transferencia de masa involucrados, el de difusión resulta ser el que controla el proceso debido a que es el que se efectúa a mucha menor velocidad.

Otros parámetros que influyen en la velocidad de secado son la humedad y temperatura del gas utilizado, como se indica en la figura donde se observa un incremento en la velocidad a temperaturas elevadas. Este resultado, sin embargo,

no es suficiente para asumir que se tienen las mejores condiciones de operación en el secado del material .

La influencia de la humedad y temperatura del gas de secado es mucho más complejo teniendo efectos significativos sobre la estructura química y propiedades finales de la resina debido a una degradación potencial del material por los procesos térmicos y de hidrólisis.



Fuente: <http://www.aprepet.org.mx/>

Figura 2.13 Efectos de la Temperatura de Secado y Humedad Removida

### 2.3.7 REQUERIMIENTOS DEL AIRE DE SECADO

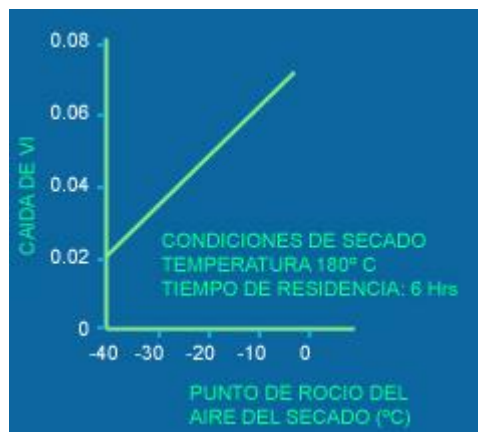
Como ya se mencionó, la velocidad en el proceso de hidrólisis con la consecuente reducción de la Viscosidad Intrínseca se incrementa a temperaturas arriba de 150°C y si el proceso de transferencia de calor es más rápido que el proceso de difusión, el secado puede ser una desventaja en la operación .

Adicionalmente, si la humedad ha sido removida a temperaturas de secado mayores a 180°C se puede conducir a una degradación termo-oxidativa donde se rompen las cadenas del polímero, produciendo subproductos indeseables con la consecuente disminución de las propiedades físicas .

Entre los subproductos se encuentra la generación de acetaldehído y cambios

físicos que pueden producir una apariencia turbia-blanquesina en las preformas debido a la disminución de V.I., así como una tonalidad amarillenta producida por la degradación. No obstante se recomienda efectuar el secado entre 165°C y 170°C, con un tiempo entre 4 y 8 horas hasta lograr que el contenido de humedad de la hojuela sea de un máximo de 40 ppm. Estas condiciones minimizarán las interacciones entre los procesos involucrados

La influencia de la humedad del gas de secado a una temperatura dada es un factor que debe ser también considerado como se indica en la figura. De aquí se puede observar que el punto de rocío, el cual es una medida indirecta del contenido de humedad del gas de secado, debe ser menor a  $-30^{\circ}\text{C}$ , condición que evita una elevada caída en la viscosidad sin disminuir la eficiencia del secado. En la práctica, el punto de rocío comúnmente usado para el aire es de  $-40^{\circ}\text{C}$ .

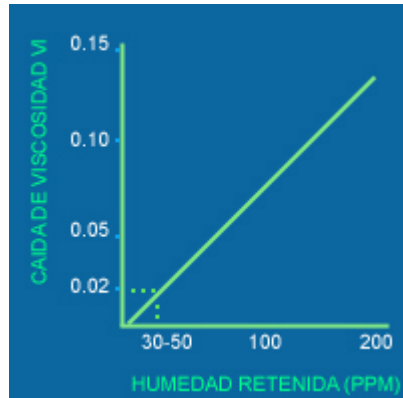


Fuente: <http://www.aprepet.org.mx/>

Figura 2.14 Dependencia de la Caída de Viscosidad Intrínseca

### 2.3.8 HUMEDAD RETENIDA DE LA HOJUELA SECA

La importancia de la eliminación de humedad, es mostrada mediante un cálculo teórico donde se obtiene una pérdida de V.I. de 0.01 casi de forma instantánea, por cada 16 ppm de humedad retenida en PET fundido.



Fuente: <http://www.aprepet.org.mx/>

Figura 2.15 Relación entre caída de viscosidad y humedad retenida

Muchos productos tales como alimentos, cosméticos y farmacéuticos entre otros, requieren materiales de empaque especiales donde el color es un importante aspecto que debe ser considerado. El PET en este sentido es ya utilizado con éxito en colores verde y ámbar principalmente en los envases para bebidas carbonatadas y farmacéuticos, así como otras aplicaciones. Claridad y brillo son algunas de las propiedades esenciales que otorga a sus productos.

En el caso de alimentos particularmente, los requerimientos para cualquier envase de plástico son muy rigurosos; sin embargo, el PET en color ha demostrado ser un material apropiado para el manejo de los alimentos, siendo aprobado por la F.D.A. en Estados Unidos y la Secretaría de Salubridad y Asistencia a través del Sector Salud de México.

## 2.4 TRANSFERENCIA DE CALOR

Hay tres formas diferentes en las que el calor puede pasar de la fuente al receptor, aun cuando muchas de las aplicaciones en la ingeniería son combinaciones de dos o tres. Estas son, conducción, convección y radiación.

### 2.4.1 CONDUCCIÓN.

La conducción es la transferencia de calor a través de un material fijo tal como la pared estacionaria.

La conducción es el método más habitual de transmisión de calor en proceso de calentamiento/enfriamiento de materiales sólidos opacos. Si existe un gradiente de temperatura en un cuerpo, tendrá lugar una transmisión de calor desde la zona de alta temperatura hacia la que esta a temperatura más baja. La ecuación para determinar la transferencia de calor es:

$$Q = -k * A * \frac{dT}{dx}$$

Donde

Q: Flujo de calor por conducción (W);

k: conductividad térmica, en (W/m°C);

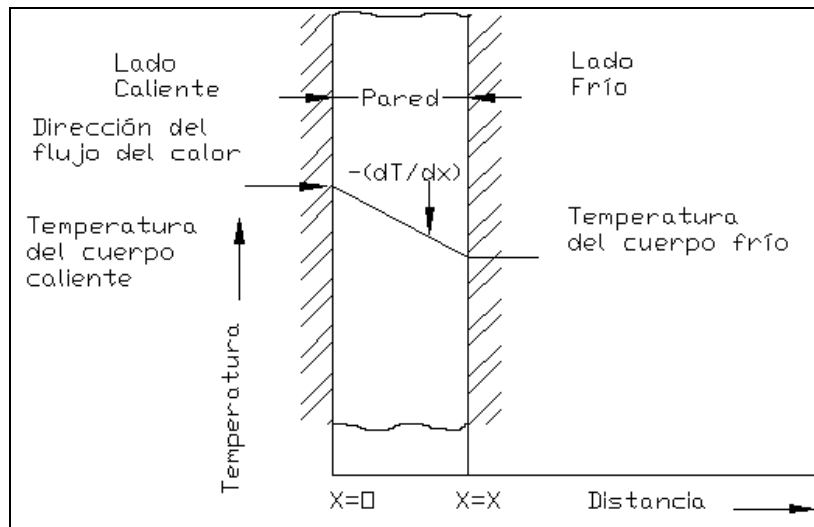
A: Es el área normal en dirección x (m<sup>2</sup>);

dT /dx: gradiente de temperatura;

dT: diferencial de temperatura (°C);

dx: espesor de la pared (m).





Fuente: <http://es.libros.resauce.com>

Figura 2.16. Flujo de calor a través de una pared

La conductividad térmica de los sólidos tiene un amplio rango de valores numéricos dependiendo de si el sólido es relativamente un buen conductor del calor, tal como un metal, o un mal conductor como el asbesto. Estos últimos sirven como aislantes. Aun cuando la conducción de calor se asocia usualmente con la transferencia de calor a través de los sólidos, también es aplicable a gases y líquidos, con sus limitaciones.

#### 2.4.2 CONVECCIÓN.

La transmisión de calor por convección ocurre cuando un fluido circula alrededor de un sólido, por ejemplo por el interior de una tubería, existiendo una diferencia de temperatura entre ambos tiene lugar un intercambio de calor entre ellos. El calentamiento y enfriamiento de gases y líquidos son los procesos más habituales de este mecanismo de transferencia de calor.

Dependiendo de si el flujo del fluido es provocado artificialmente o no, se distinguen dos tipos de transferencia de calor: forzada y natural (libre). La convección forzada implica el uso de algún medio mecánico, como una bomba o

un ventilador, para provocar el movimiento del fluido. En cambio la convección natural tiene lugar a causa de diferencias de densidad provocadas a su vez por gradientes de temperatura. Ambos mecanismos pueden provocar un movimiento laminar o turbulento del fluido.

El flujo de calor se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton que se expresa por:

$$Q = h * A * (T_p - T_{\infty})$$

Donde

Q: Flujo de calor por convección (W);

h: coeficiente de transmisión de calor por convección, en (W/m<sup>2</sup>°C);

A: Es el área (m<sup>2</sup>);

T<sub>p</sub>: Temperatura de pared (°C);

T<sub>∞</sub>: Temperatura del fluido (°C).

La tabla siguiente muestra algunos valores orientativos de h.

<b>Fluido</b>	<b>Coficiente de convección (W/m<sup>2</sup>°K)</b>
<b>Aire</b>	
Convección natural	5 - 25
Convección forzada	10 – 200
<b>Agua</b>	
Convección natural	20 - 100
Convección forzada	50 – 10000

Fuente: <http://es.libros.resauce.com>

Tabla 2.2 Coeficientes de convección orientativos

### 2.4.3 RADIACIÓN.

La radiación involucra la transferencia de energía radiante desde una fuente a un receptor. Cuando la radiación se emite desde una fuente a un receptor, parte de la energía se absorbe por el receptor y parte es reflejada por él. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación no requiere ningún medio para su propagación y puede tener lugar incluso en el vacío

La energía irradiada o emitida por una superficie es proporcional a su temperatura absoluta elevada a la cuarta potencia y depende de las características de la superficie. El flujo de calor emitido por una superficie se expresa mediante la ecuación:

$$Q = \varepsilon * \sigma * A * T^4$$

Donde:

Q: Flujo de calor por radiación (W)

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzman  $5.669 \times 10^{-8}$  (W/m<sup>2</sup>°K<sup>4</sup>)

$\varepsilon$  : Emisividad de la superficie.

A: Área de transferencia de calor (m<sup>2</sup>).

T: temperatura de la superficie irradiante (°K)

### 2.4.4 CONDICIONES DE CONTORNO DE CONVECCIÓN.

#### **Coefficiente global de transferencia.**

Es conveniente expresar la tasa de transferencia de calor para problemas que constan simultáneamente de convección y conducción caloríficas en la forma de (2.12), reemplazando h por un coeficiente global de transferencia calorífica U.

## Pared plana.

En la figura 2.12 se representa una pared plana de material homogéneo y uniforme, de conductividad térmica constante, expuesto al contacto del fluido  $i$  de temperatura  $T_i$  de un lado, y al del fluido  $o$  de temperatura  $T_o$  del otro. Generalmente, las temperaturas de los fluidos, suficientemente lejanos de la pared para no ser afectadas por la transferencia de calor, son conocidas, y las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  no se especifican.

Aplicando (2.9) a las dos caras del material tendremos

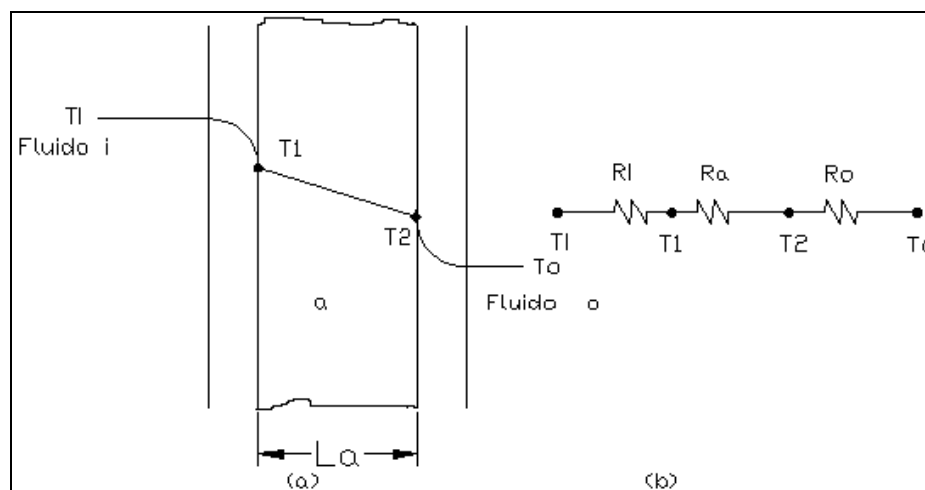
$$\frac{q}{A} = h_i (T_i - T_1)$$

$$\frac{q}{A} = h_o (T_2 - T_o)$$

$$q = \frac{T_i - T_1}{1/h_i A}$$

$$q = \frac{T_2 - T_o}{1/h_o A}$$

Donde la barra sobre  $h$  denota el valor promedio de toda la superficie.



Fuente: <http://es.libros.resauce.com>

Figura 2.17. Analogía eléctrica de la pared plana.

De conformidad con la analogía eléctrica, se puede considerar que  $1/hA$  es la resistencia térmica producida por la convección de contorno. Así, la analogía eléctrica con este problema es la de tres resistencias en serie, figura 2.12 (b). Aquí,  $R_a = L_a / K_a A$  es la resistencia de conducción debida al material homogéneo a. Como el flujo del calor de conducción dentro del sólido debe ser exactamente igual al flujo del calor de convección en el contorno, dará

$$\frac{q}{A} = \frac{T_i - T_0}{1/\bar{h}_i + L_a/k_a + 1/\bar{h}_0} = \frac{(\Delta T)_{global}}{A \sum R_t}$$

Si se define el coeficiente global de transferencia de calor U, por

$$U = \frac{1}{A \sum R_t}$$

para cualquier forma geométrica, vemos que

$$\frac{q}{A} = U(\Delta T)_{global}$$

y para la pared plana de la figura 2.12(a),

$$U = \frac{1}{1/\bar{h}_i + L_a / K_a + 1/\bar{h}_0}$$

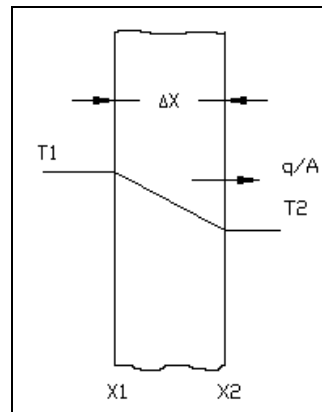
Para una pared plana de capas múltip

$$U = \frac{1}{1/\bar{h}_i + L_a / K_a + L_b / K_b + \dots + 1/\bar{h}_0}$$

## 2.4.5 CONDUCCIÓN UNIDIMENSIONAL EN EL ESTADO ESTABLE.

### Pared plana.

El más sencillo de los problemas de transferencia de calor es el del estado estable de conducción en una pared plana de material homogéneo y que posee conductividad térmica constante y una temperatura constante y uniforme en cada cara de la pared plana, como se ve en la figura 2.8.



Fuente: <http://es.libros.resauce.com>

Figura 2.18. Pared plana.

Separando variables e integrando en (la ec. 2.11), donde la dirección del gradiente se toma en la dirección  $x$ , tenemos:

$$q \int_{x1}^{x2} dx = -kA \int_{T1}^{T2} dT$$

$$q = -kA \frac{T2 - T1}{x2 - x1} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

La ecuación puede ordenarse dando:

$$q = \frac{T1 - T2}{\Delta x / kA} = \frac{\text{diferencia potencial térmico}}{\text{resistencia térmica}}$$

Nótese que la resistencia al flujo de calor es directamente proporcional al grosor del material, inversamente proporcional a la conductividad térmica, e inversamente proporcional al área normal a la dirección de la transferencia de calor.

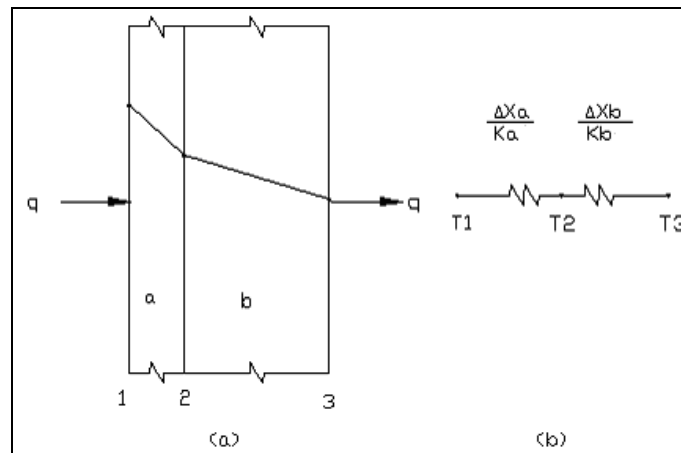
Estos principios realmente son extensivos al caso de una pared plana compuesta, como se muestra en la figura 2.9 (a). En el estado estable la tasa de transferencia de calor que entra en la cara izquierda es la misma que abandona la cara derecha.

$$q = \frac{T_1 - T_3}{\Delta x_a / k_a A + \Delta x_b / k_b A}$$

Las ecuaciones ilustran la analogía que hay entre la transferencia térmica por conducción y el flujo de corriente eléctrica, analogía ésta basada en la similitud entre las leyes de Fourier y de Ohm. Es conveniente expresar la ley de Fourier como

$$\text{flujo de calor conductivo} = \frac{\text{diferencia total de temperatura}}{\text{suma de las resistencias térmicas}}$$

En el caso de la pared plana compuesta de dos capas, la resistencia térmica total es sencillamente la suma de las dos resistencias en serie como se indica en la Figura 2.9. (b). La extensión a tres o más capas es obvia.



Fuente: <http://es.libros.resauce.com>

Figura 2.19. Pared plana compuesta.

## 2.4.6 CONDICIONES DE CONTORNO DE CONVECCIÓN.

### Coefficiente global de transferencia.

Es conveniente expresar la tasa de transferencia de calor para problemas que constan simultáneamente de convección y conducción caloríficas en la forma de (2.12), reemplazando  $h$  por un coeficiente global de transferencia calorífica  $U$ .

### Pared plana.

En la figura 2.12 se representa una pared plana de material homogéneo y uniforme, de conductividad térmica constante, expuesto al contacto del fluido  $i$  de temperatura  $T_i$  de un lado, y al del fluido  $o$  de temperatura  $T_o$  del otro. Generalmente, las temperaturas de los fluidos, suficientemente lejanos de la pared para no ser afectadas por la transferencia de calor, son conocidas, y las temperaturas  $T_1$  y  $T_2$  no se especifican.

Aplicando (2.9) a las dos caras del material tendremos



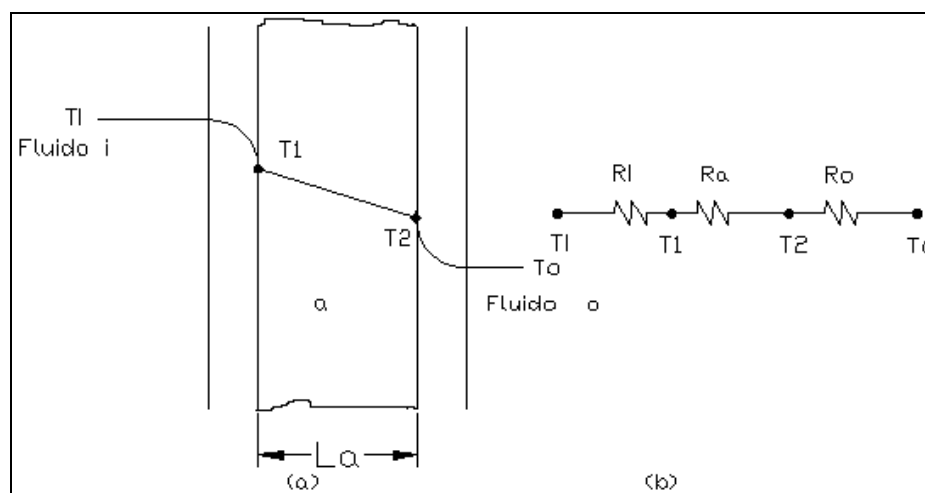
$$\frac{q}{A} = h_i (\bar{T}_i - T_1)$$

$$\frac{q}{A} = h_o (\bar{T}_o - T_2)$$

$$q = \frac{T_i - T_1}{1/h_i A}$$

$$q = \frac{T_2 - T_o}{1/h_o A} \quad (2.19)$$

Donde la barra sobre h denota el valor promedio de toda la superficie.



Fuente: <http://es.libros.resauce.com>

Figura 2.20. Analogía eléctrica de la pared plana.

De conformidad con la analogía eléctrica, se puede considerar que  $1/hA$  es la resistencia térmica producida por la convección de contorno. Así, la analogía eléctrica con este problema es la de tres resistencias en serie, figura 2.12 (b). Aquí,  $R_a = L_a / K_a A$  es la resistencia de conducción debida al material homogéneo a. Como el flujo del calor de conducción dentro del sólido debe ser exactamente igual al flujo del calor de convección en el contorno, dará

$$\frac{q}{A} = \frac{T_i - T_o}{1/\bar{h}_i + L_a/k_a + 1/\bar{h}_o} = \frac{(\Delta T)_{global}}{A \sum R_t}$$

Si se define el coeficiente global de transferencia de calor U, por

$$U = \frac{1}{A \sum R_i}$$

para cualquier forma geométrica, vemos que

$$\frac{q}{A} = U(\Delta T)_{global}$$

y para la pared plana de la figura 2.12(a),

$$U = \frac{1}{1/\bar{h}_i + L_a / K_a + 1/\bar{h}_o}$$

Para una pared plana de capas múltiples

$$U = \frac{1}{1/\bar{h}_i + L_a / K_a + L_b / K_b + \dots + 1/\bar{h}_o}$$

## 2.5 CALEFACTORES

Un calefactor eléctrico es un dispositivo que produce energía calorífica a partir de la eléctrica. El tipo más difundido es el calefactor eléctrico "resistivo", donde la generación del calor se debe al Efecto Joule.

Otros calefactores (y refrigeradores) eléctricos menos conocidos son los "termoeléctricos", que intercambian calor mediante un sistema más complicado: el Efecto Peltier.

Sirve para obtener calor de una forma cómoda, rápida y hasta elegante.

Entre las aplicaciones más conocidas del efecto Joule se tienen los elementos de las estufas para calentar el ambiente, los filamentos de los secadores para el pelo, las resistencias de las planchas para la ropa, las hornallas o fogones de las cocinas, las resistencias de tostadores y hornos industriales, los calentadores en los hervidores de agua y fermentadores, los alambres para evitar el congelamiento en refrigeradores y el empañamiento en vidrios de las ventanas traseras de automóviles, los calefactores en peceras e invernaderos, y muchísimas aplicaciones más.

### **2.5.1 FUNCIONAMIENTO**

Los calefactores resistivos generan calor proporcionalmente al cuadrado de la corriente eléctrica que fluye a través de ellos. Esta relación es conocida como Ley de Joule.

Los materiales conductores (metales y aleaciones) no son "conductores perfectos", sino que tienen una resistividad eléctrica al paso de la corriente eléctrica. La energía que se pierde en la conducción se disipa en forma de calor. La resistividad es una desventaja cuando se requiere transportar energía eléctrica, pero es deseable cuando se busca generar calor.

La explicación microscópica, pero "clásica", es que al haber una diferencia de potencial entre los extremos de un hilo conductor hay un campo eléctrico en el interior del material. Este campo acelera las cargas libres del material, hasta que éstas chocan (frenándose) con alguno de los iones fijos en la red cristalina que forma el conductor. En esos choques, las cargas ceden su energía cinética a los iones de la red, lo que corresponde a una disipación de calor desde el material al medio que le rodea.

A mayor temperatura hay mayor agitación en los iones de la red. Esto hace que sea mayor el espacio donde se mueven y, entonces, mayor la frecuencia de los choques de las cargas con los iones. Por lo tanto, la resistividad en los conductores metálicos aumenta con la temperatura. El valor de esta resistividad depende del tipo de átomos del metal, a sus enlaces, a la cantidad y tipo de impurezas, y a otros defectos como los debidos a deformación mecánica durante la fabricación y el conformado del conductor.

### **2.5.2 TRANSMISIÓN DE EL CALOR GENERADO EN EL CONDUCTOR**

Para evitar que se funda el conductor, hay que transferir el calor generado por efecto Joule. Para mejorar esa transmisión térmica, en general los calefactores tienen mayor área o superficie de contacto con el medio que les rodea. Dependiendo de la aplicación, el calor se transfiere en una o más de las 3 formas posibles:

Por conducción (hervidores, planchas, desempañadores, etc.)

Por convección (secadores de pelo, calentadores de aire, etc.)

Por radiación (tostadores, estufas de cuarzo, etc.)

### **2.5.3 CONSTRUCCIÓN**

Si las pérdidas de calor al ambiente fueran menores que los vatios generados por efecto Joule, la temperatura seguirá aumentando y el conductor puede llegar a fundirse. Por lo tanto, en el diseño de calefactores (que trabajan entre unos 50 y 1150 °C aproximadamente) es importante calcular bien el equilibrio térmico en el filamento; que el control de temperatura funcione bien; y considerar materiales que no sean tan buenos conductores, que no se fundan ni oxiden ni fracturen a la temperatura y atmósfera de trabajo, y cuya resistividad cambie muy poco con la temperatura.

El conjunto de aleaciones para calefactores (Nichrome, Chromax, Constantan y Nickel-Cobre-Zinc) se denominan "materiales resistivos".

## **2.6 TERMOCUPLAS**

La temperatura es una variable importante en la mayoría de los procesos industriales.

Su medición y control son vitales para asegurar uniformidad en la calidad de los productos terminados y para mantener dentro de los límites seguros, operaciones que entrañen riesgos de fuego y/o explosión. Dado que la temperatura es en sí, un índice del estado de energía cinética de un material, no puede medirse directamente como se mediría por ejemplo el nivel de un líquido. La medición debe entonces, basarse en los efectos del calor aplicable a los sólidos, líquidos o gases. El resultado de incremento o disminución de este calor provoca cambios en alguna de estas características:

Dimensiones

Cambio de presión a volumen constante

Cambio de la fuerza electromotriz (F.E.M.) desarrollada.

Cambio de la resistencia eléctrica.

Cambio de la radiación superficial.

Cambio de color.

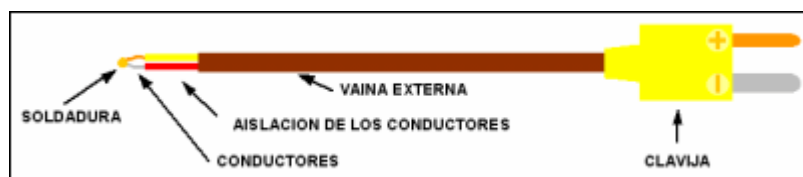
### 2.6.1 TERMOMETRÍA

Es la medición de temperatura. Esta se fundamenta en la medida cuantitativa de calor, lo que resulta preferible que fundarlo sobre el cambio de propiedades de las sustancias.

Esto es, si se determinan dos temperaturas como puntos fijos, digamos el punto de ebullición y el de congelación del agua pura bajo condiciones normales; la unidad de calor sería la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una cantidad unitaria de agua desde uno de dichos puntos fijos al otro.

La medida fundamental de temperatura, depende de un acuerdo internacional con respecto a un termómetro de gas con volumen constante y dos temperaturas fijas: los puntos de congelación y ebullición del agua. El manejo de este termómetro resulta impráctico en la mayoría de procesos por lo que se han ideado otros medidores cuyas calibraciones se basan sobre valores fijos de temperatura.

### 2.6.2 TERMOCUPLAS



Fuente:[http://www.sapiensman.com/medicion\\_de\\_temperatura/termocuplas.htm](http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termocuplas.htm)

Figura 2.21 Termocupla

Las termocuplas son el sensor de temperatura más común utilizado industrialmente. Una termocupla se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se

genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de los mili volts el cual aumenta con la temperatura.

El principio de medición de temperatura utilizando termocuplas se basa en tres principios físicos, que son:

1.- Efecto Seebeck: al unir dos cables de materiales diferentes formando un circuito, se presenta una corriente eléctrica cuando las juntas se encuentran a diferente temperatura.

2.- Efecto Peltier: consiste en que cuando una corriente eléctrica fluye a través de una junta de dos metales diferentes, se libera o absorbe calor. Cuando la corriente eléctrica fluye en la misma dirección que la corriente Seebeck, el calor es absorbido en la junta caliente y liberado en la junta fría.

3.- Efecto Thomson: un gradiente de temperatura en un conductor metálico está acompañado por un gradiente de voltaje, cuya magnitud y dirección depende del metal que se esté utilizando.

### **2.6.3 TIPOS DE TERMOCUPLAS**

Hay siete tipos de termocuplas que tienen designaciones con letras elaboradas por el Instrument Society of America (ISA). El U.S. National Bureau of Standardg (NBS), por su parte, ha preparado tablas de correlación temperatura fem para estas termocuplas, las que han sido publicadas por el American National Standards Institute (ANSI) y el American Society for Testing and Materials (ASTM).

Durante el año 1986. se ha procedido a uniformar las normas europeas DIN (alemanas), BS (inglesas), NF (francesas) y las antedichas ANSI (norteamericanas) en cuanto a la correlación de temperaturas y fem (fuerzas electromotrices ), así como en lo que hace a las tolerancias de estas fem en las distintas aleaciones.

Esto ha quedado homologado en la norma IEC 584 (International Electrotechnical Commission).

### Tipo B ( PtRh 30% - PtRh 6%)

Las ventajas de la termocupla Tipo B sobre la Tipo R o Tipo S son su capacidad para medir temperaturas levemente más altas, su mayor estabilidad y resistencia mecánica, y su aptitud de ser utilizada sin compensación de junta de referencia para fluctuaciones normales de la temperatura ambiente. Este último aspecto queda reflejado en la figura 4 por la pendiente despreciable de la curva de la termocupla Tipo B en la región de la temperatura ambiente.

Las termocuplas Tipo B resultan satisfactorias para uso continuo en atmósferas oxidantes o inertes a temperaturas hasta 1.700° C. También resultan satisfactorias durante cortos períodos de tiempo en vacío.

Las desventajas de la termocupla Tipo B son su baja tensión de salida y su incapacidad para ser utilizada en atmósferas reductoras (como ser hidrógeno o monóxido de carbono) y cuando se encuentran presentes vapores metálicos (eso es, de plomo o zinc ) o no metálicos (eso es, de arsénico, fósforo o azufre). Nunca se la debe usar con un tubo de protección metálico o termovaina (a partir de aquí, simplemente se la menciona como vaina).

### Tipo R (PtRh 13% - Pt )

Las termocuplas Tipo R pueden ser utilizadas en forma continua en atmósferas oxidantes o inertes hasta 1.400° C. No son tan estables como las Tipo B en vacío.

La ventaja de la termocupla Tipo R sobre la Tipo B es su mayor fem de salida.

La ASTM establece las siguientes limitaciones que se aplican al uso de las termocuplas Tipo R:

Nunca se las deben usar en atmósferas reductoras, ni tampoco en aquellas que contienen vapores metálicos o no metálicos u óxidos fácilmente reducidos, a menos que se las protejan adecuadamente con tubos protectores no metálicos.

Nunca deben ser insertadas directamente dentro de una vaina metálica.

### Tipo S (PtRh 10 % - Pt )

La termocupla Tipo S es la termocupla original platino-rodio. Es el estándar internacional (Escala Práctica Internacional de Temperaturas de 1968, IPTS-68) para la determinación de temperaturas entre el punto de solidificación del antimonio  $630,74^{\circ}\text{C}$  ( $1.167,33^{\circ}\text{F}$ ) y el punto de solidificación del oro  $1.064,43^{\circ}\text{C}$  ( $1.917^{\circ}\text{F}$ ).

Las termocuplas Tipo S, igual que las Tipo R, pueden ser utilizadas en forma continua en atmósferas oxidantes o inertes hasta  $1.480^{\circ}\text{C}$ . Tienen las mismas limitaciones que las termocuplas Tipo R y Tipo B y también son menos estables que la termocupla Tipo B cuando se las utiliza en vacío .

### Tipo J (Fe - CuNi )

La termocupla Tipo J, conocida como la termocupla hierro - constantán, es la segunda más utilizada en los EE.UU. El hierro es el conductor positivo, mientras que para el conductor negativo se recurre a una aleación de 55 % de cobre y 45 % de níquel (constantán).

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

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

No se deben usar en atmósferas sulfurosas por encima de  $540^{\circ}\text{C}$ .

A causa de la oxidación y fragilidad potencial , no se las recomienda para temperaturas inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$  .

No deben someterse a ciclos por encima de  $760^{\circ}\text{C}$  , aún durante cortos períodos de tiempo, si en algún momento posterior llegan a necesitarse lecturas exactas por debajo de esa temperatura.



El constantán utilizado para termocuplas Tipo J no es intercambiable con el constantán de las termocuplas Tipo T y Tipo E, ya que el constantán es el nombre genérico de aleaciones cobre-níquel con un contenido de cobre entre 45 % y 60 %. Los fabricantes de las termocuplas Tipo J regulan la composición del conductor de cobre-níquel de manera que la fem de salida de la termocupla siga la curva de calibración publicada. Los elementos fabricados por las distintas empresas, con frecuencia no son intercambiables para el mismo tipo de termocupla.

#### Tipo K (NiCr Ni)

La termocupla Tipo K se la conoce también como la termocupla Chromel-Alumel (marcas registradas de Hoskins Manufacturing Co., EE.UU.). El Chromel es una aleación de aproximadamente 90% de níquel y 10% de cromo, el Alumel es una aleación de 95% de níquel, más aluminio, silicio y manganeso, razón por la que la norma IEC la especifica NiCr - Ni. La Tipo K es la termocupla que más se utiliza en la industria, debido a su capacidad de resistir mayores temperaturas que la termocupla Tipo J.

Las termocuplas Tipo K pueden utilizarse en forma continua en atmósferas oxidantes e inertes hasta 1.260° C y constituyen el tipo más satisfactorio de termocupla para uso en atmósferas reductoras o sulfurosas o en vacío.

#### Tipo T (Cu - CuNi )

La termocupla Tipo T se conoce como la termocupla de cobre constantán. Resulta satisfactoria para uso continuo en vacío y en atmósferas oxidantes, reductoras e inertes. Su desventaja reside en el hecho de que su límite máximo de temperatura es de tan sólo 370° C para un diámetro de 3,25 mm.

Aunque las termocuplas Tipo T resulten adecuadas para mediciones debajo de 0° C, la ASTM recomienda para ese propósito a las termocuplas Tipo E.

### Tipo E ( NiCr - CuNi )

La termocupla Tipo E, o Chromel-constantán, posee la mayor fem de salida de todas las termocuplas estándar , según se muestra en la figura 4. Para un diámetro de 3,25 mm su alcance recomendado es - 200° C a 980° C.

Estas termocuplas se desempeñan satisfactoriamente en atmósferas oxidantes e inertes, y resultan particularmente adecuadas para uso en atmósferas húmedas a temperaturas subcero a raíz de su elevada fem de salida y su buena resistencia a la corrosión. La termocupla Tipo E es mejor que la Tipo T, para este propósito a causa de su mayor salida y puesto que la conductividad térmica del alambre de Chromel es menor que la del alambre de cobre de la termocupla Tipo T.

Tabla 2. 3 Termocuplas

<u>Tipo</u>	<u>Denominación</u>	<u>Composición y símbolo</u>	<u>Rango de temperaturas (1) (en °C)</u>	<u>Diámetro del alambre apropiado (2)</u>	<u>F.e.m.en mV (3)</u>
<b>B</b>	Platino-rodio 30% vs. platino-rodio 6%	PtRh 30% - PtRh 6%	0 ...1.500 (1.800)	0,35 y 0,5 mm	0...10,094 (13,585)
<b>R</b>	Platino-rodio 13% vs. platino	PtRh 13% - Pt	0...1.400 (1.700)	0,35 y 0,5 mm	0.16,035 (20,215)
<b>S</b>	Platino-rodio 10% vs. platino	PtRh 10% - Pt	0...1300(1.600)	0,35 y 0,5 mm	0...13,155 (15,576)
<b>J</b>	Hierro vs. constatán	Fe - CuNi	-200 ... 700 (900)  -200 ... 600 (800)	3 mm 1mm	-7.89 ... 39,130 (51,875)  -7.89 ... 33,096 (45,498)
<b>K</b>	Niquel-cromo vs. níquel (Chromel vs. Alumel )	NiCr - Ni	0...1000(1.300)  0 ... 900 (1.200)	3 ó 2 mm  1,38 mm	0...41,269 (52,398)  0...37,325 (48,828)
<b>T</b>	Cobre vs. constatán	Cu - CuNi	-200 ... 700 (900)	0,5 mm	-5,60 ...14,86 (20,86)
<b>E</b>	Niquel-cromo vs. constatán (Chromel vs. constatán )	NiCr - CuNi	-200 ... 600 (800)	3 mm	-9,83 ... 53,11 (68,78)  -8,83 ... 45,08 (61,02)

Fuente:[http://www.sapiensman.com/medicion\\_de\\_temperatura/termocuplas.htm](http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termocuplas.htm)

Composición, rango de temperaturas, diámetros de alambre apropiado y fuerzas electromotrices (fem) correspondientes a distintas termocuplas.

(1) Los valores entre paréntesis son los admitidos en intervalos cortos (no permanentes )

(2) Los diámetros de alambres no son indicativos

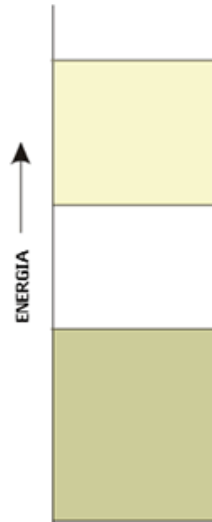
(3) Valores de fem (mV) en función de ° C , referencia junta fría 0° C.

## **2.7 AISLAMIENTO**

Un aislante térmico es un material usado en la construcción y caracterizado por su alta resistencia térmica. Establece una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura.

Un sólido es aislante cuando su banda de valencia se encuentra totalmente ocupada y existe una gran separación energética entre ésta y la banda de conducción. Esta separación energética entre ambas bandas suele ser mayor de 3.0 eV para que la sustancia se considere un aislante. Un buen ejemplo de material aislante es el diamante cuya diferencia entre bandas es de 5.47 eV.

Los materiales aislantes son utilizados para separar conductores eléctricos y así evitar cortocircuitos y mantener apartar a los usuarios de las partes de los sistemas eléctricos, que de tocarse accidentalmente cuando se encuentran en tensión pueden producir una descarga. Los materiales aislantes más frecuentemente utilizados son los plásticos y las cerámicas.



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Aislante\\_t%C3%A9rmico](http://es.wikipedia.org/wiki/Aislante_t%C3%A9rmico)

Figura 2.22 Estructura de un aislante.

El mejor aislante térmico es el vacío, pero debido a la gran dificultad para obtener y mantener condiciones de vacío, éste se emplea en muy pocas ocasiones. En la práctica se utiliza aire, que gracias a su baja conductividad térmica y un bajo coeficiente de absorción de la radiación, constituye un elemento muy resistente al paso de calor. Sin embargo, el fenómeno de convección que se origina en las cámaras de aire aumenta sensiblemente su capacidad de transferencia térmica. Por esta razón se utilizan como aislamiento térmico materiales porosos o fibrosos, capaces de inmovilizar el aire y confinarlo en el interior de celdillas más o menos estancas. Aunque en la mayoría de los casos el gas encerrado es aire común, en aislantes de celda cerrada (formados por burbujas no comunicadas entre sí, como en el caso del poliuretano proyectado), el gas utilizado como *agente espumante* es el que queda finalmente encerrado. También es posible utilizar otras combinaciones de gases distintas, pero su empleo está muy poco extendido. Se suelen utilizar como aislantes térmicos: lana de roca, fibra de vidrio, vidrio celular, poliestireno expandido, poliestireno extruido, espuma de poliuretano, aglomerados de corcho, etc.

## Lana de roca

La Lana de roca es un material aislante térmico y acústico, incombustible. Este material se diferencia de otros aislantes en que es un material resistente al fuego, con un punto de fusión superior a los 1.000 °C. Las principales aplicaciones son el aislamiento de cubierta, tanto inclinada como plana (cubierta europea convencional, con lámina impermeabilizante autoprottegida), fachadas ventiladas, fachadas monocapa, fachadas por el interior, particiones interiores, suelos acústicos y aislamiento de forjados. Cuando se tiene un techo de teja con machihembrado, se utiliza un fieltro sin revestimiento o bien otro con un papel kraft en una cara, lo que favorece la colocación. Además, se utiliza para la protección pasiva tanto de estructuras, como de instalaciones y penetraciones. La lana de roca se comercializa en paneles rígidos o semirígidos, fieltros, mantas armadas y coquillas. La lana de roca también es un excelente material para aislamiento acústico en construcción liviana, para suelos, techos y paredes interiores.

Coef. de conductividad: 0,034 a 0,042 W/(m.K.)



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Aislante\\_t%C3%A9rmico](http://es.wikipedia.org/wiki/Aislante_t%C3%A9rmico)

Figura 2.23 Panel rígido de lana de roca.

Son tubos premoldeados con diámetro exacto de la cañería a aislar. Como toda lana mineral, es incombustible. La lana de roca resiste temperaturas hasta 1000 °C

Densidades: 140-160 kg/m<sup>3</sup>

## Lana de vidrio

Cuando se tiene un techo de tejas con un machihembrado y se lo desea aislar con lana de vidrio se debe usar un producto para tal fin, que es una lana de vidrio en paneles con mayor densidad, hidrófugo e higroscópico. Cuando se tiene un techo de chapa, la línea de producto que se debe utilizar es el trasdosado con una hoja de

aluminio reforzado en una cara para que actúe de resistencia mecánica, como barrera de vapor y como material reflectivo.

Coef. de conductividad: 0,065 a 0,056 W/m·K (0,056 a 0,049 kcal/h·m·°C)

#### Vidrio expandido

Aunque ahora se usa relativamente poco, es un material muy interesante, puesto que además de aislante es una barrera de vapor muy efectiva, lo que no suele ser normal en los aislantes térmicos.

Está formado por vidrio, generalmente reciclado y sin problemas de tratar el color, puesto que no importa el color del producto, que se hace una espuma en caliente, dejando celdillas con gas encerrado, que actúan como aislante. Como se ha dicho, funciona adecuadamente como barrera de vapor, lo que hace este material muy adecuado para aislar puentes térmicos en la construcción, como pilares en muros de fachada. Su rigidez le hace más adecuado que otros aislantes para poder recubrirlo de yeso.

#### Espuma de poliestireno

El material de espuma de poliestireno, es un aislante derivado del petróleo y del gas natural del cual se obtiene el polímero plástico estireno en forma de gránulos. Para construir un bloque de, por ejemplo, 1 m<sup>3</sup>, se incorpora en un recipiente metálico una cierta cantidad del material que tiene relación con la densidad final del mismo y al inyectar vapor de agua se expanden los gránulos hasta formar un bloque. Este se corta en placas del espesor deseado para su comercialización mediante un alambre metálico caliente.

Dado que es inerte se utiliza como sustrato para el cultivo de orquídeas.



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Aislante\\_t%C3%A9rmico](http://es.wikipedia.org/wiki/Aislante_t%C3%A9rmico)

Figura 2.24 Fragmento de poliestireno expandido.

Debido a su combustibilidad se le incorporan retardantes de llama denominándoselo difícilmente inflamable.

Posee un buen comportamiento térmico en densidades que van de 12...40 kg/m<sup>3</sup> a 30 kg/m<sup>3</sup>

Tiene un coeficiente de conductividad de 0,041 a 0,032 W/m·K

Es fácilmente atacable por la radiación ultravioleta por lo cual se lo debe cubrir

Es muy permeable al vapor de agua

Posee una alta resistencia a la absorción de agua en estado líquido

#### Espuma celulósica

El material de espuma de celulosa, posee una aceptable poder aislante térmico y es un buen fonoabsorbente. Ideal para aplicar por la parte inferior de galpones por ser un material 100% ignífugo de color blanco y por su rapidez al ser colocado.

Tiene un coeficiente de conductividad promedio de 0,03 W/m·K

Temperatura superior a 45 °C se fundirá posteriormente.

#### Espuma de polietileno

La espuma de polietileno se caracteriza por ser económica, hidrófuga y fácil de colocar. Con respecto a su rendimiento térmico se puede decir que es de carácter medio. Con respecto a su terminación es de color blanco o bien de color aluminio.

Tiene un coeficiente de conductividad térmica de entre 0,035 y 0,045 W/m°C

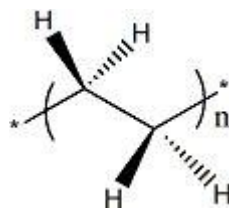


Figura 2.25 Estructura química del polietileno, a veces representada sólo como  $(CH_2-CH_2)_n$

#### Espuma de poliuretano

La espuma de poliuretano es conocida por ser un material aislante de muy buen rendimiento. Su aplicación se puede realizar desde la parte inferior o bien desde la

parte superior. Genera a partir del "punto de humeo" ácido cianhídrico: extraordinariamente tóxico para humanos.

## PROPIEDADES

Densidad: 45-60 kg/m<sup>3</sup>

Resistencia a compresión: 200 N/mm<sup>2</sup>

Conductividad térmica: 0,021 W/m·K

Retardo de llama: B1\*

Coefficiente de fricción:  $\mu=0,0135$

T<sup>a</sup> de trabajo: -50 a 80 °C

Humedad: 0 % a 100%

Presión dentro del conducto: -2000 a +2000

Ensayo con norma DIN4102: difícilmente inflamable

Retardo de llama



Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Aislante\\_t%C3%A9rmico](http://es.wikipedia.org/wiki/Aislante_t%C3%A9rmico)

Figura 2.26 Muestra de espuma de poliuretano de alta densidad

Capacidad de resistir a la combustión. Se considera que un plástico tiene "retardo de llama" cuando no sigue ardiendo una vez eliminada la fuente de ignición. El retardo de llama es la propiedad de un material, ya sea inherente o resultante de una sustancia añadida o un tratamiento aplicado, de suprimir, reducir en forma significativa o demorar la propagación de la llama. El término "con retardante de llama" se refiere a un material que es tratado con un retardante de llama. Retardante de fuego corresponde a la sustancia añadida, o tratamiento aplicado, a un material con el propósito de suprimir, reducir significativamente o demorar la combustión del material.



## Espuma elastomérica

Es un aislante con un excelente rendimiento en baja y media temperatura con fácil instalación, reduciendo al máximo los costos de mano de obra. Posee en su estructura, una barrera de vapor y un comportamiento totalmente ignífugo.

Coef. de conductividad: 0,029 kcal/h·m·°C

Temperatura de trabajo óptima: -40 a 115 °C

## 2.8 CONTROLES ELÉCTRICOS

El control automático de procesos es parte del progreso industrial desarrollado durante lo que ahora se conoce como la segunda revolución industrial . El uso intensivo de la ciencia de control automático es producto de una evolución que es consecuencia del uso difundido de las técnicas de medición y control .Su estudio intensivo ha contribuido al reconocimiento universal de sus ventajas .

El principio del control automático o sea el empleo de una realimentación o medición para accionar un mecanismo de control , es muy simple . El mismo principio del control automático se usa en diversos campos , como control de procesos químicos y del petróleo , control de hornos en la fabricación del acero , control de máquinas herramientas , y en el control y trayectoria de un proyectil

### 2.8.1 TIPOS DE CONTROLES ELÉCTRICOS

Manual: Este tipo de control se ejecuta manualmente en el mismo lugar en que está colocada la máquina. Este control es el más sencillo y conocido y es generalmente el utilizado para el arranque de motores pequeños a tensión nominal. Este tipo de control se utilizan frecuentemente con el propósito de la puesta en marcha y parada del motor. El costo de este sistema es aproximadamente la mitad del de un arrancador electromagnético equivalente. El arrancador manual proporciona generalmente protección contra sobrecarga y desenganche de tensión mínima, pero no protección contra baja tensión.

El control manual se caracteriza por el hecho de que el operador debe mover un interruptor o pulsar un botón para que se efectúe cualquier cambio en las condiciones de funcionamiento de la máquina o del equipo en cuestión.

Semi-Automático: Los controladores que pertenecen a esta clasificación utilizan un arrancador electromagnético y uno o más dispositivos pilotos manuales tales como pulsadores, interruptores de maniobra, combinadores de tambor o dispositivos análogos. Quizás los mandos más utilizados son las combinaciones de pulsadores a causa de que constituyen una unidad compacta y relativamente económica. El control semi-automático se usa principalmente para facilitar las maniobras de mano y control en aquellas instalaciones donde el control manual no es posible.

La clave de la clasificación como en un sistema de control semiautomático es el hecho de que los dispositivos pilotos son accionados manualmente y de que el arrancador del motor es de tipo electromagnético.

Control Automático: Un control automático está formado por un arrancador electromagnético o contactor controlado por uno o más dispositivos pilotos automáticos. La orden inicial de marcha puede ser automática, pero generalmente es una operación manual, realizada en un panel de pulsadores e interruptores.

En algunos casos el control puede tener combinación de dispositivos manuales y automáticos. Si el circuito contiene uno o más dispositivos automáticos, debe ser clasificado como control automático.

Los contactores son dispositivos electromagnéticos, en el sentido de que en ellos se producen fuerzas magnéticas cuando pasan corrientes eléctricas por las bobinas del hilo conductor que estos poseen y que respondiendo a aquellas fuerzas se cierran o abren determinados contactos por un movimiento de núcleos de succión o de armaduras móviles.

## **2.8.2 CONTROL DE TEMPERATURA**

Este tipo de control es un instrumento que compara la señal del sensor, la compara con una señal interna deseada (se llama a este punto setpoint) y ajusta la salida del dispositivo calefactor para mantener, tan cerca como sea posible, el equilibrio entre

la temperatura medida y la temperatura deseada. Aquí la frase clave es “tan cerca como sea posible”. Existen varios métodos de control para conseguir esto.

### Control SI o NO

La selección del control de temperatura correcta para una aplicación dada, depende del grado de control requerido por la aplicación. La solución más simple que puede necesitar una aplicación dada puede solucionarse con lo que se llama control síno (on-off). El control sí-no trabaja como el termostato del hogar, o sea la salida del control es 100 % sí o 100 % no. La sensibilidad del control síno (también llamado “histéresis” o “banda muerta”) se diseña de modo que la salida no cambie de sí a no demasiado rápido. Si el rango de histéresis es muy angosto, habrá una conmutación demasiado rápida que se conoce como traqueteo. Este traqueteo hace que los contactos de los contactores y elementos calefactores tengan una vida más corta. Entonces la histéresis deberá ajustarse de modo que haya un retardo suficiente entre los modos “sí” y “no”. Debido a la necesidad de esta histéresis habrá siempre lo que se llama “overshoot” y “undershoot”. El “overshoot” es la magnitud en que la temperatura rebasa a la del setpoint, el “undershoot” es lo contrario.

### Proporcional en el tiempo

Un control proporcional en el tiempo, trabaja de la misma manera como el control síno mientras la temperatura del proceso está por debajo de lo que se llama la banda proporcional. Esta banda proporcional es el lugar debajo del setpoint en el cual el control proporcional comienza a actuar o sea que la proporción entre sí y no comienza a cambiar. En la parte baja de la banda proporcional, el tiempo sí es mucho mayor que el tiempo no. A medida que la temperatura se aproxima al setpoint, el tiempo sí disminuye y el tiempo no aumenta. Esto cambia la potencia efectiva y ocasiona una disminución en la velocidad a la cual la temperatura del proceso aumenta. Esta acción continúa ya que se estabiliza en algún lugar debajo del setpoint. En este punto se obtiene el control. Esta diferencia entre el punto de control y el setpoint se llama “droop”

### Acción Integral

Si la caída en el control proporcional en el tiempo, no se puede tolerar en un proceso, se debe agregar la función integral de control. La función integral que se encuentra en los controladores de corte automático emplea un algoritmo matemático para calcular la magnitud de la caída y luego ajustar la salida para cortar el control y llevarlo más cerca del setpoint

Esta acción de corte automático tiene efecto solamente dentro de la banda proporcional. Si esta acción se efectúa fuera de la banda proporcional el sistema se hace inestable. Los controles integrales están preparados para impedir este efecto.

### Derivado

En todos los tipos de controles considerados hasta ahora tienen sobrepaso. La función derivada puede usarse en estos casos para prevenir el exceso de temperatura. La función derivada anticipa con qué rapidez se llega al setpoint. Hace esto midiendo la velocidad de cambio de la temperatura del proceso y forzando al control a entrar antes en una acción proporcional disminuyendo la velocidad del cambio de la temperatura del proceso. Esto resulta en una temperatura que entra al setpoint en forma suave y así previene un sobrepaso excesivo al inicio del proceso o cuando el sistema cambia

## 2.9 VENTILADORES

Un ventilador es una máquina rotativa que se utiliza para incrementar la presión del aire o de un gas con el fin de forzar al aire a través de ductos, sistemas de ventilación, calefacción.

Las presiones que se tiene en un ventilador son las siguientes.

- *Presión Estática.*- Es la diferencia entre la presión estática de salida y la presión total a la entrada. Esta presión puede ser positiva o negativa. Es una presión debida a la compresión.
- *Presión Dinámica.*- Es la correspondiente al promedio de las velocidades a la salida del ventilador. Es una presión debida al movimiento del impulsor.

- **Presión Total.-** Es la suma de la presión estática y dinámica medida en un punto.

Los ventiladores se clasifican en:

- Ventiladores Axiales
- Ventiladores Centrifugos

### **Ventiladores Axiales**

Son aquellos que tienen la entrada y la salida de aire en el mismo eje. Su característica principal es que trabajan a bajas presiones pero son usados para mover grandes caudales de aire.

### **Ventiladores de Propulsión**

Los ventiladores de propulsión operan a presiones estáticas de cero, y tienen un funcionamiento casi axial, toman aire de un lado y lo descargan del otro lado. Son comúnmente usados para brindar ventilación en viviendas y espacios de trabajo, con el fin de brindar comodidades. Las velocidades de operación de estos ventiladores están desde las 600 a 1750 rpm, por lo que utilizan motores eléctricos.

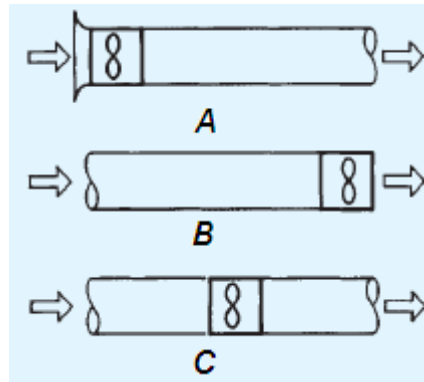
### **Ventiladores con Envolvente**

Los ventiladores con son muy parecidos a los ventiladores de propulsión la característica que marca la diferencia entre estos dos es que los ventiladores de ducto están montados dentro de un ducto cilíndrico. Este tipo de ventiladores trabajan con presiones estáticas de hasta 1.5 pulg deH<sub>2</sub>O

***Impulsores.-*** Tienen entrada libre y salida entubada.

***Extractores.-*** Tienen entrada entubada y salida libre.

***Impulsores Extractores.-*** Tienen entrada y salida entubada.

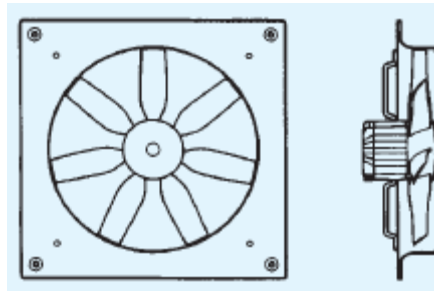


Fuente: Manual práctico de ventilación Salvador Escoda S.A.

FIG. 2.27 Ventiladores con envolvente

### Ventiladores Murales

A este tipo de ventiladores se los conoce como extractores, son utilizados en el campo de la ventilación.



Fuente: Manual práctico de ventilación Salvador Escoda S.A.

FIG. 2.28 Ventiladores murales

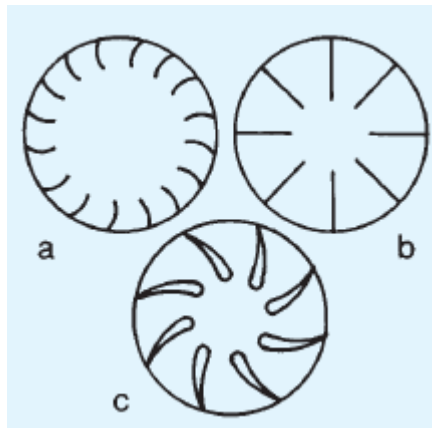
### Ventiladores Centrífugos

Es muy fácil de reconocer que se trata de un ventilador centrífugo, ya que la entrada y la salida de aire forman un ángulo de 90°.

Los ventiladores centrífugos toman aire por el centro del rotor, este es lanzado hacia fuera por las aspas generando energía cinética. El aire expulsado por las aspas pasa por la voluta o carcasa del ventilador, convirtiendo la energía cinética en una presión de gas aumentada la que finalmente es entregada a los ductos.

Los ventiladores centrífugos pueden tener diferentes rodetes o impulsores, entre estos tenemos:

- Impulsores hacia delante (a),
- Impulsores hacia atrás (b)
- Impulsores radiales.(c)



Fuente: Manual práctico de ventilación Salvador Escoda S.A.

FIG. 2.29 Ventiladores centrífugos





## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

#### 3.1 ANÁLISIS

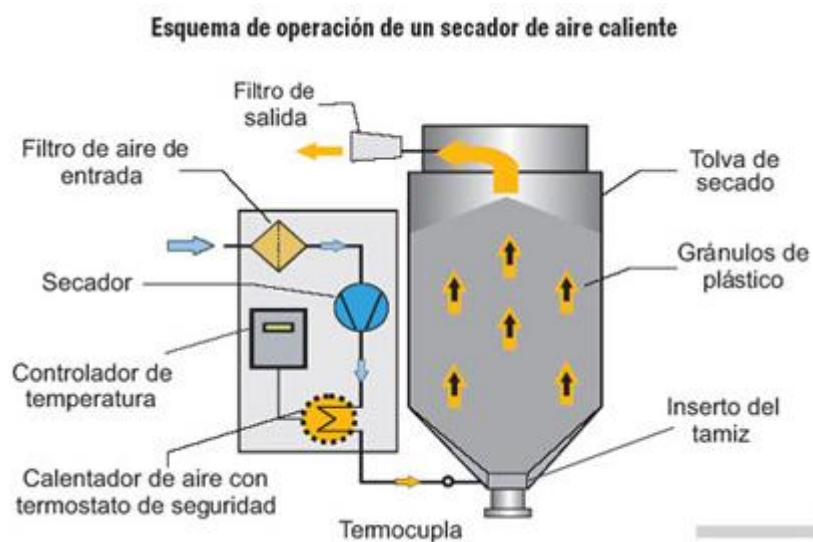
Luego de analizar el PET sus características propiedades y parámetros de secado vamos a analizar las diferentes alternativas existentes de deshumidificadores de polímeros.

##### **Alternativa 1 : Deshumidificación por vacío.**

Es apropiado para el secado de materiales sensibles al calor con capacidad de cristalización. El gran beneficio de este tipo de secadores es que tienen un tiempo de ciclo muy corto comparados con otras opciones disponibles. Funcionan por lotes, de forma que si el principal criterio es incrementar la productividad en base a lotes, y no en forma continua, el secado por vacío es una opción que vale la pena investigar. Sin embargo, requieren una inversión inicial alta, y los sellos de vacío son susceptibles a contaminación con partículas de polvo.

.

Esta tecnología relativamente nueva, sólo se diferencia del secado con aire caliente en la naturaleza de la generación del calor. Los secadores infrarrojos hacen un uso eficiente de la energía, mantienen bajos niveles de polvo y requieren un corto tiempo de residencia. El secado infrarrojo cristaliza el PET. La superficie del material a granel se calienta rápidamente, pero no es fácil mantener un control de temperatura a través de toda la masa del material. Los secadores infrarrojos han probado ser muy efectivos en algunos materiales no-plásticos, como café y madera. Sin embargo, la tecnología en secado de PET no está completamente probada, y los secadores de este tipo aún representan una alta inversión, además de requerir mantenimiento intensivo.



Fuente: [http://www.plastico.com/tp/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARCHIVO/ARTICULOS/doc\\_41537\\_H TML.html?idDocumento=41537#otros\\_articulos\(opciones de secado\)](http://www.plastico.com/tp/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARCHIVO/ARTICULOS/doc_41537_H TML.html?idDocumento=41537#otros_articulos(opciones de secado))

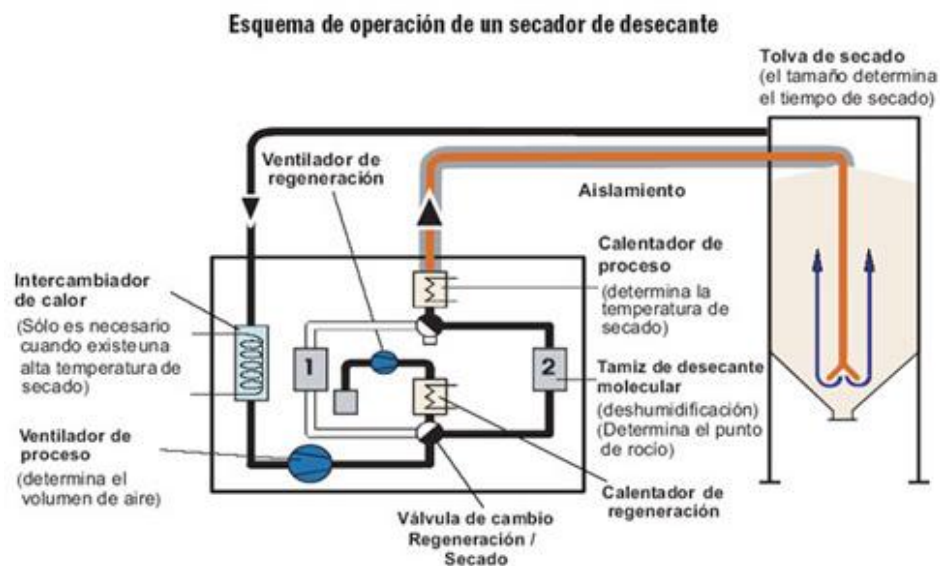
Figura 3.1 Esquema de operación de un secador de aire caliente

La tecnología de secado con aire caliente se ha probado ampliamente en la industria para remover la humedad superficial de los gránulos. Aunque no es apropiada para aplicaciones higroscópicas, los secadores de aire caliente se usan ocasionalmente para materiales bajamente higroscópicos en aplicaciones de procesamiento no susceptibles a este efecto. Además sirven para pre-calentar el material con el fin de incrementar el desempeño y la calidad de los procesos de producción.

Los calentadores de aire caliente hoy en día son unidades compactas que se montan directamente en la garganta de alimentación de la máquina, reduciendo la posibilidad de contaminación o reabsorción de humedad. Una brida en la tapa hace posible el ajuste con una tolva de alimentación para hacer la alimentación y el secado en un proceso continuo.

El aire ambiental se succiona a través de un filtro, se calienta y se alimenta a través de la recámara de secado. El aire de salida puede reintroducirse al ciclo. Las recámaras de secado completamente aisladas mejoran el consumo energético y un difusor provee un óptimo nivel de difusión de calor a través del material. Las unidades tienen un precio menor, y son apropiadas para todos los climas, excepto los tropicales.

## Alternativa 4 : Deshumidificación por desecante.



**Nota:** la operación continua se hace posible con dos o más cartuchos de desecante

Fuente:[http://www.plastico.com/tp/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARCHIVO/ARTICULOS/doc\\_41537\\_HTML.html?idDocumento=41537#otros\\_articulos\(opciones de secado\)](http://www.plastico.com/tp/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARCHIVO/ARTICULOS/doc_41537_HTML.html?idDocumento=41537#otros_articulos(opciones%20de%20secado))

Figura 3.2 Esquema de operación de un secador de desecante

Estos secadores se adaptan a todos los materiales, de tal forma que aunque cambie el programa de producción, el equipo podrá mantenerse en funcionamiento.. Existen diversos tipos de unidades, desde sistemas centralizados hasta unidades móviles para instalar al lado de la prensa. Hay varios datos con respecto al desempeño y al diseño que deben ser considerados.

Los secadores de desecante usan aire en un ciclo cerrado dirigido hacia el deshumidificador y a través del material en la recámara de secado.

Primero el aire es deshumidificado haciéndolo pasar a través del agente desecante. Hoy en día, esto está usualmente constituido por un tamiz molecular de silicato de aluminio alcalino. Aunque es relativamente costoso, es efectivo en la absorción de agua del aire con baja humedad y tiene vida de servicio larga.

El aire posteriormente se calienta a la temperatura de secado específica de cada material. Este aire caliente y sin humedad se hace pasar a través del material para remover las moléculas de agua. Posteriormente se hace pasar nuevamente por el tamiz molecular en un ciclo continuo. Después de que el tiempo de secado recomendado ha terminado, el material puede procesarse sin problemas. Las camas

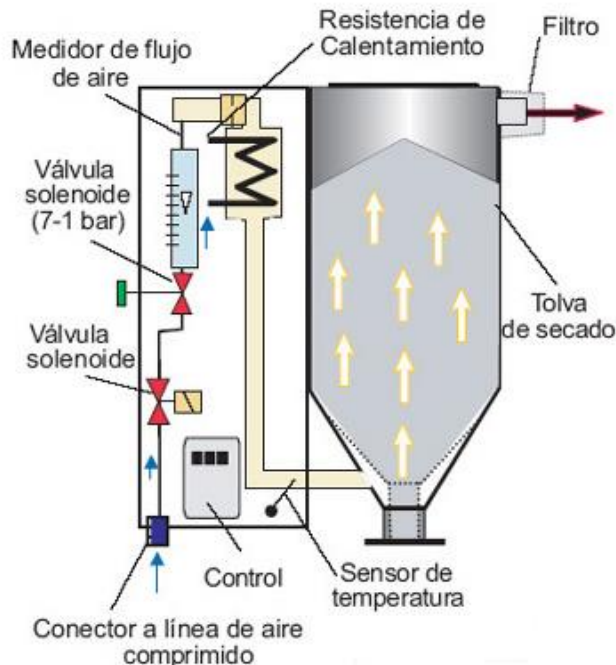
gemelas de desecante permiten hacer un secado continuo, si una cama permanece en regeneración mientras la otra se mantiene activa.

Un bajo punto de rocío, usualmente en 20°C, es suficiente para secar la mayoría de materiales higroscópicos al nivel de humedad residual necesario para el procesamiento. Esto proveerá un secado más rápido, un contenido absoluto de agua menor en el aire y una humedad residual inferior en el material. Sin embargo, tenga en mente que si el punto de rocío es extremadamente bajo, se desperdicia una gran cantidad de energía.

Con factores como recuperación de energía desde el aire de retorno y recámaras de aislamiento perfectamente aisladas, puede mejorarse la economía de los secadores de desecante.

## Alternativa 5 : Deshumidificación por aire comprimido

### Esquema de operación de un secador de aire comprimido



Fuente: [http://www.plastico.com/tp/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARCHIVO/ARTICULOS/doc\\_41537\\_HTML.html?idDocumento=41537#otros\\_articulos\(opciones de secado\)](http://www.plastico.com/tp/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARCHIVO/ARTICULOS/doc_41537_HTML.html?idDocumento=41537#otros_articulos(opciones%20de%20secado))

Figura 3.3 Esquema de operación de un secador de aire comprimido

Para capacidades pequeñas, alrededor de 25 kg/hr, los secadores de aire comprimido son una opción importante. Los secadores modernos de este tipo no son costosos y pueden instalarse fácilmente, ya sea en forma directa sobre la garganta de alimentación o en un marco de soporte adyacente. Todos los tipos de material pueden secarse de esta forma y el desempeño del secado continuo es altamente eficiente. No hay partes moviéndose, de tal forma que la operación es sencilla y los costos de mantenimiento se reducen.

Estos secadores toman aire comprimido de la línea de suministro de la planta, y lo expanden a presión atmosférica. Esto genera aire de proceso con un punto de rocío muy bajo que después se calienta a la temperatura ambiente requerida. No se requiere desecante. Las unidades modernas incorporan todos los factores de seguridad que uno esperaría, incluyendo un termostato y un interruptor de bajo flujo de aire, para evitar el sobrecalentamiento del material.

Pero, y esto es importante, el aire comprimido es el suministro más costoso en cualquier planta. Así que a menos que el flujo de material a secar sea bajo, esta no es una opción rentable.

### 3.2 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Para seleccionar la alternativa correcta se determina los parámetros con los cuales vamos a evaluarlas por su importancia las cuales revisaremos en la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Criterios de Evaluación

Ord.	Criterios de Evaluación	1	2	3	4	5	6	7	8	P	WF
1	Operación	-	1/2	1	1	1	1	1	1	6.5	0.23
2	Costo	1/2	-	1/2	1	1	1	1	1	6	0.21
3	Mantenimiento		1/2	-	1/2	1	1	1	1	5	0.18
4	Construcción			1/2	-	1	1	1	1	4.5	0.16
5	Durabilidad					-	1	1	1	3	0.11
6	Eficiencia						-	1	1	2	0.07
7	Capacidad de producción							-	1	1	0.04
									Σ	28	1.0

A continuación se buscara la alternativa más conveniente para el proyecto mediante el análisis en la siguiente matriz de decisión.

Tabla 3.2 Evaluación de Alternativas

<b>Criterios de evaluación</b>	<b>WF</b>	<b>Alternativa 1</b>		<b>Alternativa 2</b>		<b>Alternativa 3</b>	
<b>Operación</b>	0.23	1	0.23	3	0,69	9	2.07
<b>Costo</b>	0.21	8	1.68	5	1,05	8	1.68
<b>Mantenimiento</b>	0.18	8	1.44	7	1,26	8	1.44
<b>Construcción</b>	0.16	6	0.96	7	1,12	8	1.28
<b>Durabilidad</b>	0.11	9	0.99	10	1,1	10	1.1
<b>Eficiencia</b>	0.07	9	0.63	6	0,42	10	0.7
<b>Capacidad de producción</b>	0.04	8	0.32	9	0,36	9	0.36
$\Sigma$			6.25		6		8.63
<b>Criterios de evaluación</b>	<b>WF</b>	<b>Alternativa 4</b>		<b>Alternativa 5</b>			
<b>Operación</b>	0.23	9	2.07	9	2.07		
<b>Costo</b>	0.21	4	0.84	6	1.26		
<b>Mantenimiento</b>	0.18	7	1.26	7	1.26		
<b>Construcción</b>	0.16	8	1.28	9	1.44		
<b>Durabilidad</b>	0.11	10	1.1	10	1.1		
<b>Eficiencia</b>	0.07	10	0.7	9	0.63		
<b>Capacidad de producción</b>	0.04	8	0.3	9	0.36		
$\Sigma$			7.57		8.12		

Después de analizar todas las alternativas hemos determinado que la número 3 es la adecuada para nuestro proyecto de secado de PET para el reciclado de baja capacidad, teniendo en cuenta que los aspectos más relevantes son el costo de inversión, la operación y el mantenimiento.



## CAPÍTULO 4

### DISEÑO

#### 4.1 DISEÑO TÉRMICO

##### 4.1.1 CALOR GANADO POR EL SISTEMA

##### 4.1.1.1 Calor ganado por el PET

Para obtener en calor ganado por el material debemos conocer la cantidad de Pet en kilogramos con la cual va a trabajar el deshumidificador

$$m_c := 5 \quad \text{Kg}$$

$$C_p := 1.3 \quad \text{KJ/ Kg } ^\circ\text{K}$$

$$T_{med} := 18 \quad ^\circ\text{C}$$

$$T_i := 22 \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T := T_{med} - T_i$$

$$Q_{g1} := m_c C_p (\Delta T)$$

$$Q_{g1} = 1.067 \times 10^3 \quad \text{KJ}$$

#### 4.1.1.2 Calor ganado por las paredes

Determinamos las dimensiones del deshumidificador para conocer la cantidad de material necesario requerido en el deshumidificador.

##### Área del cilindro

$$r := 12 \quad \text{cm}$$

$$h := 30 \quad \text{cm}$$

$$A_c := 2\pi \cdot r \cdot h$$

$$A_c = 2.262 \times 10^3 \text{ cm}^2$$

##### Área del cono truncado

$$R := 12 \quad \text{cm}$$

$$r := 4 \quad \text{cm}$$

$$h := 15$$

$$g := \sqrt{h^2 + (R - r)^2}$$

$$g = 17 \text{ cm}$$

$$A_{ct} := \pi(R + r) \cdot g$$

$$A_{ct} = 854.513 \text{ cm}^2$$

##### Área de la tapa

$$r := 12 \quad \text{cm}$$

$$A_t := \pi \cdot r^2$$

$$A_t = 452.389 \text{ cm}^2$$

##### Área total paredes internas

$$A_T := A_c + A_{ct} + A_t$$

$$A_T = 3.569 \times 10^3 \text{ cm}^2$$

## Volumen de las paredes interiores

$$e := 0.1 \quad \text{cm} \quad \text{A36 a } 300 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$V := AT \cdot e = 356.885 \quad \text{cm}^3$$

$$V := V \cdot \frac{1}{100^3} = 3.569 \times 10^{-4} \quad \text{m}^3$$

$$\rho_a := 785 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$m_p := V \cdot \rho_a$$

$$m_p = 2.803 \quad \text{kg}$$

$$C_p := 0.43 \frac{\text{KJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}}$$

$$Q_{g2} := m_p C_p \Delta T$$

$$Q_{g2} = 192.206 \quad \text{KJ}$$

### 4.1.1.3 Calor ganado por el aire

Se tiene un caso de conducción en estado transitorio por lo tanto para poder utilizar el método de resistencia interna despreciable se debe satisfacer la siguiente condición

$$Bi < 0.1$$

$L_c$  = longitud característica

$h$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección

$k$  = conductividad térmica

$u_m$  = velocidad media del aire

$\rho$  = densidad del aire a 180° C

$\mu$  = viscosidad dinámica del aire a 180 ° C

$D$  = diámetro del tubo

$$\mu := 2.50410^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}$$

$$\rho := 0.778 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Para hornos de baja temperatura se recomienda una velocidad entre 0.8 y 2 m/s , para el deshumidificador se utilizará una velocidad de 1 m/s

$$v_m := 1 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$r_2 := 0.02 \quad \text{m}$$

$$A_{t2} := \pi \cdot r_2^2$$

$$v_m := \frac{v_m}{A_t}$$

$$D := 0.02$$

$$\text{Reinols} := \frac{\rho \cdot v_m \cdot D}{\mu} = 2.75$$

$$\text{Pr} := 0.699 \quad \text{Propiedad del aire a } 180^\circ \text{ C}$$

$$n := 0.4 \quad \text{Por calentamiento}$$

$$\text{Nu} := 0.023 \text{Reinols}^{\frac{4}{5}} \cdot \text{Pr}^n = 0.045$$

$$k := 0.0364 \quad \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$h_i := \frac{\text{Nu} \cdot k}{D}$$

$$h_i = 0.041 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

Vs = Volumen del Pet

As = Área de la superficie

$$V_s := 0.0000763 \quad \text{m}^3 \quad \text{Revisar}$$

$$A_s := 0.0254 \quad \text{m}^2$$

$$L_c := \frac{V_s}{A_s}$$

$$Bi := \frac{hi \cdot Lc}{k} = 3.359 \times 10^{-3}$$

Con este resultado podemos utilizar el método de resistencia interna despreciable

Calculo de la temperatura del aire al interior del deshumidificador

Se conoce que la energía que absorbe el material mediante la convección es igual a la energía almacenada por lo tanto:

$$-E_{entra} = E_{almacena}$$

$$-hi \cdot As \cdot (Tg - T) = \rho \cdot Vc \cdot dT/dt$$

Si  $\theta = (Tg - T)$  tomando en cuenta las condiciones de frontera que  $t = 0$ ,  $t(0) = ti$  tenemos la siguiente ecuación

$$\int_0^t dt = -\rho \cdot \frac{Vc}{h \cdot As} \cdot \int_{\theta_1}^{\theta} \frac{1}{\theta} d\theta$$

Resolviendo la ecuación anterior obtenemos:

$$\frac{Tg - T}{Tg - Ti} = e^{-\left(\frac{hi \cdot As \cdot t}{\rho \cdot V \cdot Cp}\right)}$$

Despejamos Tg

$$Tg := \frac{T - Ti e^{-\left(\frac{hi \cdot As \cdot t}{\rho \cdot V \cdot Cp}\right)}}{1 - e^{-\left(\frac{hi \cdot As \cdot t}{\rho \cdot V \cdot Cp}\right)}}$$

$$t := 720 \text{ s}$$

$$T_g := \frac{T_{med} - T_{ie} - \left( \frac{h_i A_s \cdot t}{\rho_a \cdot V_s \cdot C_p} \right)}{1 - e^{-\left( \frac{h_i A_s \cdot t}{\rho_a \cdot V_s \cdot C_p} \right)}} = 189.468$$

### Calor ganado por el aire

$$\rho_{aire} := 1.161 \cdot \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad a } 22 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$C_{pa} := 1.007 \cdot \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} \cdot \text{K}}$$

$$\rho_{alt} := 0.929 \cdot \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire a } 2800 \text{ m de altura}$$

$$\rho_{nm} := 1.225 \cdot \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \quad \text{Densidad del aire al nivel del mar}$$

$$G1 := \frac{\rho_{alt}}{\rho_{nm}}$$

$$G1 = 0.758$$

### Volumen del aire dentro del deshumidificador

$$V_{aire} := 6.16810^{-3}$$

$$m_{aire} := V_{aire} \rho_{aire} \cdot G1 = 5.433 \times 10^{-3} \quad \text{Kg}$$

$$Q_{g3} := m_{aire} C_{pa} (T_g - T_i)$$

$$Q_{g3} = 0.916 \quad \text{KJ}$$

#### 4.1.1.4 Calor ganado por el agua

$m_a := 0.350$  Kg masa de agua en 5 Kg de Pet

$c_{pa} := 4.20$   $\frac{\text{KJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$

$T_{eb} := 92$  °C Temperatura de ebullición a 2500 m de altura

$H_{fg} := 228$   $\frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$

$Q_{g4} := m_a c_{pa} \cdot (T_{eb} - T_i) + m_a H_{fg}$

$Q_{g4} = 901.974$  KJ

$Q_n := Q_{g1} + Q_{g2} + Q_{g3} + Q_{g4}$

$Q_n = 2.162 \times 10^3$  KJ

## 4.1.2 CALOR PERDIDO POR EL SISTEMA

### 4.1.2.1 Calor perdido en la pared cilíndrica

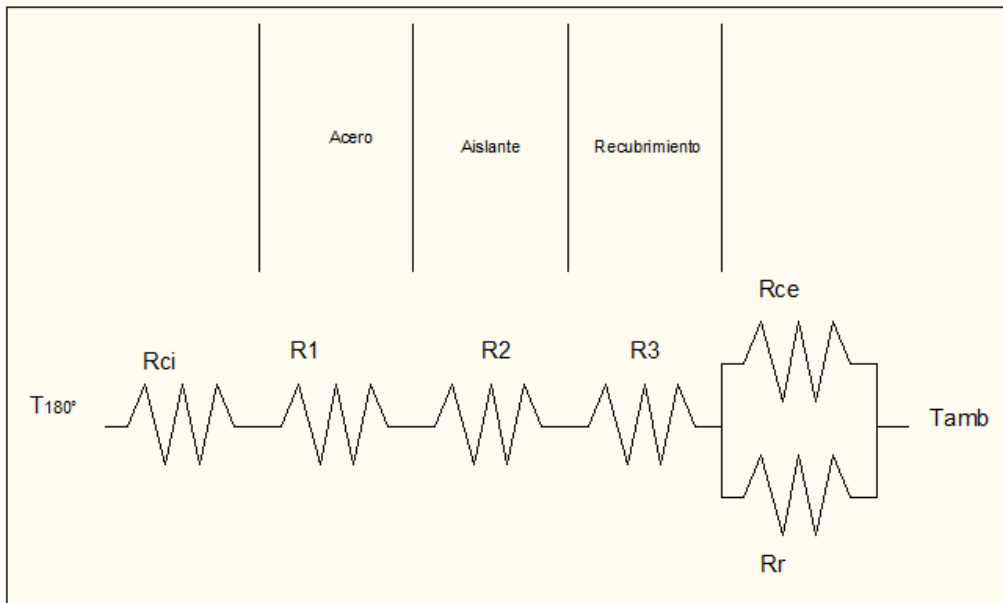


Figura 4.1 Resistencia perdidas pared cilíndrica

#### Resistencia por convección $R_{ci}$ interna

$$D := 0.24 \text{ m}$$

$$V_{prom} := 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\nu := 3.21210^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$Re := \frac{V_{prom} D}{\nu} = 7.472 \times 10^3$$

Para número de Reynolds mayores a 4000 se considera un flujo turbulento como es nuestro caso

$$Pr := 0.699$$

$$f := (0.790 \ln(Re) - 1.64)^{-2}$$



$$Nu := 0.125f \cdot Re \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = 28.366$$

$$r_s := 0.0364 \quad \frac{W}{m \cdot K}$$

$$h1 := \frac{Nu \cdot k}{D} = 4.309 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$h_s := 0.5 \quad m$$

$$r_s := 0.146 \quad m$$

$$A1 := 2\pi r \cdot h$$

$$Rci := \frac{1}{h1 \cdot A1} = 0.838 \quad \frac{K}{W}$$

### Resistencia conducción R1 acero

$$r := 0.5 \quad m \quad \text{Longitud del cilindro}$$

$$r1 := 0.12 \quad m$$

$$r2 := 0.121 \quad m$$

$$k1 := 60.4 \quad \frac{W}{m \cdot K} \quad \text{Conductividad térmica acero}$$

$$R1 := \frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2\pi L k1}$$

$$R1 = 1.089 \times 10^{-4} \quad \frac{K}{W}$$

### Resistencia conducción R2 aislante

$$L := 0.5 \quad m \quad \text{Longitud del cilindro}$$

$$r1 := 0.121 \quad m$$

$$r2 := 0.146 \quad m$$

$$k2 := 0.06 \quad \frac{W}{m \cdot K} \quad \text{Conductividad térmica acero}$$

$$R2 := \frac{\ln\left(\frac{r2}{r1}\right)}{2\pi Lk2}$$

$$R2 = 1.549 \quad \frac{K}{W}$$

### Resistencia por convección Rce exterior

El cilindro vertical puede tratarse como pared vertical cuando

$$D \geq \frac{35L}{Gr^4}$$

$$0.291 \geq 0.067$$

Cumple con la condición

$$g := 9.8 \quad \frac{m}{s^2}$$

$$Ti := 22 + 273$$

$$\beta := \frac{1}{Ti} = 3.39 \times 10^{-3} \quad \frac{1}{K}$$

$$Ts := 18 \quad ^\circ C$$

$$Lc := 0.3$$

$$\nu := 1.516 \times 10^{-5} \quad \frac{m^2}{s} \quad \text{Viscosidad cinemática aire}$$

$$Pr := 0.730$$

$$Ti := 22$$

$$Gr := \frac{g \cdot \beta \cdot (Ts - Ti) \cdot Lc^3}{\nu^2} = 6.166 \times 10^8$$

$$\frac{35 \cdot 0.3}{Gr^4} = 0.067$$

$$\text{Ral} := \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_i) \cdot L_c^3}{\nu^2} \cdot \text{Pr} = 4.507 \times 10^8$$

$$\text{Nu} := 0.59 \text{Ral}^{\frac{1}{4}} \quad \text{Convección natural pared horizontal}$$

$$k_{\text{ai}} := 0.0251 \quad \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{Conductividad térmica del aire}$$

$$h_1 := \frac{\text{Nu} \cdot k_{\text{ai}}}{L}$$

$$h_1 = 7.204 \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$h = 0.5$$

$$r = 0.146$$

$$A_1 := 2\pi r \cdot h$$

$$\text{Rce} := \frac{1}{h_1 \cdot A_1} = 0.501 \quad \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

### Resistencias por Radiación

$$\sigma := 5.7 \cdot 10^{-8} \quad \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$\epsilon := 0.5 \quad \text{Emisividad del acero } 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_p := 38 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$h_r := \frac{\sigma \cdot \epsilon \cdot (T_p^4 - T_i^4)}{T_p - T_i}$$

$$h_r = 1.978 \times 10^{-3}$$

$$\text{Rr} := \frac{1}{h_r \cdot A_1}$$

$$\text{Rr} = 1.826 \times 10^3 \quad \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

## Resistencia equivalente por radiación y convección externa

$$R_{eq} := \frac{1}{\frac{1}{R_{ce}} + \frac{1}{R_r}}$$

$$R_{eq} = 0.501$$

$$R_{tot} := R_{eq} + R_{ci} + R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_{tot} = 2.889$$

## Coefficiente Global de Transferencia de Calor

$$U := \frac{1}{R_{tot} \cdot A_1}$$

$$U = 1.25 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$Q_{pcilindro} := \frac{2 \cdot U \cdot A_1 \cdot (T_{med} - T_i)}{1000} \quad KW$$

$$Q_{pcilindro} = 0.109$$

#### 4.1.2.2 Calor perdido en la pared plana

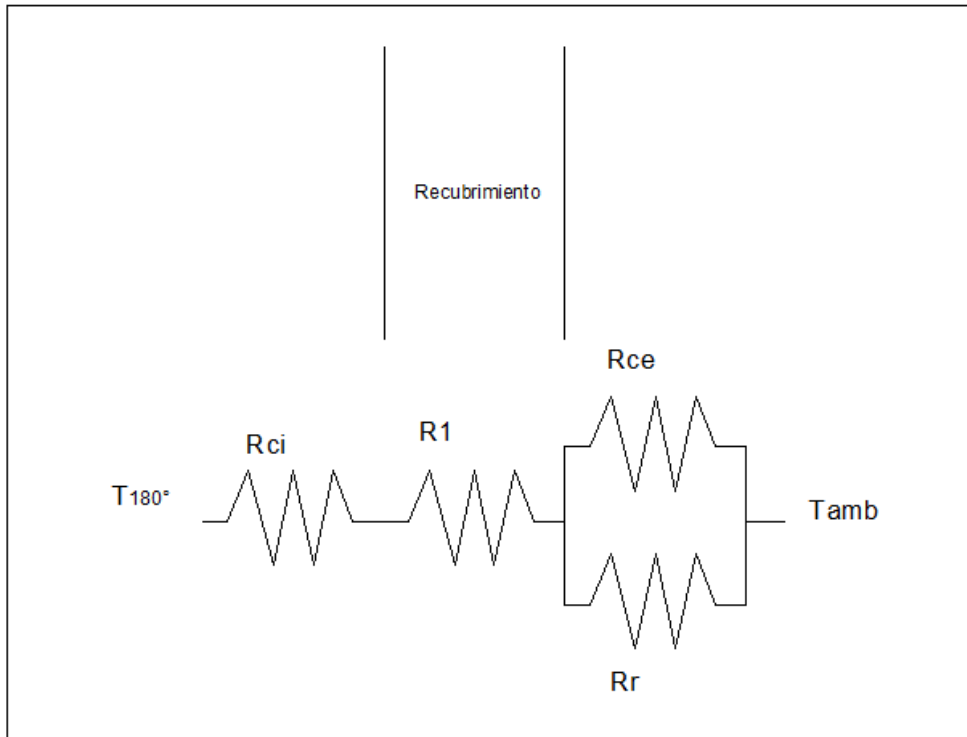


Figura 4.2 Resistencia perdidas pared plana

#### Resistencia por convección Rc interna

$$V := 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$L := 0.24 \text{ m}$$

$$Re := \frac{V \cdot L}{\nu} = 7.472 \times 10^3$$

$$Pr := 0.699 \quad \text{aire a } 180 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$Nu := 0.332 Re^{0.5} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} = 25.472 \quad \text{Ec 7-19 Cengel Pg 401}$$

$$h_1 := \frac{Nu \cdot k}{L} = 3.87$$

$$r := 0.12 \text{ m}$$

$$A_s := \pi r^2$$

$$R_{ci} := \frac{1}{h_1 \cdot A} = 5.712 \quad \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

### Resistencia conducción R1

$$L_1 := 0.001 \quad \text{m} \quad \text{Espesor de la tapa}$$

$$r_1 := 0.1 \quad \text{m}$$

$$A_{1,c} := \pi \cdot r_1^2 \quad \text{m}^2$$

$$k_1 := 60.4 \quad \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{Conductividad térmica acero}$$

$$R1 := \frac{L}{k_1 \cdot A1}$$

$$R1 = 5.481 \times 10^{-4} \quad \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

### Resistencia por convección Rc exterior

$$g = 9.8 \quad \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$T_i := 23 + 273$$

$$\beta_i := \frac{1}{T_i} = 3.378 \times 10^{-3} \quad \frac{1}{\text{K}}$$

$$T_{s,c} := 18 \quad ^\circ\text{C}$$

$$r_1 := 0.1 \quad \text{m}$$

$$A_s := \pi r_1^2$$

$$p := 2\pi \cdot r_1$$

$$L_{c,c} := \frac{A_s}{p}$$

$$\sigma := 1.51610^{-5} \quad \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{Viscosidad cinemática aire}$$

$$Pr_c := 0.730$$

$$T_i := 22$$

$$Ra1 := \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_i) \cdot L_c^3}{\sigma} \cdot Pr = 3.593 \times 10^6$$

$$\text{Nu} := 0.27 \text{Ra}^{\frac{1}{4}} \quad \text{Convección natural pared horizontal}$$

$$k_{\text{ai}} := 0.0251 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \quad \text{Conductividad térmica del aire}$$

$$h_1 := \frac{\text{Nu} \cdot k_{\text{ai}}}{L}$$

$$h_1 = 197.022 \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\text{Rce} = \frac{1}{h_1 \cdot A_1} = 0.112 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

### Resistencia por Radiación

$$\sigma := 5.7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$$

$$\varepsilon = 0.9 \quad \text{Emisividad del acero } 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_p := 38 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Temperatura superficial}$$

$$h_r := \frac{\sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_p^4 - T_i^4)}{T_p - T_i}$$

$$h_r = 1.978 \times 10^{-3}$$

$$\text{Rr} := \frac{1}{h_r \cdot A_1}$$

$$\text{Rr} = 1.117 \times 10^4 \cdot \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

## Resistencia equivalente por radiación y convección externa

$$R_{eq} := \frac{1}{\frac{1}{R_{ce}} + \frac{1}{R_r}}$$

$$R_{eq} = 0.112 \quad \frac{K}{W}$$

$$R_{tot} := R_{eq} + R_{ci} + R_l$$

$$R_{tot} = 5.825$$

## Coefficiente Global de Transferencia de Calor

$$U := \frac{1}{R_{tot} \cdot A_1}$$

$$U = 3.795 \quad \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

$$Q_{ptapa} := \frac{2 \cdot U \cdot A_1 \cdot (T_{med} - T_i)}{1000}$$

$$Q_{ptapa} = 0.054 \quad KW$$

Calor total perdido por el sistema se obtiene sumando el calor perdido por la pared cilíndrica y el calor perdido por la pared plana E1

$$Q_p := Q_{pcilindro} + Q_{ptapa}$$

$$Q_p = 0.164 \quad KW$$



### 4.1.3 CALCULO DE LA RESISTENCIA

El valor de la resistencia requerida para el deshumidificador se lo obtiene sumando el calor ganado por el sistema dividido para el tiempo de calentamiento mas el calor perdido por el sistema .

Tiempo de calentamiento 720 segundos

$$Q_n = 2.162 \times 10^3 \quad \text{Calor Ganado}$$

$$Q_n = \frac{Q_n}{720}$$

$$Q_n = 3.002$$

$$Q_{tot} := Q_p + Q_n$$

$$Q_{tot} = 3.166 \quad \text{KW}$$

El valor de la resistencia requerida debe ser mínimo de 3200 Vatios

#### 4.1.4 CALCULO DEL FLUJO MÁSSICO DEL AIRE PARA EL SECADO

Para conocer el flujo másico necesario para el deshumidificador se precisa conocer la entalpia del aire , estas las podemos conocer por medio de las cartas psicrométricas ingresando con la presión y altitud

Altitud = 2500 msnm

Presión atmosférica = 74.68 KPa

Para este calculo se empleo el programa CYTSoft Psychrometric Chart 2.2

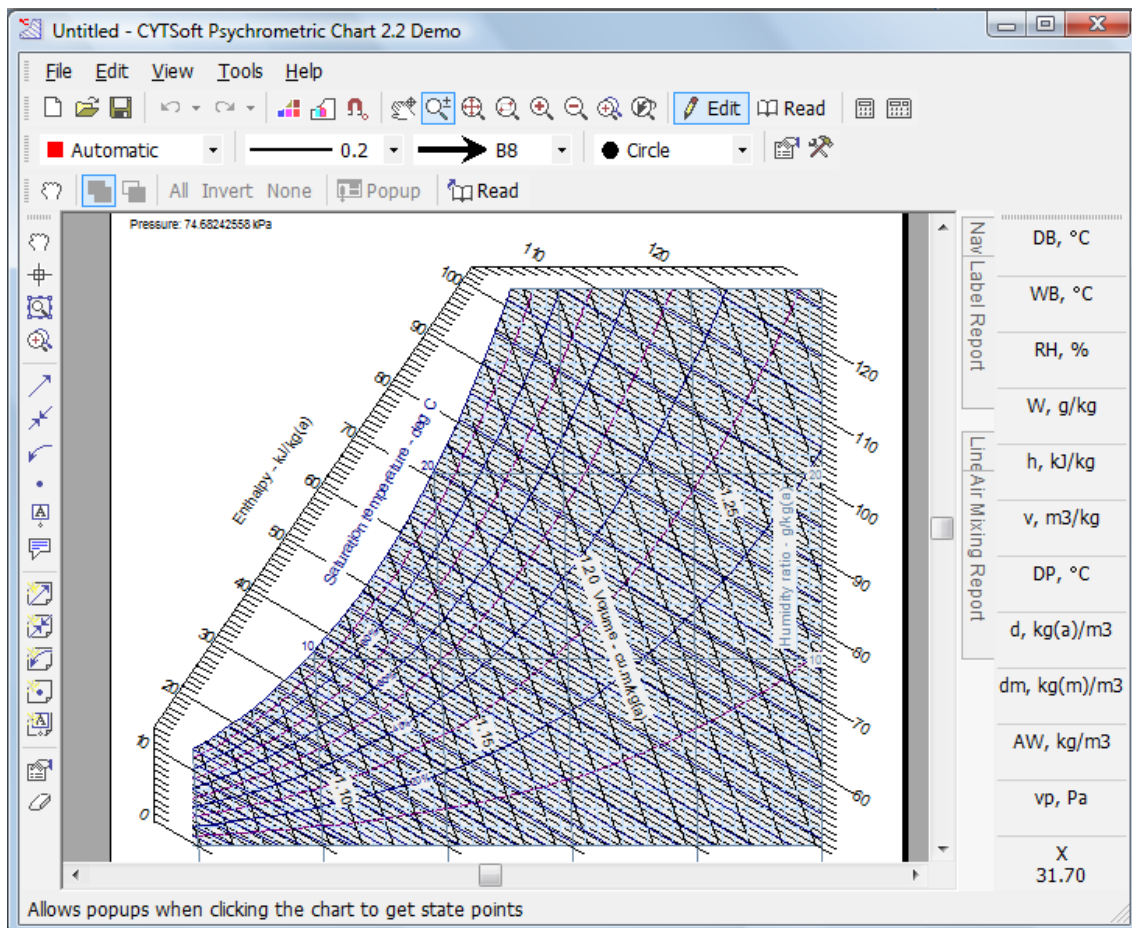


Figura 4.3 Programa CYTSoft Psychrometric Chart 2.2

Ingreso de datos de presión y altitud en el software.

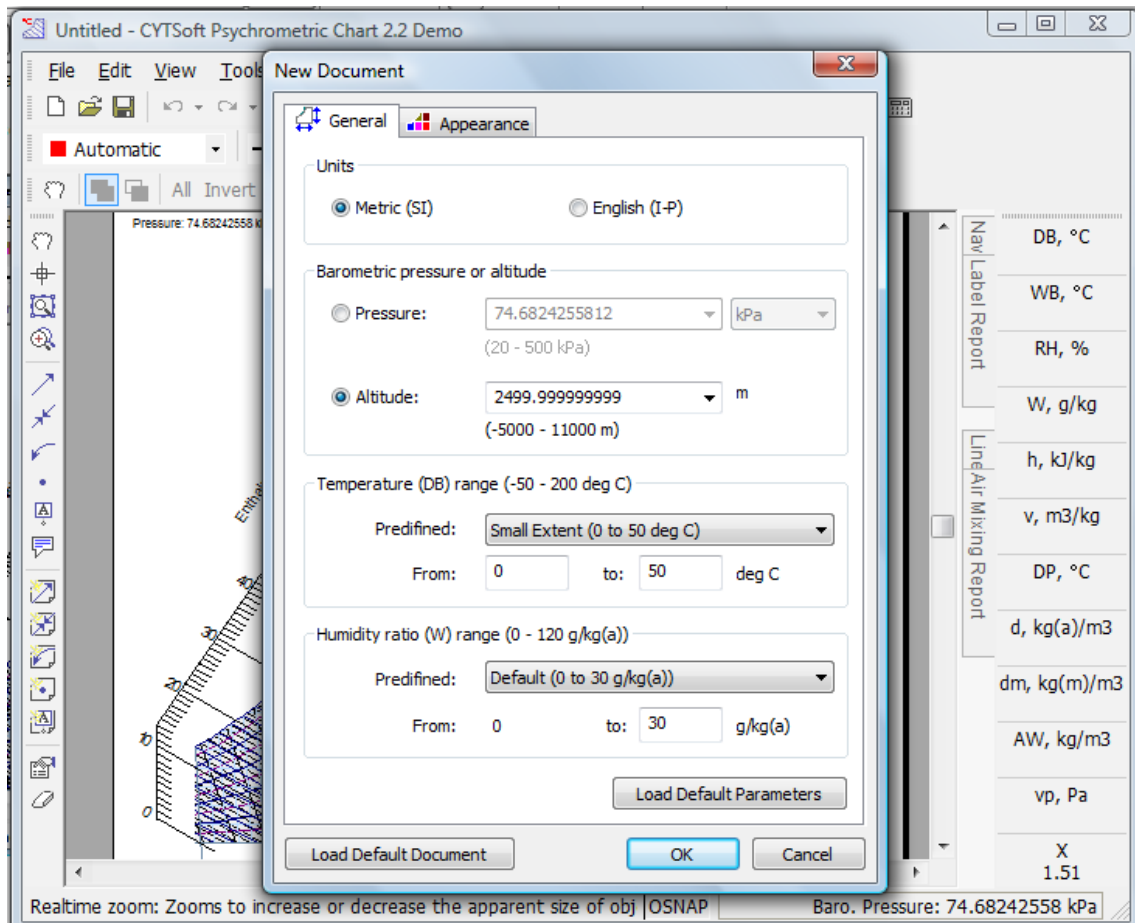


Figura 4.4 Carta psicrométrica Altitud y Presión

Para el punto de entrada de aire del ambiente se ingresa con

Humedad relativa: 60 %

Temperatura ambiente: 22 ° C

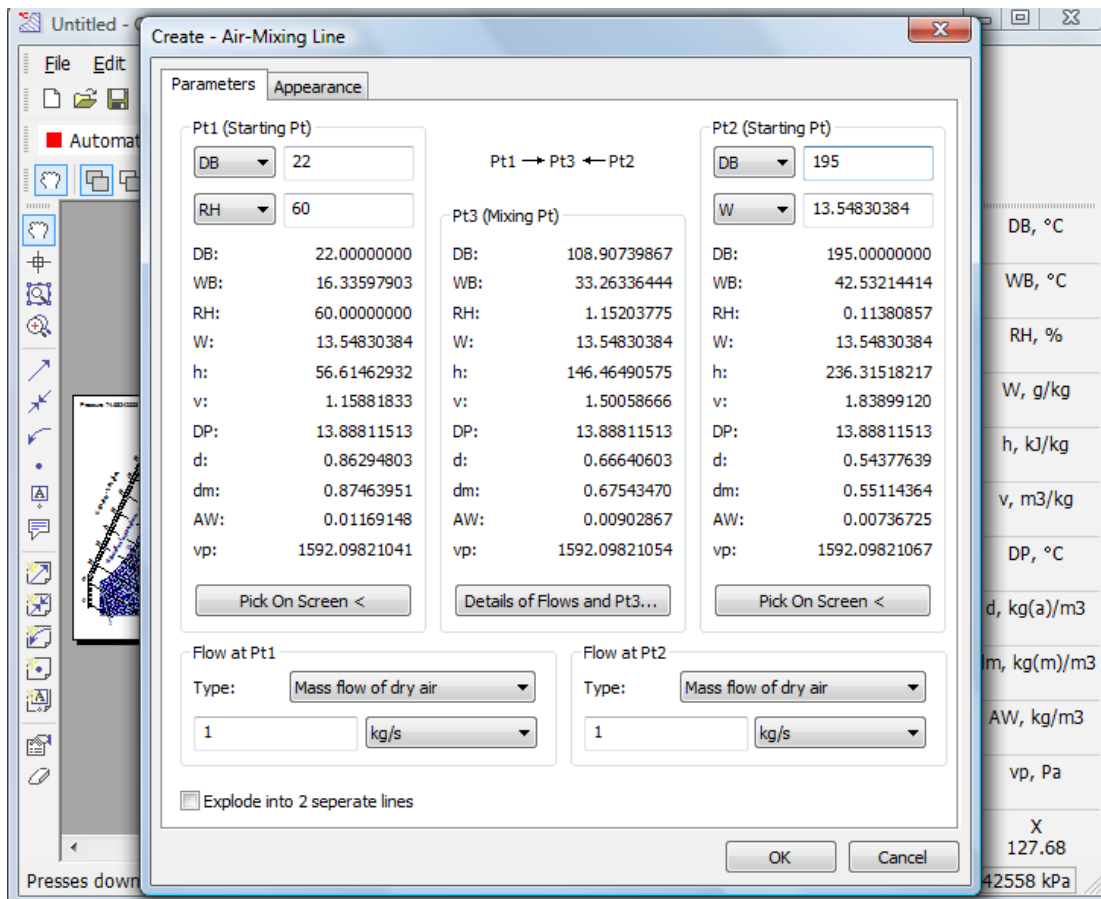


Figura 4.5 Carta psicrométrica Propiedades Ambiente

En esta carta obtenemos el valor de la entalpia teniendo en cuenta que el valor de la relación de humedad (W) es constante en los diferentes puntos del sistema.

Punto de entrada de aire a la tolva 195 ° C

$$h = 236.31 \text{ KJ/kg}$$

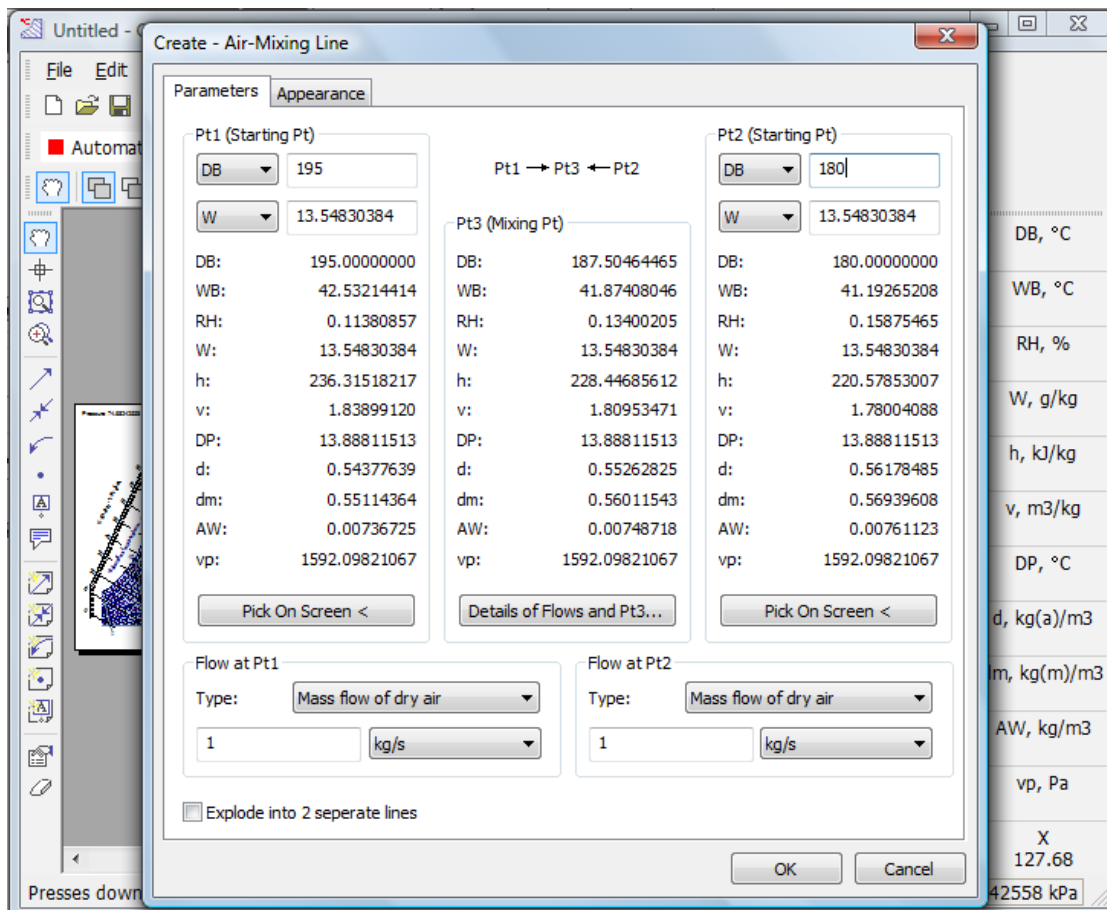


Figura 4.6 Carta psicométrica Propiedades Salida Aire

De la misma forma se obtiene la entalpia en el punto de salida de aire

$$h = 220.57 \text{ KJ/ kg}$$

El flujo de aire necesario para el secado se determina a partir de la ecuación:

$$Q_{tot} = m_{aire} \times (h_2 - h_1)$$

Donde:

QT: calor requerido para el calentamiento del aire (KW).

$h_2$  = entalpia del aire entrada (KJ/Kg.).

$h_1$  = entalpia del aire salida (KJ/Kg.).

$m_{aire}$  = caudal másico de aire necesario para el secado. (Kg. /s).

$$m_{aire} := \frac{Q_{tot}}{(h_2 - h_1)}$$

$$m_{aire} = 0.201 \text{ Kg / s}$$

Dividiendo para la densidad media del aire se tiene:

$$\rho_{180} := 0.778 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{195} := 0.745 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{ai} := \frac{\rho_{195} + \rho_{180}}{2} \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

$$F1 := \frac{m_{aire}}{\rho_{ai}} = 0.264 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

En pies cúbicos por minuto (CFM) se tiene:

$$F1 = 558.95 \text{ CFM}$$

Esto quiere decir que se requiere un ventilador de al menos 600 CFM

#### 4.1.4.1 Selección del ventilador

Para la selección del ventilador, es necesario conocer el caudal del aire y la presión estática. Con estos valores y de acuerdo a la disponibilidad del mercado local, se ha seleccionado un ventilador de las siguientes características.

Caudal de aire: 1000 (cfm)

Velocidad de giro: 1400 (rpm)

Ducto de salida: 4 (pulg.)

Voltaje: 110 (V)

Amperaje: 1.5 (A)

## 4.2 DISEÑO ELÉCTRICO

El sistema eléctrico se lo diseño mediante un diseño por selección en el cual se utilizaron los siguientes componentes

Gabinete Metálico

Contactor CSC trif. 32 amp 10 hp

Contactor CSC trif. 9 amp 3 hp

Breaker Merlin Domae 3p 40A

Breaker 1 polo 1 amperio

Control temp.8 pines 48x4

Pulsador Emer rojo

Luz piloto 220v

Selector dos posiciones

Enchufe Pategallo 3 p 50 A



Figura 4.7 Panel Eléctrico

## 4.2.1 DIAGRAMA DE FUERZA

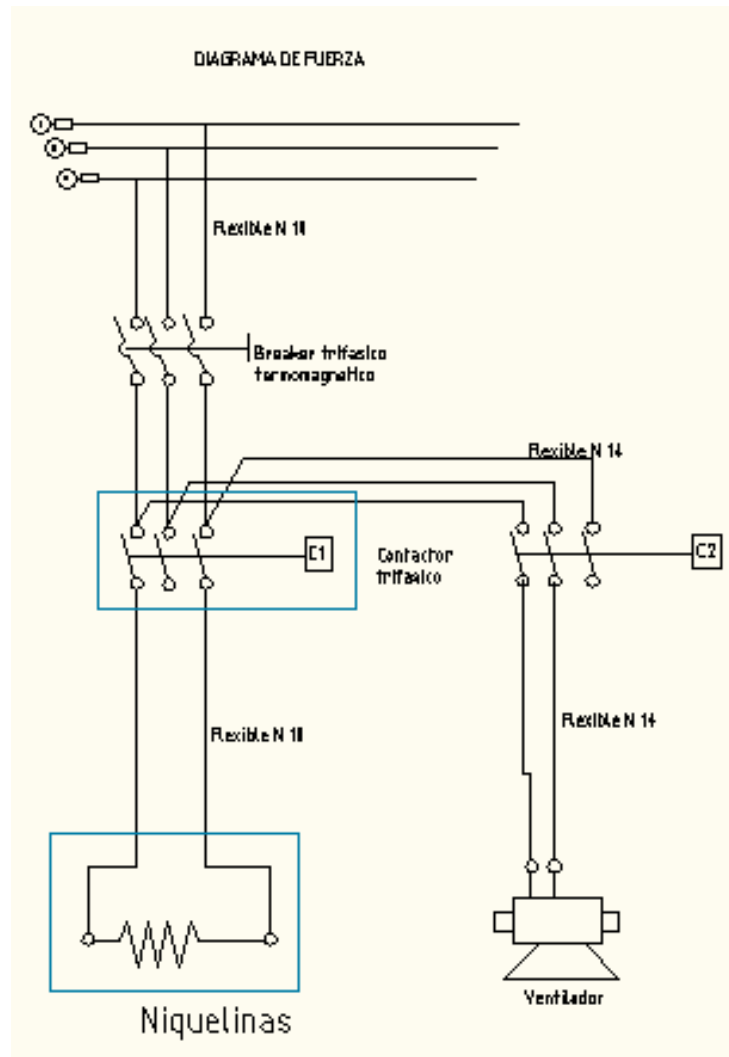


Figura 4.8 Diagrama de Fuerza



4.2.2 DIAGRAMA DE CONTROL

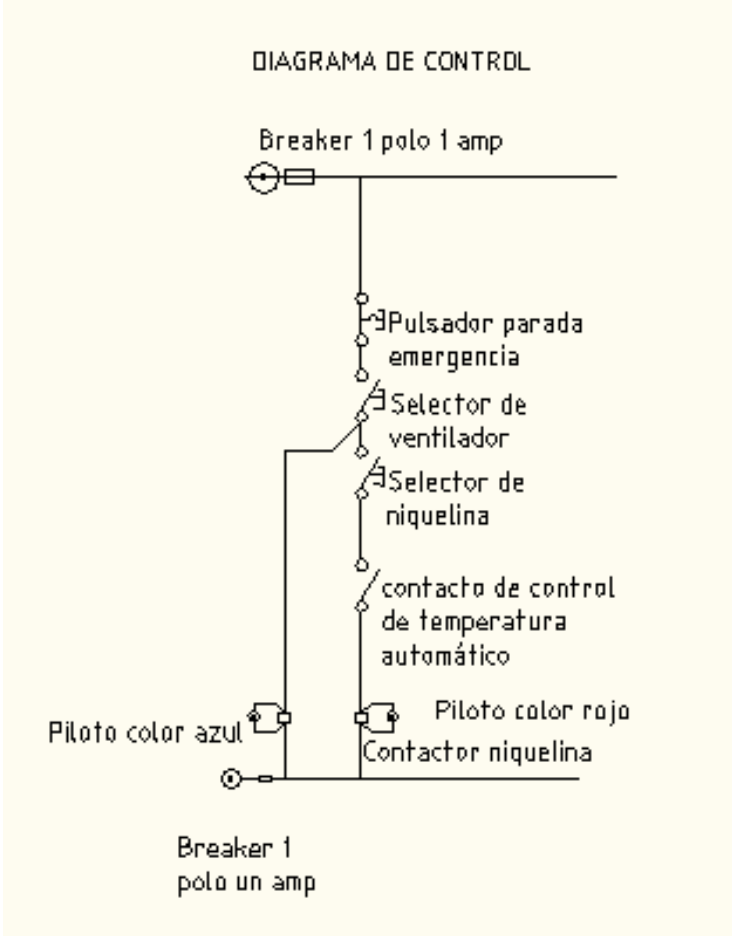


Figura 4.9 Diagrama de Control



## **CAPITULO 5**

### **CONSTRUCCION Y MONTAJE**

#### **5.1 DIAGRAMA DE PROCESOS**

Para representar gráficamente la secuencia de pasos y actividades que se necesitan en la construcción del deshumidificador para hojuelas de pet, se utilizo diagramas de procesos. Las actividades y pasos de la construcción se detallan a continuación.

Construcción del deshumidificador en forma de tolva donde va a estar el pet que va a ser secado.

Elaboración de la niquelina que va a calentar el aire que será impulsado por el ventilador.

Construcción del ducto que conecta la niquelina con la tolva.

Elaboración del panel de control donde van a estar los controles de encendido de todas las partes del deshumidificador.

Ensamblaje del panel de control con el deshumidificador.

Tomando en cuenta la simbología que se detalla en el siguiente cuadro se elaboran los diagramas de procesos





<b>SIMBOLO</b>	<b>SIGNIFICADO</b>
	Operación
	Transporte / Movimiento
	Espera
	Medición

Figura 5.1 Simbología ocupada en la diagramación de procesos

## 5.2 RECURSOS DE FABRICACIÓN

Los recursos de fabricación se desglosan en materiales, mano de obra, equipos / herramientas y se detallan a continuación.

### 5.2.1 MATERIALES

Tabla 5.1 Recursos de fabricación (materiales)

ORD	RUBRO	UNIDAD	CANT.	ACTIVIDAD <sup>2</sup>
<b>MATERIALES</b>				
1	Plancha de acero A36	Uni	1	A
2	Plancha de aluminio	Uni	1	A
3	Plancha de lana de vidrio	Uni	2	A-B
4	Neplo de acero A36 de 3 plg	Uni	1	A-B
5	Perfil en "L"	m	5	A
6	Válvula de bola de 1plg	Uni	1	A-B
7	Motor ¼ HP	Uni	1	B
8	Niquelina	Uni	1	B
9	Remaches	Uni	20	B
10	Pernos 1/8 plg	Uni	8	B
11	Tuercas de mariposa 1/8 plg	Uni	8	B
12	Gabinete metálico	Uni	1	B-C
13	Contactador CSC trif. 32 apm 10 hp	Uni	1	C
14	Contactador CSC trif. 9 apm 3 hp	Uni	1	C
15	Breaker Merlin Domae 3p 40A	Uni	1	C
16	Breaker 1 polo 1 amperio	Uni	2	C
17	Control temp.8 pines 48x4	Uni	1	C
18	Pulsador Emer rojo	Uni	1	C

<sup>2</sup> "A" se refiere a construcción (modificación), "B" a Ensamblaje, "C" a conexión eléctrica.

19	Luz piloto 220v	Uni	1	C
20	Luz piloto roja 220v	Uni	1	C
21	Selector dos posiciones	Uni	2	C
22	Cable cuenca Flexible 10	m	2	C
23	Cable cuenca Flexible 14	m	2	C
24	Cable cuenca Flexible 20	m	7	C
25	Terminal Pin # 18 - 16	Uni	50	C
26	Amarra plastica negra	Uni	20	C
27	Enchufe Pategallo 3 p 50 A	Uni	1	C
28	Sucre 3x10	m	2	C
29	Conector Romex 3/4	Uni	1	C
30	Terminal Pin #10 - 8 Negro	Uni	3	C
31	Dimmer 600w	Uni	1	C

## 5.2.2 MANO DE OBRA

Tabla5.2 Recursos de fabricación (mano de obra)

ORD	RUBRO	UNIDAD	CANT.	ACTIVIDAD <sup>3</sup>
<b>MANO DE OBRA</b>				
1	Construcción de la tolva	Uni	1	A
2	Construcción de la niquelina	Uni	1	A
3	Construcción del ventilador	Uni	1	A

<sup>3</sup> "A" se refiere a construcción (modificación), "B" a Ensamblaje, "C" a conexión eléctrica.

<sup>3</sup> "D" se refiere al uso de maquinaria.

4	Armado del equipo	Uni	1	B
5	Construcción del tablero eléctrico	Uni	1	A-B
6	Construcción de la estructura soporte	Uni	1	B

### 5.2.3 EQUIPOS Y HERRAMIENTAS

Tabla5.3 Recursos de fabricación (equipos y herramientas)

ORD	RUBRO	TIEMPO	CANT.	ACTIVIDAD <sup>4</sup>
<b>EQUIPOS Y HERRAMIENTAS</b>				
1	Suelda eléctrica	1h	1	D
2	Suelda autógena	½ h	1	D
3	Taladro	¼ h	1	D
4	Moladora	½ h	1	D
5	Piedra de corte	¾ h	1	D
6	EPPs	20 h	1	D
7	Esmeril	¼ h	1	D

### 5.3 FABRICACIÓN DE COMPONENTES

El proceso de construcción y ensamblaje se llevo a cabo en varias etapas con la finalidad de facilitar la elaboración del deshumidificador para hojuelas de Pet.

---

EPPs "Equipos de protección personal"



Figura 5.2 Estructura de la tolva

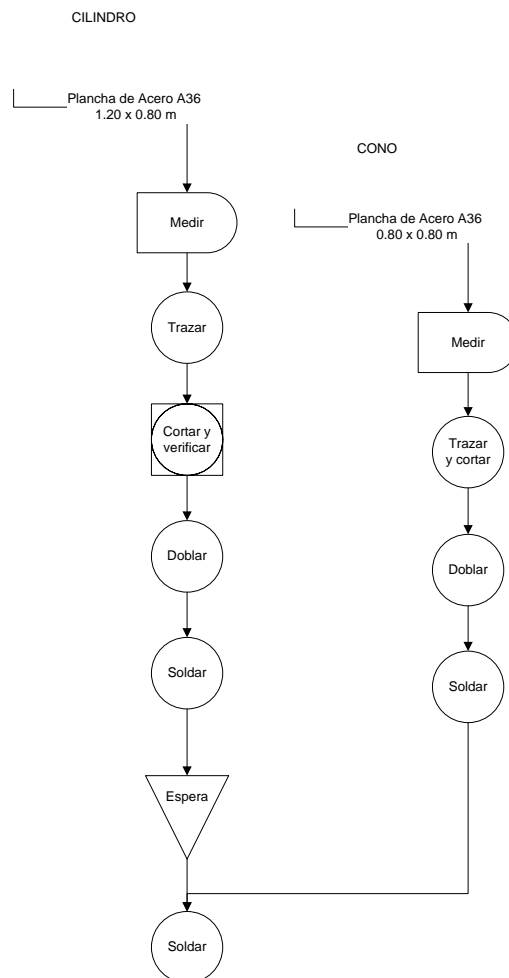


Figura 5.3 Diagrama de procesos – construcción de la tolva.

Según la cantidad de calor que se necesita para el calentamiento del aire se elige la resistencia eléctrica y se elabora la estructura en donde va a ser instalada.



Para la estructura de la niquelina se selecciona la cerámica con la que va a ser elaborada, se cortan las caras según las medidas, se realizan los agujeros por donde pasa la resistencia, y se ensamblan las mismas.

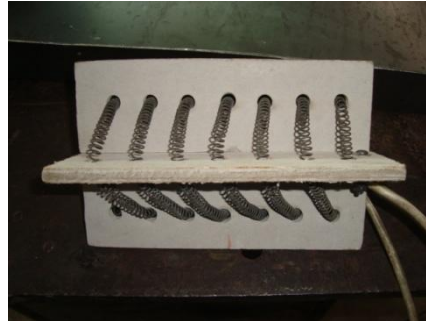


Figura 5.4 Niquelina

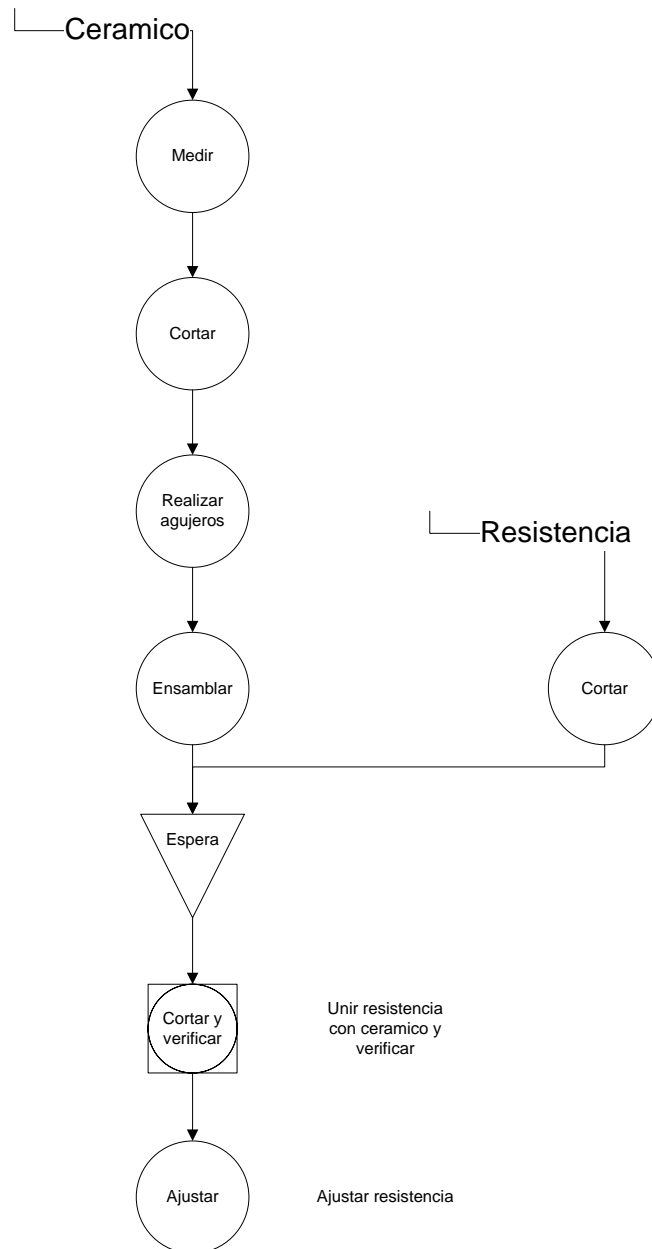


Figura 5.5 Diagrama de procesos – Niquelina.

Luego elaboramos el ducto donde va a estar la niquelina, el mismo que conecta el ventilador con la tolva. Tomamos la plancha de acero A36 cortamos y doblamos según las medidas diseñadas para realizar la unión mediante suelda eléctrica.



Figura 5.6 Ducto

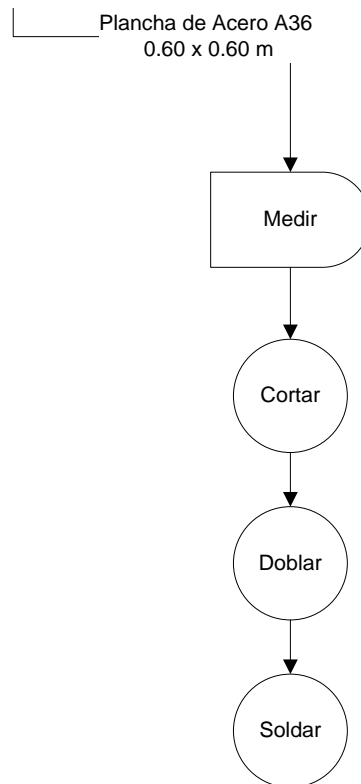


Figura 5.7 Diagrama de procesos – Ducto.

Finalmente para la construcción de la estructura soporte se utilizó perfiles en L de 1/8" de espesor y plancha de acero A36 de 2 mm de espesor. Se siguió el proceso de acuerdo con el gráfico de la figura 5.8.

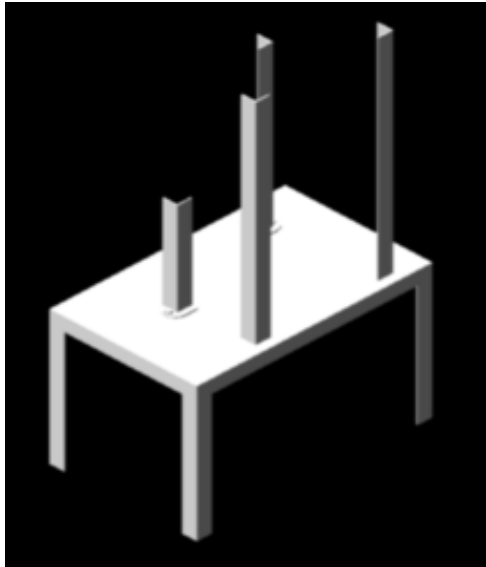


Figura 5.8 Estructura Soporte

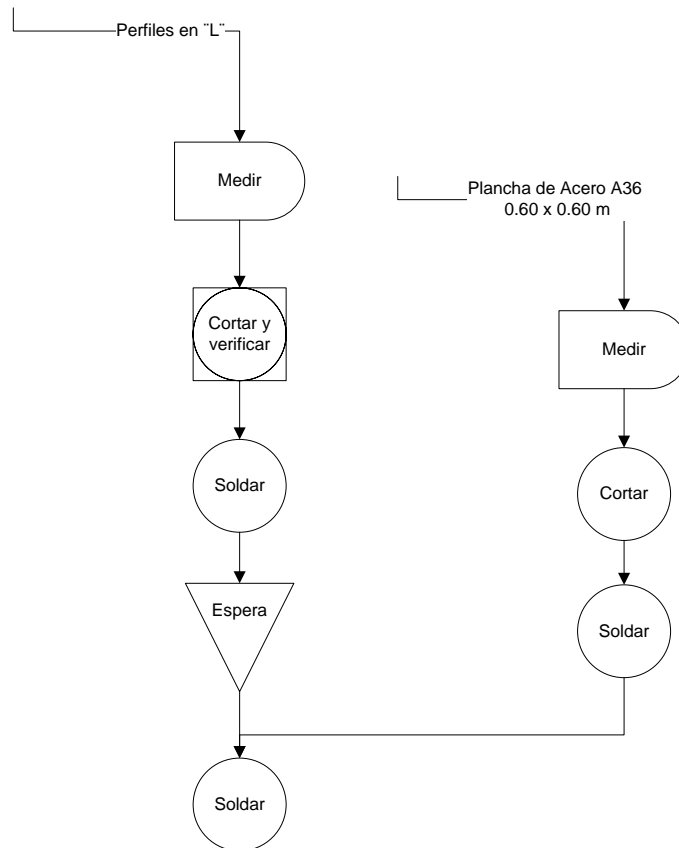


Figura 5.9 Diagrama de procesos – Estructura Soporte.

Como la temperatura del aire en la tolva debe ser constante por un largo tiempo es necesario tener un tablero de control eléctrico el mismo que nos sirve para la unificación de todas las conexiones.

Los elementos del tablero eléctrico se determinaron mediante un diseño por selección el mismo que nos permite controlar el adecuado funcionamiento del equipo de acuerdo a nuestras necesidades.

Los elementos de control que se encuentran en el tablero eléctrico se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 5.4 Elementos de control.

<b>ELEMENTO</b>	<b>DESCRIPCION</b>
Contactador CSC trif. 9 apm 3 hp	Controla el ventilador
Breaker Merlin Domae 3p 40A	Conectado a la niquelina
Breaker 1 polo 1 amperio	Conexión con el ventilador
Control temp.8 pines 48x4	Mantiene a temperatura constante
Contactador CSC trif. 32 amp 10 hp	Controla la niquelina
Luz piloto 220v	Indica el encendido
Luz piloto roja 220v	Indica el encendido
Cable cuenca Flexible 10	Conexión Interna del panel eléctrico
Cable cuenca Flexible 14	Conexión del ventilador
Cable cuenca Flexible 20	Conexión de la niquelina
Dimmer 600w	Controla la intensidad de la niquelina

El sentido de conexión de todos los elementos lo podemos visualizar en el siguiente plano eléctrico:

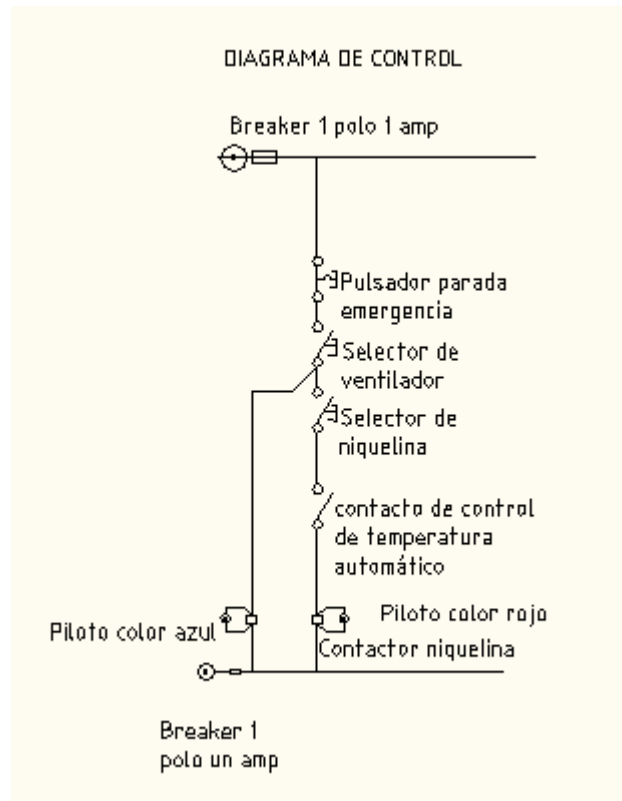


Figura 5.10 Diagrama de Control.

Las conexiones realizadas permiten que el funcionamiento del tablero sea el siguiente:

- Se enciende el ventilador
- Se enciende la niquelina
- Se coloca la temperatura deseada en el controlador de temperatura
- Si no está encendido el ventilador no se enciende la niquelina
- Cuando se llega a la temperatura establecida se apaga automáticamente la niquelina y se enciende de la misma manera cuando baje la temperatura marcada.

## 5.4 MONTAJE

Una vez construidas todas las partes del deshumidificador se procede con el ensamblaje de las mismas. Se debe tomar en cuenta que el ducto donde se encuentra la niquelina debe tener una inclinación de 45 grados para que el flujo del aire sea circular y entre tangencialmente a la cámara de secado –tolva-, de esta manera el aire que entra se reparte por todo el material que esta dentro de ella.

Al ventilador que va en la entrada del ducto se le debe dar la misma inclinación de 45 grados para que el ensamblaje de las dos partes no tenga complicaciones.



Figura 5.11 Conexión del ventilador con el ducto.

Primero se elabora un canal de conexión entre la tolva y el ducto que contiene la niquelina y se lo adapta a la tolva, completando así la estructura de la misma.



Figura 5.12 Estructura de la tolva y canal.

Se toma el ventilador y se une con el ducto que contiene la niquelina mediante suelda autógena para un acabado más fino.

Luego se introduce la niquelina en el ducto cuidando que la salida de los cables sea apropiada y tenga las protecciones necesarias.

Hay que tener en cuenta que las salidas a la toma eléctrica del ventilador y de la niquelina son distintas y para realizar las pruebas previas se debe conectar en los enchufes apropiados. A continuación una tabla con las especificaciones técnicas de la niquelina y del ventilador.

Tabla 5.4 Especificaciones técnicas.

<b>Elemento</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Entrada a la toma eléctrica</b>
Ventilador	1000 Cfm	110v
Niquelina	3500 v	220v

Se realiza unas pruebas previas solamente con la niquelina y el ventilador ensamblados para comprobar el correcto funcionamiento del sistema antes de unir a la tolva.

Luego colocamos una malla de acero en la entrada de aire de la tolva para evitar que el Pet que va a estar en la misma resbale hacia el ducto que tiene la niquelina.



Figura 5.13 Malla en la tolva.

Se sujeta el sistema pre armado y se lo levanta hasta la entrada de aire de la tolva para unirlo mediante suelda eléctrica, de esta manera queda armado el sistema de secado en su totalidad,



Finalmente para unificar los elementos y manejar con facilidad el sistema se coloca en la estructura base que consta de cuatro perfiles "L" dos de los cuales sujetan al tablero de control eléctrico y los otros dos en la parte posterior, con las alturas adecuadas para el correcto funcionamiento del sistema y que se detallan en los planos, sujetan al conjunto unido del ventilador, ducto con la niquelina y la tolva.



Figura 5.14 Equipo



## **CAPITULO 6**

### **PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

#### **6.1 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO**

El deshumidificador fue elaborado con características y especificaciones para el secado exclusivo de pet por esta razón los parámetros de funcionamiento citados a continuación son únicamente cuando el secado sea de este producto.

Capacidad máxima de la tolva

El diseño del sistema de secado de la tolva esta realizado para 5 kg de PET por esta razón esta es la capacidad máxima de la cual no debemos sobrepasarnos para que el secado sea eficiente.

Temperatura en el interior

Luego de ejecutar las pruebas de funcionamiento se llevo a establecer que la temperatura óptima que se debe ajustar en el controlador de temperatura es de 100° C para un secado homogéneo.

### Temperatura de salida de aire

La temperatura de salida varía según los ajustes que se hagan en el control de temperatura por esa razón se ha medido una temperatura de salida que va desde 107.5 a 127.5 °C

### Voltaje del ventilador

El voltaje con el que trabaja el ventilador es de 110 V y es conectado a la caja de control eléctrico en donde pasa por un contactor y se une a una salida con una toma eléctrica de 220 V.

### CFMs del ventilador

El ventilador tiene 1000 CFMs de salida lo que nos garantiza un flujo adecuado para el secado del PET que se encuentra en la tolva.

### Amperaje del ventilador

El amperaje del ventilador es de 1.5 A lo suficiente para poner en funcionamiento al dispositivo.

### Voltaje de la niquelina

Como necesitamos de generar calor mediante las resistencias de la niquelina se considero un voltaje mayor por ello el voltaje con el que trabaja la niquelina es de 220V.

### Tiempo de calentamiento

El deshumidificador necesita de un tiempo de calentamiento de 12 min antes de colocar el PET en la tolva. Esto es con el fin de que el secado sea uniforme.

### Tiempo de secado

Luego de realizar las practicas se pudo comprobar que las 3h de secado que nos dieron los datos técnicos provistos por proyectos de tesis anteriores e investigaciones realizadas son las más efectivas para ejecutar esta actividad.

Humedad

Las pruebas realizadas con los parámetros anteriormente detallados nos permiten establecer que el porcentaje de humedad que se extrae en el secado es de 7%.

## **6.2 INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN**

Balanza

Para el proyecto la balanza fue de mucha utilidad ya que sirvió para determinar los pesos exactos del pet antes del secado con el DESHUMIDIFICADOR y los posteriores al secado. De esta manera se determinó el porcentaje de humedad que ha sido extraído por la maquina.

Flexómetro

Este instrumento de medida de longitud nos fue de mucha ayuda tanto en la construcción como en las pruebas de funcionamiento:

Construcción.- Es de mucha utilidad en la medición de distancias para realizar cortes, marcaciones, en definitiva para medir las dimensiones que se diseñaron y debían concretarse en la construcción del deshumidificador

Funcionamiento.- En las pruebas de funcionamiento fue de mucha utilidad para medir las longitudes de las fibras para hacer las probetas que nos permiten realizar las pruebas mecánicas.

Pie de rey

El pie de rey ayudó a determinar con mayor exactitud las longitudes de probetas, los diámetros, etc.

También utilizamos el pie de rey para tomar medidas del casquillo de salida de la extrusora.

Multímetro

El multímetro mediante su sistema de medición ayudó a determinar la temperatura, ya que gracias a una termocupla tipo J podemos ver la variación de voltaje y el milímetro en la escala de temperatura nos da la lectura medida.

## 6.3 PROCEDIMIENTO

### 6.3.1 SECADO



Figura 6.1 Deshumidificador

1.- Se calienta el deshumidificador por un tiempo de 12 minutos subiendo la temperatura paulatinamente hasta llegar a 100° C en el control de temperatura del panel.

Con la temperatura de 100° C en el panel de control tendremos una temperatura de 140°C en el aire que circula dentro del deshumidificador

2.- Colocar máximo 5 kilogramos de RPET en la tolva del deshumidificador.

3.- Dejar un tiempo de 3 horas para que el secado sea óptimo.

Luego de este tiempo se puede comenzar con el proceso de extrusión.

### 6.3.2 EXTRUSIÓN

Luego de obtener la hojuelas de RPET siguiendo el procedimiento de secado se procede a la extrusión para obtener las fibras de RPET.



Figura 6.3 Extrusora

1.- Se calienta la maquina durante una hora hasta llegar a una temperatura de 190° C en los dos controles .



Figura 6.4 Control de Temperatura 190° C

2.- Se saca todo el material sobrante de prácticas anteriores aproximadamente durante cinco minutos se debe activar el tornillo sin fin.



Figura 6.5 Eliminación de restos

3.- Se alimenta a la extrusora con RPET seco con una cantidad aproximada a los 250 gr por carga



Figura 6.6 Alimentación de extrusora



4.- Se comienza el proceso bajando la temperatura hasta llegar a la optima la cual esa a rededor de 170 ° C en el primer control de temperatura y de 180° C en el segundo con una frecuencia de 45 en el motor.



Figura 6.7 Controles de Temperatura de Proceso

Durante el proceso de extrusión cuando la temperatura del segundo control baja se endurece la salida del RPET por la boquilla , si sucede esto debemos detener el tornillo sin fin y elevar la temperatura hasta que se destape la boquilla y poder seguir con el proceso.

5.- Se obtiene la fibra de acuerdo a los requerimientos propuestos.



Figura 6.8 Fibra extruida

## Pruebas

El procedimiento seguido en la pruebas realizadas esta detallado en el numeral 6.5 de este capitulo

### 6.4 LEVANTAMIENTO DE DATOS

Tabla 6.1 Datos obtenidos de probetas de RPET Húmedo

#	Diámetro (mm)				
	1	2	3	4	5
1	2,46	2,31	2,45	2,44	2,41
2	1,96	2,12	2,15	2,17	2,22
3	2,38	2,22	2,29	2,07	2,1
4	2,11	2,19	2,36	2,42	2,4
5	2,23	2,12	2,36	2,4	2,36

Elaborado por: M. Montenegro, J. Valverde, J. Cuenca, J. Figueroa

Tabla 6.2 Datos obtenidos de probetas de RPET Seco

#	Diámetro (mm)				
	1	2	3	4	5
1	2,11	2,4	2,63	2,57	2,13
2	2,09	1,95	2,02	2,04	2,09
3	1,95	2,01	1,99	1,99	1,98
4	2,01	2	1,99	1,95	1,93
5	2,12	2,25	2,4	2,3	2,24

Tabla 6.3 Datos obtenidos de probetas de RPET Seco y Desgasificado

#	Diámetro (mm)				
	1	2	3	4	5
1	1,09	1,27	1,15	1,27	1,44
2	1,4	1,37	1,4	1,55	1,41
3	1,44	1,43	1,63	1,64	1,55
4	1,44	1,44	1,41	1,26	1,43
5	1,47	1,53	1,16	1,27	1,52

Elaborado por: M. Montenegro, J. Valverde, J. Cuenca, J. Figueroa

## 6.5 PRUEBAS MECÁNICAS DE PRODUCTO RECICLADO

Ensayo de tracción de las fibras de PET

Estos ensayos fueron realizados con la máquina de tracción horizontal



Figura 6.9 Máquina Tracción Horizontal

Se obtuvieron probetas de PET de una longitud de 15 cm con una dimensión a estudiar de 10 cm entre marcas la cual es la longitud inicial, como se ve en la Figura 6.10

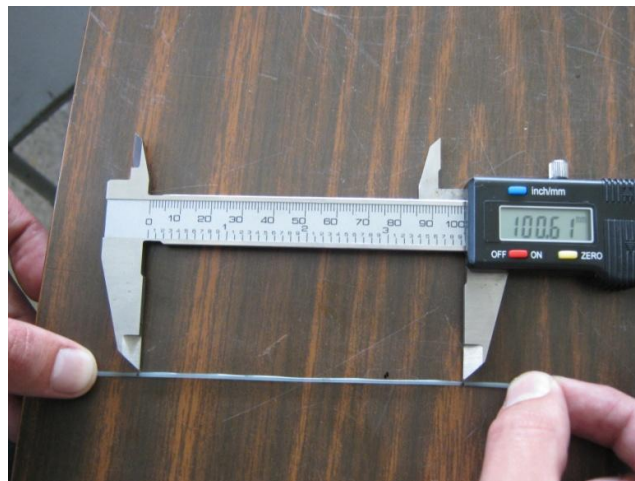


Figura 6.10 Probeta RPET

Se tomaron 5 medidas de su diámetro en diferentes sitios de la probeta para conocer su diámetro promedio y poder obtener el área transversal

Se coloca el papel milimetrado para obtener la grafica Fuerza vs Elongación que nos da la máquina.



Figura 6.11 Grafica máquina Tracción Horizontal

Se selecciona la escala con la cual va a trabajar la máquina para las pruebas se utilizara la escala 1mm = 500 gr

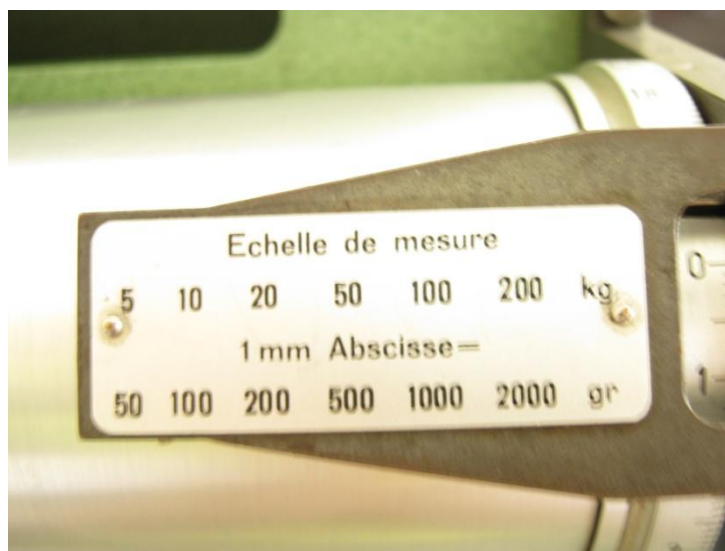


Figura 6.12 Escala máquina Tracción Horizontal

Una vez encendida la maquina se procede a realizar los ensayos de las diferente probetas obtenidas.

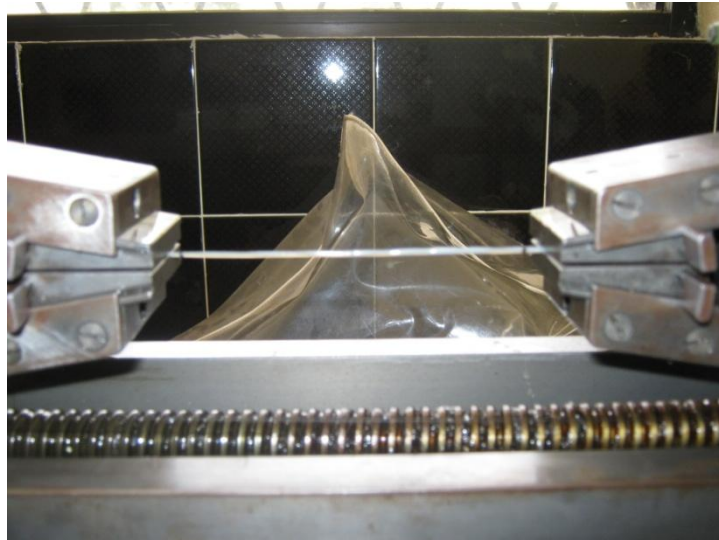


Figura 6.13 Ensayo de Tracción

Con los resultados obtenidos a través del gráfico que nos arroja la máquina podemos obtener el alargamiento porcentual y el esfuerzo ultimo a la tracción

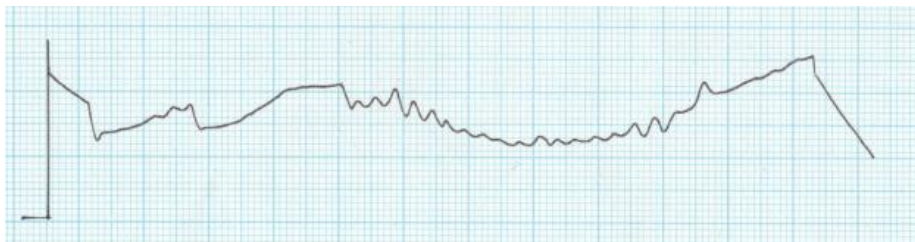


Figura 6.14 Diagrama fuerza vs desplazamiento RPET seco y desgasificado



Figura 6.15 Diagrama fuerza vs desplazamiento RPET húmedo

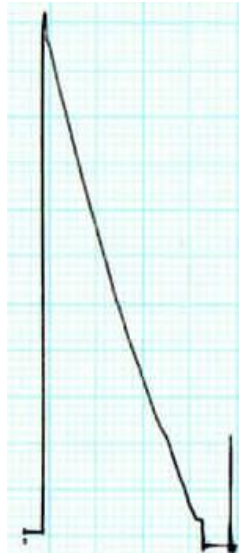


Figura 6.16 Diagrama fuerza vs desplazamiento RPET Seco

### Calculo Alargamiento Porcentual

% = Alargamiento Porcentual

$L_0$  = Longitud Inicial

$L$  = Longitud final

$$L = 102 \text{ mm}$$

$$L_0 = 100 \text{ mm}$$

$$\% = \frac{(L - L_0)}{L_0} \cdot 100$$

$$\% = 2$$

## Calculo Esfuerzo Último

$\sigma_u$  = Esfuerzo Ultimo

P = Fuerza

A = Área Transversal

P := 27.4 Kg

$A_{AAA} := 0.045 \text{ cm}^2$

$$\sigma_u := \frac{P}{A}$$

$\sigma_u = 597.826 \text{ Kg/cm}^2$

Tabla 6.4 Resultados obtenido del ensayo a tracción RPET Húmedo

	<b>D promedio</b>	<b>Lo</b>	<b>L</b>	<b>Alargamiento</b>	<b>Fuerza</b>	<b>Esfuerzo</b>
<b>#</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>%</b>	<b>P(Kg)</b>	<b><math>\sigma_u</math> (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
1	2,368	100	101,5	1,5	15	340,59
2	2,038	100	101	1	12	367,86
3	1,984	100	100,5	0,5	12	388,16
4	1,976	100	101	1	11	358,70
5	2,262	100	101,5	1,5	14	348,38

Elaborado por: M. Montenegro, J. Valverde, J. Cuenca, J. Figueroa

Tabla 6.5 Resultados obtenido del ensayo a tracción RPET seco

	<b>D promedio</b>	<b>Lo</b>	<b>L</b>	<b>Alargamiento</b>	<b>Fuerza</b>	<b>Esfuerzo</b>
<b>#</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>%</b>	<b>P(Kg)</b>	<b><math>\sigma_u</math> (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
1	2,414	100	102	2	27,5	597,83
2	2,124	100	102,5	2,5	25	714,29
3	2,212	100	102	2	24	685,71
4	2,296	100	104	4	23	560,98
5	2,294	100	103	3	26	634,15

Tabla 6.6 Resultados obtenido de el ensayo a tracción RPET seco y desgasificado

	<b>D promedio</b>	<b>Lo</b>	<b>L</b>	<b>Alargamiento</b>	<b>Fuerza</b>	<b>Esfuerzo</b>
<b>#</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>%</b>	<b>P(Kg)</b>	<b><math>\sigma_u</math> (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>
1	1,244	100	366	266	11,5	946,16
2	1,426	100	432	332	12,5	782,67
3	1,538	100	462	362	11	592,09
4	1,396	100	212	112	13,5	882,01
5	1,39	100	322	222	12	790,79

Elaborado por: M. Montenegro, J. Valverde, J. Cuenca, J. Figueroa

## 6.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con los ensayos realizados se pudo demostrar que se mejoraron las propiedades mecánicas con el secado que se realizó a las hojuelas de RPET en comparación a los resultados obtenidos de los ensayos de hojuelas húmedas

Se realizó las pruebas manualmente de ruptura se visualiza que la fibra de RPET húmedo es frágil se rompe a 90° como se puede visualizar en la figura 6.17.







Figura 6.17 Ruptura RPET húmedo

Se visualiza que se creó fibra más dúctil al momento que se realiza la prueba de ruptura esta se dobla y no se fractura como la fibra de RPER húmedo como se observa en la figura 6.18

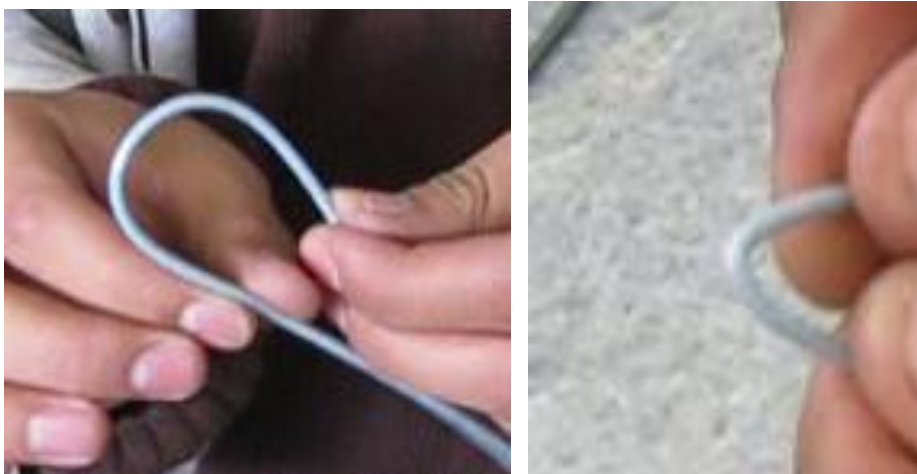
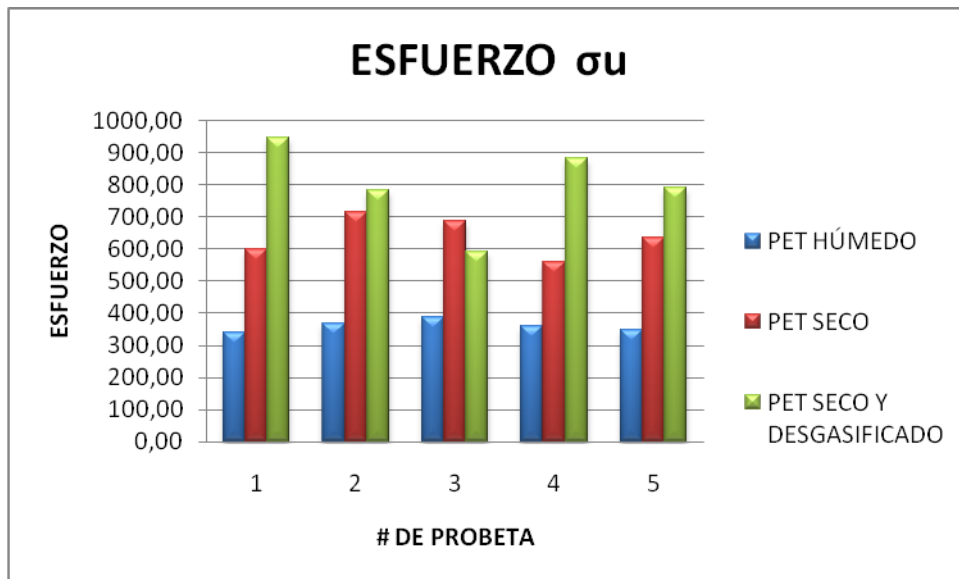
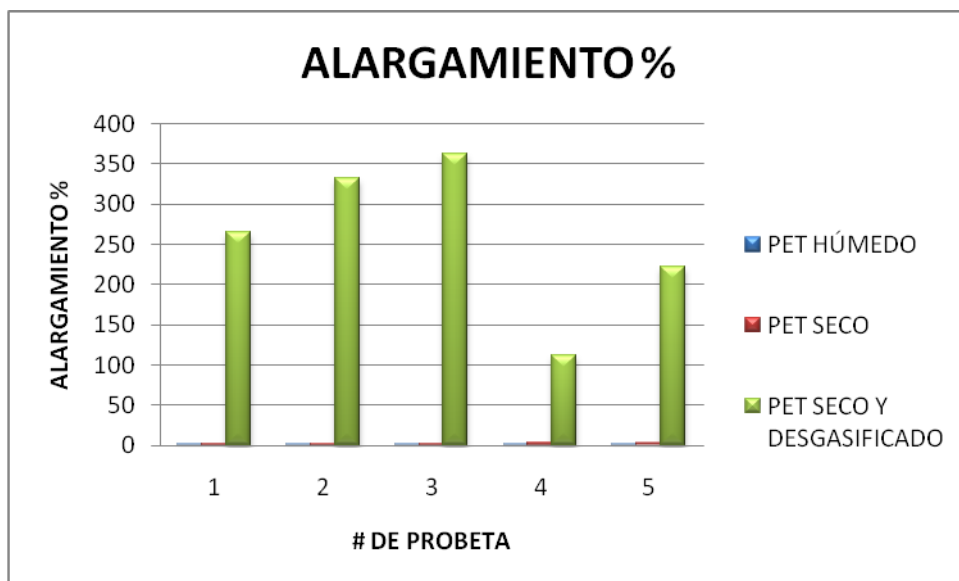


Figura 6.18 Ruptura RPET Seco



Con el RPET seco se evidencia mayor resistencia a la tracción llegando a obtener hasta 714 kg/cm<sup>2</sup> en comparación de los 380 kg/cm<sup>2</sup> del RPET húmedo.



El alargamiento porcentual estuvo en un rango entre 2 y 4 % lo cual nos demuestra que no tuvo mucho mejoramiento en la ductilidad del material.

Al realizar las pruebas en conjunto con el proyecto de grado “Diseño y construcción de un desgasificador al vacío para la extrusora post consumo del LMM” se mejoró las propiedades mecánicas de esfuerzo a tracción como las de alargamiento porcentual obteniendo los mejores resultados y llegando al objetivo de mejorar las propiedades del material, llegando a una resistencia a la tracción de 592 a 946 kg/cm<sup>2</sup> y una elongación de la fibra de 112 a 360 % .



## CAPITULO 7

### ANALISIS ECONOMICO FINANCIERO

#### 7.1 ANÁLISIS ECONÓMICO

##### Costos Directos

Tabla 7.1 Remuneraciones a profesionales

Nombre	Cargo	Valor Total
Ingeniero José Pérez	Director	600
Ingeniero Carlos Suntaxi	Codirector	600
	Total <sub>1</sub>	1200

Para realizar el diseño y la construcción del deshumidificador para hojuelas de pet se utilizaron los siguientes equipos y materiales, detallados en cantidad y costo en las siguientes tablas:

Tabla 7.2 Costo de equipos y materiales

Ord	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo Total
1	Plancha de acero A36	Uni	1	110	110
2	Niquelina	Uni	1	65	65
3	Ventilador	Uni	1	10	10
4	Válvula de bola de 1plg	Uni	1	35	35
5	Tornillos 1/8plg	Uni	6	1,2	7,2
6	Tuercas de mariposa 1/8plg	Uni	6	0,8	4,8
7	Motor ¼ HP	Uni	1	120	120
8	Remaches	Uni	20	2	40
9	Perfil en "L"	m	5	5	25
10	Gabinete metálico	Uni	1	24	24
11	Contactador CSC trif. 32 amp 10 hp	Uni	1	16,55	16,55
12	Contactador CSC trif. 9 amp 3 hp	Uni	1	7,83	7,83
13	Breaker Merlin Domae 3p 40A	Uni	1	15,71	15,71
14	Breaker 1 polo 1 amperio	Uni	2	3,2	6,4
15	Control temp.8 pines 48x4	Uni	1	49,45	49,45
16	Pulsador Emer rojo	Uni	1	3,75	3,75
17	Luz piloto 220v	Uni	1	1,16	1,16
18	Luz piloto roja 220v	Uni	1	1,16	1,16
19	Selector dos posiciones	Uni	2	2,19	4,38
20	Cable cuenca Flexible 10	m	2	0,81	1,62
21	Cable cuenca Flexible 14	m	2	0,29	0,58
22	Cable cuenca Flexible 20	m	7	0,14	0,98
23	Terminal Pin # 18 - 16	Uni	50	0,03	1,5
24	Amarra plástica negra	Uni	20	0,01	0,2
25	Enchufe Pategallo 3 p 50 A	Uni	1	5,4	5,4
26	Sucre 3x10	m	2	3,63	7,26
27	Conector Romex 3/4	Uni	1	0,57	0,57
28	Terminal Pin #10 - 8 Negro	Uni	3	0,05	0,15
29	Dimmer 600w	Uni	1	4,99	4,99
30	Neplo A/C SCH -40 1"x3"	Uni	1	2,35	2,35
31	Lana con Aluminio Duct	Uni	1	3,5	3,5
				Total <sub>2</sub>	576,49

El material utilizado para la construcción de la tolva fue adquirido en el taller industrial donde se hizo la construcción del deshumidificador.

La adquisición de los accesorios para el control de temperatura y para la medición de la misma se lo hizo en tiendas especializadas en materiales eléctricos lo que nos garantiza un correcto funcionamiento de los mismos.

Así también se tienen el costo de otros rubros como Insumos y Mano de obra.

Tabla 7.3 Costos de Insumos

Ord	Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo Total
1	Teflón	1	0,8	0,8
2	Pintura	1	4,2	4,2
3	Agua	10	0,15	1,5
4	Electrodos E11	20	0,2	4
			Total <sub>3</sub>	10,5

Tabla 7.4 Costos de Mano de obra

Ord	Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo Total
1	Construcción de la tolva	1	80	80
2	Construcción de la niquelina	1	30	30
3	Construcción del ventilador	1	20	20
4	Armado del equipo	1	20	20
5	Construcción del tablero eléctrico	1	55	55
6	Construcción de la estructura soporte	1	10	10
			Total <sub>4</sub>	215

Tanto la estructura de la tolva como sus diferentes adaptaciones al ventilador y a la niquelina fueron construidas en el taller mecánico industrial. La conexión de las termocuplas y del contactor la realizamos en las instalaciones del Laboratorio de Mecánica de Materiales de la Escuela Politécnica del Ejército.

Tabla 7.5 Costos de materiales para los ensayos

Ord	Descripción	Cantidad	Costo unitario	Costo Total
1	Pet reciclado	8 Kg	0,25	2
2	Molido de pet	8kg	0,1	0,8
Totals <sub>5</sub>				2,8

Tabla 7.6 Otros costos directos

Ord	Descripción	Costo Total
1	Resistencia eléctrica para la extrusora	50
2	Mecanizado de la rosca de la salida de material (extrusora)	30
Total <sub>6</sub>		80

Sumando los costos es posible obtener el costo total de costos directos.

TOTAL COSTOS DIRECTOS(TCD) (Total1+Total2+Total3+Total4+Total5+Total6)

$$TCD = 2084,79$$

### Costos Indirectos

Uso del laboratorio para pruebas previas a la construcción

Tabla 7.7 Uso de laboratorio

Nombre	Tiempo (h)	Valor hora	Costo total
Laboratorio de resistencia de materiales DECEM	6	3,7	22,2
Laboratorio de Mecánica de Materiales DECEM	10	3,7	37
Total <sub>7</sub>			59,2



Uso del laboratorio para pruebas posteriores a la construcción

Tabla 7.8 Uso de laboratorio

Nombre	Tiempo (h)	Valor hora	Costo total
Laboratorio de Mecánica de Materiales DECEM	30	3,7	111
		Total <sub>8</sub>	111

Fuente: Laboratorio de Resistencia de Materiales DECEM  
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Materiales DECEM

Tabla 7.9 Materiales e insumos

Rubro	Costo total (USD)
Suministros de oficina	50
Servicios básicos	60
Internet	40
Transporte	30
Otros materiales	0
Total <sub>9</sub>	180

TOTAL COSTOS INDIRECTOS (TCI) (Total7+Total8+Total9)

TCI = 180

TOTAL COSTOS (TCD+TCI) = 2264,79 USD

## 7.2 ANÁLISIS FINANCIERO

Para realizar el análisis financiero, se debe comparar el costo total del equipo con el ahorro que éste genera. Para esto es posible efectuar un análisis de costo beneficio del proyecto por lo cual se detallan equipos didácticos de secado de plástico con precios aproximados, existentes en el mercado que se ajusten a los requerimientos del Laboratorio.

Tabla 7.10 Costos de equipos similares en el mercado

Descripción	Ubicación	Costo total
Serie HD: Modelo estándar de tolva secadora de calentamiento rápido y control constante de temperatura	España	12500 USD
Tolvas secadoras de 12 a 800 kg de capacidad de secado.	Venezuela	15000 USD

La adquisición de un equipo de esta naturaleza para el Laboratorio de mecánica de materiales del DCEM sería demasiado alta, según los costos mostrados en la tabla 7.10 y comparando con el valor que se obtuvo de realizar el presente equipo se logro un ahorro mayor del 100%, que es de beneficio directo para la Universidad

Es cierto que las tolvas investigadas son de mayor capacidad por esto se hizo una relación de precios con la capacidad de nuestra tolva y nos mantenemos con un ahorro mayor al 100%.

Una vez terminado el análisis Económico Financiero del proyecto, se puede concluir que además de ser necesario el equipo para las prácticas de laboratorio es completamente conveniente en relación a los costos de equipos similares que se presenta en el mercado.

## **CAPITULO 8**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **8.1 CONCLUSIONES**

- Para el diseño del Deshumidificador se seleccionó uno de secado por aire caliente. Sus características de costo, operación y mantenimiento son adecuadas para su uso con el PET
- Las principales variables que deben ser controladas durante el proceso de secado son la temperatura y el tiempo de secado. En el caso del Pet es importante no sobrepasar los 140 °C para evitar que el material se funda. El tiempo que nos garantiza un secado adecuado son tres horas para 5 kg.
- La fibra obtenida luego de haber realizado el secado del RPET a través del deshumidificador mejora las propiedades mecánicas de: resistencia a la tracción 560 – 714 Kg/cm<sup>2</sup>, alargamiento porcentual 2 – 4 %.

- Al realizar el proceso el conjunto con un equipo desgasificador al vacío se mejoraron las propiedades mecánicas de las fibras de RPET llegando a obtener un material resistente y dúctil. Las propiedades obtenidas fueron: resistencia a la tracción 780-940 kg/cm<sup>2</sup> y un alargamiento porcentual del 220-360%.
- Un indicador de la variación de la propiedades mecánicas de la fibra de RPET es el valor de su diámetro. Las fibras de 1.2 a 1.4 mm de diámetro proporcionan un alargamiento porcentual mayor al 100%.

## **8.2 RECOMENDACIONES**

- Para el secado con aire caliente es recomendable que sea con un caudal volumétrico mínimo de 600 CFM.
- Para un adecuado secado se debe mantener el material durante tres horas a 100°C.
- Para obtener las fibras con buenas propiedades mecánicas se debe mantener las temperaturas de la extrusora entre 170 y 180°C.
- Se debe controlar la salida de la fibra con el fin de que no se tapone la boquilla y variar las temperaturas en el rango establecido de 170 y 180°C para tener una fibra continua.
- Se debe realizar una recepción de fibra constante en el tiempo con el fin de que la misma tenga un mismo diámetro en toda su longitud.

# REFERENCIAS

## BIBLIOGRAFICAS

- INCROPERA, F. y DEWIT D. Fundamentos de Transferencia de Calor. 4 ta ed. Prentice Hall hispanoamericana SA. México. 1999
- CENGEL, Y. Transferencia de Calor y masa. Traducido del ingles por José Pérez y Javier Enríquez. 3era ed. México, MacGraw Hill, 2007
- MOTT, L. R. Mecánica de Fluidos Aplicada. Traducido por Carlos Cordero. 4ta ed. México, Pearson, s.f.
- GIECK, K. Manual de Formulas Técnicas. Traducido por Dr. Víctor Gerez . 19ª ed. México, Alfaomega, 1993

## MATERIALES CONSULTADOS

- Ing. PÉREZ. José; Apuntes Mecánica de Materiales
- Ing. SUNTAXI. Carlos; Apuntes Mecánica de Materiales
- Ing. MONTENEGRO. Fernando; Apuntes de Transferencia de Calor
- Ing. TERNEUS. Apuntes de Fluidos

## DIRECCIONES DE INTERNET

- <http://www.textoscientificos.com/polimeros/pet>
- Escuela Técnica Superior de Ing Industriales Universidad de Valladolid propiedades\_y\_caracteristicas del PET.mht
- [http://www.sapiensman.com/medicion\\_de\\_temperatura/termocuplas.htm](http://www.sapiensman.com/medicion_de_temperatura/termocuplas.htm)
- [http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/Modulo\\_03/termocuplas.pdf](http://proton.ucting.udg.mx/dpto/maestros/mateos/clase/Modulo_03/termocuplas.pdf)
- [www.aprepet.org.mx](http://www.aprepet.org.mx)
- [www.allrightmachinery.com/spanish/dehumidifying.html](http://www.allrightmachinery.com/spanish/dehumidifying.html)
- [www.aea.com.ar/plasticos/productos/DS504.htm](http://www.aea.com.ar/plasticos/productos/DS504.htm)
- [www.safiplast.com/upm-descripcion01.html](http://www.safiplast.com/upm-descripcion01.html)

- [http://www.plastico.com/tp/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARCHIVO/ARTICULOS/doc\\_41537\\_HTML.html?idDocumento=41537#otros\\_articulos](http://www.plastico.com/tp/secciones/TP/ES/MAIN/IN/ARCHIVO/ARTICULOS/doc_41537_HTML.html?idDocumento=41537#otros_articulos)(opciones de secado)
- <http://www.interempresas.net/Plastico/FeriaVirtual/ResenyaProducto.asp>
- <http://www.fabrohnos.com.ar/injectorasplastico/accesorios/tolvasecadora.htm>

## **ANEXOS**





## **Anexo A**

### Planos



## **Anexo B**

### Gráficas



## **Anexo C**

### Propiedades de Materiales