



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE  
CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

*“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR ROTATORIO PARA LA  
OBTENCIÓN DE ESCAMAS PET”*

**TESIS DE GRADO**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR**

**ADRIANA ELIZABETH ABARCA SÁNCHEZ**

**MARLON FABRICIO ALDAZ FLORES**

**RIOBAMBA-ECUADOR**

**2014**

## AGRADECIMIENTO

*En primer lugar damos gracias a Dios, por ser guía de nuestras vidas, y por ser la fortaleza para llegar a este gran sueño y anhelo. A nuestros queridos padres, quienes con sacrificio y amor involucraron en nosotros el deseo de superación y progreso, que día a día fueron con cariño y paciencia incentivándonos en nuestra carrera universitaria.*

*A la Escuela de Ingeniería Química, a la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, de manera especial nuestro reconocimiento a los Ingenieros Hannibal Brito, Mabel Parada distinguidos miembros de nuestro tribunal, por habernos brindado su mano amiga, quienes con sus conocimientos nos supieron dar un criterio correcto, acertado y oportuno, para la realización de esta tesis de grado y a todas aquellas personas que con su valioso aporte hicieron posible la culminación del presente trabajo investigativo.*

*Y no podría faltar nuestro agradecimiento muy especial a nuestros amigos por sus respaldos y aliento en la culminación de esta tesis.*

## DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a Dios y a la Dolorosita del colegio por darme fuerzas y capacidad para cumplir esta meta, a mi madre que ha sido el pilar fundamental dándome apoyo incondicional dándome la oportunidad de ser un profesional, a mis abuelitos Cesario y Celina que han sabido entenderme y apoyarme desde lejos, a mi tía Blanca que con su apoyo y preocupación, les quedo muy agradecido.*

**Marlon. A**

*Con mucho amor dedico este trabajo a Dios ya que por decisión de él me despierto día a día, a mis padres los seres que más amo, quienes han estado siempre conmigo a pesar de los desaciertos y contrariedades me han apoyado incondicionalmente, dándome la oportunidad de seguir adelante con mis proyectos de vida; a mis hermanos Claudia, Raquel y Sergio quienes me han incentivado para que culmine esta etapa y a mi sobrina Emily quien siempre pondrá una sonrisa en mi rostro por el simple hecho de existir.*

**Adriana. A**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**  
**HOJA DE FIRMAS**

El tribunal de tesis certifica que: El trabajo de investigación “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR ROTATORIO PARA LA OBTENCIÓN DE ESCAMAS PET**”, de responsabilidad de la señorita Adriana Elizabeth Abarca Sánchezy el señor Marlon Fabricio Aldaz Flores ha sido prolijamente revisado por los Miembros del Tribunal de Tesis, quedando autorizado su presentación.

<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Dr. Silvio Álvarez L. <b>DECANO FAC. CIENCIAS</b>	-----	-----
Ing. Mario Villacrés A. <b>DIRECTOR ESC. ING. QUÍMICA</b>	-----	-----
Ing. Hannibal Brito M. <b>DIRECTOR DE TESIS</b>	-----	-----
Ing. Mabel Parada. <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	-----	-----
Tec. Carlos Rodríguez. <b>DIRECTOR CENTRO DOCUMENTACIÓN</b>	-----	-----
Nota de Tesis Escrita	-----	

## **HOJA DE RESPONSABILIDAD**

**“Nosotros, ADRIANA ELIZABETH ABARCA SANCHEZ Y MARLON FABRICIO ALDAZ FLORES, somos responsables de las ideas, doctrinas, resultados y propuestas expuestas en el presente trabajo de investigación y el patrimonio intelectual de la Memoria de Grado pertenece a la “ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO”**

**Adriana Abarca S.**

**Marlon Aldaz F.**

## TABLA DE CONTENIDOS

CONTENIDO	Pp.
CARATULA.....	i
AGRADECIMIENTO .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
HOJA DE FIRMAS .....	i
HOJA DE RESPONSABILIDAD .....	ii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE CUADROS .....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE REACCIONES .....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiii
RESUMEN .....	i
ABSTRACT.....	ii
INTRODUCCIÓN .....	i
ANTECEDENTES .....	iii
JUSTIFICACIÓN .....	v
OBJETIVOS .....	vi
1. MARCO TEÓRICO .....	1
1.1. PLÁSTICOS .....	1
1.1.1. CLASIFICACIÓN.....	1
1.2. PLÁSTICO PET .....	3
1.2.1. HISTORIA.....	3
1.2.2. PRODUCCIÓN DEL PET.....	4
1.2.3. PROPIEDADES DEL PET .....	8
1.2.4. CARACTERÍSTICAS DEL PET .....	10
1.2.5. VENTAJAS DEL PET .....	11
1.2.6. DESVENTAJAS DEL PET .....	12
1.2.7. APLICACIONES.....	12
1.3. RECICLAJE.....	15

1.3.1. RECICLAJE EN EL ECUADOR.....	15
1.3.2. DATOS RELEVANTES .....	16
1.3.3. PLAN DE MAJEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	17
1.3.4. GENERACIÓN DE RESIDUOS.....	17
1.3.5. TIPOS DE RECICLADO .....	18
1.4. SECADO.....	23
1.4.1. SECADORES .....	23
1.4.2. MÉTODOS GENERALES DE SECADO .....	27
1.4.3. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE SECADO.....	29
1.4.4. CINÉTICA DEL SECADO .....	31
1.5. SECADOR ROTATORIO.....	35
1.5.1. TIPOS DE SECADORES ROTATORIOS .....	35
1.6. DISEÑO DEL SECADOR ROTATORIO .....	37
1.6.1. DISEÑO DE INGENIERÍA .....	37
1.6.2. ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE UN SECADOR ROTATORIO.....	38
2. PARTE EXPERIMENTAL.....	50
2.1. MUESTREO .....	50
2.2. METODOLOGÍA .....	51
2.2.1. MÉTODOS Y TÉCNICAS.....	51
2.3. DATOS DE EXPERIMENTALES.....	55
2.3.1. DIAGNÓSTICO .....	55
2.3.2. DATOS .....	56
2.4. DATOS ADICIONALES .....	58
3. DISEÑO DEL EQUIPO.....	60
3.1. CÁLCULOS.....	60
3.1.1. Cálculos para el reciclado de PET.....	60
3.1.2. Cálculo de la velocidad de secado y del tiempo de secado para los diferentes períodos.....	60
3.1.3. Cálculos para el diseño del secador rotatorio .....	67
3.1.4. Cálculos Adicionales .....	72
3.1.4.1. Cálculo de la cantidad de calor .....	72
3.1.4.1.1. Cantidad de calor perdido .....	72

3.2. RESULTADOS.....	76
3.2.1. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE INGENIERÍA .....	76
3.2.2. RESULTADOS DE LAS CURVAS DE SECADO.....	78
3.3. PROPUESTA.....	87
3.3.1. REQUERIMIENTOS PRESUPUESTARIOS.....	88
3.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	90
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	103
4.1. CONCLUSIONES. ....	103
4.2. RECOMENDACIONES.....	104
BIBLIOGRAFÍA .....	105
CAPÍTULO I.....	106
BIBLIOGRAFÍA .....	106
ANEXOS .....	111



## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

$A$	Área de secado ( $m^2$ )
$A_T$	Área total ( $m^2$ )
$cm$	Centímetros
$C_p$	Capacidad Calorífica (Kcal/Kg. C)
$C$	Grados Celsius
$G_1, G_2$	Flujo másico del aire (Kg de aire seco/hora)
$h$	Horas
$h_1$	Entalpía del sólido a la entrada (Kcal/kg)
$h_2$	Entalpía del sólido a la salida (Kcal/kg)
$h_i$	Entalpía específica del aire kJ/kgC
$H_1$	Entalpía del aire a la salida (Kcal/kg)
$H_2$	Entalpía del aire a la entrada (Kcal/kg)
$kcal$	Kilocalorías
$kg$	Kilogramos
$k/h$	Kilómetros por hora
$Lb$	Libras
$m$	Metros
$mg$	Miligramos
$mg/kg$	Miligramos por kilogramos
$mL$	Mililitros
$P$	Peso (Kg)
$P_e$	Porcentaje de pérdidas de calor (%)
$Q_{aire}$	Caudal del Aire ( $m^3/min$ )
$R$	Rendimiento del Equipo (%)
$S$	Peso del sólido seco (Kg)
$S_1$	Caudal del sólido a la entrada (Kg/h)
$S_2$	Caudal del sólido a la salida (Kg/h)
$t_1$	Temperatura del aire a la salida (C)
$t_2$	Temperatura del aire la entrada (C)
$t_{s1}$	Temperatura del sólido a la entrada (C)

$t_{s2}$	Temperatura del sólido a la salida (C)
$T_o$	Temperatura de referencia (C)
$U.I$	Unidades internacionales
$V$	Volumen ( $m^3$ )
$W$	Velocidad de secado ( $Kg/m^2.h$ )
$W_C$	Velocidad de secado constante ( $Kg/m^2.h$ )
$W_d$	Velocidad de secado decreciente ( $Kg/m^2.h$ )
$W_T$	Velocidad total de secado ( $Kg/m^2.h$ )
$X$	Humedad (%)
$X_1$	Humedad del sólido a la entrada(%)
$X_2$	Humedad del sólido a la salida(%)
$X^*$	Humedad de equilibrio(%)
$X_C$	Humedad crítica (%)
$X_f$	Humedad final(%)
$X_i$	Humedad inicial (%)
$X_m$	Humedad media (%)
$Y_1$	Humedad del aire a la salida (%)
$Y_2$	Humedad del aire a la entrada (%)
$\theta$	Tiempo (h)
$\theta_a$	Tiempo antecrítico (h)
$\theta_p$	Tiempo poscrítico (h)
$\Delta x$	Variación de humedad
$\Delta \theta$	Variación del tiempo (h)
$\Delta T$	Variación de temperatura (C)
$\Delta$	Densidad ( $kg/m^3$ )

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA</b>	<b>P.p</b>
1.2-1 PLÁSTICO PET .....	3
1.3.5.1-1 RECICLADO MECÁNICO .....	19
1.3.5.2-1 RECICLADO QUÍMICO.....	21
1.3.5.3-1 RECICLADO ENERGÉTICO .....	22
1.4.2-1 PÉRDIDA DE HUMEDAD .....	28
1.4.2-2 CINÉTICA DE SECADO .....	28
1.4.3.1-1 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO .....	30
1.4.4.1-1 DATOS DE HUMEDAD LIBRE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	32
1.4.4.2-1 CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD LIBRE.....	33
3.1.2.1-1 BALANCES DEL SECADOR ROTATORIO .....	67
3.3-1 SECADOR TOTATORIO.....	88

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA	P.p
1.2.2-1 CARACTERÍSTICAS DE LOS TIPOS DE XILENOS .....	5
2.2.1.2.1-1PORCENTAJE DE HUMEDAD DEL PET .....	52
2.2.1.2.2-1PORDUCCIÓN DE BOTELLAS PLASTICAS EN LA ESPOCH.....	53
2.2.1.2.3-1DETERMINACIÓN DE LA PORDUCCIÓN PERCÁPITA DE LA ESPOCH	54
2.3.2-1DATOS DEL PESO DEL SOLIDO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO .....	56
2.3.2-2DATOS DEL PESO DEL SOLIDO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO .....	567
2.3.2-3DATOS DEL PESO DEL SOLIDO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO .....	567
2.3.2-4PRODUCCIÓN DE RESÍDUOS SÓLIDOS POR DÍA - ESPOCH.....	58
2.4-1DATOS ADICIONALES.....	58
3.1.2.3.1-1HUMEDAD X EN FUNCIÓN DE 1/W .....	62
3.2.1-1RESULTADO DE LOS CÁLCULOS PARA OBTENER LA VELOCIDAD DE SECADO PARA LOS DIFERENTE PERÍODOS (A 115 C).....	76
3.2.1-2RESULTADO PARA OBTENER EL TIEMPO DE SECADO PARA LOS DIFERENTES PERÍODOS .....	76
3.2.1-3RESULTADOS DEL BALANCE DE ENERGÍA.....	76
3.2.1-4RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS ADICIONALES .....	77
3.2.1-5RESULTADOS DE LA HUMEDAD A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	77
3.2.2-1RESULTADOS DE LA CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO .....	79
3.2.2-2RESULTADOSDE LA CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO .....	80
3.2.2-3RESULTADOS DE LA CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO .....	81
3.2.2-4RESULTADOSDE LA CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO .....	82
3.2.2-5RESULTADOS DE LA CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO .....	84
3.2.2-6RESULTADOSDE LA CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO .....	805
3.3.1.1.1-1RECURSOS MATERIALES .....	88
3.3.1.1.2-1RECURSOS HUMANOS .....	88
3.3.1.1.3-1RECURSOS TOTALES.....	89

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>CUADRO</b>	<b>P.p</b>
1.1.1-1CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS .....	2
1.2.3-1DATOS TÉCNICOS DEL PET .....	9
1.2.4-1RESISTENCIA DEL PET A DISTINTA SUSTANCIAS QUÍMICAS.....	10
1.2.7-1APLICACIONES COMUNES DEL PET.....	14
1.3.1-1RECICLAJE EN EL ECUADOR.....	16
3.3-1HOJA TECNICA .....	87

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>GRÁFICO</b>	<b>P.p</b>
3.1.2.3.1-1 SE GRAFICA LAS VARIABLES DE $1/W$ EN FUNCIÓN DE $X_{media}$ Y SE DETERMINA EL ÁREA BAJO LA CURVA.....	63
3.2.2-1 CURVA DE HUMEDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	78
3.2.2-2 CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO.....	79
3.2.2-3 VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	80
3.2.2-4 CURVA DE HUMEDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	81
3.2.2-5 CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO.....	82
3.2.2-6 VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	83
3.2.2-7 CURVA DE HUMEDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	84
3.2.2-8 CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO.....	85
3.2.2-9 VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	86

## ÍNDICE DE REACCIONES

<b>REACCIÓN</b>	<b>P.p</b>
1.2.2-1 ISÓMEROS DEL XILENO .....	4
1.2.2.1-1 FORMACIÓN DE ETILENGLICOL A PARTIR DE ETILENO.....	5
1.2.2.2-1 PROCESO DE ESTERIFICACIÓN .....	6
1.2.2.2-2 ESTERIFICACIÓN Y POLICONDESACIÓN DEL PET .....	7

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO</b>	<b>P.p</b>
I. DIAGRAMA PSICOMÉTRICO.....	102
II.PROPIEDADES FÍSICAS DEL AIRE A 1atm.....	103
III.COMPONENTES DEL EQUIPO.....	104
IV.VISTAS DEL EQUIPO.....	105
V.VISTAS DEL EQUIPO.....	106
VI.VISTAS DEL EQUIPO.....	107
VII.VISTAS DEL EQUIPO.....	108
VIII.VISTAS DEL EQUIPO.....	109



## RESUMEN

El diseño y construcción de un secador rotatorio para la obtención de escamas PET se realizó con el objetivo de reducir sustancialmente la humedad del plástico, el equipo antes mencionado servirá como medio de enseñanza en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo para reforzar el conocimiento teórico acerca del secado de sólidos.

Para el diseño se realizaron ensayos en el laboratorio adquiriendo diferentes datos, mismos que sirvieron para elaborar los cálculos de ingeniería para un correcto dimensionamiento del equipo realizando una previa selección de los principales elementos que conforman el equipo, estos son: Cámara de secado, motor, ventilador, fuente de calor. El equipo fue fabricado en acero inoxidable AISI 304, y cuyas dimensiones son las siguientes: la cámara de secado tiene una longitud de 80 cm, diámetro de 38 cm, un volumen de 90L y una capacidad de 10 Kg/h; la potencia del motor es de ½ HP (373 W); la velocidad con la que trabaja el ventilador es 3600 RV, la temperatura óptima de la fuente de calor es 115°C. Con este equipo se logró alcanzar una eficiencia del 87,6%, cumpliendo así la especificación de este tipo de equipos.

Como resultados se obtuvo una reducción de humedad del PET desde un 28% hasta 1%, en un tiempo de 0,3 horas y con una velocidad total de secado de 5,36Kg/m<sup>2</sup>h.

Concluimos que el secador rotatorio está en excelentes condiciones para el proceso de secado de PET alcanzando una reducción de la humedad de 1 %.

Recomendamos que al momento de utilizar el equipo se debe tener una mascarilla, guantes, mandil, para un buen desempeño y reducir los peligros que se puedan presentar en el laboratorio.

## ABSTRACT

This investigation was carried out the design and making of a rotatory dryer for producing PET flakes, it was performed with goal of substantially reducing humanity plastic, this machine will serve as means of teaching in the Unit Operations Laboratory, at school of chemical engineering School, Science Faculty, at Politechnic School of Chimborazo, to reinforce the theoretic al knowledge about drying of solids.

This design tests were performed in the laboratory acquiring different data, same that were used to develop engineering calculations for proper sizing of making a previous selection main elements of the same equipment, such as: drying chamber, engine, fan, and heat source. Equipment was made in AISI 304 stainless steel, their dimensions are: the drying chamber has length of 80 cm, diameter 38 cm. 90L volume and capacity 10 Kg/h; engine power is  $\frac{1}{2}$  HP (373 W), the speed at which fan is working 3600 RV, the optimum temperature heat source is 115C. It was able to achieve an efficiency of 87.6%, thus fulfilling specifications this type of equipment.

As a result, it obtained reduction PET moisture from 28% to 1%, in a time of 0.3 hours and a total rate of 5.36 Kg/m<sup>2</sup>drying.

It concludes that rotary dryer is in excellent condition for drying process achieving a reduction of 1 % moisture.

It recommends when using the equipment must have mask, gloves, apron, for good performance and reduce hazards that may occur in the laboratory.

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día el desarrollo científico y tecnológico es sorprendente y cada vez hay nuevas investigaciones y muchos avances tecnológicos, es por esta razón, que un Ingeniero Químico debe estar preparado y capacitado para construir e innovar constantemente los sistemas de producción en las diferentes áreas industriales sin dejar de lado el tema ambiental que hoy en día es muy preocupante, por lo que se ha visto necesario diseñar y construir un equipo secador de botellas plásticas tipo PET, para secar las escamas procedentes del lavado.

La necesidad de reciclar material termoplástico como el PET, que es uno de los materiales de envasado que más ha incrementado su consumo en los últimos años, que resulta por sus características, especialmente interesante de reciclar, ha dado como resultado una importante demanda del producto reciclado para diversas aplicaciones como la fabricación de pantalones jean a partir de filamentos de PET, alfombras, etc.

El reciclado de botellas de PET se utiliza principalmente para obtener escamas limpias, que incluye varias piezas; empezando con la recolección de botellas aplicando un muestreo aleatorio compuesto, se prosiguió con la trituración de las mismas, para después realizar el lavado de las escamas, de esta manera se continúa con el secado del cual se va a realizar un análisis completo ya que el secador es el equipo en cuestión y como última etapa de esta línea de producción viene la extrusión de las escamas, obteniendo materia prima para la elaboración de nuevos productos; que luego podrán ser comercializados.

En la actualidad en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo ha ido en aumento el consumo de botellas tipo PET, motivo por el cual se ha visto la necesidad de adoptar un plan de reutilización y reciclado. A partir de los productos reciclados y la utilización de equipos eficientes que tengan como propósito conservar el ambiente, se ha propuesto el diseño y construcción de un equipo secador de botellas plásticas tipo PET, con lo cual se fortalecerá los conocimientos y así se reducirá los residuos plásticos, ayudando a minimizar la contaminación al entorno natural.

“El PET 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.”<sup>(26)</sup>

Las exigencias actuales incluyen también la necesidad de encontrar un equilibrio entre esas ventajas y la protección del ambiente.

En cuanto a los secadores rotatorios se conoce que son muy adecuados para el secado de productos granulados, con buenas características de flujo que requieren tiempos de secado moderados.

La elevada producción de materiales plásticos lleva consigo el cómo reutilizar o reciclar los productos desechados. La problemática con el plástico PET es que su producción es muy elevada y que el reciclaje o reutilización del mismo, a nivel nacional, se podría considerar demasiado bajo.

Éste secador será el equipo que formara parte de la línea de producción en la transformación de botellas tipo PET (Polietileno de Tereftalato) a pellets, para reducir la humedad del material ya triturado y previamente lavado.

Un secador rotatorio consta de un cilindro dentro del cual se hallan paletas que pondrán en movimiento al material. Los sólidos granulados húmedos se alimentan por la parte superior y son descargados por la parte inferior del cilindro. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo con gases calientes mediante un flujo paralelo.

La línea de producción empieza por la trituración de las botellas plásticas obteniendo como resultado escamas de PET, las mismas que ingresaron a una lavadora. En este proyecto el secador rotatorio tiene la función de reducir la humedad de las escamas de

PET que salen del proceso de lavado, para luego, ser llevadas a otro equipo llamado extrusor del cual se obtendrá materia prima que será utilizada en otros procesos de interés comercial. El equipo a construir reducirá la humedad de las escamas hasta el 1%.

## **ANTECEDENTES**

Como todos saben, el uso de las botellas de PET en el mundo ha venido creciendo inmensamente en los últimos 30 años dada su utilidad a nivel mundial.

En el mundo se emplean 19 millones de toneladas de resina PET virgen, de las cuales solo es reciclado el 25%.

El problema radica en que, según la ONU, cuatro de cada cinco botellas de PET utilizadas van directamente a los basureros. Esto significa que solamente el 20% del PET utilizado se recicla y esto es verdadero para países con alta conciencia ecológica como Alemania donde se recicla el 19%.

El Ecuador consume en botellas y recipientes PET alrededor de 4.000 toneladas mensuales, es decir, 50.000 toneladas al año. En 2011 el reciclaje fue del 39% y gracias a la vigencia de una nueva Ley de Fomento Ambiental éste porcentaje ha ido incrementando.

Respecto al tema ecológico, un estudio realizado por la consultora Soluciones Ambientales Totales indica que, en el ámbito nacional, se logró una disminución de aproximadamente 112 mil toneladas de CO<sub>2</sub>, equivalentes al 50% de las emisiones generadas al ambiente por las botellas plásticas depositadas en los botaderos.

En el Ecuador ya existen empresas en donde se procesan plásticos a nivel industrial y se ha encontrado que en la Escuela Superior Politécnica del Litoral, a la Escuela Politécnica Nacional, a la Universidad Central del Ecuador y en la Escuela Politécnica del Ejército ya existen equipos con similar funcionamiento al equipo diseñado para nuestro trabajo de graduación.

“El PET fue descubierto 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 usarlo como envase de alimentos. Pero la aplicación que le significó 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.<sup>(11)</sup>

Efectivamente, los constructores han diseñado 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.

El secado de distintos materiales, es una operación compleja que involucra transferencia simultánea de masa y calor. Esta operación es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones.

Teniendo en cuenta los tres factores más importantes en el diseño de un secador son: capacidad para cumplir con las especificaciones del producto final, capacidad para manejar materiales y la seguridad de equipos y de personal.

El secador rotatorio constituye una de las formas más ampliamente utilizadas para el secado, de una amplia gama de materiales, a nivel industrial, en forma rápida y con bajo costo unitario cuando se trata de grandes cantidades; forman un grupo muy importante de secadores, son adecuados para manejar materiales granulares de flujo libre que pueden arrojarse sin temor de romperse, además se adecuan bastante bien para materiales que presenten restricción en la temperatura de secado.

Por motivo del gran consumo de plástico que hay en la actualidad y sabiendo que este no se degrada fácilmente y por esta razón se convierte en un producto altamente

contaminante, más aún si se tiene en cuenta que los plásticos al quemarse producen gases altamente tóxicos; se requiere poder reutilizar éste material aprovechándolo en lugar de desecharlo. El 90% de los plásticos es reciclable y podemos encontrarlo en numerosas formas y presentaciones.

En la ciudad de Riobamba, en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Escuela de Ingeniería Química existen equipos que ayudan a conservar el ambiente mediante el proceso que se le da al material reciclado, entre estos tenemos una trituradora y una lavadora ubicadas en el Laboratorio de Operaciones Unitarias.



## JUSTIFICACIÓN

En la actualidad las Industrias de Proceso Químico enfrentan cada vez mayores exigencias, principalmente en el reciclaje de plástico, ahorro de energía, conservación de recursos valiosos, mejoramiento en la productividad y desempeño ambiental. En tiempos en que la competencia puede encontrarse al otro lado del mundo, los laboratorios de operaciones unitarias se están inclinando hacia tecnologías de procesamiento avanzado y automatización para estar a la vanguardia y permanencia de ellos.

El secado es una de las Operaciones Unitarias más relevantes en la industria química que conlleva una alta utilización de recursos energéticos. Por este motivo esta operación es de continuo interés en esta investigación, tanto en el empleo de métodos de secado con una mayor eficacia, como en sistemas que supongan una reducción en el consumo energético.

El propósito de construir un secador rotatorio para el secado del escamas de PET previamente procesado es cuidar el ambiente ya que el porcentaje a nivel nacional de botellas de plástico generadas es muy alto y el trabajo como ingenieros es tratar de reutilizar, darle otro uso a objetos que contaminan el ambiente, también con la construcción de este secador rotatorio se podrá adquirir conocimientos más extensos y concisos acerca de los diferentes cálculos y las variables que se dan en el diseño del equipo. De esta manera se realizará la continuación de toda una línea de producción.

Dado el caso de que en la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH no existe un equipo de esta magnitud, abre camino para que las venideras promociones de estudiantes de esta prestigiosa institución puedan conocer más a fondo el proceso de reciclado y secado de PET, y los mismos puedan familiarizarse con estos equipos para que en un futuro cuando ya sean profesionales puedan desenvolverse en cualquier campo de trabajo ya que estos equipos son muy comunes tanto en fábricas, empresas, etc.

## **OBJETIVOS**

### **GENERAL**

- Diseñar y construir un secador rotatorio para la obtención de gránulos de Polietileno de Tereftalato PET secos.

### **ESPECÍFICOS**

- Determinar las variables del proceso presentes en el diseño del equipo propuesto.
- Establecer el tiempo poscrítico tanto en el método gráfico como en el método analítico comprobando su aproximación.
- Construir un secador rotatorio con las especificaciones provistas.
- Evaluar y controlar el buen funcionamiento del equipo.

# CAPÍTULO I

# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. PLÁSTICOS**

El plástico es un material sólido sintético o semi-sintético que dispone de una extensa variedad de presentaciones, muy utilizado en la elaboración de productos a nivel industrial. Aunque los objetos plásticos no gozaban de buena reputación en la antigüedad, con el pasar del tiempo empezaron a ser indispensables en la vida cotidiana, siendo ahora uno de los materiales más utilizados, existiendo más de 2000 tipos.

El plástico puede clasificarse por su estructura química, según la columna del polímero y sus cadenas. Algunos grupos importantes son los acrílicos, los poliésteres, las siliconas, los poliuretanos, etc. Pueden clasificarse también según su calidad para la fabricación o diseño del producto. Teniendo algunos como los termoplásticos, los termoestables, los elastómeros, los conductores de electricidad, entre otros. Además, cada uno de éstos se puede diferenciar por su densidad, tracción, resistencia a productos químicos, etc.




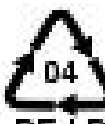
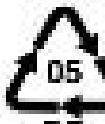


Los plásticos se caracterizan por ser fáciles de manipular, versátiles, impermeables al agua y de relativo bajo costo. Debido a ello, han desplazado a otros muchos materiales como madera, piedra, hueso, cuero, papel, metal, vidrio y cerámica. No obstante, aunque pueden ser fabricados para conducir la electricidad, no pueden reemplazar al cobre o al aluminio en ese campo.

### **1.1.1. CLASIFICACIÓN**

“Los envases de plástico exponen los diferentes códigos o números establecidos para la identificación de dicho material. Estos códigos se encuentran en el fondo de los envases con el símbolo de reciclaje y su respectivo número que establece el tipo de plástico al que pertenece.”<sup>(12)</sup>

CUADRO 1.1.1-1

CLASIFICACIÓN DE LOS PLÁSTICOS

Códigos	Nombre	Abreviatura	Descripción
	tereftalato de polietileno	PET	Se utiliza mayormente en la fabricación de bebidas suaves y refrescos
	polietileno de alta densidad	HDPE	Una gran cantidad de productos son elaborados de este tipo de plástico. Es el más común en los productos del consumidor: botellas para la leche, agua, detergentes, suavizadores de ropa y blanqueadores
	cloruro de polivinilo	PVC	Se utiliza para fabricar envases aceites cosméticos, enjuagadores bucales, mangueras de jardín, cortinas de baño, tarjetas de crédito
	polietileno de baja densidad	LDPE	Cosméticos y ciertos productos de aseo personal. Bolsas plásticas para emparedados y bolsas transparentes de lavanderías
	Polipropileno	PP	En las tapas plásticas de los envases, en la fabricación de sorbetos y alfombras
	Poliestireno	PS	Es utilizado en la producción de espuma plástica. · Vasos o tazas de bebidas calientes.
	Plásticos mezclados	-	Incluye una gran variedad de productos como plásticos mixtos

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M.Lab. Operaciones Unitarias, 2013

## 1.2. PLÁSTICO PET



FUENTE: PLÁSTICO PET, <http://segundaopor.wordpress.com/2012/06/20/uniformes-ecologicos-nike-para-la-eurocopa-2012/>

FIG. 1.2-1 PLÁSTICO PET

El PET es un tipo de materia prima plástica que se deriva del petróleo, y su fórmula corresponde a la de un poliéster aromático. Su denominación técnica es PolietilénTereftalato o más conocido como Politereftalato de etileno. El PET comenzó a ser utilizado principalmente como materia prima en fibras para la industria textil y la producción de films.

Es el polímero para el cual los productores de máquinas internacionales han dedicado el máximo empeño técnico y comercial. Evidentemente, los constructores han diseñado con grandes inversiones, equipos y líneas completas perfectamente adecuadas a los parámetros de transformación del PET, cuya disponibilidad accesible a todos los embotelladores, conjuntamente a la apropiada comercialización de la materia prima, ha permitido la expansión de su uso en todo el mundo.

### 1.2.1. HISTORIA

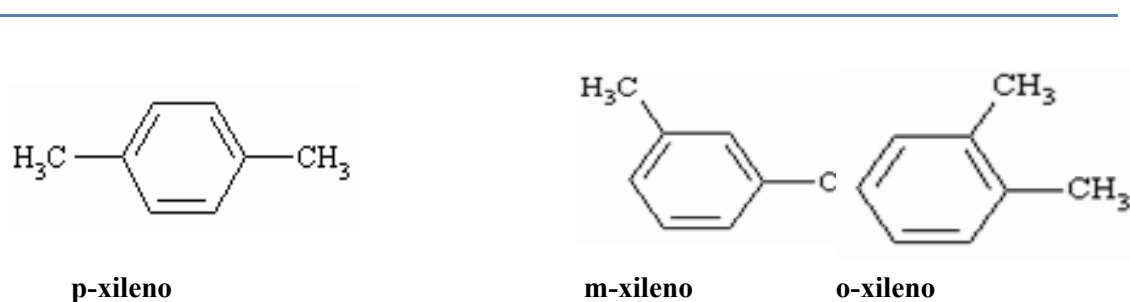
“Este material fue descubierto por los científicos británicos Whinfield y Dickson, en el año 1941, los mismos que lo patentaron como polímero para la fabricación de fibras. Recién a inicios de 1946 se lo empezó a utilizar industrialmente como fibra y desde ahí su uso ha proseguido hasta el presente. En 1952 se lo comenzó a emplear en forma de un film para el embasamiento de distintos alimentos. Pero la aplicación que le significó su principal mercado fue en envases que fueron muy rígidos, a partir de 1976; pudo abrirse camino gracias a su particular aptitud principalmente para el embotellado de bebidas carbonatadas.”<sup>(11)</sup>

## 1.2.2. PRODUCCIÓN DEL PET

El proceso para casi todo plástico producido en la actualidad es por medio de plantas petroquímicas, la mayoría de polímeros son el resultado del producto de refinación y reformación del petróleo. Los productos petroquímicos son el 2,7% en volumen de cada barril de petróleo crudo.

El dimetilbenceno, conocido comúnmente como xileno, es un importante químico industrial. Ellos son utilizados en la manufactura de tintas, la producción de ácido benzoico y entre otros el ácido tereftalático puro (PTA). Se trata de líquidos incoloros e inflamables. Los xilenos se encuentran en los gases de coque, en los gases obtenidos en la destilación seca de la madera (de allí su nombre: xilon significa madera en griego) y en algunos petróleos. Este es usado en la reacción de polimerización, produciendo una larga familia de poliésteres. El polietilentereftalato (PET) es uno de ellos, éste comienza con los isómeros (variaciones de la molécula de un compuesto) del xileno. El primer paso es recuperar el para-xileno utilizado para la producción de polímeros.

Los tres isómeros del xileno, orto, meta y para-xileno que se puede ver en la REACCIÓN 1.2.2. - 1, se separan a través de los puntos de ebullición que se encuentran en la TABLA 1.2.2. -1.



---

FUENTE: ISÓMEROS DEL XILENO, <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>

### REACCIÓN 1.2.2-1 ISÓMEROS DEL XILENO

**TABLA 1.2.2-1**

**CARACTERISTICAS DE LOS TIPOS DE XILENOS**

<b>XILENOS</b>	<b>ORTO</b>	<b>META</b>	<b>PARA</b>
<b>Punto de ebullición</b>	144°C	139,3°C	137-138°C
<b>Punto de solidificación</b>	-25°C	-47,4°C	13-14°C

FUENTE: TIPOS DE XILENOS, <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>

**1.2.2.1. POLIMERIZACIÓN**

El para-xileno recuperado del petróleo crudo y producido a través de la conversión de reacciones es solo uno de los materiales para la síntesis del PET. El otro compuesto necesario es el etileno, el cual es recuperado de la refinación del petróleo crudo. El etileno es tratado con oxígeno en presencia de plata como catalizador para producir óxido de etileno, el cual, reacciona con el agua en presencia de un ácido para producir etilenglicol, uno de los monómeros necesarios para la producción de PET. La reacción se puede observar a continuación.



FUENTE: FORMACION DE ETILENGLICOL A PARTIR DE ETILENO,  
<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>

**REACCIÓN 1.2.2.1-1 FORMACIÓN DE ETILENGLICOL A PARTIR DE ETILENO**

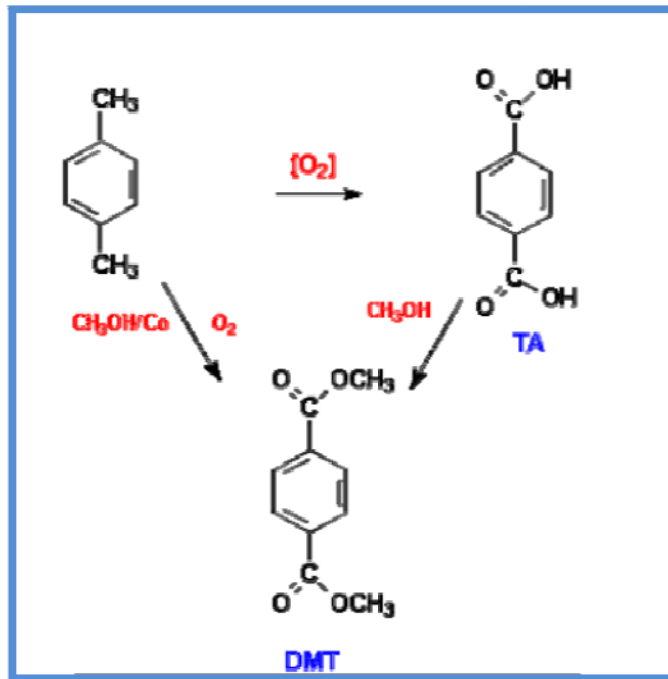
**1.2.2.2. PROCESO DE ESTERIFICACIÓN**

La esterificación es el proceso por el cual se sintetiza un éster, que es un compuesto derivado de la reacción química entre un oxácido y un alcohol.

El p-xileno es oxidado para producir el ácido tereftálico (TA) que es posteriormente esterificado a tereftalato de dimetilo (DMT). Esto puede lograrse mediante una



secuencia de dos pasos en donde la oxidación es llevada a cabo por un catalizador de cobalto en presencia de metanol. Ambas reacciones se muestran a continuación



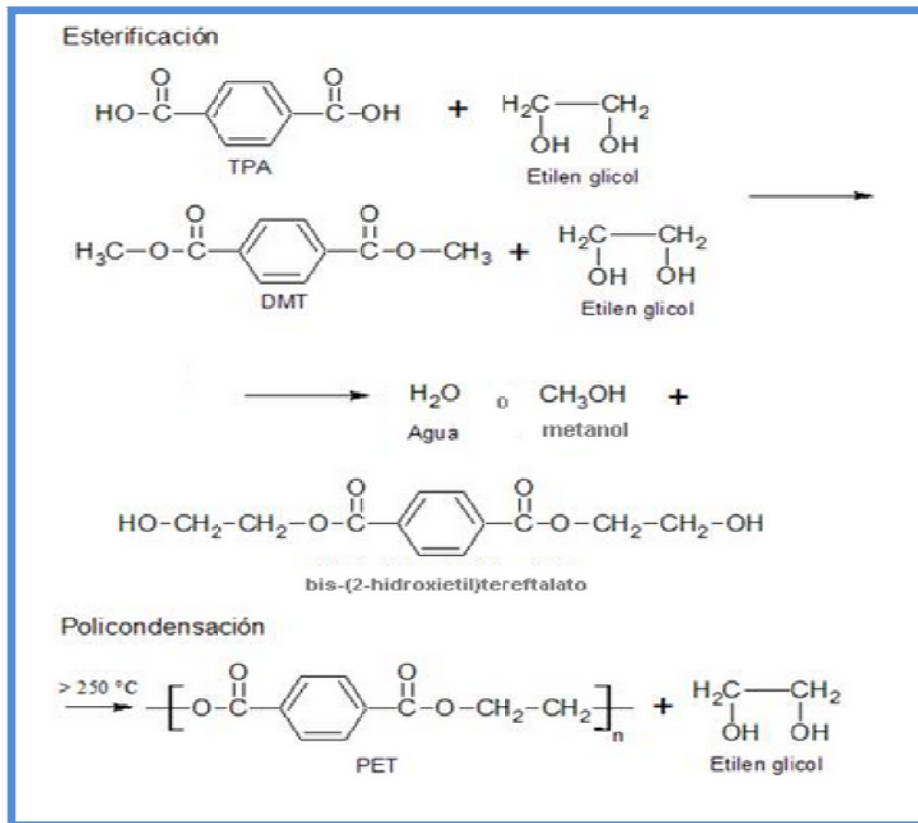
FUENTE:ESTERIFICACIÓN, <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>

#### REACCIÓN 1.2.2.2-1 PROCESO DE ESTERIFICACIÓN

Industrialmente, se puede partir de dos productos intermedios distintos:

- TPA ácido tereftálico
- DMT dimetiltereftalato

Haciendo reaccionar por esterificación TPA o DMT con glicol etilénico se obtiene el monómero bis-(2-hidroxiethyl) tereftalato, el cual en una fase sucesiva, mediante policondensación, se polimeriza en PET como se puede observar en la REACCIÓN 1.2.2.2.-2



FUENTE: ESTERIFICACIÓN Y POLICONDENSACIÓN DEL PET,  
<http://www.textoscientificos.com/polimeros/pet/produccion-pet>

### REACCIÓN 1.2.2.2-2 ESTERIFICACIÓN Y POLICONDENSACIÓN DEL PET

En la reacción de esterificación, se elimina agua en el proceso del TPA y metanol en el proceso del DMT. La reacción de policondensación se facilita mediante catalizadores y elevadas temperaturas (arriba de 270°C). La eliminación del glicol etilénico es favorecida por el vacío que se aplica en el reactor; el glicol recuperado se destila y vuelve al proceso de fabricación. Cuando la masa del polímero ha alcanzado la viscosidad deseada, registrada en un reómetro, se romperá el vacío, introduciendo nitrógeno al reactor. En este punto se detiene la reacción y la presencia del nitrógeno evita fenómenos de oxidación. La masa fundida, por efecto de una suave presión ejercida por el nitrógeno, es obligada a pasar a través de una matriz, formando espaguetis que, cayendo en una batea con agua se enfrían y consolidan. Los hilos que pasan por una cortadora (peletizadora), se reducen a gránulos (pellets), los cuales, tamizados y desempolvados se envían al almacenamiento para el posterior conformado en productos útiles.

El gránulo así obtenido es brillante y transparente porque es amorfo, tiene baja viscosidad, o sea un bajo peso molecular, I.V. = 0,55 a 0,65; para volverlo apto para la producción de botellas serán necesarios otros dos pasos (Cristalización y polimerización en estado sólido).

### **1.2.2.3. CRISTALIZACIÓN**

Con este término se describe el cambio de estructura de los polímeros semicristalinos y que consiste en el fenómeno físico con el cual las macromoléculas pasan de una estructura en la cual su disposición espacial es desordenada (estructura amorfa, transparente a la luz) a una estructura uniforme y ordenada (estructura cristalina, opaca a la luz) que le confiere a la resina una coloración blanca lechosa.

### **1.2.2.4. POLIMERIZACIÓN EN ESTADO SÓLIDO O POST**

#### **POLIMERIZACIÓN**

El gránulo cristalizado se carga en un reactor cilíndrico en cuyo interior, durante tiempos muy largos, es sometido a un flujo de gas inerte (nitrógeno) a temperatura elevada (sobre los 200°C). Este tratamiento ceba una reacción de polimerización que hace aumentar posteriormente el peso molecular de la resina hasta los valores correspondientes de I.V. (0,72 – 0,86) idóneos para la fabricación de la botella. El aumento de la viscosidad intrínseca es directamente proporcional al aumento del peso molecular.

### **1.2.3. 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.
- 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

**CUADRO 1.2.3-1**  
**DATOS TÉCNICOS DEL PET**

Nº	PROPIEDAD	UNIDAD	VALOR
1	Densidad	g/cm <sup>3</sup>	1,34 – 1,39
2	Resistencia a la tensión	MPa	59 – 72
3	Resistencia a la compresión	MPa	76 – 128
4	Resistencia al impacto, Izod	J/mm	0,01 – 0,04
5	Dureza	--	Rockwell M94 – M101
6	Dilatación térmica	10 <sup>-4</sup> / °C	15,2 – 24
7	Resistencia al calor	°C	80 – 120
8	Resistencia dieléctrica	V/mm	13780 – 15750
9	Constante dieléctrica (60 Hz)	--	3,65
10	Absorción de agua (24 h)	%	0,02
11	Velocidad de combustión	mm/min	Consumo lento
12	Efecto luz solar	--	Se decolora ligeramente
13	Calidad de mecanizado	--	Excelente
14	Calidad óptica	--	Transparente a opaco
15	Temperatura de fusión	°C	244 – 254
16	Capacidad Calorífica	Kcal/Kg.°C	0,25

FUENTE: DATOS TECNICOS DEL PET, [tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html](http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html)

#### 1.2.4. CARACTERÍSTICAS DEL PET

- **Biorientación:** Permite lograr propiedades mecánicas y de barrera con optimización de espesores.
- **Cristalización:** Permite conseguir el incremento del peso molecular y la densidad.
- **Esterilización:** El PET resiste esterilización química con óxidos de etileno y radiación gamma.
- **Resistencia química:** Muestra buena resistencia en general a: grasas y aceites presentes en alimentos, soluciones diluidas de ácidos minerales, álcalis, sales, jabones, hidrocarburos alifáticos y alcoholes. Posee poca resistencia a: solventes halogenados, aromáticos y cetonas de bajo peso molecular.

En el CUADRO 1.2.4.-1 podemos conocer la resistencia del PET a distintas sustancias químicas

CUADRO 1.2.4-1

#### RESISTENCIA DEL PET A DISTINTAS SUSTANCIAS QUÍMICAS

Alcoholes	
Metanol	Muy resistente
Etanol	Muy resistente
Isopropanol	Resistente
Ciclohexanol	Muy resistente
Glicol	Muy resistente
Glicerina	Muy resistente
Alcohol bencílico	Resistente
Aldehídos	
Acetaldehído	Muy resistente
Formaldehído	Muy resistente
Compuestos clorados	
Tetracloruro de carbono	Muy resistente
Cloroformo	Resistente
Difenil clorado	Muy resistente
Tricloro etileno	Muy resistente
Disolventes	

Éter	Muy resistente
Acetona	No resistente
Nitrobenceno	No resistente
Fenol	No resistente
<b>Ácidos</b>	
Acido fórmico	Muy resistente
Ácido acético	Muy resistente
Ácido clorhídrico 10%	Resistente
Ácido clorhídrico 30%	Resistente
Ácido fluorhídrico 10 y 35%	Muy resistente
Ácido nítrico 10%	Muy resistente
Ácido nítrico 65%	No resistente
Ácido fosfórico 30 y 85%	Muy resistente
Ácido sulfúrico 20%	Resistente
Ácido sulfúrico 80%	No resistente
Anhídrido sulfuroso seco	Muy resistente
<b>Álcalis (soluciones acuosas)</b>	
Hidróxido amónico	No resistente
Hidróxido cálcico	Muy resistente
Hidróxido sódico	No resistente
<b>Sales (soluciones)</b>	
Dicromato	Muy resistente
Carbonatos alcalinos	Muy resistente
Cianuros	Muy resistente
Fluoruros	Muy resistente

FUENTE: CARACTERÍSTICAS DEL PET, <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/tabla-resistencia-quimica-del-pet.html>

### 1.2.5. VENTAJAS DEL PET

- **Propiedades únicas:** Claridad, brillo, transparencia, barrera a gases y 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.

#### 1.2.6. DESVENTAJAS DEL PET

- **Secado:** Todo poliéster tiene que ser secado a fin de impedir pérdida de propiedades. La humedad del polímero al ingresar al proceso debe ser de máximo 0.005%. Para ello se utiliza el secado por circulación de aire caliente previamente secado en deshumificadores antes de ser procesado en inyectoras o extrusoras.
- **Costo de equipamiento:** Los equipos de inyección por soplado con biorientación presumen una buena amortización en función de una gran producción. En extrusión por soplado pueden utilizarse equipos convencionales de PVC, teniendo más versatilidad en la producción de distintos tamaños y formas.
- **Temperatura:** Los poliésteres no conservan 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.

#### 1.2.7. APLICACIONES

- ✓ **Envase y empaque:** Por su impermeabilidad a los gases, el PET abarca casi el 100% del mercado de botellas retornables y no retornables para bebidas carbonatadas. Las firmas de maquinaria han aportado en gran medida a impulsar la evolución de forma rápida de los envases, por lo que hoy se encuentran disponibles envases para llenado a temperaturas normales y para llenado en caliente; también se desarrollan envases muy pequeños desde 10 mililitros hasta garrafones de 19 litros.

Entre los variados usos dados al PET, debido a su durabilidad, estabilidad dimensional e insensibilidad a la humedad excelentes, sobresale el destino que

se le ha dado en la elaboración de envases de bebidas carbonatadas y de empaques de alimentos pues, no deteriora ni causa efectos de toxicidad a estos productos. La intervención del PET dentro de este mercado es en Bebidas Carbonatadas, Agua, Purificada, Aceite, Conservas, Cosméticos, Detergentes, Productos Químicos y Productos Farmacéuticos.

- ✓ **Electro-electrónico:** Este segmento comprende diversos tipos de películas y aplicaciones desde las películas ultradelgadas para capacitores de un micrómetro o menos hasta de 0,5 milímetros, utilizadas para aislamiento de motores. Debido a su alta resistencia dieléctrica y mecánica, el PET es utilizado como aislante de ranuras y fases en motores, condensadores, bobinas y transformadores. También ha servido para ser utilizado en la fabricación de conectores eléctricos de alta densidad, bloques terminales, circuitos integrados y partes electromecánicas, reemplazando de este modo a los materiales termoestables.
  
- ✓ **Fibras (telas tejidas, cordeles, etc.):** En la industria textil, la fibra de poliéster se utiliza para obtener gran variedad de telas y prendas de vestir. La ropa hecha con esta fibra es resistente a arrugarse. Estas fibras son conocidas como Dacron y Fortrel y son ampliamente usadas en bienes de consumo como ropa y telas, también se realiza, con el PET, telas no tejidas. Debido a su resistencia, el PET se emplea en telas tejidas y cuerdas, partes para cinturones, hilos de costura y refuerzo de llantas. Su baja elongación y alta tenacidad se aprovechan en refuerzos para mangueras.
  
- ✓ **Aplicaciones en la industria mecánica:** El PET se utiliza en la fabricación de repuestos que necesitan superficies duras, planas y buena estabilidad dimensional. Por ejemplo en engranajes, levas, cojinetes, pistones y en bastidores de bombas que soportan elevadas fuerzas de impacto. Los compuestos reforzados de PET (PRFV) son usados para fabricar tapas de distribuidores y componentes de pintura exterior para automóviles.



✓ **Aplicaciones comunes del PET**

**CUADRO 1.2.7-1**

**APLICACIONES COMUNES DEL PET**

<b>¿CÓMO SE USA EL PET?</b>	
<b>FIBRA</b>	ALFOMBRA
	ROPA
	TELAS PARA DECORACIÓN
<b>PACKAGING</b>	BEBIDAS (GASEOSAS, AGUA MINERAL, JUGOS, ETC)
	COMIDA
	PERFUMERIA
	PRODUCTOS PARA EL HOGAR
	LICORES
	PRODUCTOS FARMACEUTICOS
<b>FILM</b>	RADIOGRAFÍAS, TAPES DE VIDEO Y AUDIO

FUENTE: APLICACIONES DEL PET, [tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html](http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html)

### 1.3. RECICLAJE

“El reciclaje consiste en aprovechar los materiales u objetos que la sociedad de consumo ha descartado. Por considerarlos inútiles, es decir, darle un nuevo valor a lo descartado a fin de que pueda ser reutilizado en la fabricación o preparación de nuevos productos, que no tienen por qué parecerse ni en forma ni aplicación al producto original.”<sup>(15)</sup>

#### 1.3.1. RECICLAJE EN EL ECUADOR

“En Ecuador el reciclaje comenzó en el año 1970, fecha en la que inició su actividad productiva una fábrica de papel que utilizó material reciclado como materia prima, lo mismo ocurrió con las fábricas de papel, plásticos, vidrio, metalúrgicas y siderúrgica. En el Ecuador se reciclan aproximadamente 678 000 toneladas año, de las cuales una parte se destina al consumo interno y el excedente se exporta a EE.UU., Asia, entre otros. Esta actividad beneficia económicamente a las personas más pobres del país, aproximadamente a 15 000 recicladores independientes que recolectan en las zonas urbanas y botaderos del Ecuador.”<sup>(16)</sup>

**CUADRO 1.3.1-1**  
**RECICLAJE EN EL ECUADOR**

CIUDAD	PORCENTAJE DE RECICLAJE DE PLÁSTICO PET (%)
<b>Cuenca</b>	60
<b>Quito</b>	48
<b>Loja</b>	45
<b>Riobamba</b>	22

FUENTE: RECICLAJE EN EL ECUADOR, <http://www.teleamazonas.com/index.php/noticias/locales/25139-cuenca-lidera-el-reciclaje-de-basura-en-ecuador>

“En el país como una medida ambiental sobre el tratamiento adecuado de las botellas de plástico desechables, el ‘impuesto verde’ busca que los consumidores recuperen \$0,02 por cada botella a través del reciclaje. Sin embargo, poco se conoce sobre dónde llevar dichos plásticos para su tratamiento. En el país se recicla por año cerca de 80000 toneladas de materiales elaborados con polietileno y PET (usados para envases de bebidas).

En una entrevista realizada por la agencia Andes, la ministra del Ambiente Marcela Aguiñaga aseguró que en Ecuador se fabrican 1400 millones de botellas y apenas el 39% de esa cifra se recicla.

Hoy en Ecuador existen unas 2000 microempresas que se dedican a la recolección y tratamiento de materiales reciclables, pese a ello no hay campañas de información para los ciudadanos sobre dónde acudir.

Según datos de Reciplástico, empresa que se dedica al reciclaje a nivel nacional, allí se reciclan 670 000 toneladas de material, entre papel, cartón, metal, plástico y vidrio. El 53% corresponde a metales ferrosos y apenas el 12,2% para resinas plásticas. Para los empresarios que se dedican a esta tarea, los precios de la materia virgen frente al reciclado no convencen. Una tonelada de PET virgen se cotiza entre \$1600 y 2000 en Ecuador, mientras que ese material reciclado se vende hasta en \$1200 y 1300 por tonelada. Los expertos aseguran que las empresas poco usan PET reciclado.

En otros países hay conciencia y las leyes de los gobiernos obligan a que las empresas usen plásticos peletizados (lavados, molidos y seleccionados) porque ayuda a preservar el medio ambiente. Aquí, la exportación es la que salva al sector de reciclaje, porque el industrial no está obligado a utilizar en su producción materia reciclada.

### **1.3.2. DATOS RELEVANTES**

Solo en PET, el país importó 47 000 toneladas en 2010. De esas, el 70% se utilizó para la elaboración de botellas para el consumo de agua y bebidas no alcohólicas.

En el 2010 la industria importó 302100 toneladas de resinas plásticas.

En los primeros seis meses del 2011 se compró al exterior 85 887 toneladas de polietileno y PET.”<sup>(16)</sup>

### **1.3.3. PLAN DE MAJEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS**

Es un conjunto de procedimientos y políticas que conforman el sistema de manejo de los residuos sólidos. La meta es realizar una gestión que sea ambiental y económicamente adecuada.

#### **1.3.3.1. SISTEMA DE MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS**

El sistema de manejo de los residuos sólidos se compone de cuatro subsistemas:

- ✓ **Generación:** Cualquier persona u organización cuya acción cause la transformación de un material en un residuo. Una organización usualmente se vuelve generadora cuando su proceso genera un residuo, o cuando lo derrama o cuando no utiliza más un material.
- ✓ **Transporte:** Es aquel que lleva el residuo. El transportista puede transformarse en generador si el vehículo que transporta derrama su carga, o si cruza los límites internacionales (en el caso de residuos peligrosos), o si acumula lodos u otros residuos del material transportado.
- ✓ **Tratamiento y disposición:** El tratamiento incluye la selección y aplicación de tecnologías apropiadas para el control y tratamiento de los residuos peligrosos o de sus constituyentes. Respecto a la disposición la alternativa comúnmente más utilizada es el relleno sanitario.
- ✓ **Control y supervisión:** Este sub sistema se relaciona fundamentalmente con el control efectivo de los otros tres subsistemas.

### **1.3.4. GENERACIÓN DE RESIDUOS**

#### **1.3.4.1. PRODUCCIÓN PERCÁPITA**

La producción de residuos sólidos es un variable que depende básicamente del tamaño de la población y sus características socioeconómicas.

Una variable necesaria para dimensionar el sitio de disposición final es la llamada producción per cápita (PPC). Este parámetro asocia el tamaño de la población, la cantidad de residuos y el tiempo, siendo la unidad de expresión el Kilogramo por habitante por día. (Kg/hab/día).

#### **1.3.4.2. ESTIMACIÓN TEÓRICA DE LA PRODUCCIÓN PER CÁPITA**

La PPC es un parámetro que evoluciona en la medida que los elementos que la definen varían. En términos gruesos, la PPC varía de una población a otra, de acuerdo principalmente a su grado de urbanización, su densidad poblacional y su nivel de consumo o nivel socioeconómico. Otros elementos, como los periodos estacionales y las actividades predominantes también afectan la PPC.

Es posible efectuar una estimación teórica de la PPC en función de las estadísticas de recolección y utilizando la siguiente expresión:

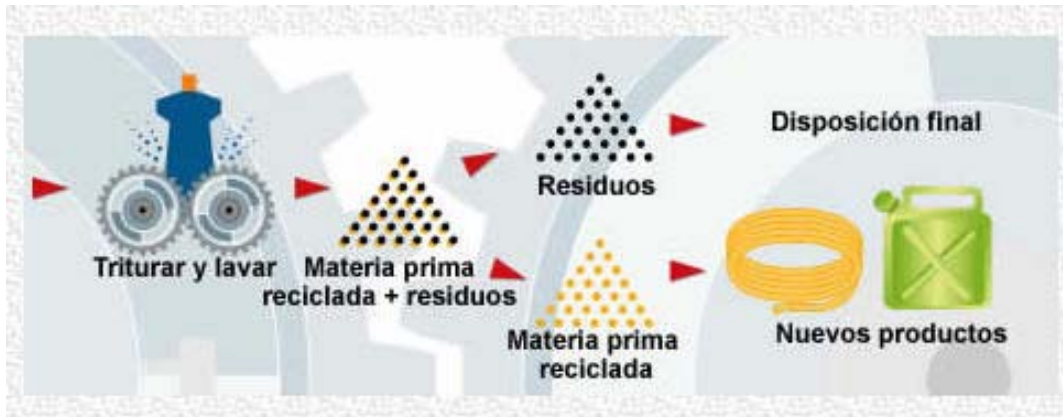
$$PPC = \frac{Kg \text{ recolectados}}{Número \text{ de habitantes}} \quad \text{Ec. 1.3.4.2-1}$$

#### **1.3.5. TIPOS DE RECICLADO**

Existen tres maneras de aprovechar los envases de PET una vez que terminó su vida útil: someterlos a un reciclado mecánico, a un reciclado químico, o a un reciclado energético empleándolos como fuente de energía.

##### **1.3.5.1. RECICLADO MECÁNICO**

“El reciclado mecánico es un proceso físico mediante el cual el plástico post-consumo o el industrial (scrap) es recuperado, permitiendo su posterior utilización.



FUENTE: RECICLADO MECÁNICO/ [http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/reciclado\\_auto/tiposdereciclado.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/reciclado_auto/tiposdereciclado.htm)

**FIG. 1.3.5.1-1 RECICLADO MECÁNICO**

Los plásticos que son reciclados mecánicamente provienen de dos grandes fuentes:

- Los residuos plásticos proveniente de los procesos de fabricación, es decir, los residuos que quedan al pie de la máquina, tanto en la industria petroquímica como en la transformadora. A esta clase de residuos se la denomina scrap. El scrap es más fácil de reciclar porque está limpio y es homogéneo en su composición, ya que no está mezclado con otros tipos de plásticos. Algunos procesos de transformación (como el termoformado) generan el 30-50% de scrap, que normalmente se recicla.
- Los residuos plásticos proveniente de la masa de Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

### **PROCESO DE RECICLADO MECÁNICO**

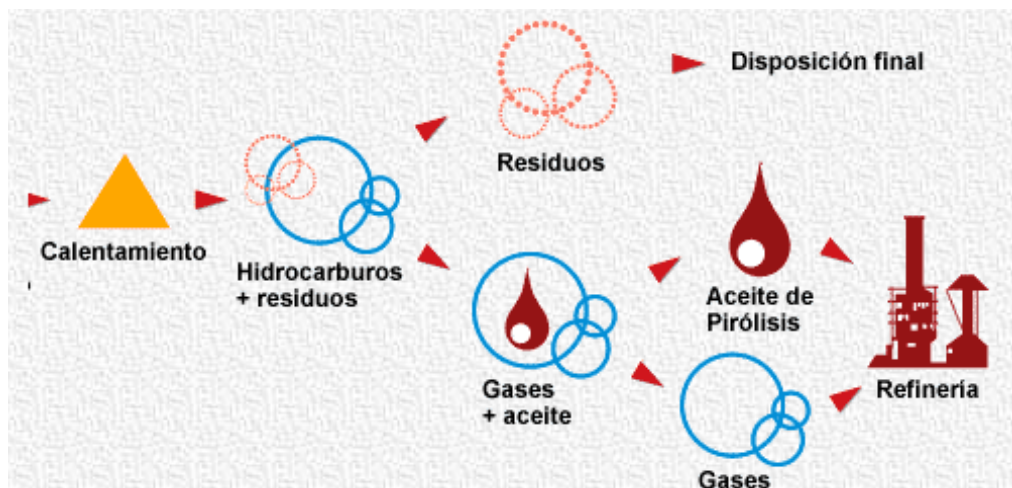
- **Trituración:** El plástico es fragmentado en pequeñas partes con un molino especial
- **Remoción de contaminantes:** En esta etapa son removidos los diferentes tipos de contaminantes por ejemplo etiquetas, papel y otros contaminantes.

- **Lavado:** Después de la remoción de contaminantes, el plástico pasa por una etapa de lavado para eliminar la suciedad. Es preciso que el agua de lavado reciba un tratamiento para su reutilización o emisión como afluente.
- **Secado:** En esta etapa se retira el agua que se encuentra como centrifugado, aquí el material pasa por una centrifuga la cual retira el exceso de agua.
- **Aglutinación:** Además de completar el secado, el material es compactado, reduciéndose así el volumen que será enviado a la extrusora. La fricción de los fragmentos contra la pared del equipo rotativo provoca el aumento de la temperatura, formándose así una masa plástica. El aglutinador también se utiliza para la incorporación de aditivos, tales como cargas, pigmentos y lubricantes.
- **Extrusión:** La extrusora funde y vuelve a la masa plástica homogénea. A la salida de la extrusora se encuentra el cabezal, del cual sale un “espagueti” continuo que es enfriado con agua. Enseguida el “espagueti” es picado en un granulador transformando en pellets (granos de plásticos).

### 1.3.5.2. RECICLADO QUÍMICO

Se trata de diferentes procesos mediante los cuales las moléculas de los polímeros son craqueadas (rotas) dando origen nuevamente a materia prima básica que puede ser utilizada para fabricar nuevos plásticos.

El reciclado químico comenzó a ser desarrollado por la industria petroquímica con el objetivo de lograr las metas propuestas para la optimización de recursos y recuperación de residuos. Algunos métodos de reciclado químico ofrecen la ventaja de no tener que separar tipos de resina plástica, es decir, que pueden tomar residuos plásticos mixtos reduciendo de esta manera los costos de recolección y clasificación. Dando origen a productos finales de muy buena calidad.



FUENTE: RECICLADO QUÍMICO [http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/reciclado\\_auto/tiposdereciclado.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/reciclado_auto/tiposdereciclado.htm)

FIG. 1.3.5.2-1 RECICLADO QUÍMICO

Principales procesos existentes:

- **Pirólisis:** Es el craqueo de las moléculas por calentamiento en el vacío. Este proceso genera hidrocarburos líquidos o sólidos que pueden ser luego procesados en refinerías.
- **Hidrogenación:** En este caso los plásticos son tratados con hidrógeno y calor. Las cadenas poliméricas son rotas y convertidas en un petróleo sintético que puede ser utilizado en refinerías y plantas químicas.
- **Gasificación:** Los plásticos son calentados con aire o con oxígeno. Así se obtienen los siguientes gases de síntesis: monóxido de carbono e hidrógeno, que pueden ser utilizados para la producción de metanol o amoníaco o incluso como agentes para la producción de acero en hornos de venteo.
- **Metanólisis:** Es un avanzado proceso de reciclado que consiste en la aplicación de metanol en el PET. Este poliéster (el PET), es descompuesto en sus moléculas básicas, incluido el dimetil tereftalato y el etilenglicol, los cuales pueden ser luego repolimerizados para producir resina virgen. Varios productores de polietileno tereftalato están intentando de desarrollar este proceso para utilizarlo en las botellas de bebidas carbonadas. Las experiencias llevadas a



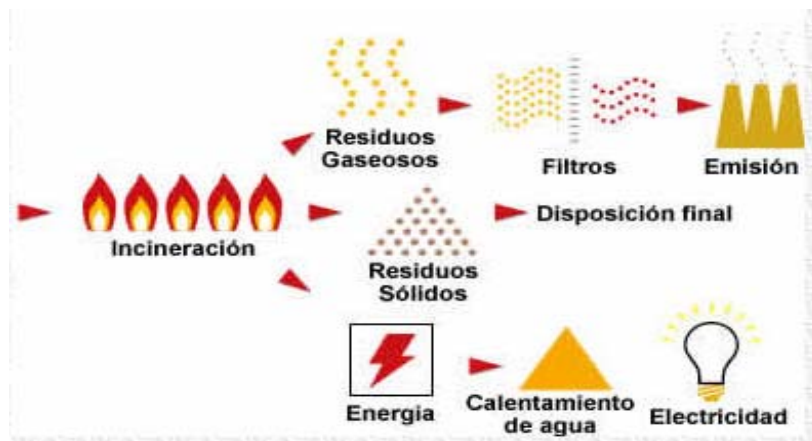
cabo por empresas como Hoechst-Celanese, DuPont e Eastman han demostrado que los monómeros resultantes del reciclado químico son lo suficientemente puros para ser reutilizados en la fabricación de nuevas botellas de PET.

Estos procesos tienen diferentes costos y características. Algunos, como la chemolysis y la metanólisis, requieren residuos plásticos separados por tipo de resina. En cambio la pirólisis permite utilizar residuos plásticos mixtos.”<sup>(17)</sup>

### 1.3.5.3. RECICLADO ENERGÉTICO

En cuanto al uso del PET como combustible alternativo, los envases pueden emplearse para generar energía ya que este material tiene un poder calorífico de 6.3 Kcal/Kg, y puede realizar una combustión eficiente. Esto es posible ya que durante su fabricación no se emplean aditivos ni modificadores, lo cual permite que las emisiones de la combustión no sean tóxicas, obteniéndose tan sólo bióxido de carbono y vapor de agua.

En la última década se ha impuesto la opinión de que la termólisis por degradación térmica de los plásticos es la tecnología más interesante para el desarrollo de un proceso a gran escala, y en el que se traten conjuntamente plásticos de diferente naturaleza sin forzar un elevado rendimiento en la separación selectiva de las materias primas.



FUENTE: RECICLADO ENERGÉTICO/[http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/reciclado\\_auto/tiposdereciclado.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/reciclado_auto/tiposdereciclado.htm)

FIG. 1.3.5.3-1 RECICLADO ENERGÉTICO

## **1.4. SECADO**

“El desecado o secado de sólidos se refiere generalmente a la separación de un líquido de un sólido, por evaporación. Los métodos mecánicos para separar un líquido de un sólido no se consideran por lo común como una operación de desecado o secado.”<sup>(9)</sup>

“El estudio del secado se refiere a la eliminación de agua de los materiales de proceso y de otras sustancias. El término secado se usa también con referencia a la eliminación de otros líquidos orgánicos, como benceno o disolvente orgánicos, de los materiales sólidos. Muchos de los equipos y métodos de cálculo que se estudiarán para la eliminación de agua, también pueden aplicarse para la eliminación de los líquidos orgánicos. En general, el secado significa la remoción de cantidades de agua relativamente pequeñas de cierto material. La evaporación se refiere a la eliminación de cantidades de agua bastante grandes; además, ahí el agua se elimina en forma de vapor a su punto de ebullición. En el secado, el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire.

En algunos casos, el agua se puede eliminar de los materiales sólidos por medios mecánicos, utilizando prensas, centrifugas y otros métodos. Esto resulta más económico que el secado por medios térmicos para la eliminación de agua.

El contenido de humedad del producto seco final varía, ya que depende del tipo del producto. La sal seca contiene 0.5% de agua, el carbón un 4% y muchos productos alimenticios, aproximadamente 5%. El secado suele ser la etapa final de los procesos antes del empaque y permite que muchos materiales, como los jabones en polvo y los colorantes, sean más adecuados para su manejo.”<sup>(4)</sup>

### **1.4.1. SECADORES**

El secado de materiales pesados granulares, es una operación compleja que involucra transferencia simultánea de masa y calor.

Los tres factores más importantes a tener en cuenta en el diseño de un secador son:

- Capacidad para cumplir con las especificaciones del producto final

- Capacidad para manejar materiales y
- La seguridad de equipos y de personal.

Son equipos utilizados para separar un líquido de un sólido mediante la evaporación. Principalmente es utilizado para reducir o eliminar humedad. En estos equipos la fuente de calor es una corriente de gas caliente. El material para el secado puede estar estático, móvil, fluido o diluido.

- ✓ **Estático:** éste es un lecho denso de sólidos en el cual cada partícula descansa sobre otras, debido a la densidad de la masa de la fase sólida. Es decir, no existe movimiento relativo entre las partículas sólidas.
- ✓ **Móvil:** este es un tipo de lecho de sólidos ligeramente restringido en el cual las partículas están separadas apenas lo suficiente para fluir o deslizarse unas sobre otras. Por lo común el flujo es descendente por acción de la fuerza de gravedad; pero también se puede registrar un movimiento ascendente debido a la elevación mecánica o a la agitación, generadas dentro del equipo de proceso.
- ✓ **Fluidizado:** las partículas sólidas se sostienen por medio de fuerzas de arrastre provocadas por la fase gaseosa que pasa por los intersticios de las partículas, con una velocidad crítica dada.
- ✓ **Diluido:** ésta es una condición de expansión total en la cual las partículas sólidas están tan separadas entre sí que prácticamente no ejercen ninguna influencia unas sobre otras.

“Los secaderos que exponen los sólidos a un gas caliente se llaman adiabáticos o secaderos directos; aquellos en los que el calor es transmitido desde un medio externo reciben el nombre de no adiabáticos o secaderos indirectos. Los secaderos calentados por energía radiante, dieléctrica o de microondas, también son no adiabáticos.”<sup>(7)</sup>

#### 1.4.1.1. SECADORES POR CONVECCIÓN

Los secadores en donde la transferencia de calor es por convección se utilizan para secar partículas y alimentos en forma laminar. En dichos secadores el calor es suministrado por medio de aire caliente o gas, el mismo que fluye sobre la superficie

del sólido a secar. El aire, los gases inertes, el vapor sobrecalentado, o gases de combustión directa pueden utilizarse en sistemas de secado por convección.

Algunos secadores convectivos o directos son:

- **Secadores en bandejas:** resultan convenientes cuando la capacidad de producción es pequeña. Usualmente pueden secar cualquier producto, pero la mano de obra necesaria para la carga y descarga da lugar a costes de operación elevados. Este tipo de secador funciona mediante un ventilador que recircula aire calentado con vapor paralelamente sobre la superficie de las charolas, también puede usar calor eléctrico. Frecuentemente se utilizan en el secado de materiales valiosos tales como colorantes y productos farmacéuticos.
- **Secadores de túnel:** Estos suelen ser compartimientos de bandejas que operan en serie, en donde las bandejas se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes que pasan por la superficie caliente de cada bandeja. Un ventilador extrae cierta cantidad de aire a la atmósfera. “El tiempo de residencia en el secador debe ser lo suficientemente grande como para reducir al valor deseado el contenido de humedad del sólido. La operación puede ser básicamente adiabática o el gas puede calentarse con espirales de calentamiento a lo largo de su trayectoria a través del secador; en este caso, la operación puede ser a temperatura constante.  
Es posible utilizar este tipo de secadores para cualquier material que pueda secarse sobre platos: cristales, tortas de filtración, pastas, cerámicas y similares.”<sup>(10)</sup>
- **Secadores rotatorios:** consta de un pequeño cilindro que gira sobre su eje con una pequeña inclinación. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo de gas caliente mediante un flujo a contracorriente, también puede ser a través de la pared calentada del cilindro. Los sólidos granulares húmedos se alimentan por el segmento superior y se desplazan por el cilindro a medida que éste gira. Son adecuados para manejar materiales granulares de flujo libre que pueden arrojarse sin temor de romperlos.

- **Secadores por aspersión:** “un líquido se atomiza o rocía en una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se evapora de dichas gotas con rapidez, y se obtienen partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. Las partículas obtenidas son porosas y ligeras.”<sup>(4)</sup>

#### 1.4.1.2. SECADORES POR CONDUCCIÓN

Los secadores por conducción o indirectos son adecuados para sólidos de poco espesor o para productos con alto grado de humedad. El calor para evaporación se suministra a través de superficies calientes (estáticas o en movimiento).

- **Secadores de tambor:** consta de un tambor de metal calentado que gira, en cuyo interior se evapora una capa delgada de líquido o suspensión hasta secar, después el material seco se desprende continuamente de la superficie del tambor mediante un cuchillo. Para un secador de este tipo, el factor controlante es la transferencia de calor y no la difusión. Los materiales fluidos y semifluidos, como soluciones, lodos, pastas y suspensiones, pueden secarse en este tipo de secadores indirectos.
- **Secadores indirectos al vacío con anaqueles:** “es un gabinete cerrado con bandejas o anaqueles que opera al vacío. El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Se usa principalmente para materiales sensibles a la temperatura o que se oxiden fácilmente.”<sup>(4)</sup>

#### 1.4.1.3. SECADORES POR RADIACIÓN.

El secado por radiación se lleva a cabo mediante radiación electromagnética cuya longitud de onda se halla dentro del rango de espectro solar y microondas.

- **Secadores solares:** está desarrollado primordialmente por un gabinete cubierto cuya tapa consta de un material traslucido que deja pasar los rayos del sol, de este modo se utiliza la energía en forma de rayos para lograr la evaporación de la humedad del sólido. No obstante, el funcionamiento de este secador depende

de las condiciones climáticas y los tiempos de secado suelen ser largos, además de tener una capacidad de producción pequeña.

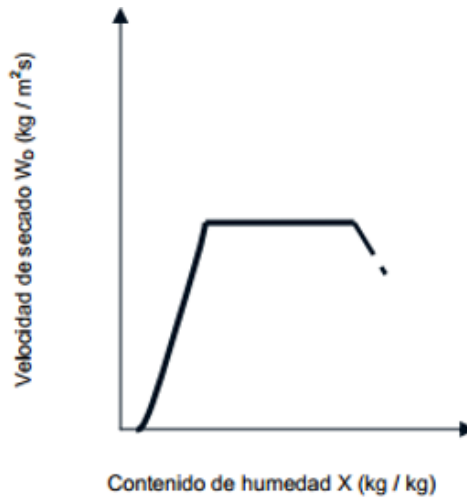
#### **1.4.2. MÉTODOS GENERALES DE SECADO**

“Los métodos y procesos de secado se clasifican de diferentes maneras; se dividen en procesos de lotes, cuando el material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica por un periodo; o continuos, si el material se añade sin interrupción al equipo de secado y se obtiene material seco con régimen continuo.

Los procesos de secado se clasifican también de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer vapor de agua:

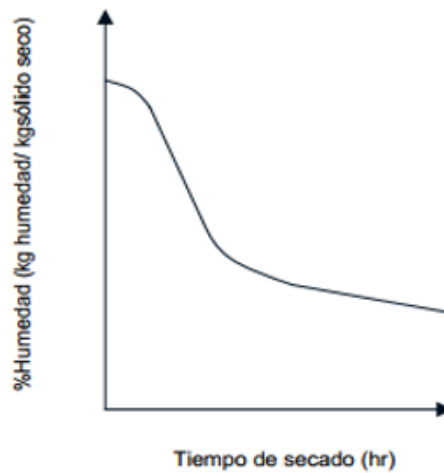
- a) En la primera categoría, el calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire.
- b) En el secado al vacío, la evaporación del agua se verifica con más rapidez a presiones bajas, y el calor se añade indirectamente por contacto con un pared metálica o por radiación (también puede usarse bajas temperaturas con vacío para ciertos materiales que se decoloran o se descomponen a temperaturas altas).
- c) En la liofilización, el agua se sublima directamente del material congelado.”<sup>(4)</sup>

En el secado el comportamiento de los sólidos es medido, como la pérdida de humedad como una función del tiempo. Existen tres etapas en el proceso de secado como se observa en la FIGURA 1.4.2.-1 y en la FIGURA 1.4.2.-2: durante la primera etapa del secado, la velocidad de secado es uniforme, la vaporización empieza cuando el contenido de humedad en el sólido llega a la superficie del mismo. Durante este periodo el paso controlante es la difusión del vapor de agua a través de la interfase que es de humedad-aire.



FUENTE: PÉRDIDA DE HUMEDAD, [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leip/ortiz\\_a\\_bs/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/ortiz_a_bs/capitulo2.pdf)

**FIG. 1.4.2-1 PÉRDIDA DE HUMEDAD**



FUENTE: CINÉTICA DE SECADO, [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leip/ortiz\\_a\\_bs/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/ortiz_a_bs/capitulo2.pdf)

**FIG. 1.4.2-2 CINÉTICA DE SECADO**

Ahora la segunda etapa es la que está formada por el periodo de secado de la superficie insaturada hasta lograr la completa evaporación del líquido contenido en la superficie del sólido. Y por último en la tercera etapa, el paso controlante es la velocidad a la que la humedad se mueve en el interior del sólido como resultado de gradientes de concentración, conforme la concentración de humedad reduzca, la velocidad del movimiento interno de humedad disminuye, provocando que la velocidad de secado aumente hasta que el contenido de humedad llegue a un punto de equilibrio con la humedad del aire de secado, es aquí donde el proceso de secado termina.

El contenido final de humedad, determina el tiempo de secado y las condiciones requeridas para el proceso de secado. Las restricciones de temperatura a la cual se lleva a cabo el proceso, resultan debido a la degradación, decoloración, manchado, inflamabilidad (provocada principalmente por polvos) y otros factores que afectan al alimento. La sensibilidad térmica fija la temperatura máxima a la cual la sustancia o alimento puede ser expuesto en el tiempo de secado, esto se debe a que por ejemplo, muchos materiales higroscópicos se pudren durante el secado.

La velocidad y uniformidad del secado, son dos factores importantes que afectan la calidad del proceso y evitan las pérdidas físicas, estructurales, químicas y nutricionales del alimento. Un proceso de secado es óptimo cuando el tiempo en el que se lleva a cabo es el mínimo, utilizando un mínimo de energía, lo cual está estrechamente relacionado con la eficiencia energética del secador empleado.

### **1.4.3. FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE SECADO**

#### **1.4.3.1. TEMPERATURA DEL AIRE**

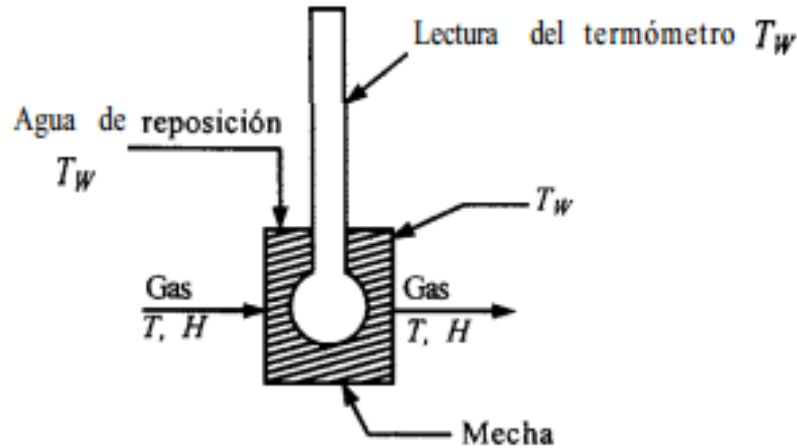
La temperatura desempeña un papel demasiado importante en los diferentes procesos de secado. Así podemos decir que, conforme se incrementa su valor se acelera la eliminación de humedad dentro de los límites posibles. En la práctica del secado, la elección de la temperatura se lleva a cabo tomando en consideración la especie que se vaya a someter al proceso.

Existen diversos niveles de temperaturas que se mantienen durante el proceso técnico de secado, y estos son:

- A. **Temperatura de bulbo seco:** es aquélla del ambiente, se mide con instrumentación ordinaria como un termómetro de mercurio.
  
- B. **Temperatura superficial:** es la de la especie a secar, generalmente se mide por medio de un sensor infrarrojo.
  
- C. **Temperatura de bulbo húmedo:** “es la temperatura de entrada en estado



estacionario y no de equilibrio que alcanza cuando se pone en contacto una pequeña cantidad de agua con una corriente continua de gas en condiciones adiabáticas.”<sup>(4)</sup>



FUENTE: TEMPERATURA HÚMEDA, GEANKOPLIS, C.J., Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3ª ed. México: Editorial Continental, 1998.

FIG. 1.4.3.1-1 MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO

Durante el proceso de secado, se origina un gradiente de temperatura con respecto al espesor del material, mismo que tiende a disminuir conforme se reduce el contenido de humedad.

#### 1.4.3.2. HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE

“La humedad relativa del aire se define como la razón de la presión de vapor de agua presente en ese momento, con respecto a la presión de saturación de vapor de agua a la misma temperatura.”<sup>(9)</sup>

Generalmente, se expresa en porcentaje (%), a medida que se incrementa la temperatura del aire aumenta su capacidad de absorción de humedad y viceversa. Cuando el aire contiene su máxima capacidad, podemos decir que se trata de un aire completamente saturado y esto significa que es incapaz de absorber más humedad, por el contrario, un aire no saturado tiene la posibilidad de absorber una cantidad determinada de humedad hasta lograr su saturación.

### **1.4.3.3. VELOCIDAD DEL AIRE**

La velocidad del aire dentro del secador tiene principales funciones las que son, en primer lugar, transmitir la energía requerida para calentar el agua contenida en el material facilitando su evaporación, y en segundo lugar, transportar la humedad saliente del material. La capa límite que existe entre el material a secar y el aire tiene un papel muy importante en el secado. Cuanto menor sea el espesor de esta capa límite, más rápida será la remoción de humedad. La forma de la corriente del aire es importante para la velocidad, una corriente turbulenta es mucho más eficaz que una laminar, pues la primera afecta en mayor forma la capa límite y el aire. Durante las primeras etapas del secado, la velocidad del aire desempeña un papel muy importante, sobre todo cuando el material contiene un alto contenido de humedad.

“Cuando mayor sea la velocidad, mayor será la tasa de evaporación y será menor el tiempo de secado y viceversa, si la velocidad del aire disminuye la tasa de evaporación disminuye y el tiempo de secado aumenta. Por tal razón, para asegurar un secado rápido y uniforme es indispensable una circulación del aire fuerte y regular.

Las ventajas de velocidades altas de aire, disminuyen en cuanto mayor es el espesor del material, menor el contenido de humedad inicial y la temperatura de bulbo seco inicial. En la práctica, la economía del proceso determina la velocidad del aire. Se utilizan velocidades mayores a 3 m/s sólo en casos excepcionales (material muy húmedo), pero en general, la velocidad se considera entre de 2 m/s a 3 m/s. En algunos casos, es recomendable utilizar velocidades de secado altas al inicio del proceso de secado, pero a medida que disminuye la humedad se sugiere disminuir la velocidad. Lo anterior es posible si se cuenta con ventiladores de velocidad variable.”<sup>(18)</sup>

### **1.4.4. CINÉTICA DEL SECADO**

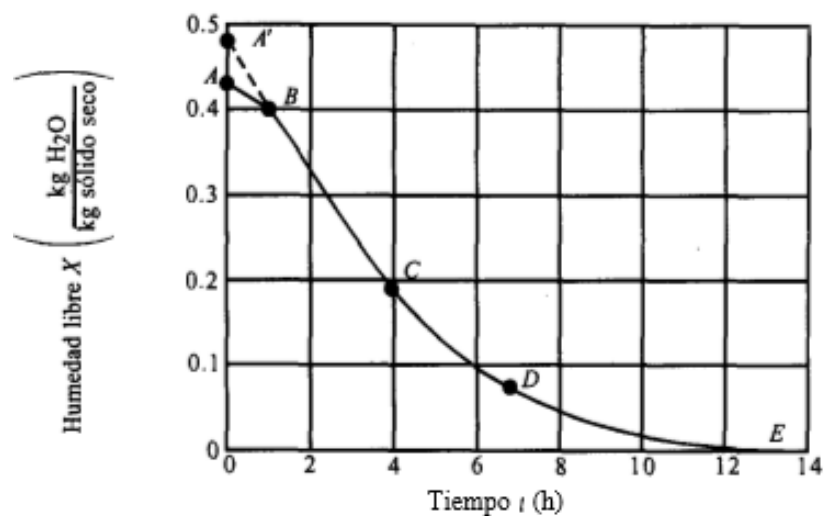
“Se define la velocidad de secado por la pérdida de humedad del sólido húmedo en la unidad de tiempo, y más exactamente por el cociente diferencial  $(-dX/d\theta)$  operando en condiciones constantes de secado, es decir con aire cuyas condiciones (temperatura, presión, humedad y velocidad) permanecen constantes con el tiempo.”

(8) Analíticamente, la velocidad de secado se refiere a la unidad de área de superficie de secado, de acuerdo con la ecuación:

$$W = \frac{S}{A} \left( - \frac{dx}{d\theta} \right) \quad \text{Ec. 1.4.3-1}$$

#### 1.4.4.1. CURVAS DE CINÉTICA DE SECADO

“A partir de las curvas de cinética de secado ( $x$  vs  $t$ ,  $dx/dt$  vs  $x$ ), que deben ser obtenidas a nivel de laboratorio, puede tenerse una idea del tiempo de secado, del consumo de energía, del mecanismo de migración de humedad, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa y de la influencia que tienen en la velocidad de secado las variables del proceso tales como: temperatura, humedad de entrada, velocidad del aire, etc. Con los datos obtenidos durante la prueba de secado o sea de la variación de la humedad con el tiempo, puede hacerse un gráfico de contenido de humedad en función del tiempo.



FUENTE: VARIACION DE LA HUMEDAD, GEANKOPLIS, C.J., Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3ª ed. México: Editorial Continental, 1998. Pp. 598

FIG. 1.4.4.1-1 DATOS DE HUMEDAD LIBRE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

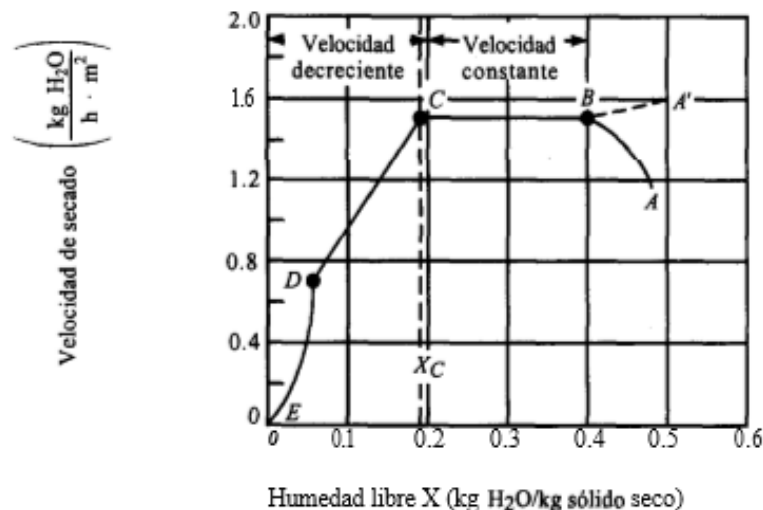
**Fase B;** estabilización, en el cual las condiciones de la superficie del sólido se equilibran con las del aire de secado. Generalmente es una proporción despreciable del total de secado.

**Fase C;** periodo de velocidad constante, Durante el mismo la superficie del sólido se mantiene saturada de agua líquida debido a que el movimiento del agua desde el interior del sólido hasta la superficie ocurre a la misma velocidad que la de la evaporación en la superficie.

**Fase D;** periodo de velocidad decreciente, la superficie del sólido comienza a desecarse porque el agua aún se halla en su interior encuentra dificultades para llegar a la superficie del sólido. La temperatura del sólido comienza a aproximarse a la temperatura de aire de secado cuando el producto se ha desecado totalmente. Esto es lo que determina que la temperatura del aire deba moderarse para evitar que la temperatura del producto supere la temperatura crítica.

#### 1.4.4.2. CURVAS DE RÉGIMEN DE SECADO

Se puede obtener abundante información si se convierten los datos a regímenes de secado, y se lleva a un gráfico en función del contenido de humedad. Generalmente se pueden apreciar dos partes notorias de la curva de régimen de secado: un periodo de régimen constante y uno de caída de régimen, aunque teóricamente existen o se pueden apreciar tres etapas del proceso o periodos de secado.



FUENTE: CURVA DE SECADO, GEANKOPLIS, C.J., Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3ª ed. México: Editorial Continental, 1998. Pp. 598

FIG. 1.4.4.2-1 CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DE LA HUMEDAD LIBRE

**Etapa A-B:** Es una etapa de calentamiento inicial del sólido normalmente de poca duración en la cual la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad. En esta etapa el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta que se alcance el equilibrio entre el enfriamiento por evaporación y la absorción de calor de los gases. Este equilibrio se alcanza a la temperatura de bulbo húmedo del gas.

**Etapa B-C:** Es el llamado primer período de secado o período de velocidad de secado constante; donde se evapora la humedad libre o no ligada del material y predominan las condiciones externas. La velocidad de secado se mantiene constante si el gas tiene un estado estacionario y en general depende solo de las propiedades y velocidad del mismo. Durante este período la temperatura del sólido se mantiene igual a la de bulbo húmedo del gas, ya que se mantiene el equilibrio alcanzado al final de la etapa de calentamiento.

**Etapa C-E:** Es el segundo período de secado o período de velocidad de secado decreciente; donde se evapora la humedad ligada del material y predominan las condiciones internas o las características internas y externas simultáneamente. Durante el período, la temperatura del material sobrepasa la de bulbo húmedo debido a que el descenso de la velocidad de secado rompe el equilibrio térmico que mantiene estable la temperatura y una parte considerable del calor se emplea en un calentamiento del sólido.”<sup>(4)</sup>

## 1.5. SECADOR ROTATORIO

Pertencen al grupo de secadores directos continuos aunque en algunos casos, el calentamiento es por contacto indirecto a través de la pared calentada del cilindro.

Los secadores rotatorios consisten en estructuras cilíndricas que giran por lo general sobre su eje, ligeramente inclinadas hacia la salida y sostenidas por dos anillos de rodadura que funcionan sobre mecanismos de rodillos. Este secador se usa generalmente para producción de alto tonelaje por su capacidad de manejar productos de considerable variación en tamaño y composición. Se emplea en secar una amplia gama de materiales granulares, la acción de volcado es beneficiosa, ya que se forma una cortina de arena expuesta perpendicular en contacto directo con el aire caliente, con lo cual se facilita la salida de la humedad desde el interior de las partículas.

Los sólidos granulares húmedos se alimentan por la parte superior, y se desplazan por el cilindro a medida que éste gira. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo con gases calientes, el flujo de aire puede ser tanto en paralelo como a contracorriente, el material húmedo esta en continuo movimiento gracias a la rotación del secador, dejándolo caer a través de una corriente de aire caliente que circula a lo largo del tambor del secador.

El uso de este equipo constituye uno de los procesos más utilizados para el secado de una amplia gama de materiales a nivel industrial, esto porque es un método rápido y de bajo costo unitario cuando se trata de grandes cantidades de material. Este tipo de secadores se pueden diseñar para tiempos de secado desde unos pocos cientos de kilogramos por hora hasta alcanzar las 200 t/h.

### 1.5.1. TIPOS DE SECADORES ROTATORIOS

- **Calor Directo:** Los secadores de calor directo son más aplicables a materiales en formas granulares, comprimidas o de extrusión, que no son sensibles al calor y tampoco son afectados por el contacto directo con gases de combustión. Los materiales pueden ser secados en paralelo o contra la corriente del gas caliente. Los secadores de flujo paralelo son ideales para el secado rápido, eficiente y a

baja temperatura de materiales que son más sensibles a las altas temperaturas, baja densidad, pegajosos y no adquieren fluidez fácilmente. La transferencia de calor se efectúa predominantemente por convección.

- **Calor Indirecto:** Los secadores de calor indirecto son más aplicables a materiales que son sensibles al calor y también son afectados por el contacto directo con gases de combustión. En este equipo, el material entra en contacto sólo con la superficie caliente del cilindro, que es calentada externamente con gases de combustión. El material húmedo se introduce en el cilindro rotatorio, insertado en una cámara estacionaria. Los gases de combustión calientes pasan a través del espacio anular. La transferencia de calor se realiza principalmente por conducción.
- **Inyección de Vapor en Tubos:** Los secadores de inyección de vapor en tubos, son más aplicables a materiales sensibles al calor y a contaminación con gases. Una de las aplicaciones comunes está en los productos alimenticios y agrícolas. Existen tubos calentados con vapor y organizados coaxialmente en filas a lo largo del secador. La transferencia de calor se lleva a cabo esencialmente por conducción.

## 1.6. DISEÑO DEL SECADOR ROTATORIO

### 1.6.1. DISEÑO DE INGENIERÍA

#### 1.6.1.1. Partes del Secador Rotatorio.

A continuación detallamos cada una de las partes del secador rotario:

**Cilindro:** Es la parte principal del secador en donde se introduce el material húmedo el mismo que es inicialmente distribuido de manera uniforme por la placa de mezclado al interior del cilindro, y luego secados por aire caliente. Éste cilindro está fabricado de acero inoxidable, tiene un diámetro de 38 cm y una longitud de 80 cm, teniendo un área de 1182 m<sup>2</sup> con un volumen de 90 L. Este cilindro cuenta con diminutos agujeros en un extremo para que salga el aire húmedo. En el interior del cilindro se colocan paletas giratorias dispuestas a lo largo de todo el secador.

**Sistema de paletas:** Consiste en unas paletas giratorias, éstas están elaboradas del mismo material del cilindro o sea acero inoxidable las cuales tienen gran consistencia ya que están bien aseguradas a un rodamiento donde se deposita el eje. El objetivo de este sistema es mantener en movimiento el material para que el secado se realice satisfactoriamente entonces éstas ayudan al transporte del material; así como a la homogenización de la mezcla esparciendo el material en la corriente gaseosa, mejorando la transferencia de calor y garantizando que el proceso se vea mejorado en un 100%.

**Motor Eléctrico:** “Es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica.”<sup>(22)</sup> El motor eléctrico utilizado en el secador tiene una potencia de ½ HP (373 W) y se emplea un voltaje de 110 V. A éste motor se acopla un sistema de poleas las cuales también se hallan conectadas al cilindro, su utilidad se enfoca en la transmisión de movimiento giratorio entre dos ejes distantes; permitiendo aumentar, disminuir o mantener la velocidad de giro.



## Sistema de calentamiento.

- **Fuente de calor.-** El aire caliente ingresa con un generador de gas (GLP) que se conecta a una válvula industrial. El secador rotatorio se calienta por contacto directo del gas con los sólidos, por el gas caliente que pasa a través de un encamisado externo, en donde el aire de secado y los gases de combustión se mezclan. El aire que ingresa a la cámara de secado tiene una temperatura de 115 C pudiendo disminuir o aumentar regulando la válvula industrial.
- **Ventilador.-** “es una máquina de fluido concebida para producir una corriente de aire, éste desplaza el gas de un lugar a otro.”<sup>(25)</sup> El secador posee un ventilador pequeño de empuje en la entrada del gas que trabaja a 3600 RV; de esta forma se mantiene una presión cercana a la atmosférica en el secador; éste previene la fuga de aire frío en los extremos de almacenamiento del secador; si la presión está bien balanceada, la fuga hacia el exterior también puede reducirse al mínimo.

## 1.6.2. ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE UN SECADOR ROTATORIO

### 1.6.2.1. CÁLCULOS DE LA HUMEDAD; X.

El contenido de humedad puede expresarse en base seca o base húmeda, para los cálculos de secado resulta más conveniente referir la humedad a base seca debido a que esta permanece constante durante el proceso de secado.

$$X = \frac{\text{Peso solido humedo (Kg s.seco)} - \text{Peso del solido (Kg s.seco)}}{\text{Peso del solido (Kg s.seco)}} \quad \text{Ec. 1.6.2.1.-1}$$

**Donde:**

*X = Humedad referida a base seca.*

La ecuación es aplicada para determinar la humedad existente en ciertos solidos tales como granos, harinas, plástico, etc. Al reducir su peso y su volumen aumenta la eficacia de los procesos de transporte y almacenaje.

### 1.6.2.2. CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE SECADO; $W_T$

Es la perdida de humedad del solido en la unidad de tiempo operando en condiciones constantes de secado. Es la sumatoria de las velocidades constante (Crítica) y la decreciente (Poscrítica).

$$W_T = W_C + W_D \quad \text{Ec. 1.6.2.2.-1}$$

**Donde:**

$W_C =$  *Velocidad para el periodo constante*

$W_D =$  *Velocidad para el periodo decreciente*

Es necesario efectuar ensayos de velocidad de secado del material para determinar la capacidad del equipo y el tiempo de secado.

### 1.6.2.3. VELOCIDAD PERIODO CONTANTE; $W_C$

Se caracteriza porque la velocidad de secado en este periodo es constante. Este periodo va desde la humedad inicial  $X_0$ , hasta la humedad critica  $X_C$ .

$$W_C = \frac{S}{A} \left[ - \frac{\Delta x}{\Delta \theta} \right] \quad \text{Ec. 1.6.2.3.-1}$$

**Donde:**

$W_C =$  *Velocidad de secado constante*

$A =$  *Superficie expuesta al secado*

$S =$  *Sólido seco*

$\Delta X =$  *Variación de la humedad en base seca*

$\Delta \theta =$  *Variación del tiempo de secado*

Esta ecuación es aplicada en problemas de secado de sólidos para determinar el valor de la velocidad de secado desde una humedad inicial hasta la humedad crítica.

#### 1.6.2.4. VELOCIDAD POSCRITICA O DECRECIENTE; $W_D$

En general este período puede dividirse en dos tramos: uno en la que la velocidad de secado varía linealmente con la humedad desde el punto crítico (primer período poscrítico), y otro en que no se cumple esta variación lineal (segundo período poscrítico), aunque no puede presentar esta separación neta entre ambos tramos.

$$W_D = \frac{S}{A} \left[ \frac{X_c - X^*}{\Delta\theta} \right] \quad \text{Ec. 1.6.2.4.-1}$$

**Donde:**

$W_D$  = *Velocidad de secado poscritica o decreciente*

$A$  = *Superficie expuesta al secado*

$S$  = *Sólido seco*

$\Delta X$  = *Variación de la humedad en base seca*

$\Delta\theta$  = *Variación del tiempo de secado*

Esta ecuación es aplicada en problemas de secado de sólidos para determinar el valor de la velocidad de secado desde una humedad crítica hasta la humedad final o de equilibrio.

#### 1.6.2.5. VELOCIDAD TOTAL DE SECADO

Es la sumatoria de las velocidades constante y decreciente o poscritica

$$W_T = W_C + W_D \quad \text{Ec. 1.6.2.5-1}$$

**Donde:**

$W_C$  = *velocidad constante*

$W_D$  = *velocidad decreciente o poscritica*

#### 1.6.2.6. CÁLCULO DE TIEMPO TOTAL DE SECADO; $\theta_T$

Es la sumatoria de los tiempos constante (antecrítico) y la decreciente (poscrítico).

$$\theta_T = \theta_a + \theta_p \quad \text{Ec. 1.6.2.6.-1}$$

**Donde:**

$\theta_a =$  *Tiempo para el período antecrítico o constante*

$\theta_p =$  *Tiempo para el período poscrítico o decreciente*

### **1.6.2.7. CÁLCULO DEL TIEMPO DE SECADO EN EL PERIODO CONSTANTE; $\theta_a$**

Es el tiempo que se determina durante el periodo de velocidad constante.

$$\theta_a = \frac{S}{A} \left[ \frac{X_i - X_c}{W_c} \right] \quad \text{Ec. 1.6.2.7.-1}$$

**Donde:**

$\theta_a =$  *Tiempo antecrítico*

$W_c =$  *Velocidad de secado constante*

$A =$  *Superficie expuesta al secado*

$S =$  *Sólido seco*

$X_i =$  *Humedad inicial*

$X_c =$  *Humedad crítica*

Esta ecuación es aplicada en problemas de secado de sólidos para determinar el tiempo durante el periodo de velocidad constante.

### **1.6.2.8. CÁLCULO DEL TIEMPO DE SECADO POSCRÍTICO; $\theta_p$**

Es el tiempo que se determina durante el periodo de velocidad decreciente.

Este se lo puede realizar por:

**El método gráfico** si no se conoce la relación analítica  $W = f(X)$ , la integración de la ecuación 5.3.3-3 ha de hacerse gráficamente representando  $X$  frente a  $1/W$  este valor será el rea limitada por la curva, el eje de las abscisas y las ordenadas extremas  $G_y G_5$ .

$$\theta_P = \frac{S}{A} \int_{X_f}^{X_i} \frac{dX}{W} \quad \text{Ec. 1.6.2.8.-1}$$

**El Método Analítico** si la velocidad de secado varía linealmente con la humedad, desde la humedad crítica hasta la final, la integración de la ecuación 5.3.3-3 conduce a:

$$\theta_P = \frac{S}{A} \frac{X_c - X_f}{W_c - W_D} \ln \frac{W_c}{W_D} \quad \text{Ec.1.6.2.7.-2}$$

$$\theta_P = \frac{SX_c - X^*}{AW_c} \ln \frac{X_c - X_f}{X_c - X^*} \quad \text{Ec.1.6.2.7.-3}$$

**Donde:**

$\theta_P$  = Tiempo poscrítico

$W_C$  = Velocidad de secado constante

$W_D$  = Velocidad decreciente o poscritica

$A$  = Superficie expuesta al secado

$S$  = Sólido seco

$X_f$  = Humedad final

$X_C$  = Humedad crítica

$X^*$  = Humedad en equilibrio

Esta ecuación es aplicada en problemas de secado de sólidos para determinar el tiempo durante el periodo de velocidad decreciente.

### 1.6.2.7. CÁLCULO DE LAS ENTALPÍAS DEL SOLIDO PARA EL BALANCE DE ENERGÍA

La Entalpía es la cantidad de energía de un sistema termodinámico que éste puede intercambiar con su entorno.

#### 1.6.2.7.1. ENTALPÍA A LA ENTRADA

$$h_1 = (C_{PS} + C_{PL}X_i)t_{S1} \quad \text{Ec. 1.6.2.7.1-1}$$

**Donde:**

$h_1 =$  Entalpía del solido a la entrada  
 $C_{PS} =$  Capacidad calorifica del solido seco  
 $C_{PL} =$  Capacidad calorifica del liquido  
 $X_i =$  Humedad del solido a la entrada  
 $t_{S1} =$  Temperatura del solido a la entrada

#### 1.6.2.7.2. ENTALPÍA A LA SALIDA

$$h_2 = (C_{PS} + C_{PL}X_f)t_{S2} \quad \text{Ec. 1.6.2.7.1-1}$$

**Donde:**

$h_2 =$  Entalpía del solido a la salida  
 $C_{PS} =$  Capacidad calorifica del solido seco  
 $C_{PL} =$  Capacidad calorifica del liquido  
 $X_f =$  Humedad del solido a la salida  
 $t_{S2} =$  Temperatura del solido a la salida

#### 1.6.2.8. CÁLCULO DE LAS ENTALPÍAS DEL AIRE PARA EL BALANCE DE ENERGÍA

##### 1.6.2.8.1. ENTALPÍA A LA ENTRADA

$$H_2 = (0,24 + 0,46y_2)t_2 + 597,2y_2 \quad \text{Ec. 1.6.2.8.1.-1}$$

**Donde:**

$H_2 =$  Entalpía del aire a la entrada  
 $y_2 =$  Humedad del aire a la entrada  
 $t_2 =$  Temperatura del aire a la entrada

##### 1.6.2.8.2. ENTALPÍA A LA SALIDA

$$H_1 = (0,24 + 0,46y_1)t_1 + 597,2y_1 \quad \text{Ec. 1.6.2.8.2-1}$$

**Donde:**

$H_1 =$  Entalpía del aire a la salida

$y_1 =$  Humedad del aire a la salida

$t_1 =$  Temperatura del aire a la salida

Las diferentes ecuaciones de entalpías tanto para el sólido como para el aire son aplicadas cuando un sistema pasa desde unas condiciones iniciales hasta otras finales.

### 1.6.2.9. CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE CALOR.

Se considera que el calor es positivo, o "ganado" por un cuerpo si la temperatura del dicho cuerpo aumenta, y lo contrario (el calor se pierde) cuando la temperatura del cuerpo desciende.

- **Cantidad de calor perdido.**

$$q = G * H_2 * E \quad \text{Ec. 1.6.2.9-1}$$

**Donde:**

$q =$  cantidad de calor perdido,  $\frac{Kcal}{h}$

$G =$  flujo másico del aire,  $\frac{Kg_{aire\ seco}}{h}$

$H_2 =$  Entalpía del aire a la entrada,  $\frac{Kcal}{Kg}$

$E =$  porcentaje de perdidas

- **Cantidad de calor necesario para calentar el material.**

$$Q = mC_{PS}\Delta T \quad \text{Ec. 1.6.2.9-2}$$

**Donde:**

$Q =$  cantidad de calor necesario para calentar el material,  $kcal$

$m =$  masa de agua eliminada,  $kg$

$C_{PS} =$  calor específico del sólido,  $\frac{Kcal}{KgC}$

$\Delta T =$  variación de temperatura,  $C$

### 1.6.2.10. CÁLCULO DEL AIRE NECESARIO QUE DEBE SUMINISTRAR EL VENTILADOR.

$$V_{aire} = \frac{m_{as}}{\delta_{aire}} \quad \text{Ec. 1.6.2.10-1}$$

**Donde:**

$V_{aire}$  = Cantidad de aire que debe suministrar el ventilador,  $m^3$

$m_{as}$  = masa del aire seco,  $kg$

$\delta_{aire}$  = densidad del aire,  $\frac{kg}{m^3}$

### 1.6.2.11. CÁLCULO DEL CAUDAL DEL AIRE.

El caudal del aire se define como el volumen de aire que pasa a través de la carcasa de un ventilador en un tiempo determinado.

$$Q_{aire} = \frac{V_{aire}}{t} \quad \text{Ec. 1.6.2.11-1}$$

**Donde:**

$Q_{aire}$  = Caudal del aire,  $\frac{m^3}{min}$

$V_{aire}$  = Cantidad de aire que debe suministrar el ventilador,  $m^3$

$t$  = tiempo de secado,  $min$

### 1.6.2.12. CÁLCULO DEL RENDIMIENTO DEL EQUIPO.

El rendimiento del equipo es la cantidad de materia prima que sale con respecto a aquella que entra.

$$R = \frac{PET \text{ seco}}{PET \text{ húmedo}} * 100 \quad \text{Ec. 1.6.2.12-1}$$

**Donde:**

$R$  = rendimiento del equipo, %

$PET \text{ seco}$  = peso del sólido seco,  $kg$

$PET \text{ húmedo}$  = peso del sólido húmedo,  $kg$



La ecuación es aplicada para poder determinar una mejor gestión del equipo.

### **1.6.2.13. CÁLCULO DE LA EFICIENCIA DEL EQUIPO**

La eficiencia del equipo es la cantidad de trabajo que realmente genera la máquina en relación a la energía con que se alimenta.

$$E = \frac{q}{Q} * 100 \qquad \text{Ec. 1.6.2.13-1}$$

**Donde:**

*E = eficiencia del equipo,*

*q = cantidad de calor perdido,*

*Q = cantidad de calor que ingresa al secador*

La ecuación es aplicada para poder determinar el buen funcionamiento del equipo.

## **CAPITULO II**

## **2. PARTE EXPERIMENTAL**

El presente trabajo de diseño y construcción de un secador rotatorio se enfoca a la reducción de la humedad existente en las botellas de plástico PET, el mismo que se halla ubicado en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH del cantón Riobamba, Provincia de Chimborazo.

El PET obtenido luego del secado, posteriormente pasa a la extrusión para obtener la materia prima que tiene como fin de reusarlas en otros procesos tales como fibras, envases, etc. Una vez obtenidos los resultados de los procesos de triturado y lavado en los mismos que se realizaron análisis químicos del plástico PET para determinar sus propiedades, se procedió a la determinación de los respectivos cálculos de diseño y construcción del secador rotatorio adecuado para extraer la humedad del plástico PET hasta que sea la adecuada para que ingrese al siguiente equipo llamado extrusor.

### **2.1. MUESTREO**

El muestreo se realizó antes de que el plástico PET ingrese a la línea de producción por estudiantes del primer proceso de dicha línea (trituración) los mismos que aplicaron un muestreo aleatorio compuesto con una frecuencia de una muestra diaria durante 8 días; este fue realizado en la Facultad de Ciencias con la ayuda de los alumnos de la escuela de Biotecnología Ambiental de la ESPOCH, que ayudaron a recolectar botellas plásticas gracias a campañas en contra de la contaminación ambiental y diferentes recipientes hechos a base de materiales reciclados en los cuales depositaban las botellas plásticas.

Posterior al proceso de muestreo se realizó la trituración, y lavado de las botellas plásticas PET.

## **2.2. METODOLOGÍA**

### **2.2.1. MÉTODOS Y TÉCNICAS**

#### **2.2.1.1. MÉTODOS**

El presente estudio de este proyecto de investigación tiene un carácter explicativo y experimental para obtener apropiadamente la metodología adecuada a través de la implementación del proyecto de diseño, selección y aplicación de todas las herramientas y componentes necesarios para reducir la humedad del PET, en respuesta a las posibles interrogantes que se puedan presentar en el transcurso del secado.

- **MÉTODO INDUCTIVO**

A partir del muestreo se procedió a triturar las botellas plásticas, luego las escamas obtenidas pasan a una lavadora en donde el plástico sale con una humedad del 28%, por consiguiente estas escamas ingresan al secador rotatorio. Encontrada la temperatura óptima de secado se obtuvo las diferentes variables de proceso tales como: humedades, temperaturas, flujo de aire, etc; teniendo así los datos de partida para el dimensionamiento del secador rotatorio apropiado para el secado del PET.

- **MÉTODO DEDUCTIVO**

Para el secado del PET las escamas deben ingresar al secador previamente lavadas, estas escamas se obtuvieron por medio de una trituradora en la cual se ingresaron las botellas plásticas recicladas. Después del secado se realizan los respectivos cálculos de ingeniería cuya aplicación permitirá la búsqueda de límites de las variables operaciones del sistema de secado.

#### **2.2.1.2. TÉCNICAS**

Se utilizaron ciertas técnicas para la recolección de información como las siguientes:

- Observaciones
- Ensayos

### 2.2.1.2.1. PORCENTAJE DE HUMEDAD DEL PET

TABLA 2.2.1.2.1-1

PORCENTAJE DE HUMEDAD DEL PET

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULO
El objetivo del secado es la deshidratación de las escamas de PET previamente procesadas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Secador rotatorio</li> <li>• Balanza</li> <li>• Cronometro</li> <li>• Recipiente para la recolección del material molido</li> <li>• Brocha para la limpieza del equipo y sus alrededores</li> <li>• Platico de PET previamente procesado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pesar muestras del material plástico a ser triturado.</li> <li>• Conectar el equipo a una fuente de corriente eléctrica.</li> <li>• Encender el equipo</li> <li>• Colocar el recipiente en la parte baja del secador para recibir el producto ya secado.</li> <li>• Verificar que la alimentación se esté realizando de forma adecuada. En el caso de que exista alguna obstrucción, empujar la alimentación con un equipo adecuado.</li> <li>• Durante la operación de secado medir con el cronometro el tiempo de secado.</li> <li>• Después que la muestra ha sido secada totalmente, se debe pesar el producto final a fin de determinar las perdidas por operación en el secador.</li> <li>• Desconectar el secador de la alimentación eléctrica.</li> <li>• Limpiar el secador utilizando la brocha.</li> </ul>	<p>% de Humedad =</p> $\frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100$ <p><b>Donde:</b></p> <p><b>m<sub>1</sub></b> = Masa de la muestra recién extraída.</p> <p><b>m<sub>2</sub></b> = Masa de la muestra después de estar en el secador.</p>

FUENTE: Guía Laboratorio Operaciones Unitarias, ESPOCH, 2013

### 2.2.1.2.2. PRODUCCIÓN DE BOTELLAS PLASTICAS EN LA ESPOCH

TABLA 2.2.1.2.2-1

#### PRODUCCIÓN DE BOTELLAS PLÁSTICAS EN LA ESPOCH

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULO
El objetivo de esta técnica es conocer la producción diaria de botellas plásticas que existe en la ESPOCH.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recipientes</li> <li>• Fundas Plásticas</li> <li>• Balanza</li> <li>• Guantes</li> <li>• Marcadores</li> <li>• Cámara digital</li> <li>• Afiches</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Primero se procede con la división y ubicación de la población en zonas, para esto se utilizó el plano de la ESPOCH donde se dividió toda la población en 13 puntos de la siguiente manera: 7 FACULTADES, COMEDOR, DISPENSARIO MEDICO, CENTRO DE EDUCACION FISICA, EDIFICIO CENTRAL, CENTRO DE IDIOMAS, BIBLIOTECA.</li> <li>• Después se procede a la determinación del número de muestras utilizando la fórmula estadística, la cual se utiliza para el diseño de planes de manejo de residuos sólidos domiciliarios, pero en este caso se utilizó ya que para el desarrollo de planes de manejo de residuos sólidos de instituciones educativas no existe ninguna.</li> <li>• Como siguiente paso se procede a colocar fundas de en los basureros de las diferentes zonas.</li> <li>• Por último se realiza la recolección de las fundas de las diferentes zonas para el posterior pesaje de las mismas.</li> </ul>	$n = \frac{(Z_{1-\alpha}^2 x N \sigma^2)}{(N - 1)E^2 + Z_{1-\alpha}^2 + \sigma^2}$ <p><b>Donde:</b>  <math>\sigma^2</math>: 0.04 Desviación estándar.  E: 0.056 Error permisible.  N: 1 Total zonas.  <b>Z1-<math>\alpha</math></b>: 1.96 Coeficientes de confianza al 95%.  N: número de zonas.</p>

FUENTE: Guía Laboratorio Operaciones Unitarias, ESPOCH, 2013

### 2.2.1.2.3. DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN PERCAPITA DE LA ESPOCH

TABLA 2.2.1.2.3-1

#### DETERMINACIÓN DE LA PRODUCCIÓN PERCÁPITA DE LA ESPOCH

FUNDAMENTO	MATERIALES	TÉCNICA	CÁLCULO
<p>La producción de residuos sólidos es una variable que depende básicamente del tamaño de la población y de sus características socioeconómicas.</p> <p>La PPC varía de una población a otra, de acuerdo principalmente a su grado de urbanización, densidad poblacional y su nivel de consumo o nivel socioeconómico, es por esta razón que la PPC de la ESPOCH varía dentro de la Institución debido a las diferentes actividades predominante que se realiza en cada una de las zonas muestreadas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mapa de la ESPOCH</li> <li>• Marcadores</li> <li>• Cámara digital</li> <li>• Afiches</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se utilizó el total de residuos recolectados por el día de muestras.</li> <li>• Se pesó diariamente (w) el total de las bolsas recogidas durante los días que duró el muestreo este proceso representa (<math>W_t</math>) la cantidad total de basura diaria generada en todas las zonas muestreadas, con todos los datos de los días muestreados se calculó el peso total promedio diario de residuos sólidos.</li> <li>• Como se indicó anteriormente en función de los datos obtenidos sobre el número total de personas por facultad y el peso total promedio diario se determinó el PPC para cada punto muestreado, dividiendo el peso total promedio diario de las bolsas (<math>W_t</math>) entre la población total del área muestreada</li> </ul>	$PPC = \frac{\text{Peso Total de Residuos}(W_t)}{\text{Número total de personas}}$

FUENTE: Guía Laboratorio Operaciones Unitarias, ESPOCH, 2013

## **2.3. DATOS DE EXPERIMENTALES**

### **2.3.1. DIAGNÓSTICO**

Al observar que en la actualidad en la ESPOCH ha ido en aumento el consumo de botellas tipo PET se ha visto necesario adoptar un plan de reciclado y de reutilización de botellas plásticas que tiene como propósito disminuir la contaminación al ambiente; una opción muy factible es la creación de una línea de producción, es por eso que, se ha propuesto el diseño y construcción de un equipo secador de PET, el mismo que reducirá la humedad superficial del plástico PET.

Para el diseño del equipo de secado del PET se obtuvieron datos, los cuales ayudaron a identificar las variables operativas del proceso. Estos datos podemos observarlos en las siguientes tablas:



### 2.3.2. DATOS

- A 90 C

**TABLA 2.3.2-1**

**DATOS DEL PESO DEL SÓLIDO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**

<b>Tiempo (h)</b>	<b>Peso (Kg)</b>
0	3
0,03	2,87
0,06	2,65
0,1	2,51
0,13	2,44
0,16	2,39
0,2	2,31
0,23	2,24
0,27	2,16
0,3	2,1
0,33	2,06
0,37	2
0,4	1,985
0,43	1,959
0,47	1,947
0,5	1,34

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

- A 115 C

**TABLA 2.3.2-2**

**DATOS DEL PESO DEL SÓLIDO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**

<b>Tiempo (h)</b>	<b>Peso (Kg)</b>
<b>0</b>	3
<b>0,03</b>	2,667
<b>0,06</b>	2,462
<b>0,1</b>	2,333
<b>0,13</b>	2,077
<b>0,16</b>	2,051
<b>0,2</b>	2
<b>0,23</b>	1,974
<b>0,27</b>	1,949
<b>0,3</b>	1,923

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

- A 160 C

**TABLA 2.3.2-3**

**DATOS DEL PESO DEL SÓLIDO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**

<b>Tiempo (h)</b>	<b>Peso (Kg)</b>
<b>0</b>	3
<b>0,03</b>	2,73
<b>0,06</b>	2,11
<b>0,1</b>	1,98
<b>0,13</b>	1,95
<b>0,16</b>	1,92

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

En la tabla que se muestra a continuación se reflejan los pesos y porcentajes diarios de residuos sólidos generados en la ESPOCH.

**TABLA 2.3.2-4**

**PRODUCCIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS POR DÍA - ESPOCH**

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

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

**2.4. DATOS ADICIONALES**

**TABLA 2.4-1**

**DATOS ADICIONALES**

TEMPERATURA	°C
Temperatura ambiente	<b>20</b>
Temperatura húmeda	<b>15</b>
Temperatura del solido a la entrada	<b>12</b>
Temperatura del solido a la salida	<b>60</b>

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

# **CAPITULO III**

### 3. DISEÑO DEL EQUIPO

#### 3.1. CÁLCULOS

##### 3.1.1. Cálculos para el reciclado de PET.

###### 3.1.1.1. Determinación del número de puntos a muestrear.

Aplicando la ecuación de la Tabla 2.2.1.2.2-1 se tiene:

$$n = \frac{(Z_{1-\alpha}^2 \times N \times \sigma^2)}{(N-1)E^2 + Z_{1-\alpha}^2 + \sigma^2}$$
$$n = \frac{(1.96)^2 \times 13 \times 0.04}{(13-1)(0.056)^2 + (1.96)^2 \times 0.04} = 11 \text{muestras}$$

###### 3.1.1.2. Determinación de la producción per cápita.

Aplicando la ecuación de la Tabla 2.2.1.2.3-1 se tiene:

$$PPC_{PET} = \frac{\text{Peso Total de Residuos}(W_t)}{\text{Número total de personas}}$$

$$PPC_{PET} = \frac{60 \text{ Kg}}{1 \text{ habitante-día}}$$

$$PPC_{PET} = 0,0035 \frac{\text{Kg}}{\text{habitante-día}}$$

###### 3.1.2. Cálculo de la velocidad de secado y del tiempo de secado para los diferentes períodos.

De acuerdo a la curva de velocidad de secado a una temperatura de operación de 115 C habrá un periodo de velocidad de secado constante y otro de velocidad de secado decreciente.

### 3.1.2.1. Velocidad de secado constante

Para calcular la velocidad constante se hace uso de la Ec. 1.6.2.3.-1

$$W_C = \frac{S}{A} \left[ -\frac{\Delta x}{\Delta \theta} \right]$$

**Datos:**

$$x_{inicial} = 0,335$$

$$x_{critica} = 0,145$$

$$t_2 = 0,13h$$

$$t_1 = 0,06h$$

$$S = 1,923Kg$$

$$A = 1,182m^2$$

**Solución:**

$$W_C = \frac{S}{A} \left[ -\frac{\Delta x}{\Delta \theta} \right]$$

$$W_C = \frac{1,923}{1,182} \left[ -\left( \frac{0,145-0,335}{0,13-0,06} \right) \right]$$

$$W_C = 4,42 \frac{Kg}{m^2h}$$

### 3.1.2.2. Tiempo anticrítico

Para calcular el tiempo de secado en condiciones constantes, se lo hace a partir de la Ec.

1.6.2.6.-1

$$\theta_a = \frac{S}{A} \left[ -\frac{X_i - X_c}{W_c} \right]$$

**Datos:**

$$W_C = 4,42 \frac{Kg}{m^2h}$$

$$S = 1,923Kg$$

$$A = 1,182m^2$$

$$x_{inicial} = 0,335$$

$$x_{critica} = 0,145$$

**Solución:**

$$\theta_a = \frac{S}{A} \left[ \frac{X_i - X_c}{W_c} \right]$$

$$\theta_a = \frac{1,923}{1,182} \left[ \frac{0,335 - 0,145}{4,42} \right]$$

$$\theta_a = 0,07h$$

### 3.1.2.3. Período Decreciente o Poscrítico

#### 3.1.2.3.1. Método de integración gráfica

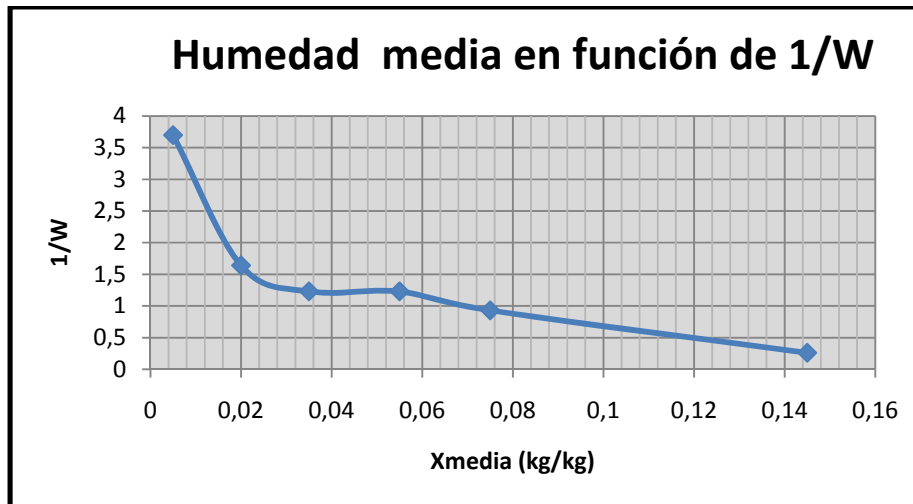
Para este período de velocidad decreciente tendremos una humedad crítica  $X_c = 0.145$  hasta una humedad final o de equilibrio de  $X^* = 0.005$ . Se elabora la siguiente tabla:

**TABLA 3.1.2.3.1-1**

**HUMEDAD X EN FUNCIÓN DE 1/W**

Xmedia (kg/kg)	Velocidad de Secado W (kg/hm2)	1/W
0,145	3,79	0,26
0,075	1,08	0,93
0,055	0,81	1,23
0,035	0,81	1,23
0,02	0,61	1,64
0,005	0,27	3,7

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013



FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

**GRAF. 3.1.2.3.1-1 SE GRAFICA LAS VARIABLES DE 1/W EN FUNCIÓN DE XMEDIA Y SE DETERMINA EL ÁREA BAJO LA CURVA**

### Cálculo del área total

$$A_T = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9 + A_{10} \quad \text{Ec.3.1.2-1}$$

### Cálculo de áreas individuales

#### Área 1

$$A_1 = \frac{b \times h}{2}$$

$$A_1 = \frac{0,015 \times 2,1}{2}$$

$$A_1 = 0,0155m^2$$

#### Área 2

$$A_2 = b \times h$$

$$A_2 = 0,015 \times 1,64$$

$$A_2 = 0,025m^2$$



**Área 3**

$$A_3 = 3,08 \times 10^{-3} m^2$$

**Área 4**

$$A_4 = 0,043 m^2$$

**Área 5**

$$A_5 = 3 \times 10^{-3} m^2$$

**Área 6**

$$A_6 = 0,019 m^2$$

**Área 7**

$$A_7 = 9,24 \times 10^{-3} m^2$$

**Área 8**

$$A_8 = 0,0215 m^2$$

**Área 9**

$$A_9 = 3,24 \times 10^{-3} m^2$$

**Área 10**

$$A_{10} = 7,02 \times 10^{-3} m^2$$

1) Sustituyendo en la Ec. Ec.3.1.2-1 queda de la siguiente manera:

$$A_T = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7 + A_8 + A_9 + A_{10}$$

$$A_T = 0,0155 m^2 + 0,025 m^2 + 3,08 \times 10^{-3} m^2 + 0,043 m^2 + 3 \times 10^{-3} m^2 + 0,019 m^2 + 9,24 \times 10^{-3} m^2 + 0,0215 m^2 + 3,24 \times 10^{-3} m^2 + 7,02 \times 10^{-3} m^2$$

$$A_T = 0,149 m^2$$

Sustituyendo en la Ec. 1.6.2.7.-1 se tiene que:

$$\theta_P = \frac{S}{A} \int_{Xf}^{Xi} \frac{dX}{W}$$

$$\theta_P = \frac{1,923}{1,182} (0,149)$$

$$\theta_P = 0,242 h$$

### 3.1.2.4. Tiempo total de secado

Sustituyendo en la Ec. 1.6.2.5.-1 se halla el tiempo total de secado que va a ser igual a:

$$\theta_T = \theta_a + \theta_p$$

**Datos:**

$$\theta_a = 0,07h$$

$$\theta_p = 0,242h$$

**Solución:**

$$\theta_T = \theta_a + \theta_p$$

$$\theta_T = 0,07 + 0,242$$

$$\theta_T = 0,312h$$

### 3.1.2.5. Velocidad decreciente

Para encontrar la velocidad decreciente se utiliza la Ec. 1.6.2.4.-1

$$W_D = \frac{S}{A} \left[ -\frac{X_c - X^*}{\Delta\theta} \right]$$

**Datos:**

$$x_c = 0,145$$

$$x^* = 0,005$$

$$\Delta\theta = 0,242h$$

**Solución:**

$$W_D = \frac{S}{A} \left[ -\frac{X_c - X^*}{\Delta\theta} \right]$$

$$W_D = \frac{1,923}{1,182} \left[ \frac{0,145 - 0,005}{0,242} \right]$$

$$W_D = 0,941$$

### 3.1.2.6. Velocidad total de secado

Para hallar la velocidad total de secado se tiene la Ec. 1.6.2.5-1

$$W_T = W_C + W_D$$

**Datos:**

$$W_C = 4,42$$

$$W_D = 0,941$$

**Solución:**

$$W_T = W_C + W_D$$

$$W_T = 4,64 + 0,941$$

$$W_T = 5,36 \frac{Kg}{m^2h}$$

### 3.1.2.3.2. Método analítico

Tomando en cuenta la línea de secado entre los puntos C y D de carácter lineal, se puede calcular el tiempo de secado entre los intervalos  $x_c = 0,145$  y  $x_D = 0,075$  se tiene la Ec.1.6.2.7.-2

$$\theta_P = \frac{S}{A} \frac{X_c - X_D}{W_c - W_D} \ln \frac{W_c}{W_D}$$

**Datos:**

$$W_C = 4,42$$

$$W_D = 0,941$$

$$X_f = 0,005$$

$$X_C = 0,145$$

**Solución:**

$$\theta_P = \frac{S}{A} \frac{X_C - X_D}{W_C - W_D} \ln \frac{W_C}{W_D}$$

$$\theta_P = \frac{1,923}{1,182} \left( \frac{0,145 - 0,075}{4,42 - 0,941} \right) \ln \frac{4,42}{0,941}$$

$$\theta_P = 0,051 \text{ h}$$

El tiempo de secado entre D y E se determina gráficamente entre los límites de 0,075 y 0,005 y el resultado del área es 0,11 y el tiempo es 0,177

Por este método el tiempo de secado poscrítico da:

$$\theta_P = 0,177 + 0,051$$

$$\theta_P = 0,228 \text{ h}$$

El valor del tiempo obtenido por este método se considera aproximado al valor encontrado por el método gráfico.

### 3.1.3. Cálculos para el diseño del secador rotatorio

#### 3.1.3.1. Balance de masa



FIG. 3.1.3.1-1 BALANCES DEL SECADOR ROTATORIO

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

**Datos:**

$$X_i: 0,28 - 28 \%$$

$$X_f: 0,01 - 1 \%$$

$$t_2: 115 \text{ C}$$

$$t_1: 45 \text{ C}$$

$$t_{S1}: 12 \text{ C}$$

$$t_{S2}: 60 \text{ C}$$

$$t_a: 20 \text{ C}$$

$$t_w: 15 \text{ C}$$

$$C_{PS} = 0,25 \text{ kcal/kgC (Capacidad Calorífica del PET)}$$

$$C_{PL} = 1 \text{ kcal/kgC (Capacidad Calorífica del líquido)}$$

$$X_1 S_1 - G Y_2 = X_2 S_2 - G Y_1$$

$$0,28(10) - (0,009)G = 0,01(10) - G Y_1$$

$$2,8 - 0,009G = 0,1 - G Y_1$$

$$G Y_1 - 0,009G = 0,1 - 2,8$$

$$G(Y_1 - 0,009) = -2,7$$

$$G = \frac{-2,7}{(Y_1 - 0,009)} \quad \text{Ec. 3.1.3.1-1}$$

### 3.1.3.2. Balance de Energía.

Al utilizar la carta psicométrica teniendo como temperatura ambiente  $t_a = 20 \text{ C}$  y temperatura húmeda  $t_w = 15 \text{ C}$  se encontró que el aire ingresa al secador con una humedad de  $Y_2 = 0.009$ .

#### 3.1.3.2.1. Cálculos de las Entalpías del sólido.

##### Entalpía de Entrada

Para calcular la entalpía del sólido a la entrada se utiliza la Ec. 1.6.2.7.1-1

$$h_1 = (C_{PS} + C_{PL} X_i) t_{S1}$$

##### Datos:

$$C_{PS} = 0,25 \text{ kcal/kgC (Capacidad Calorífica del PET)}$$

$$C_{PL} = 1 \text{ kcal/kgC (Capacidad Calorífica del líquido)}$$

$$X_i = 0,28$$

$$t_{S1} = 12 \text{ C}$$

**Solución:**

$$h_1 = (C_{PS} + C_{PL}X_i)t_{S1}$$

$$h_1 = [0,25 + 1(0,28)]12 \frac{kcal}{kgC} \cdot C$$

$$h_1 = 6,4 \frac{kcal}{kg}$$

### Entalpía de Salida

Para calcular la entalpía del sólido a la entrada se utiliza la Ec. 1.6.2.7.1-1

$$h_2 = (C_{PS} + C_{PL}X_f)t_{S2}$$

**Datos:**

$C_{PS} = 0,25 \text{ kcal/kgC}$  (Capacidad Calorífica del PET)

$C_{PL} = 1 \text{ kcal/kgC}$  (Capacidad Calorífica del líquido)

$X_f = 0,01$

$t_{S2} = 60C$

**Solución:**

$$h_2 = (C_{PS} + C_{PL}X_f)t_{S2}$$

$$h_2 = [0,25 + 1(0,01)]60 \frac{kcal}{kgC} \cdot C$$

$$h_2 = 15,6 \frac{kcal}{kg}$$

### 3.1.3.2.2. Cálculos de las Entalpías del aire.

#### Entalpía a la entrada

Para calcular la entalpía del aire a la entrada se utiliza la Ec. 1.6.2.8.1.-1

$$H_2 = (0,24 + 0,46y_2)t_2 + 597,2y_2$$

**Datos:**

$$y_2 = 0.009$$

$$t_2 = 115C$$

**Solución:**

$$H_2 = (0,24 + 0,46y_2)t_2 + 597,2y_2$$

$$H_2 = [0,24 + 0,46(0,009)]115 + 597,2(0,009)$$

$$H_2 = 33,451 \frac{kcal}{kg}$$

**Entalpía a la Salida**

Para calcular la entalpía del aire a la salida de utiliza la Ec. 1.6.2.8.2-1

$$H_1 = (0,24 + 0,46y_1)t_1 + 597,2y_1$$

**Datos:**

$$t_1 = 45C$$

**Solución:**

$$H_1 = (0,24 + 0,46y_1)45 + 597,2y_1$$

$$H_1 = 10,8 + 20,7y_1 + 597,2y_1$$

$$H_1 = 10,8 + 617,9y_1$$

Después de haber hallado  $y_1 = 0,045$  se reemplaza este valor y queda:

$$H_1 = 10,8 + 617,9(0,045)$$

$$H_1 = 38,61 \frac{kcal}{kg}$$

Para el cálculo de ésta entalpía se necesita de la humedad del aire a la salida, a continuación se encontrará tal valor mediante la aplicación de los balances de masa y energía simultáneamente, éstos además indicarán el flujo másico o caudal el aire.

$$h_1 S_1 - GH_2 = h_2 S_2 - GH_1 + q$$

Reemplazando  $H_1$  por  $10,8+617,9Y_1$  se tiene:

$$6,4(10) - 33,45G = 15,6(10) - (10,8 + 617,9Y_1)G + q$$

Si se estima una pérdida de calor del 10% de la entalpía del aire a la entrada se tendrá  $q = G \cdot 33,45(0,10)$  y esto se reemplaza en el balance:

$$64 - 33,45G = 156 - 10,8G - 617,9GY_1 + 3,345G$$

$$617,9GY_1 - 33,45G + 10,8G - 3,345G = 156 - 64$$

$$617,9GY_1 - 25,99G = 92$$

$$G(617,9Y_1 - 25,99) = 92$$

$$G = \frac{92}{(617,9Y_1 - 25,99)} \quad \text{Ec. 3.1.3.2-1}$$

Al igualar la Ec. 3.1.3.1-1 del balance de masa con la Ec. 3.1.3.2-1 que se tiene en el balance de energía queda:

$$\frac{-2,7}{(Y_1 - 0,009)} = \frac{92}{(617,9Y_1 - 25,99)}$$

$$-2,7(617,9Y_1 - 25,99) = 92(Y_1 - 0,009)$$

$$-1668,33Y_1 + 70,173 = 92Y_1 - 0,828$$

$$-1576,33Y_1 = -70,998$$

$$Y_1 = \frac{-70,998}{-1576,33}$$

$$Y_1 = 0,045$$

El valor de  $Y_1 = 0,045$  se reemplaza en la Ec. 3.1.3.2-1 y queda:

$$G = \frac{92}{(617,9Y_1 - 25,99)}$$



$$G = \frac{92}{(617,9(0,045) - 25,99)}$$

$$G = 50,67 \frac{\text{Kg de aire}}{\text{hora}}$$

$$G = 0,8445 \frac{\text{Kg de aire}}{\text{minuto}}$$

### 3.1.4. Cálculos Adicionales

#### 3.1.4.1. Cálculo de la cantidad de calor

##### 3.1.4.1.1. Cantidad de calor perdido

Utilizando la Ec. 1.6.2.9-1 se obtiene el valor del calor perdido al exterior estimando un porcentaje del 10% de la entalpia total del aire a la entrada:

$$q = G * H_2 * P_e$$

**Datos:**

$$G = 50,67 \frac{\text{Kg de aire seco}}{\text{hora}}$$

$$H_2 = 33,451 \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$P_e = 10\%$$

**Solución:**

$$q = G * H_2 * P_e$$

$$q = 50,67 * 33,451 * 0,10 \frac{\text{Kg}}{\text{hora}} \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$$

$$q = 169,5 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$q = 2,83 \frac{\text{Kcal}}{\text{min}}$$

### 3.1.4.1.2. Cantidad de calor necesario para calentar el material.

Aplicando la Ec. 1.6.2.9-2 se tiene:

$$Q = mC_{PS}\Delta T$$

**Datos:**

$$m = 1,077 \text{ kg}$$

$$C_{PS} = 0,25 \frac{\text{Kcal}}{\text{KgC}}$$

$$\Delta T = (60 - 12)C = 48 C$$

**Solución:**

$$Q = mC_{PS}\Delta T$$

$$Q = 1,077 * 0,25 * 48 \text{ kg} \frac{\text{Kcal}}{\text{KgC}} C$$

$$Q = 3,23 \text{ Kcal}$$

### 3.1.4.2. Cálculo del aire necesario que debe suministrar el ventilador.

Despejando  $\delta_{\text{aire}} = \frac{m_{as}}{V_{\text{aire}}}$  se tiene la Ec. 1.6.2.10-1:

$$V_{\text{aire}} = \frac{m_{as}}{\delta_{\text{aire}}}$$

**Datos:**

$$m_{as} = 0,845 \text{ kg}$$

A 150 C la densidad es 0,834 y a 100 C es 0,946 para obtener la densidad a 115 C se procede a interpolar:

$$\frac{150 - 100}{150 - 115} = \frac{0,834 - 0,946}{0,834 - \delta}$$

$$50(0,834 - \delta) = -0,112(150 - 115)$$

$$41,7 - 50\delta = -16,8 + 12,88$$

$$-50\delta = -45,62$$

$$\delta = \frac{-45,62}{-50}$$

$$\delta = \frac{-45,62}{-50}$$

$$\delta_{aire} = 0,91 \frac{kg}{m^3}$$

**Solución:**

$$V_{aire} = \frac{m_{as}}{\delta_{aire}}$$

$$V_{aire} = \frac{0,845}{0,91} kg \frac{m^3}{kg}$$

$$V_{aire} = 0,93 m^3$$

### 3.1.4.3. Cálculo del caudal del aire.

Aplicando la Ec. 1.6.2.11-1 se tiene:

$$Q_{aire} = \frac{V_{aire}}{t}$$

**Datos:**

$$V_{aire} = 0,93 m^3$$

$$t = 7,8 min$$

**Solución:**

$$Q_{aire} = \frac{V_{aire}}{t}$$

$$Q_{aire} = \frac{0,93 m^3}{7,8 min}$$

$$Q_{aire} = 0,12 \frac{m^3}{min}$$

#### 3.1.4.4. Cálculo del rendimiento del equipo.

Para obtener el valor del rendimiento del secador rotatorio se utiliza el peso del sólido seco y el peso del sólido húmedo; aplicando la Ec. 1.6.2.12-1:

$$R = \frac{PET\ seco}{PET\ húmedo} * 100$$

**Datos:**

$$PET\ seco = 1,974\ kg$$

$$PET\ húmedo = 2,462\ kg$$

**Solución:**

$$R = \frac{PET\ seco}{PET\ húmedo} * 100$$

$$R = \frac{2}{2,4} * 100$$

$$R = 83,3\ \%$$

#### 3.1.4.5. Cálculo de la eficiencia del equipo

Para obtener el valor de la eficiencia del secador rotatorio se utiliza la Ec. 1.6.2.13-1:

$$E = \frac{q}{Q} * 100$$

**Datos:**

$$q = 2,83\ kcal$$

$$Q = 3,23\ kcal$$

**Solución:**

$$E = \frac{2,83}{3,23} * 100$$

$$E = 87,6\ \%$$

## 3.2. RESULTADOS

### 3.2.1. RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS DE INGENIERÍA

TABLA 3.2.1-1

RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS PARA OBTENER LA VELOCIDAD DE SECADO PARA LOS DIFERENTES PERÍODOS. (A 115 C)

$W_c \left( \frac{Kg}{m^2 h} \right)$	$W_D \left( \frac{Kg}{m^2 h} \right)$	$W_T \left( \frac{Kg}{m^2 h} \right)$
4,42	0,941	5,361

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

TABLA 3.2.1-2

RESULTADOS PARA OBTENER EL TIEMPO DE SECADO PARA LOS DIFERENTES PERÍODOS

$\theta_a (h)$	$A_T$ por método gráfico ( $m^2$ )	$\theta_p (h)$		$\theta_T (\theta_a + \theta_p) (h)$
0,07	0,149	METODO GRAFICO	0,242	0,312
		METODO ANALITICO	0,228	0,3

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

TABLA 3.2.1-3

RESULTADOS DEL BALANCE DE ENERGÍA

Entalpia del solido $\left( \frac{kcal}{kg} \right)$		Entalpia del aire $\left( \frac{kcal}{kg} \right)$		Humedad del aire a la salida	Flujo másico del aire. $\left( \frac{Kg \text{ de aire}}{min} \right)$
$h_1$	$h_2$	$H_1$	$H_2$	$Y_1$	$G$
6,4	15,6	38,61	33,451	0,045	0,8445

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

**TABLA 3.2.1-4**

**RESULTADOS DE LOS CÁLCULOS ADICIONALES**

q (Kcal)	Q (Kcal)	$V_{aire}$ ( $m^3$ )	$Q_{aire}$ ( $m^3/min$ )	R (%)	E (%)	n (muestras)	PPC <sub>PET</sub> (Kg/habitante-día)
<b>2,83</b>	3,23	0,93	0,12	83,3	87,6	11	0,0035

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

**TABLA 3.2.1-5**

**RESULTADOS DE LA HUMEDAD A DIFERENTES TEMPERATURAS**

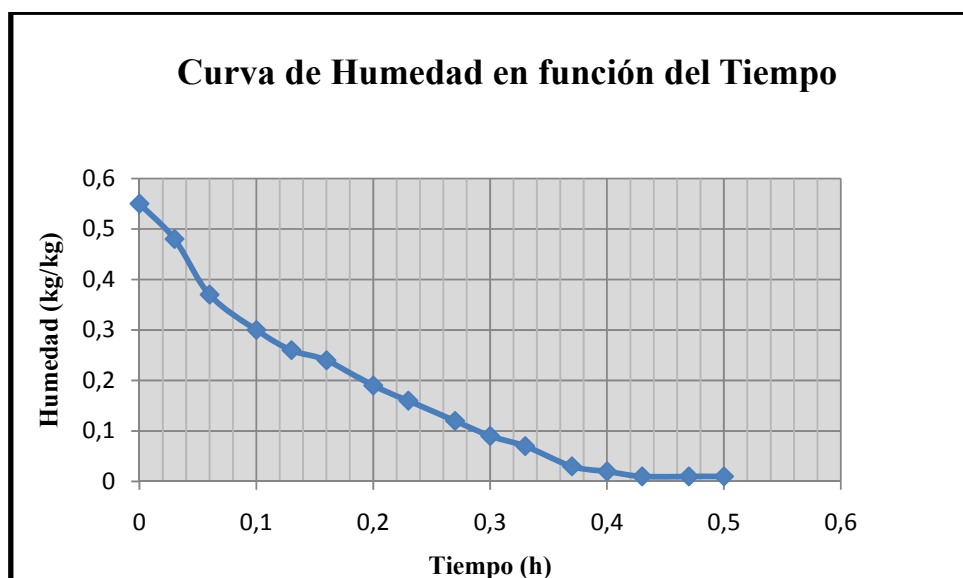
Humedad (kg/kg) (90C)	Humedad (kg/kg) (115C)	Humedad (kg/kg) (160C)
0,55	0,56	0,54
0,48	0,39	0,3
0,37	0,28	0,08
0,3	0,21	0,02
0,26	0,08	0,01
0,24	0,07	0,01
0,19	0,04	
0,16	0,03	
0,12	0,01	
0,09	0,01	
0,07		
0,03		
0,02		
0,01		
0,01		
0,01		

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

### 3.2.2. RESULTADOS DE LAS CURVAS DE SECADO

- A 90 C

La humedad disminuye pero en mayor tiempo, en este caso de 0,5 h. Además en la curva de velocidad de secado se puede notar que la velocidad de secado es inestable.



FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

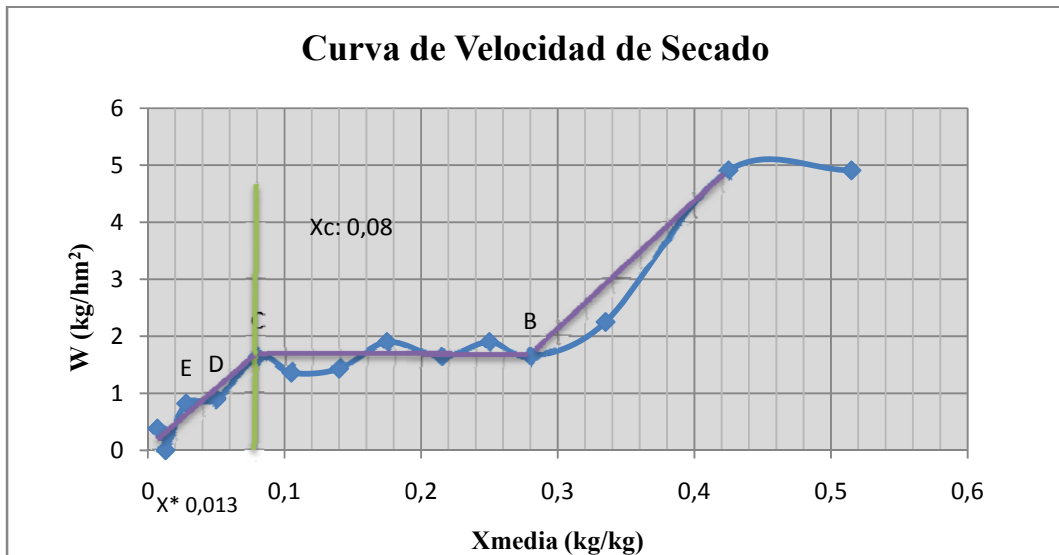
GRAF. 3.2.2-1 CURVA DE HUMEDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

**TABLA 3.2.2-1**

**RESULTADOS DE LA CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO**

<b>Xmedia (kg/kg)</b>	<b>Velocidad de Secado W (kg/hm<sup>2</sup>)</b>
0,515	4,91
0,425	4,91
0,335	2,25
0,28	1,64
0,25	1,9
0,215	1,64
0,175	1,9
0,14	1,43
0,105	1,36
0,08	1,64
0,05	0,89
0,028	0,82
0,013	0
0,013	0,25
0,007	0,38

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013



FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

**GRAF. 3.2.2-2 CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO**

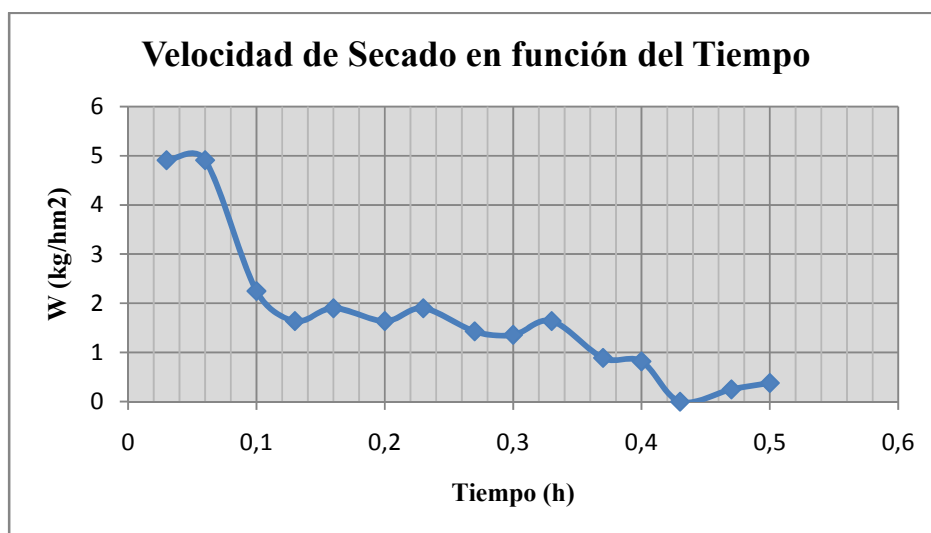


**TABLA 3.2.2-2**

**RESULTADOS DE LA CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCION DEL TIEMPO**

Tiempo (h)	Velocidad de Secado W (kg/hm <sup>2</sup> )
0,03	4,91
0,06	4,91
0,1	2,25
0,13	1,64
0,16	1,9
0,2	1,64
0,23	1,9
0,27	1,43
0,3	1,36
0,33	1,64
0,37	0,89
0,4	0,82
0,43	0
0,47	0,25
0,5	0,38

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

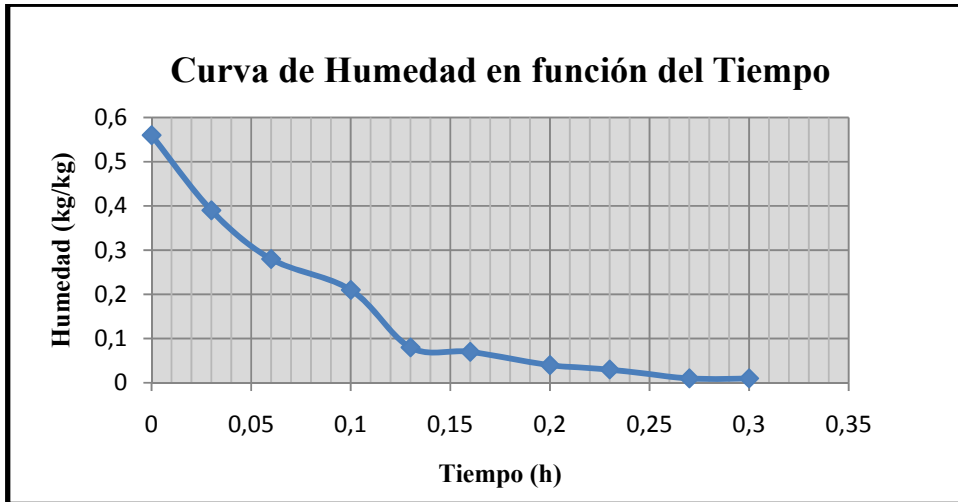


FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

**GRAF.3.2.2-3 VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**

- A 115 C

La velocidad de secado se presenta como una curva típica de secado y la humedad disminuye progresivamente con un tiempo de 0,3 h.



FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

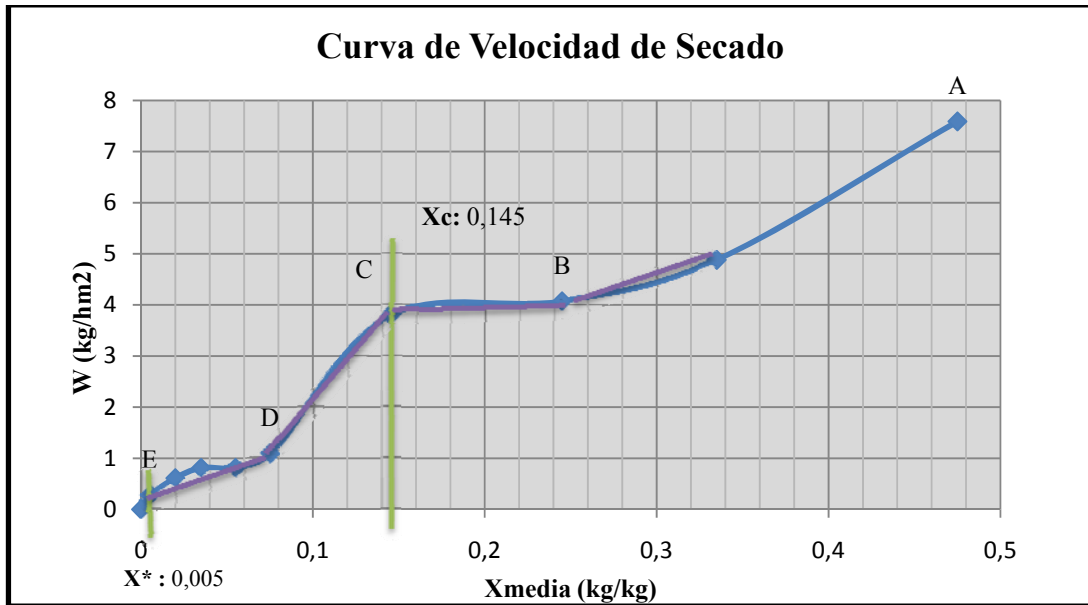
**GRAF. 3.2.2-4 CURVA DE HUMEDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**

**TABLA 3.2.2-3**

**RESULTADOS DE LA CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO**

Xmedia (kg/kg)	Velocidad de Secado W (kg/hm <sup>2</sup> )
0,475	7,59
0,335	4,88
0,245	4,07
0,145	3,79
0,075	1,08
0,055	0,81
0,035	0,81
0,02	0,61
0,005	0,27
0	0

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013



FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

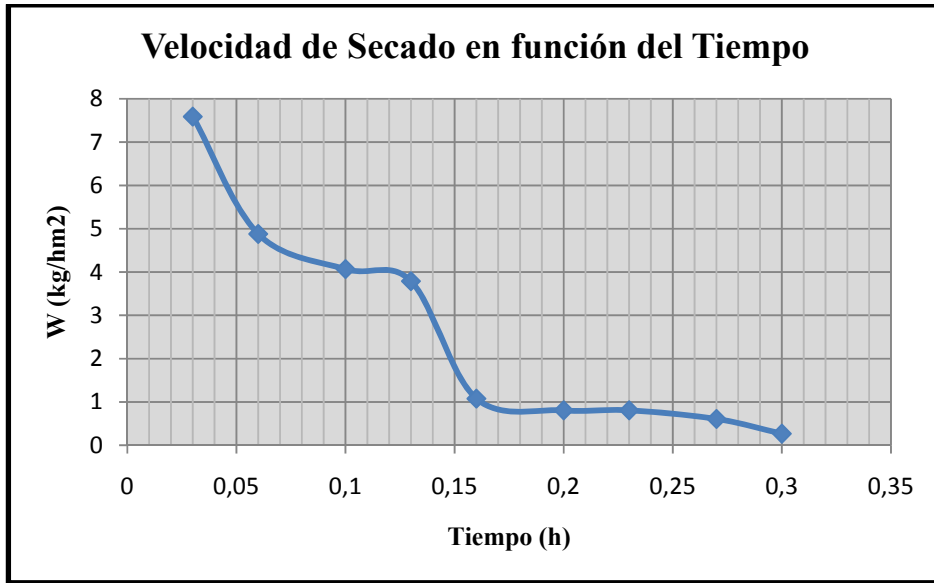
**GRAF. 3.2.2-5 CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO**

**TABLA 3.2.2-4**

**RESULTADOS DE LA CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCION DEL TIEMPO**

Tiempo (h)	Velocidad de Secado W (kg/hm <sup>2</sup> )
0,03	7,59
0,06	4,88
0,1	4,07
0,13	3,79
0,16	1,08
0,2	0,81
0,23	0,81
0,27	0,61
0,3	0,27

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

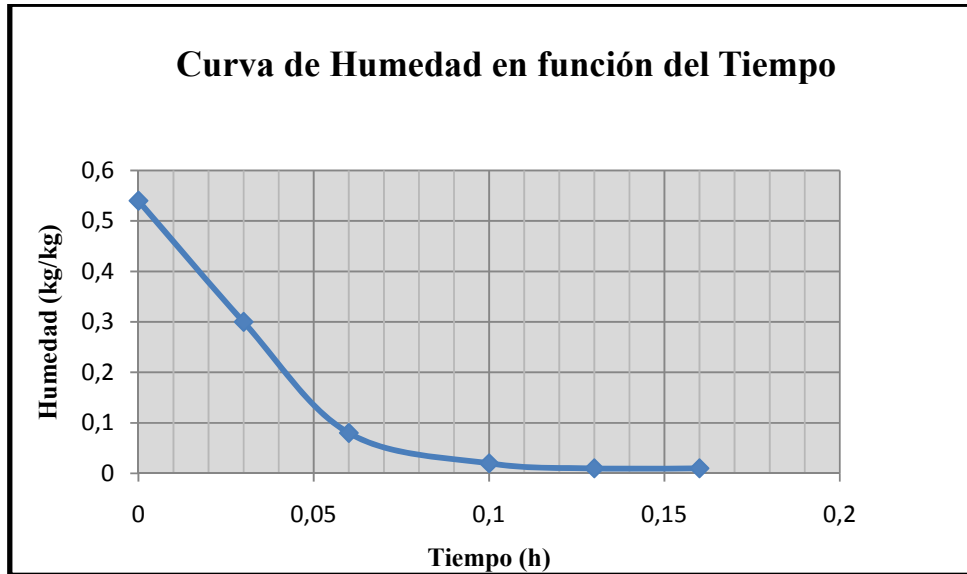


FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

**GRAF. 3.2.2-6 VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**

- A 160 C

La humedad disminuye rápidamente pero el plástico tiende a perder sus propiedades.



FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

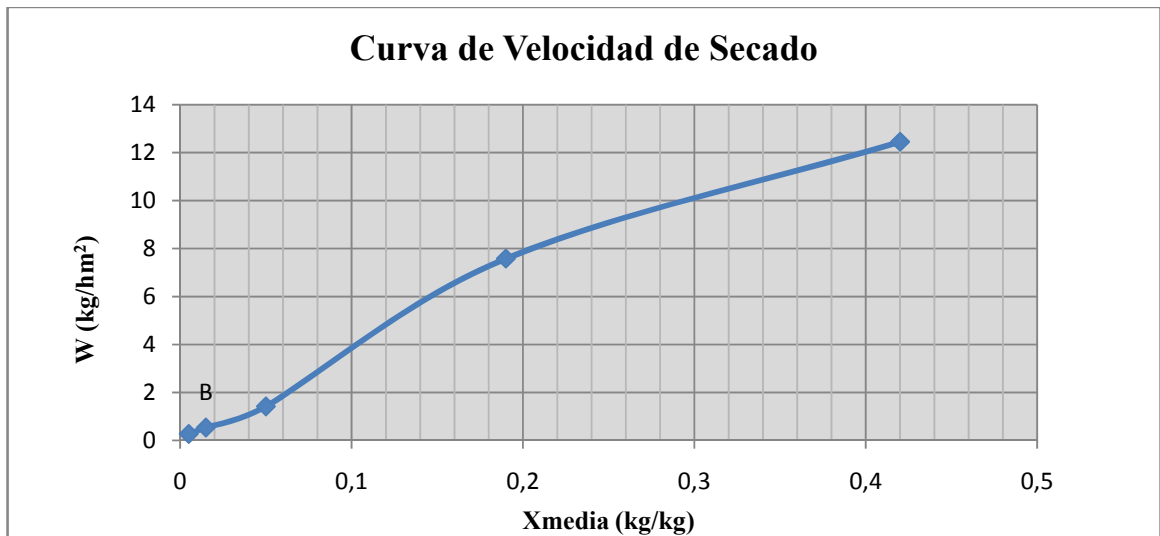
**GRAF. 3.2.2-7 CURVA DE HUMEDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**

**TABLA 3.2.2-5**

**RESULTADOS DE LA CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO**

Xmedia (kg/kg)	Velocidad de Secado W (kg/hm <sup>2</sup> )
0,42	12,45
0,19	7,58
0,05	1,42
0,015	0,54
0,005	0,27

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013



FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

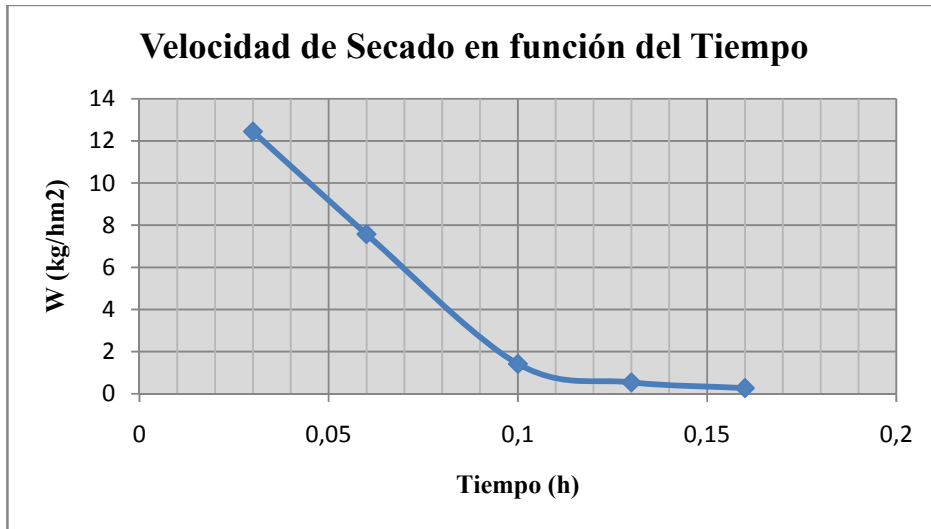
**GRAF. 3.2.2-8 CURVA DE LA VELOCIDAD DE SECADO**

**TABLA 3.2.2-6**

**RESULTADOS DE LA CURVA DE VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCION DEL TIEMPO**

Tiempo (h)	Velocidad de Secado W (kg/hm <sup>2</sup> )
0,03	12,45
0,06	7,58
0,1	1,42
0,13	0,54
0,16	0,27

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013



FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

**GRAF. 3.2.2-9 VELOCIDAD DE SECADO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO**

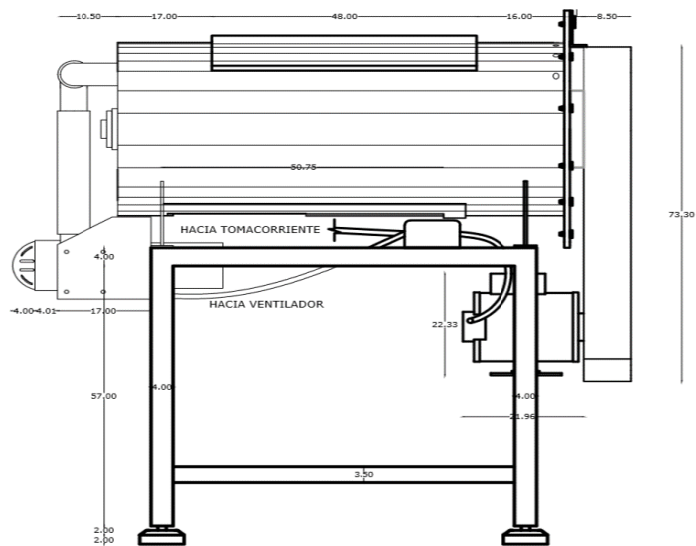
### 3.3. PROPUESTA

**CUADRO 3.3-1**

**HOJA TÉCNICA**

	Material	Dimensiones
Cilindro	Acero Inoxidable (AISI 304)	Longitud: 80 cm
		Diámetro: 38 cm
		Volumen: 90 L
		Capacidad: 10 Kg/h
Motor eléctrico	Sistema de encendido manual	Potencia: ½ HP (373 W)
		Voltaje: 110 V
Poleas (Control de Velocidad)		Parte Superior: 10 plg
		Parte Inferior: 1 plg
Ventilador	Sistema de encendido manual	Velocidad: 3600 RV
Fuente de Calor	Sistema de encendido manual	Temperatura: 115 C
	GLP	
	Válvula Industrial	

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013



FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

**FIG. 3.3-1 SECADOR TOTATORIO**



### 3.3.1. REQUERIMIENTOS PRESUPUESTARIOS

#### 3.3.1.1. ANÁLISIS DE COSTOS

##### 3.3.1.1.1. RECURSOS MATERIALES

**TABLA 3.3.1.1.1-1**  
**RECURSOS MATERIALES**

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO UNIDAD	TOTAL (\$)
Motor 1/2 Hp	1	70	70
Plancha de acero inoxidable	4	200	800
Tubo de acero inoxidables	3	50	150
Ventilador 3600RV	1	30	30
Pernos y tuercas	8	0,50	4
Botellas plásticas (kg)	10	0,90	9
Lija	4	0,8	3,2
		<b>TOTAL</b>	<b>1066,2</b>

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

##### 3.3.1.1.2. RECURSOS HUMANOS

**TABLA 3.3.1.1.2-1**  
**RECURSOS HUMANOS**

DENOMINACIÓN	COSTO
Mano de obra para la construcción del equipo	883
Mano de obra para la instalación del sistema eléctrico	60
<b>Total</b>	<b>943</b>

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

### 3.3.1.1.3. RECURSOS TOTALES

TABLA 3.3.1.1.3-1  
RECURSOS TOTALES

ACTIVIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	TOTAL
Transporte			200
Impresiones y copias	1200	0,03	60,5
Empastado	3	7	24
Anillados	8	4	32
Internet	200	0,40	80
Recursos materiales			1066,2
Recursos Humanos			943
		TOTAL	2405,7

FUENTE: ABARCA, A. / ALDAZ, M. Lab. Operaciones Unitarias, 2013

### 3.4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El rol del secador rotatorio en este proceso de producción de escamas PET es de suma importancia ya que se debe extraer la humedad superficial del PET después que éste pasa por un proceso de lavado.

El material obtenido de la lavadora ingresó al secador con una humedad del 28% (0,28) en base seca, valor obtenido mediante los ensayos que se realizaron en el laboratorio y abandona el mismo a una humedad del 1% (0,01) con un tiempo real de secado de 18 min, por lo que el plástico está apto para ingresar a procesarse en el siguiente equipo (extrusor).

Los resultados obtenidos en los diferentes cálculos están en base a una temperatura de operación de 115 C la cual demostró ser la más adecuada en el proceso debido a que al realizar pruebas a una menor temperatura (90 C) el material se seca en mayor tiempo y la velocidad de secado es inestable y al secar el material a una mayor temperatura (160 C) el plástico tiende a perder sus propiedades ya que se excedería el punto de fusión del mismo.

El tiempo poscritico se calculó por el método gráfico (0,242) y por el método analítico (0,228) y se verificó su similitud; se recomienda utilizar el método gráfico debido a que es más exacto.

Por medio de la aplicación de los balances de materia y energía hallamos la cantidad del flujo másico de aire que se debe suministrar al secador con un valor de 50,67 kg/h (0,845 kg/min).

En el secador el aire ingresa con una temperatura de 115 C para dejar el mismo a 45 C observando así que la temperatura del aire disminuye con el paso del tiempo; la temperatura del sólido a la entrada es de 12 C saliendo del secador a 60 C ya que el sólido se va calentando.

## **CAPITULO IV**

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **4.1. CONCLUSIONES.**

- Las variables de proceso como: humedad, entalpías, entre otras; se determinaron mediante ensayos realizados en el laboratorio con una temperatura de operación de 115 C y un flujo de aire de 0,845 kg/min.
- Los tiempos poscríticos establecidos tienen valores que son considerablemente similares teniendo por el método gráfico 0,242 h, y por el método analítico 0,228 h; de esta manera se obtuvo el tiempo total de secado con un valor de 0,3 h.
- El secador rotatorio tiene una capacidad de 10 kg/h, el mismo logró disminuir la humedad desde el 28 % a una humedad del 1%; consta de un cilindro de acero inoxidable con una longitud de 80 cm y un diámetro de 38 cm; para activar las paletas se instaló un motor eléctrico de ½ HP (373 W) de potencia, además el secador consta de un ventilador que trabaja a 3600 RV.
- La validación del equipo, ayudó a cuantificar el rendimiento con 83,3% y la eficiencia con un 87,6%.

## **4.2. RECOMENDACIONES.**

- Antes de manipular el equipo debe instruirse en el manual de operación del mismo, siguiendo correctamente cada uno de los pasos.
- Se debe verificar que la conexión sea a 110 V ya que si existe un voltaje que no es el adecuado podría existir daños en el secador debido a que el motor eléctrico sufriría una sobrecarga.
- Al encender el equipo dejar unos minutos para que el aire se distribuya en todo el secador y así la temperatura se estabilice dentro del mismo antes de ingresar el material a secar.
- Después de utilizar el equipo realizar la respectiva limpieza ya que no debe quedar material esparcido alrededor del mismo que pueda afectar a cualquiera de sus componentes.

# **BIBLIOGRAFÍA**

## CAPÍTULO I

### BIBLIOGRAFÍA

1. **BRITO H.**, Fenómenos de Transporte I: Texto Básico. Ecuador– Riobamba, 2004. Pp. 62-67; 76-77.
2. **BRITO H.**, Operaciones Unitarias: Texto Básico. Ecuador– Riobamba, 2000. Pp. 33 - 36
3. **BROWN, George G.** Operaciones Básicas de la Ingeniería Química. España: Marín S.A., 1965. Pp. 58-62, 73
4. **GEANKOPLIS, C.J.**, Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3<sup>a</sup> ed. México: Editorial Continental, 1998 Pp.450-483, 580, 591
5. **HIMMELBLAU, D.** Balances de Materia y Energía. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, D.F., 1994. Pp. 475-482



6. **KENNET, J.** Termodinámica. 6a. ed. Barcelona: Mc. Graw Hill, 2001. Pp. 468-486.
  
7. **MCCABE, W.L., OTROS.,** Operaciones unitarias en ingeniería química. Traducido del inglés. 4ª ed. Madrid-España: McGraw-Hill, 1998 Pp. 206-214
  
8. **OCON/ TOJO, G.,** Problemas de Ingeniería Química. .2a. ed. Santiago: Chile, Pp. 243. V. 2
  
9. **PERRY, R., GREEN, W.,** Manual del Ingeniero Químico, Trad. del Inglés. 6ª ed. Bogotá – Colombia, Mc Graw-Hill, 2001 Pp. 20-4, 20-5, 20-6, 20-7.
  
10. **TREYBAL, R.E.,** Operaciones de transferencia de masa. Traducido del inglés. 2ª ed. Buenos Aires-Argentina: McGraw-Hill, s.f. Pp. 60-65

## INTERNET

### 11. HISTORIA DEL PET

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

(2013-06-17)

### 12. CLASIFICACIÓN DEL PLÁSTICO

<http://www.oni.escuelas.edu.ar/olimpi2000/santa-fe-norte/reciclandoplasticos/clasificacion.htm>

(2013-06-17)

### 13. PRODUCCIÓN DEL PET

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/pet.html>

(2013-06-18)

### 14. RESISTENCIA QUÍMICA DEL PET

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/05/tabla-resistencia-quimica-del-pet.html>

(2013-06-18)

### 15. RECICLAJE

<http://www.rena.edu.ve/primeratapa/Ciencias/quereciclaje.html>

(2013-06-19)

### 16. RECICLAJE EN EL ECUADOR

<http://www.amchamecuador.org/publicaciones.php?titulo=3355>  
(2013-07-01)

<http://www.metroecuador.com.ec/19603-estado-exige-reciclar-el-plastico-pero-donde.html>  
(2013-07-02)

<http://www.telegrafo.com.ec/economia/item/el-reciclaje-reactiva-la-industria-de-plasticos.html>  
(2013-12-22)

<http://www.hoy.com.ec/noticias-ecuador/ecuador-14-millones-produjo-el-reciclaje-en-2012-579590.html>  
(2013-12-22)

## **17. TIPOS DE RECICLADO**

[http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/reciclado\\_auto/tiposdereciclado.htm](http://www.eis.uva.es/~macromol/curso04-05/reciclado_auto/tiposdereciclado.htm)  
(2013-07-09)

## **18. VELOCIDAD EL AIRE**

[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leip/ortiz\\_a\\_bs/capitulo2.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/ortiz_a_bs/capitulo2.pdf)  
(2013-07-10)

## **19. PROPIEDADES DEL AIRE**

<http://profesormario.files.wordpress.com/apendice>  
(2013-10-14)

## **20. SECADOR ROTATORIO**

<http://ceti-quimica.files.wordpress.com/2010/04/secador-de-horno-rotatorio.ppt>

(2013-07-11)

## **21. CILINDRO**

<http://www.farmingmachine.es/2-7-2-rotating-cylinder-dryer.html>

(2013-08-01)

## **22. MOTOR ELECTRICO**

<http://www.monografias.com/trabajos93/motores-electricos/motores-electricos.shtml>

(2013-08-12)

## **23. SISTEMA DE POLEAS**

<http://elblogdelprofesordetecnologia.blogspot.com/2009/05/sistema-de-poleas-con-correa.html>

(2013-08-12)

## **24. FUENTE DE CALOR**

<http://www.ingcontreras.com.ar/es/equipos/secador-rotativo>

(2013-08-13)

## **25. VENTILADOR**

<http://depa.fquim.unam.mx/procesos/secado/equipo.html>

(2013-08-14)

## **26. PET EN LA INDUSTRIA**

<http://www.buenastareas.com/ensayos/El-Pet/3837778.html>

(2013-06-17)

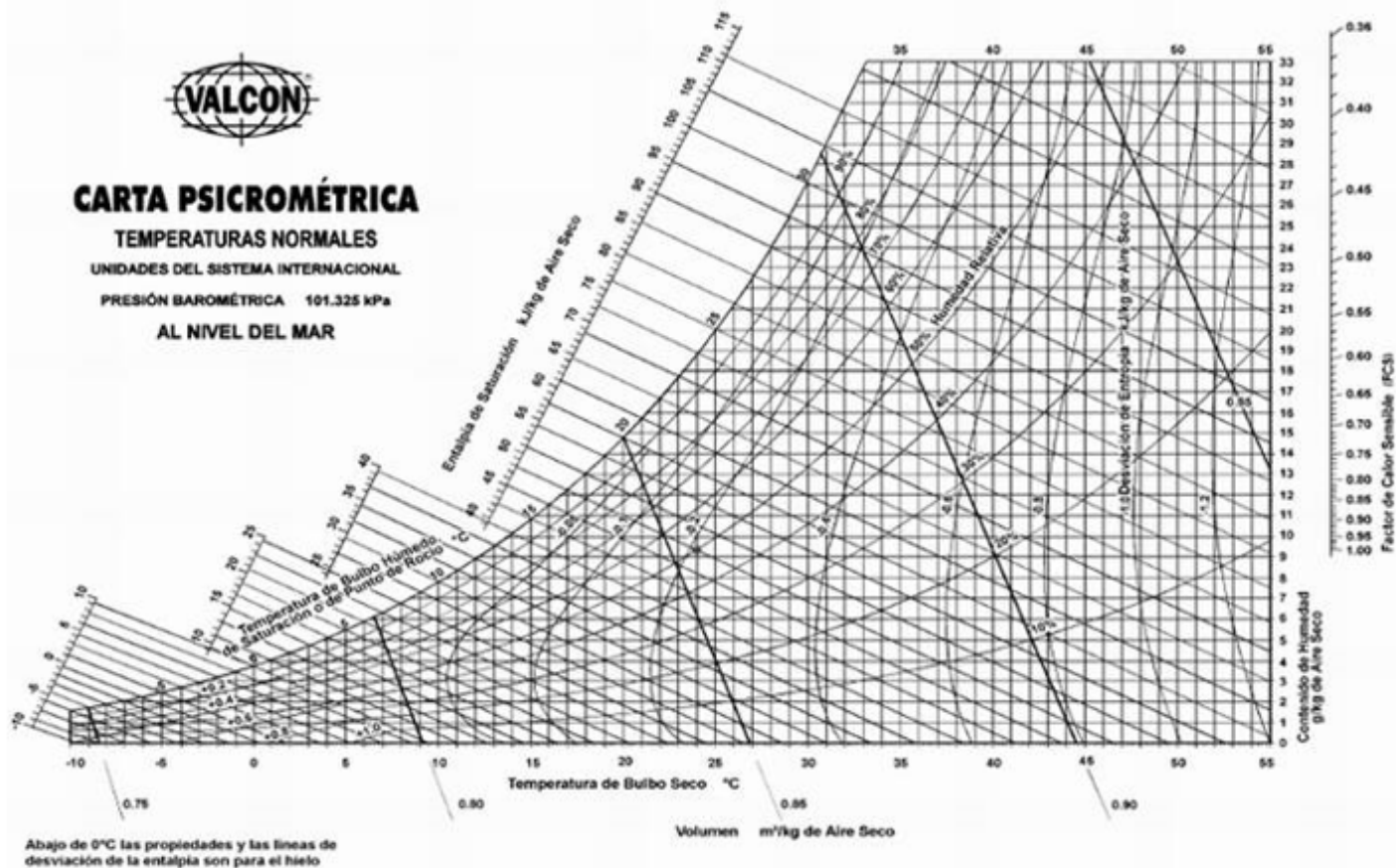
# **ANEXOS**

**ANEXO I  
DIAGRAMA PSICOMÉTRICO**



**CARTA PSICOMÉTRICA**

TEMPERATURAS NORMALES  
UNIDADES DEL SISTEMA INTERNACIONAL  
PRESIÓN BAROMÉTRICA 101.325 kPa  
AL NIVEL DEL MAR



a.

Abajo de 0°C las propiedades y las líneas de desviación de la entalpia son para el hielo

<p align="center"><b>NOTAS</b></p>	<p align="center"><b>CATEGORIA DEL DIAGRAMA</b></p>	<p align="center">ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA</p>	<p align="center">DIAGRAMA PSICOMÉTRICO</p>		
<p>a. CARTA PSICOMÉTRICA b. c.</p>	<p> <input type="checkbox"/> CERTIFICADO      <input type="checkbox"/> POR ELIMINAR  <input type="checkbox"/> APROBADO        <input type="checkbox"/> POR APROBAR  <input checked="" type="checkbox"/> POR CALIFICAR    <input type="checkbox"/> INFORMACIÓN         </p>	<p align="center">POR: ADRIANA ABARCA - MARLON ALDAZ</p>	<p>LÁMINA</p>	<p>ESCALA</p>	<p>FECHA</p>
			<p align="center">1</p>	<p align="center">22-11-2013</p>	

**ANEXO II**  
**PROPIEDADE FÍSICAS DEL AIRE A 1 Atm.**

*Propiedades físicas del aire, a 1 atm.*

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho$ Kg/m <sup>3</sup>	$\mu$ 10 <sup>-4</sup> Kg/ m·seg.	$C_p$ Kcal/ Kg·°C	$k$ Kcal/ mh·°C	$\beta$ 10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>	$\nu$ 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /seg	$\alpha$ 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /seg	$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$	$\rho/\alpha\nu$ 10 <sup>4</sup> m <sup>-1</sup>
0	1,293	1,709	0,238	0,0208	3,66	1,32	1,88	0,702	39,5
50	1,093	1,951	—	0,0240	3,10	1,78	2,57	0,695	21,4
100	0,946	2,175	0,237	0,0272	2,68	2,30	3,37	0,681	12,65
150	0,834	2,385	—	0,0304	2,36	2,86	4,28	0,668	8,02
200	0,746	2,582	0,236	0,0336	2,11	3,46	5,30	0,652	5,35
250	0,675	2,770	—	0,0366	1,97	4,10	6,40	0,640	3,74
300	0,616	2,946	0,235	0,0394	1,74	4,78	7,57	0,632	2,71

a.

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	PROPIEDADE FÍSICAS DEL AIRE A 1 Atm.		
a. PROPIEDADE FÍSICAS DEL AIRE A 1 Atm.	<input type="checkbox"/> CERTIFICADO <input type="checkbox"/> POR ELIMINAR <input type="checkbox"/> APROBADO <input type="checkbox"/> POR APROBAR <input checked="" type="checkbox"/> POR CALIFICAR <input type="checkbox"/> INFORMACIÓN	POR:	LÁMINA	ESCALA	FECHA
b.		ADRIANA ABARCA - MARLON ALDAZ	2		22-11-2013
c.					

**ANEXO III  
COMPONENTES DEL EQUIPO**



**a.**



**b.**

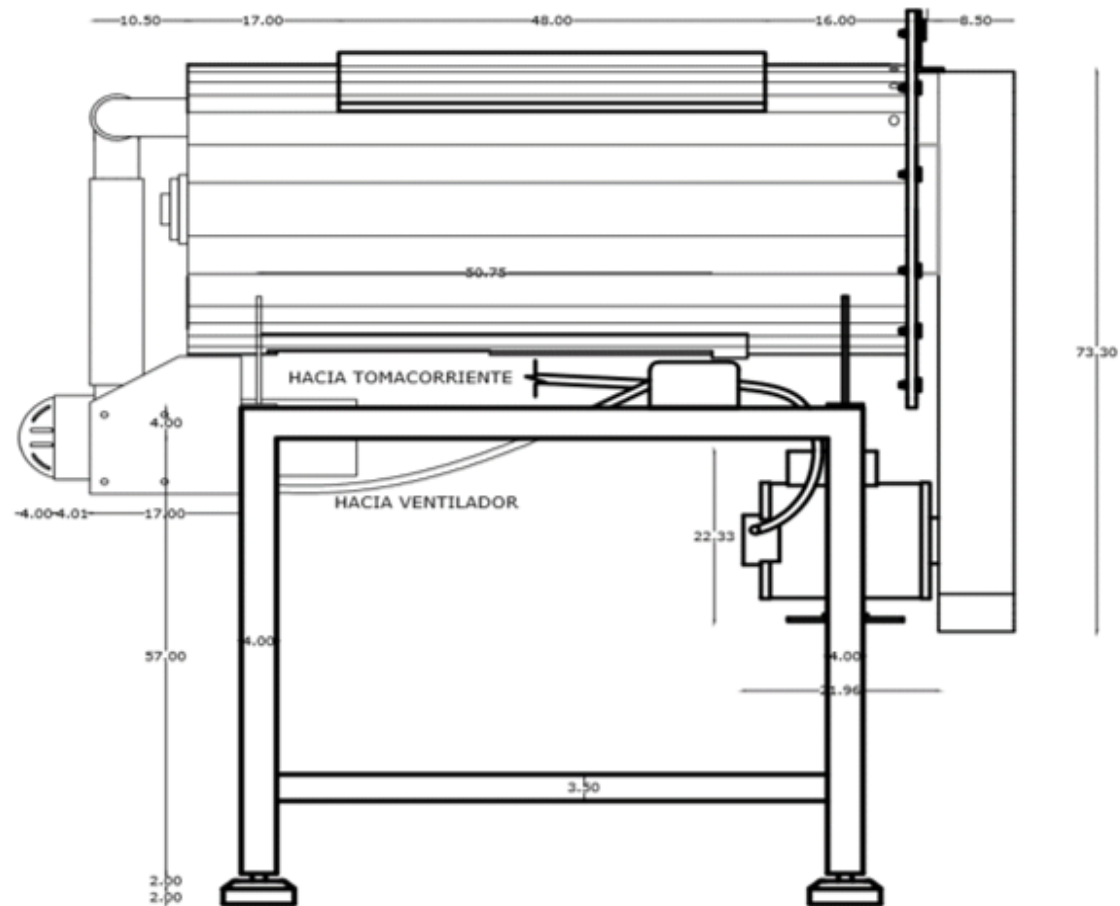


**c.**

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	COMPONENTES DEL EQUIPO		
a. SISTEMA DE ALIMENTACION	<input type="checkbox"/> CERTIFICADO	<input type="checkbox"/> POR ELIMINAR	POR: ADRIANA ABARCA - MARLON ALDAZ	LÁMINA	ESCALA	FECHA
b. SISTEMA DE PALETAS	<input type="checkbox"/> APROBADO	<input type="checkbox"/> POR APROBAR		3		22-11-2013
c. SISTEMA DE ALIMENTACION DE AIRE CALIENTE	<input checked="" type="checkbox"/> POR CALIFICAR	<input type="checkbox"/> INFORMACIÓN				



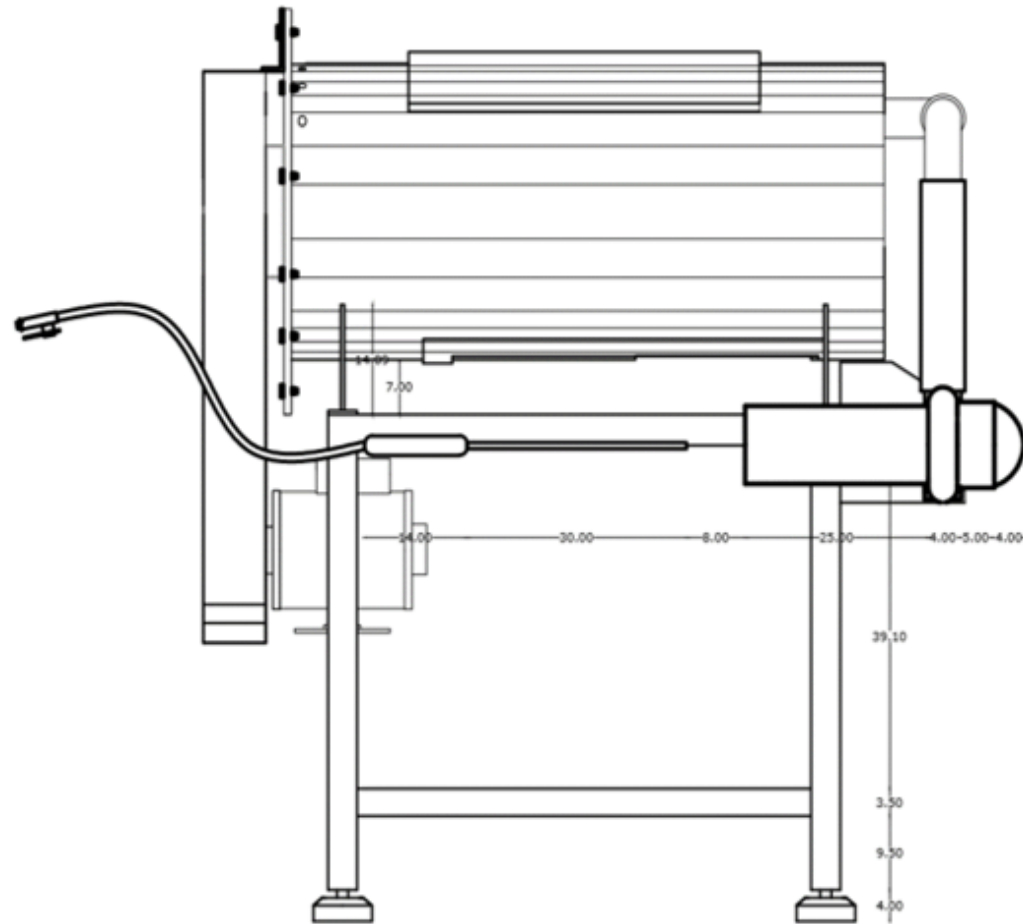
**ANEXO IV  
VISTAS DEL EQUIPO**



**a.**

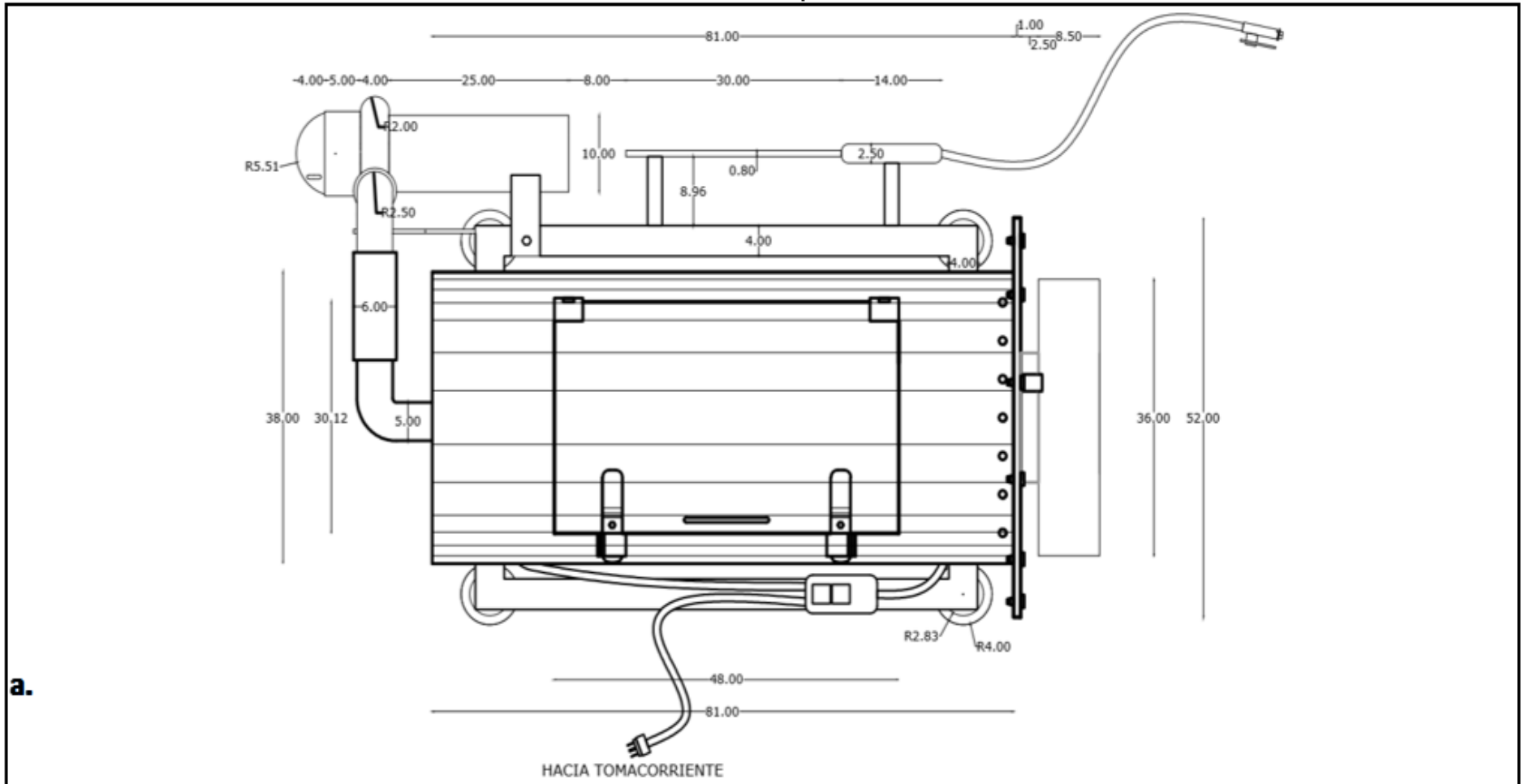
NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO	VISTAS DEL EQUIPO		
a. VISTA FRONTAL	<input type="checkbox"/> CERTIFICADO <input type="checkbox"/> POR ELIMINAR <input type="checkbox"/> APROBADO <input type="checkbox"/> POR APROBAR <input checked="" type="checkbox"/> POR CALIFICAR <input type="checkbox"/> INFORMACIÓN	FACULTAD DE CIENCIAS			
b.		ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA			
c.		POR:			
		ADRIANA ABARCA - MARLON ALDAZ	LÁMINA	ESCALA	FECHA
			4	ESC 1 : 10	22-11-2013

**ANEXO V  
VISTAS DEL EQUIPO**



NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA	ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA	VISTAS DEL EQUIPO		
a. VISTA POSTERIOR	<input type="checkbox"/> CERTIFICADO <input type="checkbox"/> POR ELIMINAR <input type="checkbox"/> APROBADO <input type="checkbox"/> POR APROBAR <input checked="" type="checkbox"/> POR CALIFICAR <input type="checkbox"/> INFORMACIÓN	POR: ADRIANA ABARCA - MARLON ALDAZ	LÁMINA	ESCALA	FECHA
b. c.			5	ESC 1 : 10	22-11-2013

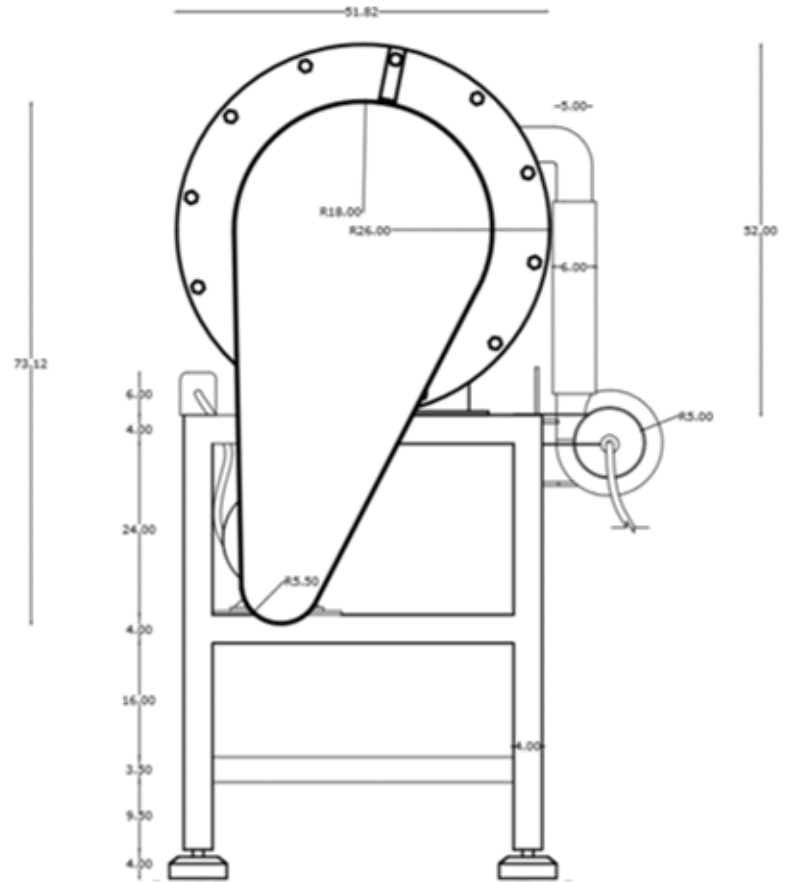
**ANEXO VI  
VISTAS DEL EQUIPO**



**a.**

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		VISTAS DEL EQUIPO			
a. VISTA SUPERIOR	<input type="checkbox"/> CERTIFICADO	<input type="checkbox"/> POR ELIMINAR	POR: ADRIANA ABARCA - MARLON ALDAZ			LÁMINA	ESCALA	FECHA
b.	<input type="checkbox"/> APROBADO	<input type="checkbox"/> POR APROBAR				6	ESC 1 : 10	22-11-2013
c.	<input checked="" type="checkbox"/> POR CALIFICAR	<input type="checkbox"/> INFORMACIÓN						

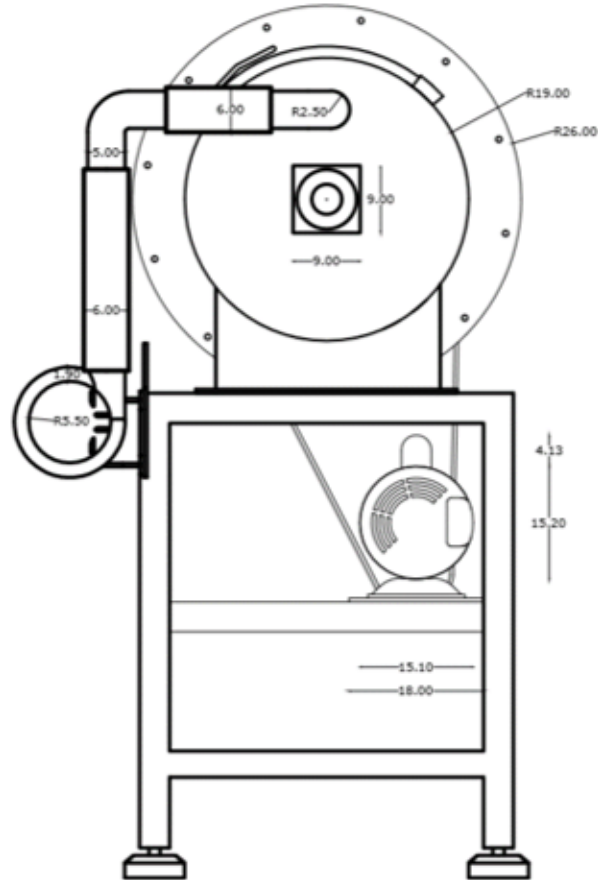
**ANEXO VII  
VISTAS DEL EQUIPO**



**a.**

NOTAS	CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		
a. VISTA LATERAL DERECHA	<input type="checkbox"/> CERTIFICADO	<input type="checkbox"/> POR ELIMINAR	POR: ADRIANA ABARCA - MARLON ALDAZ		
b.	<input type="checkbox"/> APROBADO	<input type="checkbox"/> POR APROBAR			
c.	<input checked="" type="checkbox"/> POR CALIFICAR	<input type="checkbox"/> INFORMACIÓN			
			VISTAS DEL EQUIPO		
			LÁMINA	ESCALA	FECHA
			7	ESC 1 : 10	22-11-2013

**ANEXO VIII  
VISTAS DEL EQUIPO**



**a.**

NOTAS		CATEGORIA DEL DIAGRAMA		ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO FACULTAD DE CIENCIAS ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA		
a.	VISTA LATERAL IZQUIERDA	<input type="checkbox"/> CERTIFICADO	<input type="checkbox"/> POR ELIMINAR	POR:		
b.		<input type="checkbox"/> APROBADO	<input type="checkbox"/> POR APROBAR	ADRIANA ABARCA - MARLON ALDAZ		
c.		<input checked="" type="checkbox"/> POR CALIFICAR	<input type="checkbox"/> INFORMACIÓN	VISTAS DEL EQUIPO		
				LÁMINA	ESCALA	FECHA
				8	ESC 1 : 10	22-11-2013

