



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**OPTIMIZACIÓN DEL USO DE GASES DE CHIMENEA, EN UN  
SECADOR DE FLUJO TRANSVERSAL, EN EL  
ACONDICIONAMIENTO DE FIBRA DE PALMA AFRICANA PARA  
SU USO COMO COMBUSTIBLE DE CALDERA**

**Rodolfo Eduardo Monzón Oxom**

Asesorado por: Ing. Ronal Adolfo Herrera Orozco  
Ing. José Manuel Tay Oroxom

Guatemala, marzo de 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**OPTIMIZACIÓN DE USO DE GASES DE CHIMENEA, EN UN  
SECADOR DE FLUJO TRANSVERSAL, EN EL  
ACONDICIONAMIENTO DE FIBRA DE PALMA AFRICANA PARA  
SU USO COMO COMBUSTIBLE DE CALDERA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR:

**RODOLFO EDUARDO MONZÓN OXOM**

ASESORADO POR: ING. RONAL A. HERRERA OROZCO  
ING. JOSÉ MANUEL TAY OROXOM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO QUÍMICO**

GUATEMALA, MARZO DE 2008

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Inga. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Víctor Gerber de León Morales
EXAMINADOR	Ing. Alberto Arango Sieckavizza
EXAMINADOR	Ing. José Manuel Tay Oroxom
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Varga

**HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**OPTIMIZACIÓN DEL USO DE GASES DE CHIMENEA, EN UN  
SECADOR DE FLUJO TRANSVERSAL, EN EL  
ACONDICIONAMIENTO DE FIBRA DE PALMA AFRICANA PARA  
SU USO COMO COMBUSTIBLE DE CALDERA,**

tema que me fuera aprobado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, el 13 de agosto de 2007.



**RODOLFO EDUARDO MONZÓN OXOM**



Guatemala 9 de enero de 2008

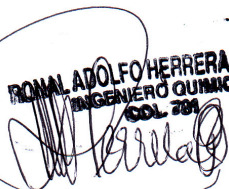
Ingeniero  
Williams Guillermo Álvarez Mejía  
Director  
Escuela de Ingeniería Química

Respetable Ingeniero Álvarez:

Cordialmente me dirijo a usted para informarle que he revisado el informe final de trabajo de graduación titulado: **“ OPTIMIZACIÓN DEL USO DE GASES DE CHIMENEA, EN UN SECADOR DE FLUJO TRANSVERSAL, EN EL ACONDICIONAMIENTO DE FIBRA DE PALMA AFRICANA PARA SU USO COMO COMBUSTIBLE DE CALDERA”**. Desarrollado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Química: Rodolfo Eduardo Monzón Oxom, que se identifica con número de carné: 2003-12497

Por lo tanto, considero que el informe final de trabajo de graduación cumple con los requisitos para su aprobación.

Atentamente,



**RONAL ADOLFO HERRERA OROZCO**  
INGENIERO QUIMICO  
COL. 781

Ing. Ronal Adolfo Herrera Orozco  
Colegiado 781  
ASESOR  
Jefe de Planta  
OLMECA, S.A.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Guatemala, 14 de febrero del 2008  
Ref. EI.Q.0049.2008

Ingeniero  
**Williams Guillermo Álvarez Mejía**  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Presente.

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el Acta TG-003-08-B-IF le informo que reunidos los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del informe final del trabajo de graduación, para optar al título de INGENIERO QUÍMICO al estudiante universitario **RODOLFO EDUARDO MONZON OXOM**, identificado con carné No. **2003-12497**, titulado: **OPTIMIZACION DEL USO DE GASES DE CHIMENEA EN UN SECADOR DE FLUJO TRANSVERSAL EN EL ACONDICIONAMIENTO DE FIBRA DE PALMA AFRICANA PARA SU USO COMO COMBUSTIBLE DE CALDERA**, el cual ha sido asesorado por los Ingenieros Químicos, Ronal Adolfo Herrera Orozco y José Manuel Tay Oroxom como consta en el Acta.

Habiendo encontrado el referido informe final **satisfactorio**, se procede a recomendarle autorice al estudiante **Monzón Oxom** proceder con los trámites requeridos de acuerdo a normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Inga. Teresa Lisely de León Arana, M.Sc.

COORDINADORA  
Tribunal que revisó el informe final  
Del trabajo de graduación



ESCUELA DE  
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía M. Sc. Después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe del Departamento al trabajo de Graduación del estudiante **Rodolfo Eduardo Monzón Oxom** titulado: "OPTIMIZACIÓN DEL USO DE GASES DE CHIMENEA, EN UN SECADOR DE FLUJO TRANSVERSAL, EN EL ACONDICIONAMIENTO DE FIBRA DE PALMA AFRICANA PARA SU USO COMO COMBUSTIBLE DE CALDERA", procede a la autorización del mismo

Ing. Williams Guillermo Álvarez Mejía  
DIRECTOR ESCUELA INGENIERÍA QUÍMICA



Guatemala, febrero de 2,008.

## **AGRADECIMIENTOS**

A todas las personas que de manera especial colaboraron en la realización del trabajo de graduación, en particular a:

Ing. José Manuel Tay Oroxom

Ing. Ronal Adolfo Herrera Orozco

Ing. Oliver Alejandro Lima

Personal de secador, Caldera de Biomasa, laboratorio de control de calidad, propietarios y personal de la empresa Olmeca S.A.

## **DEDICATORIA A:**

- DIOS** Todo poderoso, por iluminarme y darme la vida.
- MIS ABUELOS** Rodolfo Monzón<sup>+</sup>, Estela Muñoz<sup>+</sup>, Eduardo Oxom y Olga López, por aconsejarme y guiarme en el camino del bien.
- MIS PADRES** Germán Rodolfo Monzón Muñoz y Olga Anabella Oxom López, por darme la vida, haber formado la persona que soy, y enseñarme día a día a seguir adelante con pasos firmes.
- MIS HERMANAS** Heidy Karina y Claudia Anabella, con mucho cariño.
- MI TÍA** Laura Waleska Oxom, gracias por quererme como a un hijo.
- MI NOVIA** Karla Gabriela Palacios Ruiz, por su apoyo, amor, comprensión y creer en mi capacidad.
- MI CUÑADO** Carlos Alberto Acosta, por alentarme y aconsejarme en los buenos y malos momentos
- FACULTAD DE INGENIERÍA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA** Por darme la oportunidad de realizar una de las metas de mi vida y formarme como un profesional de éxito.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	V
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	VII
<b>ECUACIONES</b>	IX
<b>GLOSARIO</b>	XI
<b>RESUMEN</b>	XIII
<b>HIPÓTESIS</b>	XV
<b>OBJETIVOS</b>	XVII
<b>INTRODUCCIÓN</b>	XIX
<b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	1
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	3
2.1 Biomasa	3
2.1.1 Generación de energía	3
2.1.2 Utilización de la biomasa	4
2.1.3 Métodos de conversión de la biomasa en energía	5
2.1.4 Economía	5
2.1.5 Biomasa residual	6
2.1.6 Palma africana	6
2.1.6.1 Fibra de palma africana	7
2.1.7 Gases de combustión	8
2.1.7.1 Componentes de los gases de combustión	8
2.1.7.1.1 Nitrógeno	8
2.1.7.1.2 Dióxido de carbono	9
2.1.7.1.3 Oxígeno	9

2.1.7.1.4 Monóxido de carbono	9
2.1.7.1.5 Óxidos de nitrógeno	10
2.1.7.1.6 Dióxido de azufre	10
2.1.7.1.7 Hollín	10
2.1.7.1.8 Partículas sólidas	11
2.1.7.2 Combustibles sólidos	11
2.2 Contacto gas – sólido	11
2.2.1 Condiciones de contacto	12
2.2.1.1 Estático	12
2.2.1.2 Fluidificado	12
2.2.1.3 Diluido	12
2.2.2 Método de contacto gas – sólido	13
2.2.2.1 Flujo de gas en contacto paralelo	13
2.2.2.2 Flujo de gas a contracorriente	13
2.2.2.3 Flujo transversal de gas	14
2.2.3 Factores para diseño y selección de equipo	14
2.3 Secado	15
2.3.1 Condiciones internas en contraposición a externas	15
2.3.1.1 Mecanismo interno de la circulación del líquido	17
2.3.2 Clasificación de los sólidos	17
2.3.2.1 Flujo capilar	17
2.3.2.2 Difusión de vapor	18
2.3.2.3 Difusión de líquido	19
2.3.3 Condiciones externas	20
2.4 Curvas fundamentales de secado	20
2.4.1 Curva de humedad en el tiempo	21
2.4.2 Curva de régimen de secado	23
2.4.3 Período de velocidad constante	26
2.4.4 Período de velocidad decreciente	27

2.4.5 Teoría capilar	28
2.4.6 Contenido crítico de humedad	30
2.4.7 Contenido de humedad de equilibrio	30
2.5 Psicrometría	31
2.5.1 Psicrometría en desecación	32
2.6 Humedad	32
2.6.1 Humedad absoluta	32
2.6.2 Humedad de saturación	33
2.6.3 Humedad en equilibrio	33
2.6.4 Humedad libre	33
2.6.5 Humedad límite	33
2.7 Secadores industriales	34
<b>3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO</b>	<b>37</b>
3.1 Secador en túnel continuo	37
3.2 Variables de operación	38
3.3 Materiales de construcción	39
3.3.1 Cuerpo del equipo	39
3.3.2 Banda transportadora	39
3.3.2.1 Accesorios	40
3.4 Regulador de velocidad	40
3.5 Sistema de alimentación de sólidos	41
3.6 Sistema de flujo gaseoso	41
3.7 Instrumentación	42
<b>4. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO</b>	<b>43</b>
4.1 Determinación de la carga inicial de fibra en el secador	44
4.2 Determinación del flujo de gases de combustión	48
4.3 Determinación del tiempo de residencia de la fibra en el secado	50



4.4 Determinación de la carga máxima en la banda transportadora	52
4.5 Determinación de las curvas de secado	54
4.6 Diseño experimental	57
<b>5. MUESTRA DE CÁLCULO</b>	<b>61</b>
<b>6. RESULTADOS</b>	<b>67</b>
<b>7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>81</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>85</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>	<b>87</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>89</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>91</b>
<b>APÉNDICE</b>	<b>93</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

### FIGURAS

1	Curvas de humedad en el tiempo	21
2	Curva de velocidad de secado	23
3	Tipos de humedad	34
4	Clasificación de secadores industriales, por transferencia de calor	36
5	Banda transportadora	52
6	Campana de distribución de probabilidad	64
7	Curva de humedad de fibra a 15 hertz de frecuencia en motoreductor	69
8	Curva de humedad de fibra a 20 hertz de frecuencia en motoreductor	71
9	Curva de humedad de fibra a 25 hertz de frecuencia en motoreductor	73
10	Curva de velocidad de secado de fibra en función de la humedad a 25 hertz de frecuencia en motoreductor	75
11	Curva de humedad de fibra a 30 hertz de frecuencia en motoreductor	77
12	Curva de humedad de fibra a 35 hertz de frecuencia en motoreductor	79

## TABLAS

I	Clasificación de materiales y sus características	7
II	Porcentaje de apertura de damper de gases de chimenea	48
III	Relación de tiempos de residencia de fibra en el secador	51
IV	Relación de la carga máxima en la banda transportadora a diversas variaciones de frecuencia	53
V	Humedad de la fibra a 110 segundos de residencia en el secador a un factor de frecuencia de 25 hertz	61
VI	Diferencia entre media grupal y valores muestrales	62
VII	Variables de operación del secador	67
VIII	Humedad de fibra a 15 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor a diversos tiempos de residencia	68
IX	Humedad de fibra a 20 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor a diversos tiempos de residencia	70
X	Humedad de fibra a 25 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor a diversos tiempos de residencia	72
XI	Velocidad de secado de fibra a 25 hertz de frecuencia en motoreductor	74
XII	Humedad de fibra a 30 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor a diversos tiempos de residencia	76
XIII	Humedad de fibra a 35 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor a diversos tiempos de residencia	78

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta$	Variación de dos valores puntuales de la misma naturaleza
$\Theta$	Medida de tiempo
$\Sigma$	Desviación estándar
A	Constante de capacidad calorífica para gases
B	Constante de capacidad calorífica para gases
C	Constante de capacidad calorífica para gases
C <sub>c</sub>	Poder calorífico monóxido de carbono
C <sub>m</sub>	Medida de longitud en sistema internacional, centímetro
CO	Monóxido de carbono gaseoso
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono gaseoso
C <sub>p</sub>	Capacidad calorífica
D	Constante de capacidad calorífica para gases
De	Diferencia entre media grupal y humedad puntual
E <sub>k</sub>	Energía cinética
E <sub>p</sub>	Energía potencial
H	Medida de tiempo en horas
H	Entalpía
H <sub>liq</sub>	Entalpía de sustancia en estado líquido
H <sub>vap</sub>	Entalpía de sustancia en forma de vapor
Hg	Mercurio
HHV	Calor de combustión fibra de palma africana
K	Medida de temperatura en sistema internacional, kelvin
Kg	Medida de masa en sistema internacional, kilogramos
kPa	Medida de presión expresada en kilopascales

kW	Medida de potencia en sistema internacional, kilowatts
M	Medida de longitud en sistema internacional, metro
M	Moles de sustancia conocida
m <sup>3</sup>	Medida volumétrica en sistema internacional, metros cúbicos
$\dot{m}$	Flujo másico
Me	Representa el valor de la media grupal
N	Tamaño de muestra para análisis estadístico
N <sub>2</sub>	Nitrógeno molecular gaseoso
O <sub>2</sub>	Oxígeno molecular gaseoso
PC	Calor de combustión monóxido de carbono
Q	Calor ganado o perdido por el sistema
S	Medida de tiempo en sistema internacional, segundo
T	Medida de masa en toneladas
Tg	Temperatura de gases de combustión
Tr	Temperatura de referencia
W	Trabajo realizado por el sistema o sobre el sistema
X	Medida puntual de humedad de fibra
Z	Puntaje de distribución de probabilidad

## ECUACIONES

1	Balance de energía	44
2	Representación de formas de energía	44
3	Energía térmica	44
4	Representación de energía térmica	44
5	Representación de energía térmica en caldera de biomasa	44
6	Capacidad calorífica	45
7	Entalpía de componentes de gases de chimenea	45
8	Entalpía total de gases de chimenea	46
9	Calor de combustión de monóxido de carbono	46
10	Eficiencia de caldera de biomasa	46
11	Relación de eficiencia	47
12	Humedad media grupal	58
13	Diferencia entre media grupal y muestras seleccionadas	58
14	Desviación estándar	63
15	Puntaje Z de probabilidad	64



## GLOSARIO

<b>Analizador Orsat</b>	Dispositivo utilizado para determinar la composición de una muestra de gases.
<b>Banda transportadora</b>	Son dispositivos mecánicos, empleados para el transporte de productos diversos entre dos puntos predeterminados, poseen altas o bajas velocidad y la peculiaridad de manejar cortas o altas cargas en su superficie (toneladas/hora)
<b>Biomasa</b>	Es toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial.
<b>Calor de combustión</b>	Cantidad de calor liberado por mol de una sustancia quemada.
<b>Difusividad</b>	Es el movimiento bajo la influencia de un estímulo físico de un componente individual, a través de la mezcla. Un gradiente de concentración del componente que difunde.



<b>Fibra de Palma Africana</b>	Es un residuo o desecho orgánico derivado del proceso de molienda en la extracción de aceite de vegetal de la palma africana.
<b>Molienda</b>	Pulverización o desintegración de un material sólido en partículas de tamaño menor respecto al original.
<b>Motoreductor</b>	Dispositivo mecánico que posee la peculiaridad de variar la potencia con la que desarrolla un trabajo de eje.
<b>Potenciómetro</b>	Equipo electrónico que modifica la salida del factor de frecuencia a partir de un valor determinado de potencia que oscila en el tiempo, expresada en hertz.
<b>Secador</b>	Es un equipo especializado, cuya finalidad es eliminar porcentajes o cantidades de líquidos retenidos en sólidos.

## RESUMEN

Se llevó a cabo el acondicionamiento de la fibra de palma africana para emplearse como combustible de caldera, mediante su secado en un secador de túnel continuo a flujo transversal de gases calientes de chimenea. Para llevar a cabo la operación, se optimizaron las variables de operación las cuales son: flujo másico de gases de chimenea (12.74 t/h), carga de fibra (3.89 t/h), factor de frecuencia en banda transportadora (25 hertz) y tiempo de residencia (160 segundos).

La finalidad de acondicionar la fibra es secarla hasta el 16.2% de humedad, para aprovechar al máximo su calor de combustión como propiedad inherente del material (16992.6 kJ/kg) liberando mayor energía en su combustión.

Las variables de operación se determinaron a partir de: balance térmico en la caldera para generar 12 t/h de vapor a 1200 kPa de presión, la carga de sólidos húmedos en el secador y la velocidad de la banda transportadora, determinada por un variador de frecuencia que aumenta o disminuye la velocidad rotacional del eje del motoreductor y a la vez su velocidad lineal.

Para establecer las variables de operación y estandarizar el proceso se realizaron curvas de secado a diversos factores de frecuencia para determinar la mejor curva de secado que caracterice la humedad en el tiempo. Y con base a esto se elaboró la curva de velocidad de secado a 25 hertz de frecuencia donde se determinó la humedad crítica de la fibra (18.7%) y la humedad de saturación (16.2%).

Las curvas de secado se realizaron a partir de muestras de humedad analizadas en un determinador electrónico, las cuales se seleccionaron por ensayos de muestras secuenciales con intervalos de confianza del 95%.

El secado de fibra de palma permite aprovechar su energía residual como un subproducto de la elaboración de aceites vegetales y contribuir a la conservación del medio ambiente durante su combustión, ya que el balance neto de CO<sub>2</sub> liberado es nulo y el monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, entre otros, se descargan en menor proporción respecto a los combustibles derivados del petróleo.

## **HIPÓTESIS**

Hipótesis de Investigación:

Es posible desarrollar curvas de secado de fibra de palma africana con gases de combustión provenientes de una caldera de sólidos, reduciendo la humedad de la fibra a 16.2 % y en función de ello aumentar su calor de combustión.



## **OBJETIVOS**

### **General**

Determinar las variables de operación de un secador en túnel a flujo transversal de gases de combustión, para alcanzar una curva óptima de secado y eliminar la humedad presente en la fibra de palma africana.

### **Específicos**

1. Elaborar curvas de secado de fibra a diversos tiempos de residencia que permitan determinar el contenido crítico de humedad y el punto de saturación de la fibra.
2. Determinar el flujo de gases de combustión y la carga de sólidos que deben alimentarse al secador para generar 20 toneladas de vapor a 1200 kPa de presión en la caldera de sólidos.
3. Establecer la forma para obtener el porcentaje óptimo de humedad en la fibra de palma africana, aprovechando su máximo calor de combustión como un residuo orgánico de biogeneración energético.



## INTRODUCCIÓN

La finalidad del presente estudio es determinar las variables de operación que permitan optimizar el secado de fibra de palma africana con gases de chimenea hasta el 16.2 % de humedad, para aprovechar su máximo calor de combustión (16992.6 kJ/kg).

La palma africana es una palmera que pertenece a la familia Palmáceas, cuyo nombre científico es *Elaeis guineensis*. Es una planta de hasta 20 m de altura cuyo tronco termina en una corona de hojas pinnadas. Su área de distribución natural es la zona tropical del oeste de África, pero se ha aclimatado en las regiones norte y sur-occidente de Guatemala con condiciones físicas similares. La fibra de palma africana es un producto residual en la obtención de aceite vegetal, posterior a la molienda y trituración. Su poder calorífico es (16992.6 kJ/kg a 16.20% de humedad), mayor al bagazo de caña de azúcar (10500 kJ/kg a 12 % de humedad), a la leña (5900 kJ/kg a 7 % de humedad), al cascabillo de café (15300 kJ/kg a 6 % de humedad) y a la cáscara de arroz (13800 kJ/kg a 3 % de humedad).

El secador donde se realizará el proceso es en túnel continuo de acero al carbono que opera a flujo transversal de gases calientes de combustión. Está formado por cuatro cuerpos, cuya dimensión total es: 16.25 m de largo, 1.95 m de ancho y 3.25 m de alto. El medio de transporte dentro del secador es una banda de acero inoxidable en forma de malla, sus dimensiones son: 14.25 m de largo y 1.45 m de ancho.



La determinación de las variables de operación del secador permitirá caracterizar curvas de secado, con la finalidad de conocer la humedad de la fibra alimentada a la caldera de sólidos. Para optimizar la operación del secador se debe considerar la siguiente metodología:

1. Balance energético en la caldera, determina el flujo de fibra que debe secarse hasta el 16.2% de humedad. Para generar 20 toneladas de vapor por hora a 1200 kPa de presión.
2. Flujo de gases calientes de combustión, el cual se determina a partir de la variación del porcentaje de apertura de damper en la descarga de los gases de chimenea.
3. Tiempo de residencia de la fibra en el secador, a partir de la variación de frecuencia por un motoreductor que modifica la velocidad lineal de la banda transportadora.
4. Carga máxima de fibra que soporta la banda transportadora del secador.
5. Determinación de las curvas de secado a partir de análisis de humedad.

Las variaciones de humedad en el secador para determinar las curvas de secado se realizan en un medidor de humedad electrónico (Sartorius MA45 , Signum, Test).

El calor de combustión y las propiedades de los gases de chimenea (composición química, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>; temperatura, porcentaje de humedad y peso molecular en base húmeda), se determinan a través de informes proporcionados por el laboratorio técnico del Ministerio de Energía y Minas.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En una planta de producción de aceite vegetal de palma africana se obtienen residuos húmedos de molienda que pueden utilizarse como fuente de energía, “biomasa”, para generar vapor en una caldera que quema sólidos.

La biomasa se encuentra en forma de fibra, que necesita ser secada para aprovechar al máximo su calor de combustión como propiedad inherente del material. La humedad que la fibra debe poseer para ser alimentada a la caldera es del 16.2 %.

El equipo que se dispone para secar la fibra de palma africana es un secador en túnel continuo. Este secador opera por tres variables fundamentales: flujo de fibra alimentada, flujo de gases de combustión y la velocidad de la banda transportadora.

Actualmente, la operación de este secador es inapropiada desde el punto de vista técnico, ya que las variables de operación no permiten alcanzar el 16.2% de humedad deseada en la salida del secador, debido a 3 factores fundamentales: 1) El secador opera con sobre carga de fibra. 2) El tiempo de residencia de la fibra es muy corto. 3) La humedad del aire caliente con la que se lleva a cabo la operación es elevada (80.58 %).

La necesidad de establecer las variables de operación del secador es la generación de 20 toneladas de vapor por hora a 1200 kPa de presión, por lo que la cantidad de fibra a 16.2% de humedad debe mantener el balance térmico en la caldera.

Las variaciones del tiempo de residencia, el flujo de gas y la carga inicial en el secador permitirán elaborar las curvas de secado, determinando la humedad de la fibra en la salida del secador.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Biomasa**

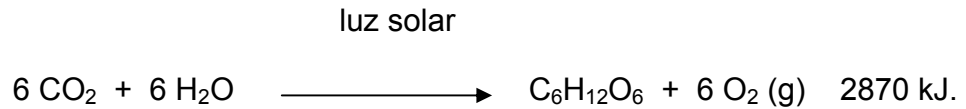
La biomasa es toda la materia orgánica de origen vegetal o animal, incluyendo los materiales procedentes de su transformación natural o artificial.

Y se clasifican en:

- Natural: es la que se produce en la naturaleza sin intervención humana.
- Residual: que es la que genera cualquier actividad humana, principalmente en los procesos agrícolas, ganaderos y los del propio hombre, tal como, basuras y aguas residuales
- Producida: que es la cultivada con el propósito de obtener biomasa transformable en combustible, en vez de producir alimentos

#### **2.1.1 Generación de energía**

La formación de materia viva o biomasa a partir de la luz solar se lleva a cabo por el proceso denominado fotosíntesis, gracias al cual se producen grandes moléculas de alto contenido energético (en forma de energía química), cuyo costo de almacenamiento es nulo y, en principio, sin pérdidas. La fotosíntesis es el proceso global mediante el cual la glucosa se forma a partir de dióxido de carbono y agua a expensas de la energía solar.



La originalidad de esta tecnología es el hecho de que toma prestadas del medio ambiente natural la energía (fotones de luz) y las materias primas consumidas (carbono, hidrógeno, nitrógeno, potasio y fósforo).

La acción de construir unos edificios ordenados (macromoléculas de glucosa, principalmente) a partir de elementos suministrados en desorden por la naturaleza (carbono, hidrógeno, oxígeno) exige, de acuerdo a las leyes de la Termodinámica, cantidades muy importantes de energía (2870 kJ/mol de glucosa obtenida) de las cuales, la mayor parte es desechada a la atmósfera. Pero, a pesar de que el rendimiento termodinámico de la fotosíntesis es particularmente bajo, la operación resulta, no obstante, rentable, debido al costo nulo de la energía solar y de la utilidad de los productos finales (principalmente alimentos).

### **2.1.2 Utilización de la biomasa**

La única biomasa realmente explotada en la actualidad es el bagazo de caña y la leña. Para fines energéticos es la de los bosques para cubrir parte de la demanda energética sólo puede constituir una opción razonable en países donde la densidad territorial de dicha demanda es muy baja, así como también la de la población. La energía derivada de la biomasa es renovable indefinidamente. Al contrario de las energías eólica y solar, la de la biomasa es fácil de almacenar.

## **2.1.3 Métodos de conversión de biomasa en energía**

### **2.1.3.1 Métodos termoquímicos**

Estos métodos se basan en la utilización del calor como fuente de transformación de la biomasa. Están bien adaptados al caso de la biomasa seca, y, en particular, a los de la paja, hojas secas, residuos orgánicos y de la madera.

La combustión, oxidación de la biomasa por el oxígeno del aire, libera simplemente agua y gas carbónico, y puede servir para la calefacción doméstica y para la producción de calor industrial.

### **2.1.3.2 Métodos biológicos**

La fermentación alcohólica es una técnica empleada desde muy antiguo con los azúcares, que puede utilizarse también con la celulosa y el almidón, a condición de realizar una hidrólisis previa (en medio ácido) de estas dos sustancias.

## **2.1.4 Economía**

La biomasa agrícola y forestal supone un potencial económico importante especialmente en las zonas tropicales y subtropicales, dado que en ellas se dan las condiciones más idóneas para el desarrollo de los vegetales.

Los organismos fotosintéticos, tanto terrestres como marinos, pueden ser considerados como convertidores continuos de la energía solar, y por consiguiente renovables, en materia orgánica. Las plantas fijan anualmente mediante la fotosíntesis una cantidad de carbono equivalente en energía a 21021 Jolues, que equivalen aproximadamente a 10 veces el consumo mundial de energía y aproximadamente a 200 veces la energía consumida en forma de alimentos.

### **2.1.5 Biomasa residual**

Sólo se consideran de interés como fuente energética los residuos de sectores industriales que, en principio, pueden generar mayor cantidad de residuos de naturaleza orgánica, en los que su eliminación supone un costo adicional en la empresa.

Las industrias que cumplen aproximadamente estas condiciones, son las siguientes: elaboración de azúcar, extracción de aceites, extracción de vinos, frutos secos y en general la agroindustria.

### **2.1.6 Palma Africana**

Esta palmera, *Elaeis guineensis*, pertenece a la familia Palmáceas. Es una planta de hasta 20 m de altura cuyo tronco termina en una corona de hojas pinnadas. Su área de distribución natural es la zona tropical del oeste de África, pero se ha aclimatado en las regiones sudamericanas con condiciones físicas similares.

Precisa suelos fértiles y estaciones lluviosas que produzcan inundaciones. La importancia económica radica en sus frutos. Son drupas en las que, tanto el pericarpio del fruto, como la semilla, son oleaginosos.

### 2.1.6.1 Fibra de Palma Africana

En un sólido orgánico que se considera como subproducto de la molienda del fruto y la palmera africana, que posteriormente se tritura para desmenuzar y reducir el tamaño del sólido, esto con la finalidad de facilitar su transporte hacia las naves industriales y a la vez eliminar impurezas presente debido a su corte durante la cosecha.

### 2.1.6.2 Clasificación y propiedades

La clasificación de la fibra de palma dentro de la clase de materiales y su peso es:

**Tabla I. Clasificación de materiales y sus características**

Material	Densidad promedio (kg/m <sup>3</sup> )	Clase
Bagazo	112 – 160	Tamaño: irregular, fibroso Fluidez: lento - ángulo de reposo de 45 grados o más Abrasividad: no abrasivo Muy ligero y fluido Entrelazado o en capas, y resistente a la excavación Se apelmaza a presión.

Fuente: Perry, Robert, *Biblioteca del Ingeniero Químico* Tomo III, Sección 7, Página 6



### **2.1.7 Gases de combustión**

Los gases de combustión son gases producidos como resultado de la combustión de gasolina/petróleo, diesel o carbón y se descarga a la atmósfera a través de una tubería o chimenea.

Aunque gran parte es relativamente inofensivo, dióxido de carbono, otra parte la componen sustancias nocivas o tóxicas como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos, óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), y aerosoles.

La solución para una producción de energía que no perjudique el medio ambiente debe suponer una reducción de las emisiones contaminantes. Los contaminantes en los gases de combustión sólo pueden reducirse eficazmente si en las plantas existentes, operaran con el máximo rendimiento posible o si se cierran las calderas nocivas. El análisis de los gases de combustión ofrece un medio para determinar las concentraciones de contaminantes y para ajustar al máximo rendimiento las instalaciones de calor.

#### **2.1.7.1 Componentes**

##### **2.1.7.1.1 Nitrógeno (N<sub>2</sub>)**

Es el principal componente (79 %) del aire que respiramos. Este gas incoloro, inodoro y sin sabor no interviene en la combustión. Entra en la caldera como un lastre, se calienta y sale por la chimenea.

#### **2.1.7.1.2 Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

El dióxido de carbono es un gas incoloro, inodoro con un ligero sabor agrio. Bajo la influencia de la luz solar y el verde de las hojas, clorofila, las plantas convierten el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en oxígeno (O<sub>2</sub>). La respiración humana y animal convierten el oxígeno (O<sub>2</sub>) otra vez en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Esto crea un equilibrio que los productos gaseosos de la combustión distorsionan. Esta distorsión acelera el efecto invernadero. El valor límite de efecto es de 5.000 ppm.

#### **2.1.7.1.3 Oxígeno (O<sub>2</sub>)**

Parte del oxígeno (O<sub>2</sub>) disuelto en el aire combina con el hidrógeno (H<sub>2</sub>) del combustible y forma agua (H<sub>2</sub>O). Según la temperatura de los gases de combustión (TH), esta agua se convierte en humedad del gas o en condensados. El oxígeno restante nos sirve para medir el rendimiento de la combustión y se utiliza para determinar las pérdidas por chimenea y el contenido de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

#### **2.1.7.1.4 Monóxido de carbono (CO)**

El monóxido de carbono es un gas venenoso al respirar, incoloro, inodoro y es el producto de una combustión incompleta. Valores típicos en gases de combustión.

#### **2.1.7.1.5 Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>)**

A altas temperaturas (combustión), el nitrógeno (N<sub>2</sub>) presente en el combustible y en el aire ambiente combina con el oxígeno del aire (O<sub>2</sub>) y forma monóxido de nitrógeno (NO). Después de algún tiempo, este gas incoloro se oxida en combinación con el oxígeno (O<sub>2</sub>) para formar dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>). El NO<sub>2</sub> es soluble en agua, tóxico si se respira y contribuye a la formación de ozono en combinación con la radiación ultravioleta (Luz solar). El NO y el NO<sub>2</sub> en conjunto se llaman óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).

#### **2.1.7.1.6 Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)**

El dióxido de azufre es un gas tóxico, incoloro con un olor fuerte. Se forma a partir del azufre del combustible. El valor límite del efecto es de 5 ppm. El Ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>2</sub>) se forma en combinación con el agua (H<sub>2</sub>O) o condensados.

#### **2.1.7.1.7 Hollín**

El hollín también es carbón puro, resultante de una combustión incompleta.

#### **2.1.7.1.8 Partículas sólidas**

Las partículas sólidas (polvo) es el nombre que se da a pequeñas partículas sólidas distribuidas en el aire. Esto puede ocurrir en cualquier forma y densidad. Se forman a partir de las cenizas y de los minerales que componen los combustibles sólidos

#### **2.1.7.2 Combustibles sólidos**

Los combustibles sólidos incluyen carbón, carbón bituminosos, turba, bagazo, madera y paja. Los componentes principales de estos combustibles son: carbono (C), hidrógeno ( $H_2$ ), oxígeno ( $O_2$ ) y pequeñas cantidades de azufre (S) y agua ( $H_2O$ ). Los combustibles sólidos se diferencian principalmente por su poder calorífico, siendo el carbón el de mayor poder calorífico seguido del carbón bituminoso, la turba, bagazo y la madera. El principal inconveniente de su uso es la gran cantidad de cenizas, partículas sólidas y hollín que generan. Esto obliga a disponer de medios mecánicos para eliminar estos "residuos" (por ejemplo parrillas de agitación).

### **2.2 Contacto gas - sólido**

El lecho de sólidos en los equipos de manera estática es de característica densa, en el cual, cada partícula descansa sobre otras, esencialmente a la densidad de masa de sedimentación de la fase sólida. Dicho de otra manera no existe movimiento relativo entre las partículas sólidas.

## **2.2.1 Condiciones de contacto**

### **2.2.1.1 Estático**

Un lecho denso de sólidos en el cual cada partícula descansa sobre otra. No existe movimiento relativo entre las partículas.

### **2.2.1.2 Móvil**

Las partículas están separadas apenas lo suficiente para fluir o deslizarse una sobre otra. Donde el movimiento de los sólidos se logra ya sea por agitación mecánica o por la fuerza de gravedad.

### **2.2.1.3 Fluidificado**

Las partículas sólidas se sostienen por medio de fuerzas de arrastres provocadas por la fase gaseosa que pasa por los intersticios de las partículas. Y estas se comportan juntas (partículas + gas) como un fluido en ebullición.

### **2.2.1.4 Diluido**

Las partículas sólidas están tan separadas entre sí que prácticamente no ejercen ninguna influencia unas en otras. Los sólidos están tan dispersos en el gas que la densidad de la suspensión es fundamentalmente la de la fase gaseosa en lo individual.

### **2.2.2 Método de contacto gas - sólido**

Puesto que en una operación de contacto entre gases y sólidos la transferencia o transmisión de calor y masa se desarrolla en las superficies de estos últimos se puede esperar una máxima eficiencia de proceso con una máxima exposición de la superficie de los sólidos a la fase gaseosa, junto con un mezclado minucioso de gas y sólido.

No obstante, cuando el lecho de sólidos se encuentra en una condición estática o de movimiento muy sutil, el gas que se introduce en los vacíos queda separado del cuerpo principal de la fase gaseosa. Es posible que se registre cierta transferencia de energía y masa por difusión.

#### **2.2.2.1 Flujo de gas en corriente paralela**

La dirección del flujo de gas es paralelo a la superficie de la fase sólida, el contacto se lleva en la entre cara de las dos fases donde hay una leve penetración del gas en los espacios vacíos de los sólidos cercanos a la superficie y éstos se encuentran en condición estática.

#### **2.2.2.2 Flujo de gas a contracorriente**

La dirección de flujo del gas es exactamente opuesta a la que sigue el movimiento de los sólidos. Y el contacto del gas con los sólidos ocurre de la misma manera que en flujo de corriente paralela.

### **2.2.2.3 Flujo transversal del gas**

La dirección de la corriente de gas se realiza a ángulos rectos en relación con el movimiento de los sólidos. El gas penetra y fluye directamente pasando por los intersticios de los sólidos, circulando de una manera más o menos libre en torno a las partículas individuales. Esto puede ocurrir en condiciones: estáticas, móviles, fluidizadas y diluidas.

### **2.2.3 Factores de diseño y selección de equipo**

1. Consideraciones de índole mecánica, que comprende en general la temperatura o el aislamiento del proceso.

2. Flujo de sólidos y la característica de superficie. Las características superficiales de los sólidos son importantes en el sentido de que controlan el grado al que una operación tiene restricciones de difusión, es decir, se difunde dentro o fuera de los poros de una partícula dada, y no a través de los vacíos comprendidos entre las partículas individuales.

## **2.3 Secado**

La desecación, el desecado o secado de sólidos se refiere generalmente a la separación de un líquido de un sólido por evaporación, lo que refiere a la eliminación de humedad en una sustancia. Un sólido húmedo puede secarse por evaporación de la humedad en una corriente de gas. En la práctica, la humedad es con tanta frecuencia agua y el gas con tanta frecuencia aire que esta combinación proporcionará las bases para la mayor parte de este análisis. Sin embargo, es importante acentuar que el equipo, técnica y relaciones son igualmente aplicables a otros sistemas.

### **2.3.1 Condiciones internas en contraposición a externas**

Cuando un sólido se deseca, ocurren dos procesos fundamentales y simultáneos:

1. Se transmite calor para evaporar el líquido
2. Se transmite masa en forma de líquido o vapor dentro del sólido y como vapor en la superficie.

Los factores que regulan las velocidades de estos procesos determinan la rapidez o el índice de desecación.



Las operaciones de desecado comercial emplean la transferencia de calor por convección (el calor necesario para la evaporación del líquido se transmite por un agente gaseoso o un vapor que pasa por encima del sólido o lo atraviesa), conducción (el producto que debe secarse se encuentra en recipientes calentado o se desplaza por encima de estos). El calor también se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido por radiación (el calor se transmite por las superficies radiantes próximas) o una combinación de éstas. Los secadores industriales difieren fundamentalmente en los métodos de transferencia de calor utilizados. Sin embargo, sea cual fuere la modalidad de transmisión de calor, éste debe fluir hacia la superficie exterior y luego al interior del sólido. La única excepción es el desecado dieléctrico y de microondas, en donde la electricidad de alta frecuencia genera calor internamente creando una temperatura elevada dentro del material y en su superficie.

La masa se transfiere durante la desecación en forma de líquido o vapor dentro del sólido, y como vapor que se desprende de las superficies expuestas. El movimiento dentro del sólido se debe a un gradiente de concentración que depende de las características del mismo.

Un estudio de la forma como se deseca un sólido se puede basar en el mecanismo interna de la circulación del líquido o en el efecto de las condiciones externas de temperatura, humedad, corriente de aire, estado de subdivisión, etc., en la velocidad de desecación del sólido. El primer procedimiento requiere por lo común un estudio básico de las condiciones internas y el segundo, aunque es menos fundamental, se usa de un modo más general debido a que los resultados tienen una mayor aplicabilidad inmediata en el diseño y la evaluación de equipos.

### **2.3.1.1 Mecanismo interno en la circulación del líquido**

La circulación o el flujo interno del líquido ocurre siguiendo varios mecanismos que dependen de la estructura del sólido. Algunos de ellos son:

1. Difusión en sólidos homogéneos continuos
2. Flujo capilar en sólidos granulados y porosos
3. Flujo provocado por gradientes de contracción y presión
4. Flujo producido por gravedad
5. Flujo originado por una secuencia de vaporización y condensación

En general, durante la desecación se tiene un mecanismo que predomina en un lapso dado, dentro del sólido; pero no es extraño encontrar diferentes mecanismos que predominan en tiempos distintos durante el ciclo de desecado.

### **2.3.2 Clasificación de los sólidos basándose en el flujo capilar y de difusión**

#### **2.3.2.1 Flujo capilar**

La humedad no ligada en sólidos granulares y porosos como arcillas, arena, pigmentos para pinturas y similares, se mueven a través de los capilares e intersticios de los sólidos mediante un mecanismo en que interviene la tensión superficial; además, se mueve de la misma forma que el aceite se mueve a través de la mecha de una lámpara.

Los capilares se extienden desde pequeños recipientes de la humedad en el sólido hasta la superficie que se está secando. Conforme el secado continúa, al principio la humedad se mueve por capilaridad hasta la superficie, con la suficiente rapidez para mantener una superficie uniformemente húmeda; la rapidez de secado es constante. El agua es reemplazada por aire que entra en el sólido a través de las relativamente pocas aberturas y rupturas.

Finalmente, la humedad superficial se lleva hasta los espacios entre los gránulos de la superficie, el área húmeda en la superficie decrece y continúa el período de secado de la superficie no saturada. Al final, los recipientes debajo de la superficie se secan, la superficie líquida queda en los capilares, la evaporación sucede debajo de la superficie en una zona o plano que gradualmente se va haciendo más profunda en el sólido y ocurre el segundo período decreciente de la rapidez. Durante este período la difusión del vapor dentro del sólido ocurre desde el lugar de la evaporación hasta la superficie.

#### **2.3.2.2 Difusión de vapor**

La humedad se desplaza por acción de la difusión de vapor a través del sólido, a condición de que se establezca un gradiente de temperatura por calentamiento, creando así un gradiente de presión de vapor. La vaporización y la difusión de vapor ocurren en cualquier sólido en donde se realice el calentamiento en una superficie y la desecación en la otra, y en donde el líquido quede aislado entre los gránulos del sólido.

### **2.3.2.3 Difusión del líquido**

La difusión de la humedad líquida puede derivarse de los gradientes de concentración entre el interior del sólido, donde la concentración es alta, y la superficie, donde es baja. Estos gradientes se fijan durante el secado de la superficie. Este método de transporte de la humedad se limita probablemente a los casos en que se forman soluciones sólidas de una sola fase con la humedad, y en ciertos casos en que se está secando la humedad ligada. Por lo que la difusividad de la humedad generalmente decrece con rapidez al decrecer el contenido de humedad.

Durante el período de rapidez constante de secado de estos sólidos, la concentración de humedad superficial se reduce, pero la concentración en el interior del sólido permanece elevada. Las altas difusividades resultantes permiten que la humedad se mueva hasta la superficie tan rápido como se evapora y la rapidez de secado permanece constante. Cuando aparecen manchas secas debido a la proyección de partes del sólido en la película gaseosa, se tiene un periodo de evaporación superficial no saturada. Al final, la superficie se seca hasta el contenido de humedad en el equilibrio para el gas predominante. El secado posterior sólo sucede a flujos que están completamente controlados por las rapideces de difusión dentro del sólido, puesto que éstas son lentas a contenidos bajos de humedad. Si el secado inicial a rapidez constante es muy rápido, quizá no aparezca el periodo de evaporación superficial no saturada; el periodo decreciente de la rapidez controlado por la difusión empieza inmediatamente después de que termina el periodo de rapidez constante.

### **2.3.3 Condiciones externas**

Las principales variables externas comprendidas en cualquier estudio de desecación son temperatura, humedad, corriente de aire, estado de subdivisión del sólido, agitación del mismo, método de sustentación de éste y el contacto entre las superficies calientes del sólido mojado.

### **2.4 Curvas fundamentales de secado**

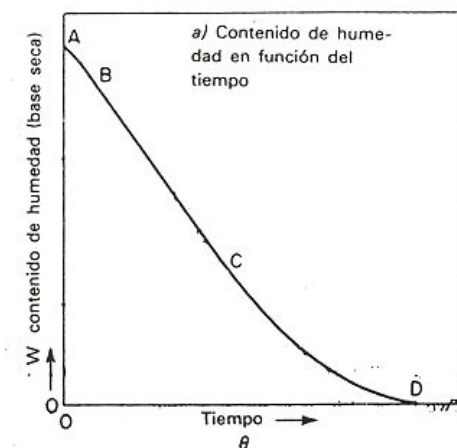
La cinética de secado de un material no es más que la dependencia de la humedad del material y de la intensidad de evaporación con el tiempo o variables relacionadas con este, como la propia humedad o las dimensiones del equipo. La intensidad de evaporación se determina a través de la velocidad de secado, que es el cambio de humedad (base seca) en el tiempo.

A partir de las curvas de cinética de secado ( $X$  vrs  $\theta$ ,  $dX/d\theta$  vrs  $X$  o  $dX/d\theta$  vrs  $\theta$ ), 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.

### 2.4.1 Curva de humedad en el tiempo

Se debe tener en cuenta que este perfil aplica en muchas sustancias o sólidos, pero existen excepciones donde puede haber variaciones entre uno o varios de los periodos de secado dependiendo del número de mecanismos involucrados en el secado.

**Figura 1. Curva de humedad en el tiempo**



Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5. Sección 20. Pág.: 11

#### 2.4.1.1 Período de inducción inicial

Cuando un sólido se coloca en una estufa de secado, comienza a absorber calor e incrementa su temperatura hasta la fijada para el secado. A medida que la temperatura aumenta, la humedad se evapora y se empieza a enfriar el sólido. Posteriormente, la velocidad de enfriamiento y calentamiento se igualan y la temperatura se estabiliza, la temperatura de bulbo húmedo del aire secante será igual a la temperatura alcanzada.

#### **2.4.1.2 Período de velocidad constante**

En el punto B la temperatura se estabilizará y permanecerá constante siempre y cuando haya una capa de humedad remanente en la superficie del sólido. Entre los puntos B y C la humedad de evaporación de la superficie se reemplaza por el agua de difusión del interior del sólido a una velocidad igual a la de evaporación, aquí la velocidad de secado/unidad de superficie es constante.

#### **2.4.1.3 Período de decaimiento de velocidad**

En el punto C, el agua de la superficie no se reemplazará más para mantener la capa. Pequeñas manchas empiezan a parecer y la velocidad del secado comienza a decaer. A esto se le llama contenido de humedad crítica. Entre los puntos C y D el contenido y número de manchas del secado crece y cae la velocidad de secado. El periodo de tiempo CD se conoce como primer periodo de caída de velocidad o periodo de secado de superficie insaturado.

#### **2.4.1.4 Contenido de humedad crítica**

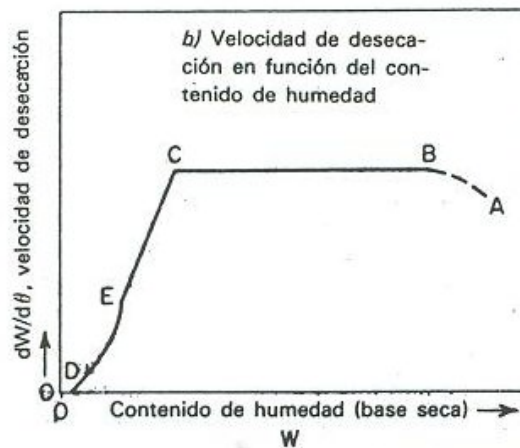
En el punto D conocido como segundo punto crítico, es el punto donde finaliza el periodo de velocidad constante. Aquí, el agua de superficie del sólido esta totalmente evaporada y la velocidad de secado dependerá de la difusión de humedad a la superficie del sólido. Por lo anterior, este punto depende de la porosidad y del tamaño de partícula del sólido que se esta secando.

En el punto D la velocidad del secado es cero y comienza la humedad de equilibrio poniéndose el sólido en equilibrio con su ambiente externo (la temperatura y porcentaje de humedad es constante).

### 2.4.2 Curvas de régimen de secado

Se puede obtener abundante información de una curva de secado en función del contenido de humedad. Esto se puede hacer, midiendo las pendientes a las tangentes trazadas a la curva de humedad contra tiempo, o por medio de la determinación en base a la curva, de pequeños cambios  $\Delta X$  en el contenido de humedad para los correspondientes cambios en el tiempo  $\Delta t$ .

Figura 2. Curva de velocidad de secado



Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5. Sección 20. Pág.: 11



Generalmente, se pueden apreciar dos partes notorias de la curva de régimen de secado: un período de régimen constante y uno de caída de régimen, aunque teóricamente existen o se pueden apreciar tres etapas del proceso o períodos de secado.

#### **2.4.2.1 Etapa A – B**

Es una etapa de calentamiento (o enfriamiento) 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.

#### **2.4.2.2 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. En este período el sólido tiene un comportamiento no higroscópico. 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. Si durante el proceso, el gas se enfría, la velocidad de secado decrece pero sigue en esta zona dependiendo de factores externos al sólido. 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.

### **2.4.2.3 Etapa C – D**

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. En estas condiciones el sólido tiene un comportamiento higroscópico. 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. Ahora la humedad deberá ser extraída del interior del material con el consiguiente incremento de la resistencia a la evaporación.

Este período de velocidad decreciente puede dividirse en dos partes, con diferentes comportamientos de la velocidad de secado, la cual decrece cada vez más al disminuir la humedad del sólido. Esto implica dos modelos de secado diferente en dicha zona.

Un parámetro muy importante a determinar en los materiales a secar es la humedad a la cual se cambia del primero al segundo período, llamada humedad crítica. Esta depende del tipo del material y de la relación de secado en el primer período.

#### **2.4.2.4 Punto E**

Representa el punto en que toda la superficie expuesta se hace completamente insaturada y marca el principio de la porción del ciclo de desecado durante el cual la velocidad del movimiento de la humedad interna controla la velocidad de desecado.

#### **2.4.3 Período de velocidad constante**

El desecado se desarrolla por difusión de vapor desde la superficie saturada del material, pasando por una capa del aire estancado hasta el medio que lo rodea.

El movimiento de la humedad dentro del sólido es lo suficientemente rápido para mantener una condición saturada en la superficie y la velocidad de desecación se controla por medio de la velocidad de transmisión de calor a la superficie de evaporación. La velocidad de transferencia de masa se equilibra con la de calor, y la temperatura de la superficie saturada permanentemente constante.

Cuando el calor se transmite por radiación, conducción o por una combinación de ambas y por convección, la temperatura de la superficie saturada se ubica entre la del bulbo húmedo y la del punto de ebullición del agua. En tales condiciones, la velocidad de transferencia de calor se incrementa y se obtiene mayor velocidad de desecación.

La magnitud de la velocidad constante depende de tres factores:

1. El coeficiente de transmisión de calor y transferencia de masa
2. El aire expuesto al medio ambiente
3. La diferencia de temperatura o humedad entre la corriente de gas y la superficie mojada del sólido.

#### **2.4.4 Período de velocidad decreciente**

Principia al concluir los períodos de velocidad constante al contenido crítico de humedad. Si el contenido final de humedad es superior al contenido crítico, todo el proceso de desecado se desarrollará en condiciones de velocidad constante. Si el contenido inicial de humedad es inferior al crítico, todo el proceso de desecación se desarrollará en el período de velocidad decreciente. En este período casi siempre se determina el tiempo total de desecación.

- Etapas del período decreciente:

1. Desecación de superficie no saturada: En esta división no toda la superficie de evaporación se puede mantener saturada por el movimiento de humedad dentro del sólido. La velocidad de secado depende de factores que afecta la difusión de humedad en una dirección que se aleja de la superficie de evaporación, y los que afectan la velocidad de movimiento interno de la humedad.

2. Movimiento interno de la humedad: Es la sección a la que se llega a un punto en que la superficie de evaporación es insaturada. La evaporación se desplaza dentro del sólido y el proceso de secado entra al segundo período de velocidad decreciente. La velocidad de desecación esta regida ahora por la velocidad del movimiento interno de la humedad y la influencia de las variables externas.

#### **2.4.5 Teoría capilar**

Si el tamaño de poro de un material granular es apropiado, la humedad se puede desplazar de una región de gran concentración a otra de menor magnitud, como resultado de la acción capilar, más que por difusión.

La teoría capilar presupone que un lecho de esferas no porosas se compone de partículas de partículas que rodean un espacio denominado poro. Estos poros se conectan por medio de pasajes de varios tamaños.

Conforme el agua se separa progresivamente del lecho, la curvatura de la superficie del agua en los intersticios de la capa superior de esferas aumenta y se establece una presión de succión que resulta de dicha curvatura. Esta succión de entrada es una medida de las fuerzas resultantes que tienden a atraer agua del interior del lecho hacia la superficie.

Los poros de la superficie se abren, el aire penetra y la humedad se redistribuye con una reducción en el potencial de succión. Al proseguir la evaporación, el potencial de succión aumenta una vez más hasta alcanzar un valor de admisión o entrada ligeramente mayor, momento en que se produce una redistribución subsecuente.

En la curva de velocidad de secado (Figura 2) se analiza desde el punta de vista de la teoría capilar.

B – C: Se tiene una pérdida de humedad con un aumento gradual de la succión y el vaciamiento de la mayor parte de los poros de mayor tamaño del sólido.

C – E: Se registra un aumento de succión conforme el contenido de humedad disminuye y se abran los poros más finos.

E – D: La humedad se elimina por difusión de vapor desde el interior del cuerpo, aunque existe todavía el agua suficiente en el lecho para aumentar las fuerzas capilares.

#### **2.4.6 Contenido crítico de humedad**

Es la humedad promedio a lo largo del material, su valor depende de la velocidad de desecación, el espesor del material y los factores que influyen en le movimiento de la humedad así como los gradientes resultantes dentro del sólido. El contenido crítico de humedad aumenta al incrementar la velocidad de desecación y al aumentar también el espesor de la masa del material que se esta secando.

Además parece ser que el período de velocidad constante concluye cuando el contenido de humedad en la superficie llega a un valor específico.

#### **2.4.7 Contenido de humedad en el equilibrio**

La humedad de equilibrio se puede absorber como una película superficial o bien, condensarse dentro de los capilares finos del sólido a presión reducida, y su concentración variará con la temperatura y humedad del aire que lo rodea.

La humedad en el equilibrio depende de la naturaleza del sólido es decir, en materiales no porosos dicho (no higroscópicos) dicho contenido es prácticamente cero a todas las temperaturas y humedades.

Un material higroscópico es un material que al mantener en contacto con aire a temperatura y humedad constante, el material adquirirá un contenido de humedad específico hasta llegar al equilibrio.

El contenido de humedad en el equilibrio de un sólido es especialmente importante en la desecación, porque representa el contenido de humedad limitante en ciertas condiciones de humedad y temperatura. Si el material se seca a un contenido de humedad inferior al que posee normalmente en equilibrio con el aire atmosférico, volverá a su valor de equilibrio al almacenarse, a menos que se tomen precauciones especiales.

## **2.5 Psicrometría**

La psicrometría se ocupa de la determinación de las propiedades de las mezclas de un gas y un vapor. El sistema aire-vapor de agua es, por mucho, el que se encuentra con mayor frecuencia.

Los principios comprendidos en la determinación de las propiedades de otros sistemas son los mismos que rigen el de aire-vapor de agua, con una excepción primordial. Mientras que la razón psicrométrica (la razón del coeficiente de transferencia de masa y calor húmedo) en el caso del sistema gas-vapor de agua, tiene un valor asignado de 1, la razón de otros sistemas generalmente no es equivalente a 1. Esto tiene un efecto de hacer que la temperatura de saturación adiabática sea distinta de la temperatura de bulbo húmedo. Por tanto, para sistemas que no sean el de aire-vapor de agua, el cálculo de problemas psicrométricos y de secado se ve complicado por la necesidad de efectuar un cálculo detallado de la temperatura de la superficie de evaporación. Por ejemplo, en el sistema aire-agua, la temperatura de la superficie de evaporación será constante durante el período de secado a velocidad constante, aunque la temperatura y la humedad de la corriente de gas varíe. En el caso de otros sistemas, la temperatura de la superficie de evaporación tendrá alteraciones.



### **2.5.1 Psicrometría en la desecación**

En cualquier proceso de desecado, suponiendo un suministro adecuado de calor, la temperatura y la velocidad a las cuales se produce la vaporización del líquido depende de la concentración de vapor en la atmósfera circundante.

En casi todas las operaciones de desecación, el agua es el líquido evaporado y el aire es el gas de purga que se emplea comúnmente. Para fines de desecación, es de gran utilidad el manejo de la carta psicrométrica, a partir de la cual se puede obtener valores de humedades tanto del aire como del sólido, a partir de las variables de operación, como lo puede ser la temperatura.

## **2.6 Humedad**

El aire que entra en un secador no suele estar completamente seco, sino que contiene algo de humedad y posee una humedad relativa definida. Para un aire de humedad definida el contenido de humedad del sólido que sale del secador no puede ser inferior al contenido de humedad de equilibrio correspondiente a la humedad del aire que entra.

### **2.6.1 Humedad absoluta**

Es igual a las libras de vapor de agua transportadas por una libra de aire seco. Si se presupone un comportamiento de gas ideal, se puede describir como una relación entre, el producto del peso molecular del agua y su presión parcial de vapor; respecto, al producto del peso molecular del gas y la diferencia de la presión total del sistema y la presión parcial del vapor de agua.

### **2.6.2 Humedad de saturación**

Cuando la presión parcial del vapor de agua en el aire, a una temperatura dada, es igual que la presión de vapor de agua, a la misma temperatura, el aire está saturado y la humedad absoluta se designa como humedad de saturación.

### **2.6.3 Humedad en el equilibrio**

Es la porción de agua del sólido húmedo que no puede ser removida por el aire que entra debido a la humedad de éste.

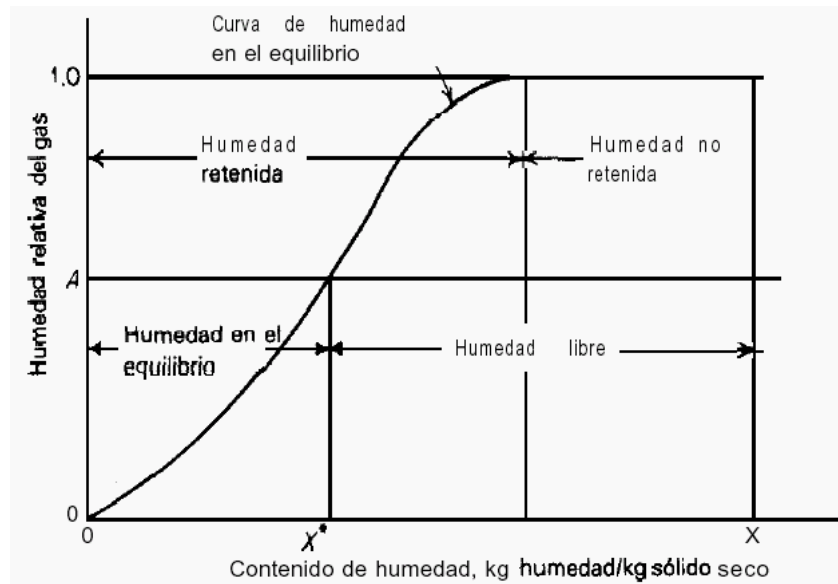
### **2.6.4 Humedad libre**

Es la humedad del sólido; que es la humedad que está en exceso con relación a la humedad de equilibrio. Es ésta la humedad que se puede evaporar y depende de la concentración de vapor en la corriente gaseosa.

### **2.6.5 Humedad límite**

Es la humedad del sólido que ejerce una presión de vapor de equilibrio menos que aquella que ejerce el líquido puro a la misma temperatura.

**Figura 3. Tipos de humedad**



Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 3. Sección 9. Pág.: 15

## 2.7 Secadores industriales

Para seleccionar un tipo de desecador adecuado o para corroborar el buen funcionamiento actual de un secador en uso, se utiliza el potencial de capacidad.

Variables requeridas:

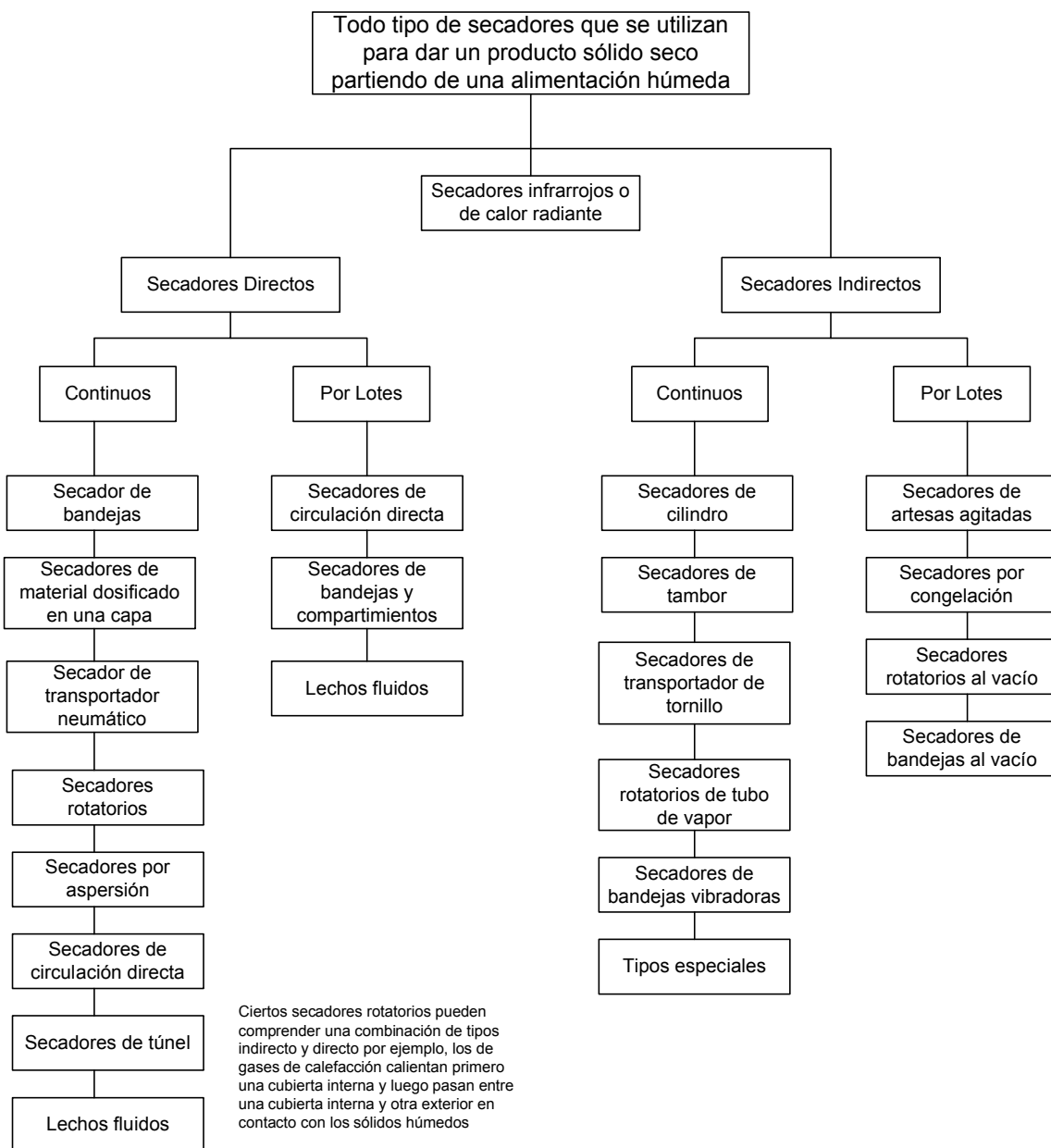
1. Contenidos de humedad en la entrada y salida
2. Temperatura del gas en la entrada y la salida
3. Temperatura del material en la entrada y en la salida

4. Índice de alimentación
5. Velocidad de gas
6. Humedades en la entrada y en la salida
7. Tiempo de retención
8. Uso de combustible

Para determinar una prueba de capacidad es necesario analizar las siguientes variables:

- Efecto de aumento de temperatura: forma de lograr una mayor capacidad de la manera más sencilla.
- Efecto del aumento en la humedad final: se determina con los tiempos de desecación hasta humedades reducidas.
- Efecto del aumento de velocidad del aire: usualmente se necesitan velocidades de aire superiores para proporcionar el calor adicional necesario a mayores capacidades.
- Uniformidades en el flujo de aire: la distribución deficiente de esta circulación puede reducir de un modo marcado la capacidad y la eficiencia del secador.
- Recirculación del aire y sus beneficios posibles.

**Figura 4. Clasificación de secadores industriales en función de la transferencia de calor.**



Fuente: Perry, Robert. *Biblioteca del Ingeniero Químico*. Tomo 5. Sección 20. Pág.: 14

### **3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE SECADO DE SÓLIDOS**

#### **3.1 Secador de túnel**

Consiste en túneles largos a través de los cuales se mueven una banda transversal de tipo malla con fibra que se va a secar, en contacto con una corriente de gas para evaporar la humedad. Formado por cuatro cuerpos, cuya dimensión total es: 16.25 m de largo, 1.95 m de ancho y 3.25 m de alto. El medio de transporte dentro del secador es una banda de acero inoxidable en forma de malla, sus dimensiones son: 14.25 m de largo y 1.45 m de ancho.

Como medio gaseoso de difusión se emplea gases calientes de chimenea con un bajo porcentaje de humedad lo que permite la evaporación del agua retenida en la fibra. El contacto gas – sólido es en flujo transversal, lo cual permite que el gas atraviese los intersticios formados entre los sólidos.

El diseño del secador, el sistema de alimentación, la descarga del secador y la caldera de biomasa tienen la finalidad de aprovechar el residuo industrial que se genera en la extracción de aceite de palma para emplearse como combustible de caldera.

### **3.2 Variables de operación**

Las principales variables de operación del secador en túnel son:

1. Flujo de gases de chimenea: el flujo gaseoso gobierna la difusión del líquido retenido en la superficie y los intersticios. La temperatura de los gases y la humedad de entrada al secador son fundamentales, ya que permite el secado de la fibra hasta la humedad deseada por contacto a flujo transversal.

2. Flujo de sólidos dentro del secador: la carga inicial de fibra en el secador permite alcanzar el balance térmico en la caldera de biomasa, por lo que la humedad en la descarga determina el calor de combustión como propiedad inherente del material.

3. Velocidad de la banda transportadora: es una variable crítica que debe ser regulada y estandarizada para que el tiempo de residencia de la fibra en el secador sea óptimo, eliminando el agua no ligada de la superficie y pequeñas porciones retenidas en los intersticios de la fibra.

### **3.3 Materiales de construcción**

El secador en túnel a flujo transversal está diseñado en dos partes fundamentales: El cuerpo principal del secador y la banda de transporte.

#### **3.3.1 Cuerpo del equipo**

El secador está formado por cuatro cuerpos contruidos de acero al carbono. Las dimensiones de cada cuerpo son 3.56 m de largo, 1.95 m ancho y 3.25 m de alto. Poseen un sistema de alimentación y descarga de flujo gaseoso hacia el medio ambiente en forma transversal respecto al flujo de fibra sobre la banda transportadora.

El flujo de gases de chimenea es alimentado al secador por un sistema de tubería circular de acero al carbono, de diámetro de 15.24 cm y con recubrimiento de aislante térmico.

#### **3.3.2 Banda transportadora**

El medio de transporte de sólidos en el secador es una banda de acero inoxidable que se mueve por una superficie de rodillos. El material de la banda no contamina la fibra por corrosión que se podría formar por la humedad del sólido y de los gases de chimenea.



### **3.3.2.1 Accesorios**

Tensores: fabricados de acero al carbono y son utilizados para tensar y darle rigidez al sistema de transporte.

Sistema mecanizado de rodillos: El cuerpo de los rodillos es de hule reencauchado y posee un sistema de protección de acero al carbono que esta en contacto con la superficie de la banda transportadora para su desplazamiento lineal.

### **3.4 Regulador de velocidad**

La velocidad de la banda transportadora se regula a partir de dos elementos fundamentales:

1. Potenciómetro que modifica el factor de frecuencia de la corriente alterna de 440 voltios realizando variaciones en forma proporcional, lo cual indica que al aumentar el paso del potenciómetro se aumenten los hertz de la corriente eléctrica en un rango de operación de 12 a 60.
2. Motoreductor que posee la variabilidad de operar con distintos valores de potencia, modificando la velocidad rotacional (revoluciones por minuto) a partir del aumento o disminución de los hertz establecidos por el potenciómetro, además modifica la velocidad lineal de la banda (m/s) a partir de un acople que realiza el trabajo de eje sobre el motor principal.

### **3.5 Sistema de alimentación de sólidos**

La fibra de palma es transportada de El Petén, San Marcos, Quetzaltenango y Escuintla en contenedores hacia la planta de producción. El sistema de extracción de la fibra es por un ventilador de tiro forzado que succiona las partículas hacia un separador sólido – gas (ciclón) a través de tubería de cloruro de polivinilo (PVC) de 20.3 cm de diámetro.

El ciclón descarga hacia una banda transportadora de cangilones por una válvula rotativa regulada en el panel de control del secador. La banda de cangilones descarga hacia la banda transportadora tipo malla por una válvula dosificadora automatizada que traslada la fibra hacia la salida del secador (hogar de la caldera).

### **3.6 Sistema de flujo gaseoso**

Los gases son impulsados hacia el secador por un ventilador de tiro forzado en la descarga de la caldera hacia la chimenea, regulada por un damper automatizado desde el panel de control de la caldera de biomasa.

La tubería que transporta los gases de combustión se deriva de la descarga principal de la caldera hacia la chimenea. Por lo que el flujo gaseoso en el secador se determina a partir de la apertura del damper ya que la tubería no posee accesorios, como válvulas o sopladores intermedios, que permitan modificar la velocidad de flujo a cada uno de los cuerpos del secador.

### 3.7 Instrumentación

La operación de secado esta regulada por un panel de control automatizado que permite modificar y conocer la situación actual de las variables de operación.

Las variables que se controlan son:

1. Potencia del ventilador de tiro forzado para extraer la fibra de los contenedores. La indicación digital de esta variable determina el flujo estable de sólidos en la tubería, ya que valores elevados de potencia indica que existe material atorado que debe removerse para evitar el deterioro del equipo.
2. Medidor de amperaje de bandas transportadoras de cangilones y de tipo malla. Estos valores permiten controla la carga de fibra transportada, ya que valores elevados representan sobrecarga que podrían generar atoramiento o derrame de material.
3. Medidor de flujo gaseoso expresado en  $m^3/h$ , esta señal únicamente indica el flujo, ya que éste, se controla por la apertura de damper en la descarga de gases de la caldera en el panel de control de la caldera.
4. Toneladas de fibra sobre la banda transportadora tipo malla, esta señal se determina a partir de un sistema de pesaje controlado por una celda electrónica.

## 4. DESARROLLO DEL EXPERIMENTO

En el presente estudio se determinan las variables de operación óptimas del secador de túnel a flujo transversal de gases de chimenea para elaborar curvas de secado que permitan reducir el porcentaje de humedad en la fibra de palma africana.

Las variables de operación se establecen a partir de la generación de 20 toneladas de vapor a 1200 kPa de presión en una caldera que quema biomasa, por lo que la metodología a emplearse debe considerar el balance energético en la caldera, la carga inicial de fibra y el flujo de gases de chimenea en el secador.

El tiempo de residencia de la fibra en el secador se determina realizando variaciones de frecuencia en un motoreductor. Esta variable es de suma importancia, ya que caracteriza la humedad de la fibra en el recorrido y en salida del secador, representados como curvas de humedad.

#### 4.1 Determinación de la carga inicial de fibra en el secador

Esto se determina a partir de un balance de energía en la caldera de sólidos.

$$E_{entra} = E_{sale} \quad \text{Ec. [1]}$$

$$\Delta E_k + \Delta E_p + \Delta H = Q + W \quad \text{Ec. [2]}$$

Del balance de energía, se determina que la variación de energía cinética y potencial no repercute sobre el sistema; además no se realiza trabajo por los alrededores hacia el sistema o viceversa.

$$\Delta H = Q \quad \text{Ec. [3]}$$

$$\dot{m}_{vapor} * \Delta H = \dot{m}_{fibra} * HHV_{fibra} \quad \text{Ec. [4]}$$

En la caldera el agua modifica su estado de agregación de líquido a vapor, por lo que el balance de energía se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{vapor} * (H_{vapor} - H_{líquido}) = \dot{m}_{fibra} * HHV_{fibra} \quad \text{Ec. [5]}$$

#### 4.1.1 Capacidad calorífica de cada componente de los gases

La capacidad calorífica de cada uno de los gases esta en función de la temperatura de los gases de combustión.

$$C_{pi} = A + B \cdot T_g + C \cdot T_g^2 + D \cdot T_g^{-2} \quad \text{Ec. [6]}$$

$$C_{p_{O_2}} = 3.639 + 0.50E-3 \cdot (452.41) - 0.227E5 / (452.41)^2 = 3.757 \text{ kJ/mol}$$

$$C_{p_{CO_2}} = 5.457 + 1.04E-3 \cdot (452.41) - 1.157E5 / (452.41)^2 = 5.364 \text{ kJ/mol}$$

$$C_{p_{CO}} = 3.376 + 0.55E-3 \cdot (452.41) - 0.031E5 / (452.41)^2 = 3.612 \text{ kJ/mol}$$

$$C_{p_{N_2}} = 3.28 + 0.593E-3 \cdot (452.41) + 0.04E5 / (452.41)^2 = 3.5678 \text{ kJ/mol}$$

#### 4.1.2 Entalpía de cada componente de los gases de chimenea

$$H_i = M_i \cdot C_p \cdot (T_g - T_r) \quad \text{Ec. [7]}$$

$$H_{O_2} = 174.5 \text{ mol} (3.757 \text{ kJ / mol} \cdot \text{K}) \cdot (452.41 - 298.14) \text{ K} = 26.918 \text{ kJ}$$

$$H_{CO_2} = 42.77 \text{ mol} (5.3644 \text{ kJ / mol} \cdot \text{K}) \cdot (452.41 - 298.14) \text{ K} = 35.394 \text{ kJ}$$

$$H_{CO} = 17.15 \text{ mol} (3.6128 \text{ kJ / mol} \cdot \text{K}) \cdot (452.41 - 298.14) \text{ K} = 9.956 \text{ kJ}$$

$$H_{N_2} = 1235.23 \text{ mol} (3.567 \text{ kJ / mol} \cdot \text{K}) \cdot (452.41 - 298.14) \text{ K} = 26.91 \text{ kJ}$$

#### 4.1.3 Entalpía de los gases de chimenea

$$H_{\text{gases}} = H_{\text{CO}_2} + H_{\text{CO}} + H_{\text{O}_2} + H_{\text{N}_2} \quad \text{Ec. [8]}$$

$$H_{\text{gases}} = 26.91 \text{ kJ} + 35.39 \text{ kJ} + 9.95 \text{ kJ} + 26.91 \text{ kJ} = 99.19 \text{ kJ}$$

#### 4.1.4 Calor de combustión de CO

$$PC = C_c * M_{\text{CO}} \quad \text{Ec. [9]}$$

$$PC = 282.99 \text{ kJ/mol} * 15.17 \text{ mol} = 4292.95 \text{ kJ}$$

#### 4.1.5 Eficiencia de la caldera

A partir del análisis ORSAT se determina el porcentaje de eficiencia de la caldera, a través de un balance de energía, expresado de la siguiente manera:

$$\text{Eficiencia} = 1 - (H_{\text{gases}} + PC) / HHV * 100 \quad \text{Ec. [10]}$$

$$\text{Eficiencia} = [ 1 - (4292.95 \text{ kJ} + 99.19 \text{ kJ}) / 16992.6 \text{ kJ} ] * 100$$

$$\text{Eficiencia} = 74.15 \%$$

A partir de la eficiencia de la caldera (74.15 %) se determina la cantidad de energía generada a partir de la energía disponible.

$$\text{Eficiencia} = \text{Energía generada} / \text{Energía disponible} \quad \text{Ec. [11]}$$

$$0.7415 = \dot{m}_{\text{vapor}} * (H_{\text{vapor}} - H_{\text{líquido}}) / \dot{m}_{\text{fibra}} * \text{HHV}_{\text{fibra}} \quad \text{Ec. [11]}$$

Por lo tanto, la cantidad de fibra de palma africana que debe alimentarse en la caldera es:

$$\dot{m}_{\text{fibra}} = \dot{m}_{\text{vapor}} * (H_{\text{vapor}} - H_{\text{líquido}}) / \text{HHV}_{\text{fibra}} * 0.7415 \quad \text{Ec. [11]}$$

$$\dot{m}_{\text{fibra}} = [ 20 \text{ t/h} * (2784.96 - 334.9) \text{ kJ/kg} ] / (0.7415 * 16992.6 \text{ kJ/kg})$$

$$\dot{m}_{\text{fibra}} = 3.89 \text{ t/h}$$



## 4.2 Determinación del flujo de gases de combustión

Tomando como referencia el análisis ORSAT de la caldera, el flujo total de gases de chimenea a condiciones normales de operación es 32894.25 m<sup>3</sup>/h.

Para determinar el flujo de gases hacia el secador, se debe calibrar el porcentaje de apertura de damper en función de la presión de vacío en el hogar de la caldera. Considerando que el rango de variación de presión es de 5.12 cm Hg a 6.7 cm Hg en operación.

**Tabla II. Porcentaje de apertura de damper de gases de combustión.**

Flujo de Gases de Combustión (m <sup>3</sup> /h)	Abertura del Damper (%)	Presión de vacío (cm Hg)	Efecto	Flujo de Gas hacia el secador (m <sup>3</sup> /h)
32894.25	20	5.12	Sobre el límite inferior	6578.85
32894.25	25	5.61	Ninguno	8223.56
32894.25	30	5.9	Ninguno	9868.27
32894.25	35	6.39	Ninguno	11512.98
32894.25	40	6.7	Sobre el límite superior	14802.41

Fuente: Lecturas tomadas en caldera de sólidos, 17 de noviembre de 2007.

#### 4.2.1 Flujo de gases alimentados al secador

Seleccionado el 30% de apertura de damper, la presión de vacío (5.9 cm Hg) no altera la operación de la caldera de sólidos. Por lo tanto, los gases derivados de la chimenea son:

$$32894.25 \text{ m}^3 \text{ gas sale/h} * \frac{(0.3 \text{ m}^3 \text{ gas empleado/h})}{(1 \text{ m}^3 \text{ gas sale/h})} = 9868.28 \text{ m}^3 \text{ gas empleado}$$

$$9868.28 \text{ m}^3 \text{ gas empleado} * \frac{1 \text{ mol}}{21.58 \text{ m}^3} * \frac{27.868 \text{ kg}}{1 \text{ mol}} * \frac{1 \text{ t}}{1000 \text{ kg}} = 12.74 \text{ t/h}$$

El flujo de gases de combustión alimentados al secador es 12.74 t/h a 452.41 K de temperatura.

### **4.3 Determinación del tiempo de residencia de la fibra en el secador**

Los tiempos de residencia de la fibra en el secador se determinan con la variación de frecuencia en el motoreductor, que modifica las revoluciones por minuto a través de un potenciómetro, donde el rango de variación es de 12 – 60 hertz.

#### **4.3.1 Especificaciones Técnicas del Potenciómetro**

Telematic altivar 31

Voltaje de operación: 440 Volts

Potencia: 5.60 kW

Rango de voltaje en operación: 380/500 Volts

#### **4.3.2 Operación.**

1. Seleccionar la frecuencia del motoreductor a través del potenciómetro, siempre y cuando el secador no se encuentre en operación, es decir, que la banda transportadora debe estar parada.
2. Modificar la frecuencia, aumentando o disminuyendo el tiempo de residencia de la fibra dentro del secador.

El tiempo de residencia de la fibra de palma en el secador es una variable fundamental para lograr secarla hasta el 16.2 % de humedad, ya que a un mayor factor de frecuencia el agua no ligada, no será removida por completo durante su evaporación por los gases de chimenea. Por el contrario, a un menor factor de frecuencia, el tiempo de residencia de la fibra en el secador se elevará, lo cual requerirá mayor carga de fibra inicial en la banda transportadora ya que el balance energético en la caldera debe permanecer constante.

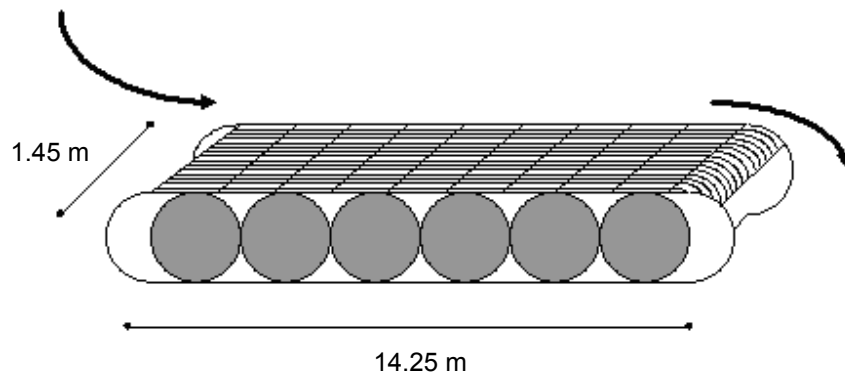
**Tabla III. Relación de tiempos de residencia de la fibra en el secador.**

<b>Factor de Frecuencia (hertz)</b>	<b>Tiempo de residencia (segundos)</b>
45	82.56
40	97.98
35	117.24
30	139.2
25	162.96
20	180.6
15	207.12

Fuente: Lecturas tomadas en potenciómetro 17 de noviembre de 2007.

#### 4. 4. Determinación de la carga máxima permisible sobre la banda transportadora.

Figura 5. Banda transportadora



Fuente: Secador industrial de fibra de palma

La carga a transportar se determina calibrando la velocidad de la banda (modificando el factor de frecuencia del motoreductor) y tomando como referencia la densidad máxima del sólido (Tabla No. I), se establece la carga alimentada al secador en toneladas por hora, a partir de los datos de transportadores de banda con rodillos.

**Tabla IV. Relación de la carga máxima en la banda transportadora a diversas variaciones de frecuencia.**

<b>Factor de frecuencia (hertz)</b>	<b>Velocidad banda (m/s)</b>	<b>Carga banda transportadora (t/h)</b>
45	0.1726	20.880
40	0.1454	17.485
35	0.1215	14.519
30	0.1023	12.149
25	0.0874	10.325
20	0.0789	9.283
15	0.0688	8.056

Fuente: Lecturas tomadas en banda transportadora, 17 de noviembre de 2007.

La fibra que se transporta en el rango de frecuencia es adecuada, ya que supera la carga inicial de sólidos necesarios para el balance térmico en la caldera (3.89 tonelada de sólidos / hora).

#### **4.5. Determinación de las curvas de secado de fibra de palma africana.**

Las curvas de secado son de gran importancia para determinar el porcentaje de humedad que tendrá la fibra antes de alimentarse al hogar de la caldera de sólidos, por lo que un porcentaje de humedad apropiado, aumenta considerablemente su calor de combustión.

El mínimo porcentaje de humedad que la fibra de palma africana puede alcanzar es la del equilibrio (16.2%). Esta humedad se determina gráficamente, a partir de la asíntota horizontal que se presenta en las curvas de humedad en función del tiempo. Además, en esta sección de la curva, se muestra el tiempo óptimo requerido que la fibra debe de permanecer en contacto con el medio gaseoso dentro del secador.

##### **4.5.1 Determinación de la humedad en la fibra.**

###### **4.5.1.1 Equipo a emplear**

Analizador de Humedad en Sólidos: Sartorius MA45 (Signum, Test)

#### **4.5.1.2 Procedimiento**

1. Tomar una muestra de fibra con pinzas de acero inoxidable
2. Colocar una bandeja de aluminio dentro del analizador de humedad
3. Tarar la bandeja
4. Colocar 5 gramos de fibra sobre la bandeja
5. Cerrar y encender el analizador de humedad electrónico
6. Iniciar el precalentamiento del analizador electrónico que puede tener una duración aproximada de 10 a 15 minutos
7. La temperatura alcanza una isoterma de 403 K, lo cual automáticamente desconecta el sistema de calentamiento
8. Tomar la lectura del porcentaje de humedad proporcionado por el analizador
9. Retirar la muestra y apagar el equipo

Las muestras se extraerán del secador en intervalos de 10 segundos, determinando las variaciones de la humedad de la fibra respecto al tiempo, para obtener datos confiables que pueda garantizar el correcto funcionamiento del diseño experimental.



## **4.5.2 Determinación de curvas de secado:**

### **4.5.2.1 Humedad contra tiempo**

Se determinará a partir de las mediciones de humedad en el dispositivo electrónico a intervalos de 10 segundos, para luego graficar la curva de los datos experimentales.

### **4.5.2.2 Régimen de secado**

Se determinará a partir de la diferencia entre los puntos sobre la curva de humedad versus tiempo. Realizando variaciones de humedad  $\Delta X$  en intervalos de tiempo definidos  $\Delta \theta$ . Graficando la razón  $\Delta X/\Delta \theta$  versus humedad.

#### 4.6. Diseño experimental

La selección de las muestras a secar, varían según su procedencia (El Petén, San Marcos, Quetzaltenango, Escuintla), lo cual permite conocer la capacidad del secador de operar a diversos valores de humedad inicial del material para valores establecidos de las variables de operación. Ya que la humedad de la fibra varía de manera aleatoria e independiente de su lugar de origen.

El diseño experimental propuesto para la selección y evaluación de las muestras se basa en ensayos secuenciales, donde las muestras se asignan por grupos de 5 muestras en cada punto de medición, en función del tiempo que permanecen en el secador (10, 15, 20, ..., n segundos) hasta obtener los resultados esperados, es decir que exista precisión entre ellos. Este método permitirá anular datos incoherentes dentro del grupo seleccionado sustentado en análisis estadísticos de intervalo de confianza del 95%. La humedad crítica representa el punto en que toda la superficie expuesta se hace completamente insaturada y marca el principio de la porción del ciclo de secado durante el cual la velocidad del movimiento de la humedad interna controla la velocidad de desecado.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Wackerly, Dennis. Estadística matemática aplicada. Pág. 724

#### 4.6.1 Metodología

1. Establecer el punto de referencia para realizar las mediciones en el secador (intervalos de 10 segundos)
2. Formar grupos de análisis, seleccionando cinco muestras en el punto de referencia.
3. Determinar la humedad media grupal utilizando la siguiente ecuación:

$$Me = \Sigma X / n \qquad \text{Ec. [12]}$$

4. Determinar la diferencia entre la humedad media grupal y cada una de las humedades que componen el grupo, utilizando la siguiente ecuación:

$$De = | Me - X | \qquad \text{Ec. [13]}$$

5. Eliminar del grupo de análisis la muestra que presente la mayor diferencia entre la media grupal y las muestras individuales. Esto con la finalidad de reducir el tamaño grupal en función de la precisión de los datos.
6. Determinar de nuevo la humedad media grupal utilizando la siguiente ecuación número 12.

7. Seleccionar la humedad más cercana a la nueva humedad media grupal, ya que ésta representará el valor de la muestra.

Esta metodología permitirá reducir el tamaño del grupo formado por cinco muestras iniciales, con la finalidad de incrementar los intervalos probabilísticos de aceptación de las muestras que representan a los grupos de análisis. El intervalo de confianza que se logra a partir de ensayos secuenciales es del 95%.



## 5. MUESTRA DE CÁLCULO

A partir de los siguientes datos se determinará el valor representativo del grupo de análisis con intervalo de confianza del 95%.

Los datos de humedad fueron tomados en el punto de referencia correspondiente a 110 segundos de residencia en el secador.

**Tabla V. Humedad de la fibra a 110 segundos de residencia en el secador, factor de frecuencia de 25 hertz**

No. Muestra	Humedad (%)
1	17.39
2	16.47
3	16.22
4	16.23
5	17.09

Fuente: Lecturas tomadas en analizador electrónico de humedad, 24 de noviembre de 2007.

1. Determinación de la media grupal:

$$Me = (17.39 + 16.47 + 16.22 + 16.23 + 17.09) / 5$$

Ec. [12]

$$Me = 16.68$$

2. Determinación de la diferencia entre la media grupal y los valores muestrales

**Tabla VI. Diferencia entre la media grupal y los valores muestrales**

<b>Media grupal</b>	<b>Valores muestrales</b>	<b>Diferencia</b>
16.68	17.39	0.71
16.68	16.47	0.21
16.68	16.22	0.46
16.68	16.23	0.45
16.68	17.09	0.41

Fuente: Diseño experimental. Sección 3 y 4.

3. La muestra que presenta la mayor diferencia respecto a la media grupal es:

La muestra No. 1, con una diferencia de 0.71, por lo que la muestra con 17.39 % de humedad será eliminada del grupo de análisis.

4. Determinación de la nueva media grupal:

$$Me = (16.47 + 16.22 + 16.23 + 17.09) / 4 \quad \text{Ec. [12]}$$

$$Me = 16.50$$

5. Determinación del valor muestral representativo del grupo de análisis.

La muestra más cercana a la nueva media grupal es la No. 1. Por lo que el valor representativo del grupo es 16.47 %.

6. Verificación del intervalo de confianza en la selección de la muestra.

- Determinación de la desviación estándar:

$$\sigma = [ \Sigma ( Me - X ) / n - 1 ]^{1/2} \quad \text{Ec. [14]}$$

$$\sigma = [ [(16.5-16.47)^2+(16.5-16.22)^2+(16.5-16.23)^2+(16.5-17.09)^2]/4 - 1 ]^{1/2}$$

$$\sigma = 0.4083$$



- Determinación de distribución de probabilidad

$$Z = \frac{Me - X}{\sigma}$$

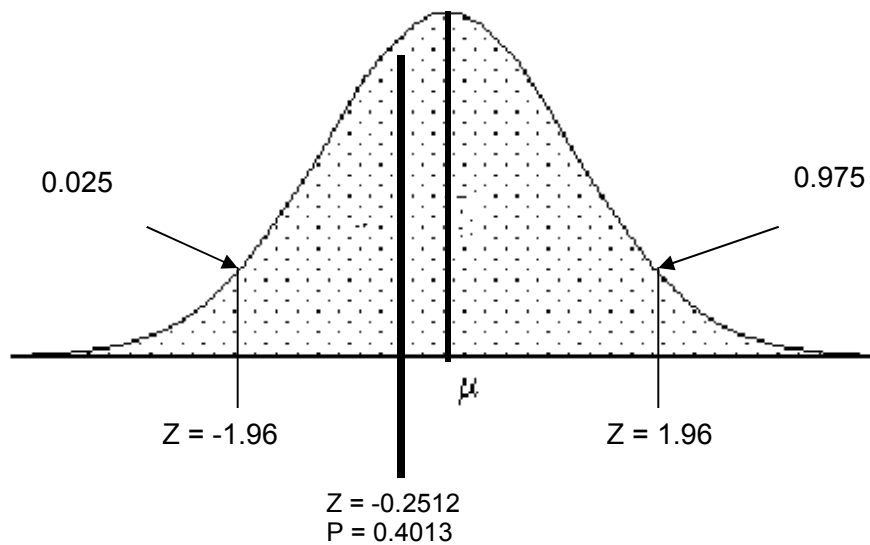
Ec. [15]

$$Z = (16.5 - 16.47) / 0.4083$$

$$Z = 0.073$$

Ubicando el valor del puntaje Z, en la distribución de Gauss, se determinará si la muestra seleccionada que representa al grupo de análisis se encuentra en el intervalo de confianza del 95% es:

Figura 6. Campana de distribución de probabilidad gaussiana



Fuente: López, Iris C. *Fundamentos de Estadística*. Págs. 342 y 343

Probabilidad: 0.4013, por lo que si es confiable el método de ensayos secuenciales para extraer muestras aleatorias de fibra de palma africana dentro del secador en túnel para determinar su humedad a partir del procedimiento propuesto.



## 6. RESULTADOS

Tabla VII. Variables de operación del secador

<b>Flujo de gases de chimenea</b>	12.74 t/h
<b>Carga de sólidos</b>	3.89 t/h
<b>Variador de frecuencia</b>	25 hertz
<b>Velocidad banda transportadora</b>	5.24 m/min
<b>Tiempo de residencia</b>	160 segundos
<b>Humedad de fibra en la salida</b>	16.2 %
<b>Temperatura de fibra seca</b>	315.95 K
<b>Humedad de los gases en la salida</b>	44.15 %

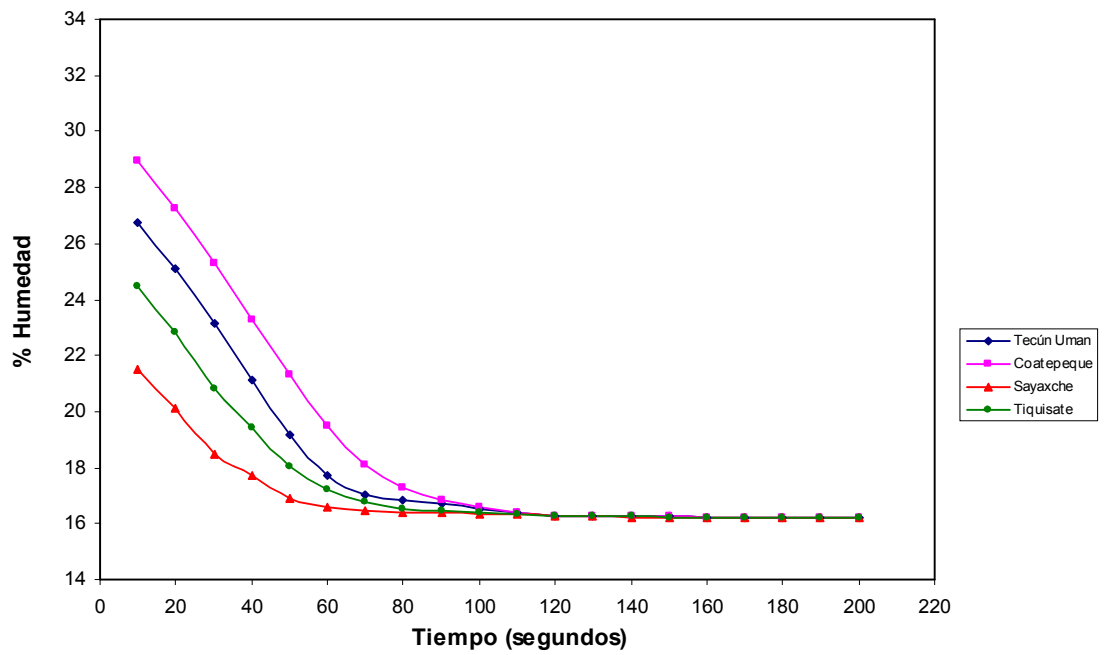
Fuente: Secador de fibra de palma, Olmeca S.A.

**Tabla VIII. Humedad de fibra a 15 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor a diversos tiempos de residencia.**

<b>Procedencia / Tiempo [s]</b>	<b>Tecún Uman San Marcos</b>	<b>Coatepeque Quetnango.</b>	<b>Saxayche El Petén</b>	<b>Tiquisate Escuintla</b>
0	27.843	30.001	22.895	25.569
10	26.774	28.932	21.495	24.5
20	25.106	27.264	20.095	22.832
30	23.119	25.277	18.495	20.845
40	21.132	23.29	17.695	19.445
50	19.145	21.303	16.895	18.045
60	17.745	19.503	16.615	17.245
70	16.999	18.103	16.462	16.779
80	16.846	17.303	16.401	16.499
90	16.713	16.837	16.393	16.463
100	16.508	16.557	16.364	16.393
110	16.375	16.424	16.331	16.347
120	16.242	16.291	16.262	16.281
130	16.268	16.276	16.246	16.263
140	16.253	16.263	16.22	16.243
150	16.245	16.251	16.21	16.237
160	16.21	16.23	16.2	16.21
170	16.2	16.22	16.2	16.2
180	16.2	16.2	16.2	16.2
190	16.2	16.2	16.2	16.2
200	16.2	16.2	16.2	16.2

Fuente: Reporte de análisis de laboratorio, control de calidad, Olmecca S.A. Sección: Apéndice

Figura 7. Curva de humedad de fibra a 15 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor.



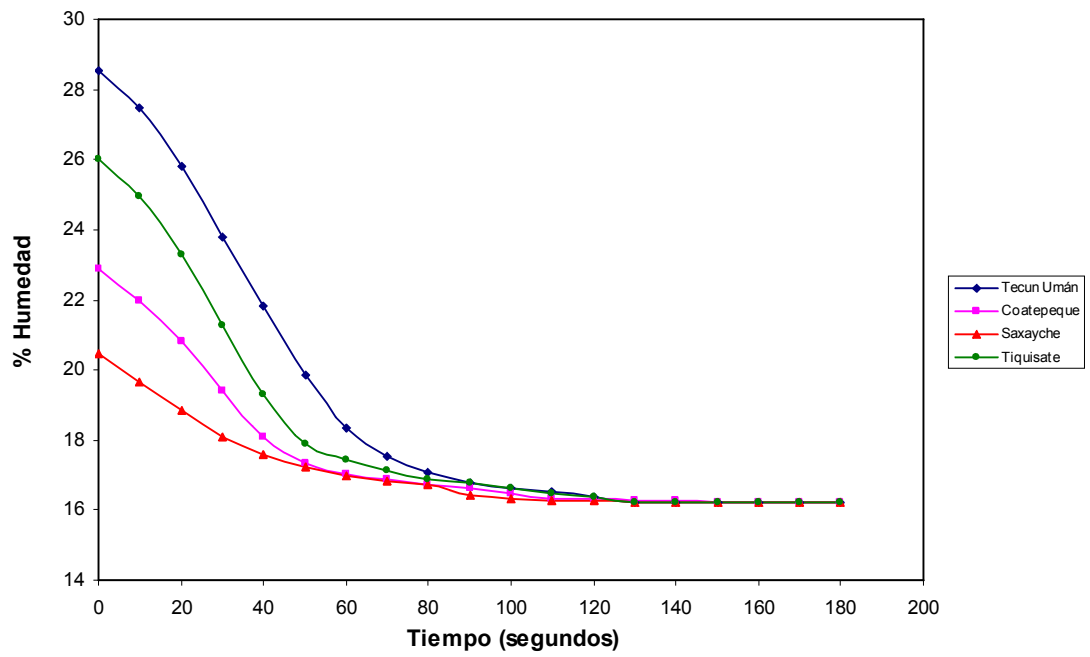
Fuente: Reporte de análisis, laboratorio, control de calidad, Olmecca S.A. Sección: Apéndice

**Tabla IX. Humedad de fibra a 20 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor a diversos tiempos de residencia.**

<b>Procedencia / Tiempo [s]</b>	<b>Tecún Uman San Marcos</b>	<b>Coatepeque Quetnango.</b>	<b>Saxayche El Petén</b>	<b>Tiquisate Escuintla</b>
0	28.534	22.874	20.47	26.001
10	27.465	21.997	19.67	24.932
20	25.797	20.807	18.87	23.264
30	23.81	19.407	18.07	21.277
40	21.823	18.107	17.604	19.29
50	19.836	17.307	17.224	17.89
60	18.336	17.027	16.999	17.424
70	17.536	16.874	16.84	17.144
80	17.07	16.741	16.705	16.891
90	16.79	16.608	16.426	16.758
100	16.637	16.475	16.321	16.625
110	16.504	16.342	16.282	16.492
120	16.371	16.3	16.258	16.359
130	16.238	16.275	16.235	16.226
140	16.229	16.264	16.223	16.219
150	16.223	16.232	16.2	16.21
160	16.2	16.201	16.2	16.2
170	16.2	16.2	16.2	16.2
180	16.2	16.2	16.2	16.2

Fuente: Reporte de análisis de laboratorio, control de calidad, Olmeca S.A. Sección: Apéndice

**Figura 8. Curva de humedad de fibra a 20 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor.**



Fuente: Reporte de análisis, laboratorio, control de calidad, Olmecca S.A. Sección: Apéndice

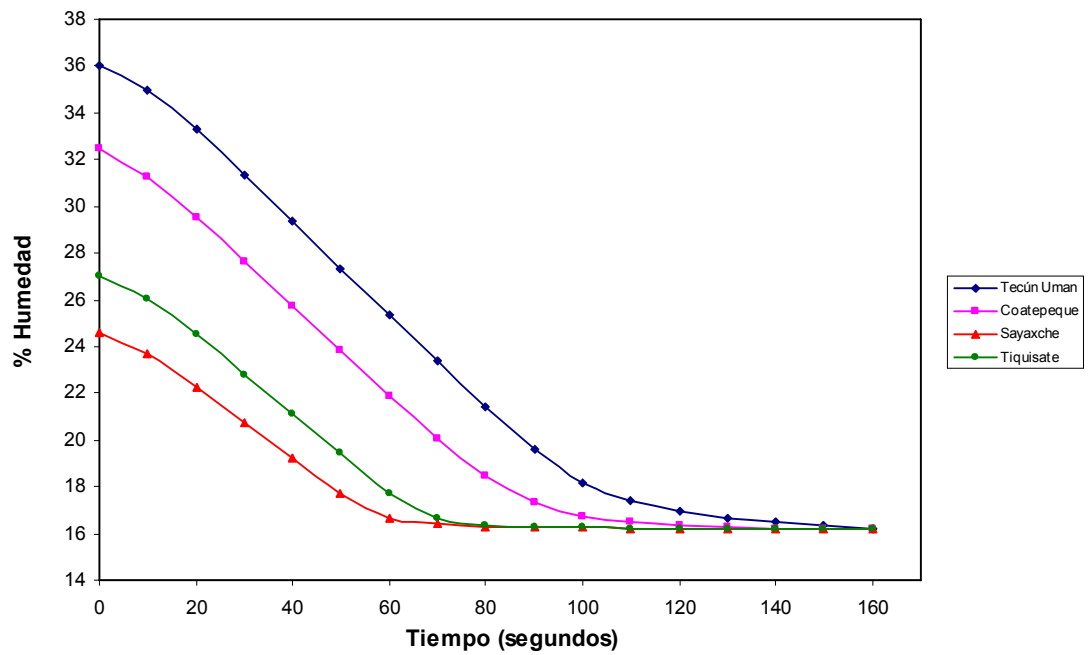


**Tabla X. Humedad de fibra a 25 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor a diversos tiempos de residencia.**

<b>Procedencia / Tiempo [s]</b>	<b>Tecún Uman San Marcos</b>	<b>Coatepeque Quetnango.</b>	<b>Saxayche El Petén</b>	<b>Tiquisate Escuintla</b>
0	36.056	32.5	24.569	27.012
10	34.987	31.27	23.659	26.011
20	33.319	29.52	22.239	24.491
30	31.332	27.615	20.739	22.804
40	29.345	25.71	19.239	21.117
50	27.358	23.805	17.739	19.43
60	25.371	21.9	16.639	17.743
70	23.384	20.05	16.388	16.62
80	21.397	18.45	16.306	16.319
90	19.597	17.35	16.253	16.259
100	18.197	16.75	16.241	16.242
110	17.397	16.47	16.229	16.23
120	16.931	16.337	16.219	16.22
130	16.651	16.267	16.21	16.211
140	16.498	16.221	16.202	16.203
150	16.365	16.2	16.2	16.2
160	16.232	16.2	16.2	16.2

Fuente: Reporte de análisis de laboratorio, control de calidad, Olmecca S.A. Sección: Apéndice

**Figura 9. Curva de humedad de fibra a 25 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor.**



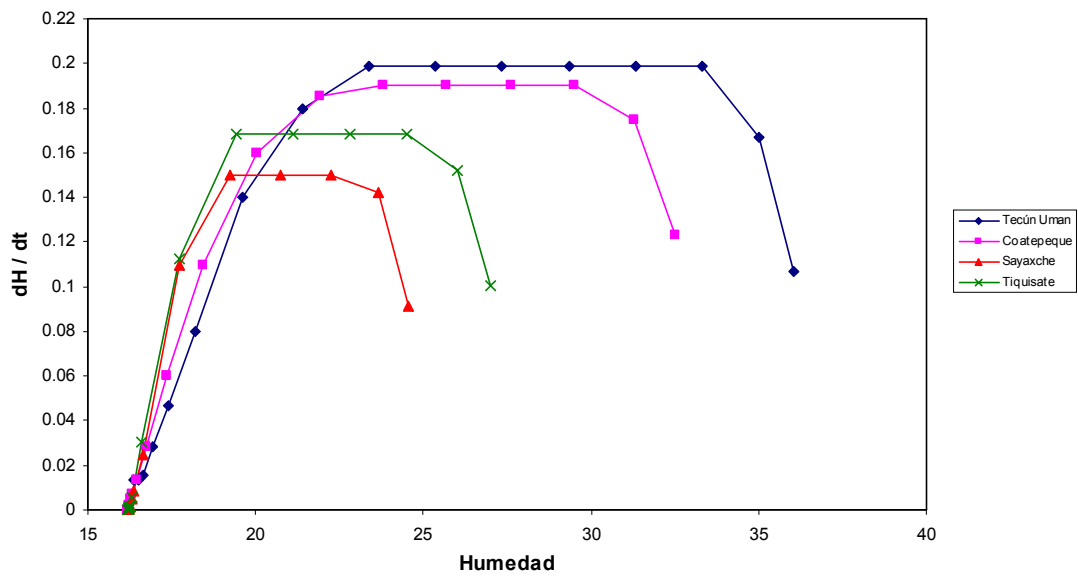
Fuente: Reporte de análisis, laboratorio, control de calidad, Olmecca S.A. Sección: Apéndice

**Tabla XI. Velocidad de secado de fibra a 25 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor.**

<b>Tecún Uman San Marcos <math>\Delta H / \Delta t</math></b>	<b>Coatepeque Quetnango. <math>\Delta H / \Delta t</math></b>	<b>Saxayche El Petén <math>\Delta H / \Delta t</math></b>	<b>Tiquisate Escuintla <math>\Delta H / \Delta t</math></b>
0.1069	0.123	0.091	0.1001
0.1668	0.175	0.142	0.152
0.1987	0.1905	0.15	0.1687
0.1987	0.1905	0.15	0.1687
0.1987	0.1905	0.15	0.1687
0.1987	0.1905	0.11	0.1687
0.1987	0.185	0.0251	0.1123
0.1987	0.16	0.0082	0.0301
0.18	0.11	0.0053	0.006
0.14	0.06	0.0012	0.0017
0.08	0.028	0.0012	0.0012
0.0466	0.0133	0.001	0.001
0.028	0.007	0.0009	0.0009
0.0153	0.0046	0.0008	0.0008
0.0133	0.0021	0.0002	0.0003
0.0133	0	0	0

Fuente: Reporte de análisis de laboratorio, control de calidad, Olmeca S.A. Sección: Apéndice

**Figura 10. Curva de velocidad de secado de fibra en función de la humedad a 25 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor.**



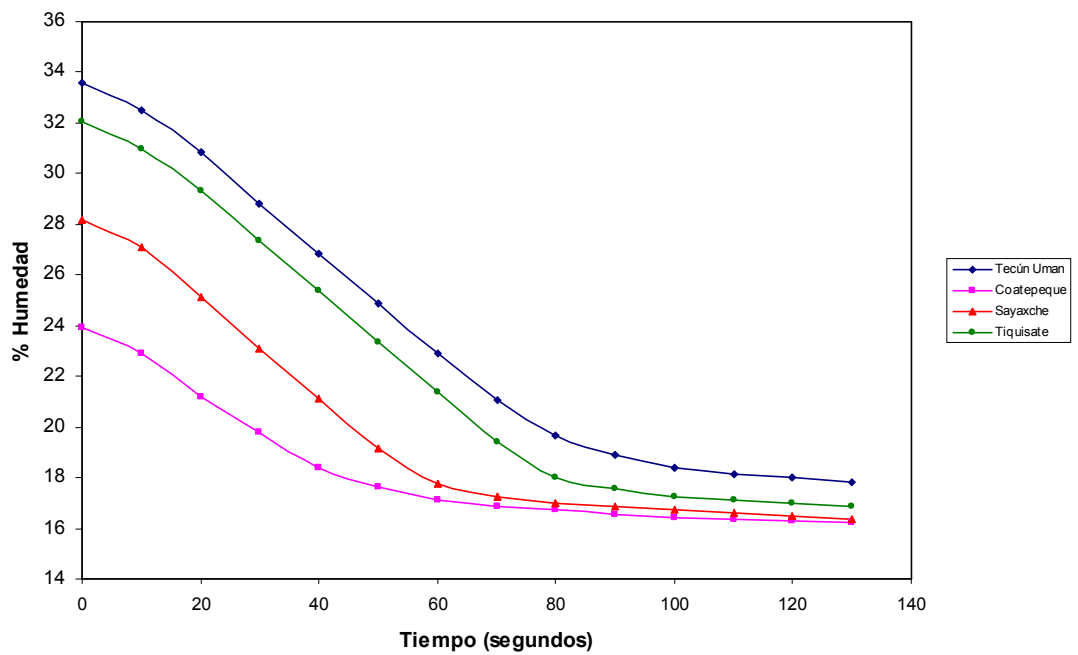
Fuente: Reporte de análisis, laboratorio, control de calidad, Olmecca S.A. Sección: Apéndice

**Tabla XII. Humedad de fibra a 30 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor a diversos tiempos de residencia.**

<b>Procedencia / Tiempo [s]</b>	<b>Tecún Uman San Marcos</b>	<b>Coatepeque Quetnango.</b>	<b>Saxayche El Petén</b>	<b>Tiquisate Escuintla</b>
0	33.563	23.943	28.152	32.074
10	32.494	22.874	27.083	31.005
20	30.826	21.206	25.096	29.337
30	28.839	19.806	23.109	27.35
40	26.852	18.406	21.122	25.363
50	24.865	17.606	19.135	23.376
60	22.878	17.14	17.735	21.389
70	21.078	16.86	17.269	19.402
80	19.678	16.707	16.989	18.002
90	18.878	16.574	16.856	17.536
100	18.412	16.441	16.723	17.256
110	18.132	16.351	16.59	17.103
120	17.979	16.261	16.457	16.97
130	17.846	16.2	16.324	16.837

Fuente: Reporte de análisis de laboratorio, control de calidad, Olmecca S.A. Sección: Apéndice

**Figura 11. Curva de humedad de fibra a 30 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor.**



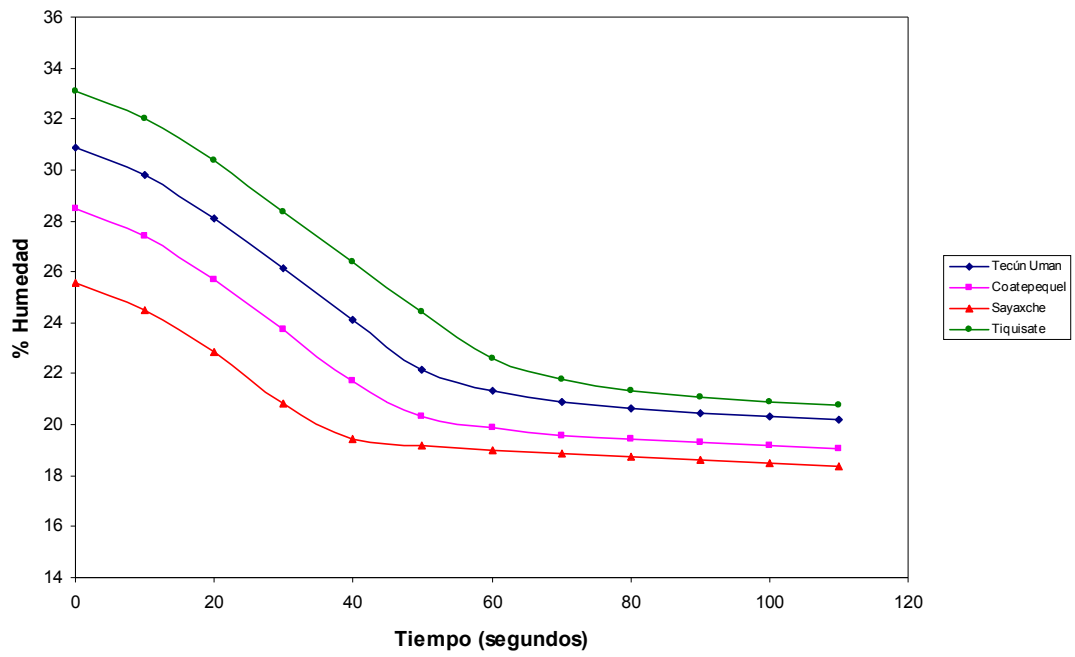
Fuente: Reporte de análisis, laboratorio, control de calidad, Olmeca S.A. Sección: Apéndice

**Tabla XIII. Humedad de fibra a 35 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor a diversos tiempos de residencia.**

<b>Procedencia / Tiempo [s]</b>	<b>Tecún Uman San Marcos</b>	<b>Coatepeque Quetnango.</b>	<b>Saxayche El Petén</b>	<b>Tiquisate Escuintla</b>
0	30.854	28.45	25.569	33.103
10	29.785	27.381	24.5	32.034
20	28.117	25.713	22.832	30.366
30	26.13	23.726	20.845	28.379
40	24.143	21.739	19.445	26.392
50	22.156	20.339	19.165	24.405
60	21.356	19.873	19.012	22.605
70	20.89	19.593	18.879	21.805
80	20.61	19.44	18.746	21.339
90	20.457	19.307	18.613	21.059
100	20.324	19.174	18.48	20.906
110	20.191	19.041	18.347	20.773

Fuente: Reporte de análisis de laboratorio, control de calidad, Olmeca S.A. Sección: Apéndice

**Figura 12. Curva de humedad de fibra a 35 hertz de frecuencia en potenciómetro de motoreductor.**



Fuente: Reporte de análisis, laboratorio, control de calidad, Olmecca S.A. Sección: Apéndice





## 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Para acondicionar fibra de palma africana como combustible de caldera, se deben establecer las variables de operación de un secador en túnel continuo a flujo transversal de gases de chimenea calientes que optimicen la operación.

Las principales variables que determinan las curvas de humedad de la fibra que permitan secarla hasta 16.2% de humedad son: flujo másico de gases calientes, la carga de sólidos y el factor de frecuencia que determinan la velocidad de la banda transportadora y el tiempo de residencia de la fibra en el secador.

Para determinar las variables de operación se debe considerar que la fibra alimentada al hogar de la caldera debe poseer una humedad del 16.2 %. El calor de combustión de la fibra de palma se relaciona de manera proporcional con la humedad retenida, considerada como propiedad inherente del material<sup>2</sup>.

Las variables que optimizan la operación son: carga inicial (3.89 t/h), flujo de gases (12.74 t/h), factor de frecuencia (25 hertz) y tiempo de residencia (160 segundos). Estos valores permiten la operación estable de la caldera considerando la descarga de gases de combustión hacia la chimenea y derivación del 30% para el secador; manteniendo el balance energético para producir 20 t/h de vapor a 1200 kPa de presión, y permitir la evaporación de agua no ligada en la fibra de palma como humedad en base seca.

---

<sup>2</sup> 2005 Carballo H. Reporte Caldera Caquis, Ministerio de Energía y Minas, pág. 24

En las curvas de humedad de la fibra de palma a diversos factores de frecuencia se observa que la humedad de la fibra alimentada al secador es variable, según su procedencia (San Marcos, Quetzaltenango, Escuintla y El Petén). La correcta operabilidad de secadores industriales permite manipular materiales con propiedades heterogéneas en la alimentación y lograr la homogeneidad en las propiedades como humedad o temperatura en la salida del secador<sup>3</sup>. Por lo que la capacidad del secador de operar a diversas condiciones es adecuada para estandarizar el proceso a partir de las variables de operación determinadas, obteniendo el mismo valor de humedad en la salida del secador.

La curva de humedad a 25 hertz de frecuencia es la mejor caracterización que representa el secado de la fibra de palma hasta 16.2% de humedad, ya que el tiempo de residencia a mayor factor de frecuencia (30 y 35 hertz) sobrepasa lo necesario para alcanzar la humedad de saturación de la fibra, resultado opuesto con menor factor de frecuencia (15 y 20 hertz). La humedad de saturación de un sólido es el mínimo porcentaje de agua que un sólido retiene en sus intersticios que no puede eliminarse por evaporación ya que la presión de vapor de agua en los gases de difusión se equilibra con la humedad del sólido.

La importancia de secar la fibra hasta la humedad de saturación es: no sobre cargar la banda transportadora, ya que la carga inicial establece el balance térmico en la caldera y aumenta el calor de combustión del material a (16992.6 kJ/kg). Además, la sobre carga no permite la difusión de los gases de chimenea por el material a flujo transversal dentro del secador.

---

<sup>3</sup> 1988 Treybal R. Operaciones de transferencia de masa, pág. 345

La curva de velocidad de secado a 25 hertz de frecuencia muestra el período de velocidad de secado constante, el período de velocidad decreciente, el contenido crítico de humedad y la humedad de saturación de la fibra de palma africana. Esta curva se representa por la razón de la variación de humedad y el tiempo versus la humedad de la fibra en su trayecto por el secador. El período de velocidad constante es mayor que los de velocidad decreciente, lo cual indica que la mayor parte de agua retenida por la fibra se encuentra en la superficie como agua no ligada, mientras que en los dos períodos de velocidad decreciente la evaporación de agua ligada es en menor proporción, ya que el sólido al alcanzar el contenido de humedad crítico se encuentra parcialmente seco por lo que el flujo capilar hacia la superficie es contrareestado por la compactación de partículas que son alimentadas al secador.

La humedad crítica representa el punto en que toda la superficie expuesta se hace completamente insaturada y marca el principio de la porción del ciclo de secado durante el cual la velocidad del movimiento de la humedad interna controla la velocidad de desecado<sup>4</sup>. La humedad crítica de la fibra (18.7%) evidencia que la mayor parte del secado ocurre por difusión gaseosa entre el agua de la superficie y los gases de chimenea, mientras que la difusión capilar es en menor proporción, ya que ésta permite alcanzar la humedad de saturación de la fibra (16.2 %).

---

<sup>4</sup> 1986 Perry R. Biblioteca del Ingeniero Químico, pág. 18-14



## CONCLUSIONES

1. Técnicamente es posible determinar las variables de operación del secador en túnel a flujo transversal que permitan optimizar su operación, mediante el balance térmico en la caldera que quema biomasa.
2. El tiempo de residencia de la fibra de palma africana en el secador es 160 segundos permitiendo el secado hasta la humedad de saturación (16.2%) para que genere 20 t/h de vapor a 1200 kPa de presión.
3. La curva de humedad se utiliza para determinar el factor de frecuencia en el motoreductor y a partir de éste, caracterizar la curva de velocidad de secado de la fibra de palma, ambas a 25 hertz de frecuencia.
4. La fibra de palma africana se clasifica como un bagazo, cuyo secado es por difusión de vapor en un 87% y por difusión en los intersticios en un 13%, por lo que la velocidad de secado constante determina la evaporación de agua no ligada y el período de velocidad de secado decreciente se determina por la difusión capilar.
5. La humedad crítica de la fibra de palma africana es 18.7 % y su humedad de saturación es 16.2 %, lo cual determina su calor de combustión (16992.6 kJ/kg) como propiedad inherente del material.



## RECOMENDACIONES

1. Buscar otras fuentes de combustibles alternos que se puedan quemar en la caldera de sólidos aprovechando residuos industriales de biogeneración que generen energía térmica en forma de vapor para el consumo interno de la planta de producción como el cascabillo de café, la cáscara de arroz, entre otros.
2. Establecer un plan de control de las variables necesarias para realizar el secado de la fibra de palma y definir un manual de operaciones que establezca de forma precisa el rango de las variables, el alcance y la responsabilidad de los operarios encargados en el área.
3. Evitar la acumulación de fibra de palma en la galera de almacenamiento ya que ésta, por naturaleza es un material higroscópico y las condiciones ambientales en las cuales se ubica la planta de producción son propicias para que la fibra adsorba humedad del medio ambiente.
4. Permitir que con la información obtenida en la operación del secador en túnel a flujo transversal y el procedimiento propuesto, se puedan hacer las generalizaciones necesarias para el secado de otros productos sólidos y/o residuos orgánicos.



5. Proveer a los operarios del secador equipo de protección personal: gafas, mascarillas, casco, guantes y protectores auditivos, ya que la fibra es un material fino que puede ocasionar problemas en las vías respiratorias o alergias en diversas partes del cuerpo inclusive los ojos.

## BIBLIOGRAFÍA

1. FELDER, Rousseau. **Principios elementales de los procesos químicos**. Tercera Edición. México: Editorial Limusa Wiley, 2003
2. HUI Y.H. **Bailey's Industrial Oil & Fat Products. Volume 4 Edible oil & Fat Products: Processing Technology**. 5<sup>th</sup>. edition E.E.U.U. 1996.
3. LEE Duarte, Frandique. Determinación de las curvas de secamiento de maíz en un secador de lecho fluido como práctica experimental. Trabajo de Graduación Ing. Químico. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, julio 2001.
4. LOPEZ, Iris C. **Fundamentos de estadística**. Quinta Edición. Zantmaro Editoriales S.A. México, 2005.
5. PERRY, Robert. **Biblioteca del Ingeniero Químico**. Quinta Edición, Segunda en Español. México: Editorial McGraw Hill, 1986.
6. TREYBAL, Robert. **Operaciones de transferencia de masa**. Segunda Edición. Editorial McGraw Hill. México 1988.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CARBALLO H., Miguel Ángel. **Reporte de evaluación de emisiones a la atmósfera caldera raquis**. Ministerio de Energía y Minas. Asesoría en Geología, Petróleo y Medio Ambiente, Mayo 2005
2. PERRY, Robert. **Biblioteca del Ingeniero Químico**. Quinta Edición, segunda en español. Editorial McGraw Hill. México 1986.
3. TREYBAL, Robert. **Operaciones de transferencia de masa**. Segunda Edición. Editorial McGraw Hill. México 1988.
4. WACKERLY, Dennis. **Estadística matemática con aplicaciones**. Cuarta Edición. Editorial Thomson. México 2000.



## **APÉNDICE**

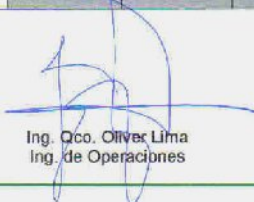
- **Humedad de fibra de palma africana procedente de Tecún Uman, San Marcos, a diversos valores de frecuencia en potenciómetro.**



Análisis de humedad de muestras de fibra de palma africana  
 Dispositivo: Sartorius MA45 (Signum, Test)  
 Departamento: Control de calidad, OLMECA II  
 Procedencia finca: Tecún Uman, San Marcos  
 Tiempos de residencia en secador: variable  
 Procedimiento: CCFPA-001

15-Oct-07

Tiempo [s]	15 Hertz	20 Hertz	25 Hertz	30 Hertz	35 Hertz
0	27.843	28.534	36.056	33.563	30.854
10	26.774	27.465	34.987	32.494	29.785
20	25.106	25.797	33.319	30.826	28.117
30	23.119	23.81	31.332	28.839	26.13
40	21.132	21.823	29.345	26.852	24.143
50	19.145	19.836	27.358	24.865	22.156
60	17.745	18.336	25.371	22.878	21.356
70	16.999	17.536	23.384	21.078	20.89
80	16.846	17.07	21.397	19.678	20.81
90	16.713	16.79	19.597	18.878	20.457
100	16.508	16.637	18.197	18.412	20.324
110	16.375	16.504	17.397	18.132	20.191
120	16.242	16.371	16.931	17.979	
130	16.268	16.238	16.651	17.846	
140	16.253	16.229	16.498		
150	16.245	16.223	16.365		
160	16.21	16.2	16.232		
170	16.2	16.2			
180	16.2	16.2			
190	16.2				
200	16.2				

  
 Ing. Qco. Oliver Lima  
 Ing. de Operaciones



Oficinas Centrales:  
 4a. Av. 8-93, Zona 9,  
 01009 Guatemala, C.A.  
 PBX: (502) 2429-9555  
 FAX: (502) 2336-9308

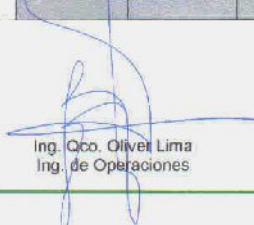
Planta:  
 Km. 16.5 Carretera a El Salvador  
 Frajanes, Guatemala, C.A. 01501  
 PBX: (502) 6628-5555

- Humedad de fibra de palma africana procedente de Coatepeque, Quetzaltenango, a diversos valores de frecuencia en potenciómetro.



Análisis de humedad de muestras de fibra de palma africana 15-Oct-07  
 Dispositivo: Sartorius MA45 (Signum, Test)  
 Departamento: Control de calidad, OLMECA II  
 Procedencia finca: Coatepeque, Quetzaltenango  
 Tiempos de residencia en secador: variable  
 Procedimiento: CCFPA-001

Tiempo [s]	15 Hertz	20 Hertz	25 Hertz	30 Hertz	35 Hertz
0	30.001	22.874	32.5	23.943	28.45
10	28.932	21.997	31.27	22.874	27.381
20	27.264	20.807	29.52	21.206	25.713
30	25.277	19.407	27.815	19.806	23.726
40	23.29	18.107	25.71	18.406	21.739
50	21.303	17.307	23.805	17.606	20.339
60	19.503	17.027	21.9	17.14	19.873
70	18.103	16.874	20.05	16.86	19.593
80	17.303	16.741	18.45	16.707	19.44
90	16.837	16.608	17.35	16.574	19.307
100	16.557	16.475	16.75	16.441	19.174
110	16.424	16.342	16.47	16.351	19.041
120	16.291	16.3	16.337	16.261	
130	16.276	16.275	16.267	16.2	
140	16.263	16.264	16.221		
150	16.251	16.232	16.2		
160	16.23	16.201	16.2		
170	16.22	16.2			
180	16.2	16.2			
190	16.2				
200	16.2				

  
 Ing. Oco. Oliver Lima  
 Ing. de Operaciones



Oficinas Centrales:  
 4a. Av. 8-93, Zona 9,  
 01099 Guatemala, C.A.  
 PBX: (502) 2429-5555  
 FAX: (502) 2338-0308

Planta:  
 Km. 16.5 Carretera a El Salvador  
 Frajanes, Guatemala, C.A. 01901  
 PBX: (502) 6628-5555



- Humedad de fibra de palma africana procedente de Tiquisate, Escuintla, a diversos valores de frecuencia en potenciómetro.



Análisis de humedad de muestras de fibra de palma africana

15-Oct-07.

Dispositivo: Sartorius MA45 (Signum, Test)

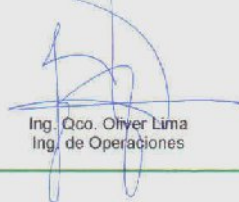
Departamento: Control de calidad, OLMECA II

Procedencia finca: Tiquisate, Escuintla

Tiempos de residencia en secador: variable

Procedimiento: CCFPA-001

Tiempo [s]	15 Hertz	20 Hertz	25 Hertz	30 Hertz	35 Hertz
0	25.569	26.001	27.012	32.074	33.103
10	24.5	24.932	26.011	31.005	32.034
20	22.832	23.264	24.491	29.337	30.386
30	20.845	21.277	22.804	27.35	28.379
40	19.445	19.29	21.117	25.363	26.392
50	18.045	17.89	19.43	23.376	24.405
60	17.245	17.424	17.743	21.389	22.605
70	16.779	17.144	16.62	19.402	21.805
80	16.499	16.891	16.319	18.002	21.339
90	16.463	16.758	16.259	17.536	21.059
100	16.393	16.625	16.242	17.256	20.906
110	16.347	16.492	16.23	17.103	20.773
120	16.281	16.359	16.22	16.97	
130	16.263	16.226	16.211	16.837	
140	16.243	16.219	16.203		
150	16.237	16.21	16.2		
160	16.21	16.2	16.2		
170	16.2	16.2			
180	16.2	16.2			
190	16.2				
200	16.2				

  
 Ing. Oco. Oliver Lima  
 Ing. de Operaciones



Oficinas Centrales:  
 4a. Av. 8-93, Zona 9  
 01109 Guatemala, C.A.  
 PBX: (502) 2429-5555  
 FAX: (502) 2336-9305

Planta:  
 Km. 15.5 Carretera a El Salvador  
 Frejanes, Guatemala, C.A. 01531  
 PBX: (502) 6628-6656

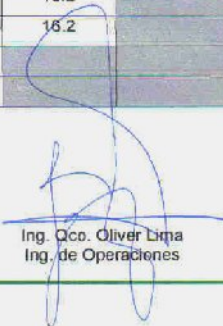
- **Humedad de fibra de palma africana procedente de Saxayche, El Petén, a diversos valores de frecuencia en potenciómetro.**



Análisis de humedad de muestras de fibra de palma africana.  
 Dispositivo: Sartorius MA45 (Signum, Test)  
 Departamento: Control de calidad, OLMECA II  
 Procedencia finca: Saxayche, El Petén  
 Tiempos de residencia en secador: variable  
 Procedimiento: CCFPA-001

15-Oct-07

Tiempo [s]	15 Hertz	20 Hertz	25 Hertz	30 Hertz	35 Hertz
0	22.895	20.47	24.560	28.152	25.569
10	21.495	19.67	23.659	27.083	24.5
20	20.095	18.87	22.239	25.096	22.832
30	18.495	18.07	20.739	23.109	20.845
40	17.695	17.604	19.239	21.122	19.445
50	16.895	17.224	17.739	19.135	19.165
60	16.615	16.999	16.639	17.735	19.012
70	16.462	16.84	16.388	17.269	18.879
80	16.401	16.705	16.306	16.989	18.746
90	16.393	16.426	16.253	16.856	18.613
100	16.364	16.321	16.241	16.723	18.48
110	16.331	16.262	16.229	16.59	18.347
120	16.262	16.258	16.219	16.457	
130	16.246	16.235	16.21	16.324	
140	16.22	16.223	16.202		
150	16.21	16.2	16.2		
160	16.2	16.2	16.2		
170	16.2	16.2			
180	16.2	16.2			
190	16.2				
200	16.2				

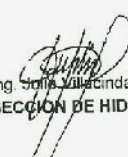

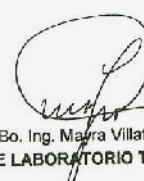

  
 Ing. Oco. Oliver Lima  
 Ing. de Operaciones



Oficinas Centrales:  
 4a. Av. B-93, Zona 9,  
 C1009 Guatemala, C.A.  
 PBX: (502) 2429-5555  
 FAX: (502) 2336-9308

Planta:  
 Km. 16.5 Carretera a El Salvador,  
 Frajanes, Guatemala, C.A. 01901  
 PBX: (502) 6528-5555

- **Análisis de calor de combustión de fibra de palma africana, Ministerio de Energía y Minas.**

MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS GUATEMALA, C. A.	<b>LABORATORIO TECNICO</b>  <b>RESULTADOS DE</b>  <b>ANALISIS</b>		PAGINA 1 DE (1) LAB-REP-1237-04 ORDEN No. L-575-04 NUM. _____								
			GUATEMALA, 22-11-04								
MUESTRA: Fibra de Palma PRESENTADA POR: OLMECA S.A. PROCEDENCIA: OLMECA S.A. Muestra No.3, humedad 16.2 % LOCALIZACION: Km. 16.5 Carretera a El Salvador FECHA DE MUESTREO: 10-11-04 FECHA DE RECEPCION DE MUESTRA Y PAPELERIA: 17-11-04 FECHA DE ANALISIS: del 18 al 19-11-04 PRECIO DE ANALISIS: \$ 12.00 ANALISTA: Hugo Argueta											
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 40%;">DESCRIPCION</th> <th style="width: 20%;">METODO DE ANALISIS</th> <th style="width: 20%;">ESPECIFICACION</th> <th style="width: 20%;">RESULTADO (1)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>CALOR DE COMBUSTION, Kcal/Kg</td> <td>ASTM D-240</td> <td></td> <td style="text-align: right;">(2) 4058</td> </tr> </tbody> </table>				DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION	RESULTADO (1)	CALOR DE COMBUSTION, Kcal/Kg	ASTM D-240		(2) 4058
DESCRIPCION	METODO DE ANALISIS	ESPECIFICACION	RESULTADO (1)								
CALOR DE COMBUSTION, Kcal/Kg	ASTM D-240		(2) 4058								
<b>OBSERVACIONES:</b> <p>1) El resultado es válido solo para el volumen de muestra presentada en este laboratorio.          2) 4058 Kcal/Kg es igual a 7304 Btu/lb.          La muestra se analizó en base húmeda.</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">               Ing. Sonia Valacinda  <b>SECCION DE HIDROCARBUROS</b> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 20px;"> <div style="text-align: center;">               Vo. Bo. Ing. Maira Villatoro  <b>JEFE LABORATORIO TECNICO</b> </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>											
El presente informe no puede ser modificado ni reproducido sin la autorización del Laboratorio Técnico.											

- **Análisis ORSAT Caldera Raquis, Ministerio de Energía y Minas**

ASESORÍA EN GEOLOGÍA, PETROLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE  
MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS (MEM)  
GUATEMALA, C.A.

Guatemala, Mayo 2006

Ing. Sergio Chang  
Gerente General  
OLMECA.

Respetable Ingeniero Sergio Chang, el motivo de la presente es para exponer a su conocimiento el resultado de los análisis realizado en la Caldera de Raquis, planta de producción OLMECA, S.A. Km. 16.5 a El Salvador, entrada a Pavón, Fraijanes, Guatemala Centro América.

Reporte de Evaluación de Emisiones a la Atmósfera:

Gases de Chimenea:

Elemento	Composición
O <sub>2</sub>	13.15 %
CO <sub>2</sub>	4.43 %
CO	1 %
N <sub>2</sub>	81.42 %
SO <sub>2</sub>	0%
Total Base Seca	100%
CO	10000 ppm
Nox	58.33 ppm

Porcentaje de Agua en Base Húmeda: 28.20 %


Gasto a Condiciones Normales: 32894.25 m<sup>3</sup>/h

Temperatura Gases de Combustión: 452.41 K

Temperatura Ambiente: 299.15 K

Peso molecular en Base Húmeda: 27.868

Atentamente,

  
Ing. Miguel Angel Carballo H.  
Responsable de Muestreo

