

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

**IMPLEMENTACION DEL FLUJO TRANSVERSAL EN
EL SECADOR DE TUNEL UBICADO EN EL LABORATORIO
DE OPERACIONES UNITARIAS**

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ARIEL ALEXANDER PERNILLA MEJIA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO QUIMICO

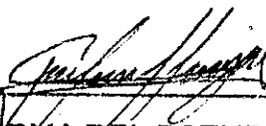
Guatemala, marzo de 1,999

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 tesis titulado:

IMPLEMENTACIÓN DEL FLUJO TRANSVERSAL EN EL SECADOR DE TUNEL UBICADO EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS.

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de:
Ingeniería Química con fecha 25 noviembre de 1998.



FIRMA DEL ESTUDIANTE

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO Ing. Herbert René Miranda Barrios.
VOCAL 1o. Ing. José Francisco Gómez Rivera.
VOCAL 2o. Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez.
VOCAL 3o. Ing. Jorge Benjamín Gutiérrez Quintana.
VOCAL 4o. Br. Dimas Alfredo Carranza Barrera.
VOCAL 5o. Br. José Enrique López Barrios.
SECRETARIA Ing. Gilda Marina Castellanos de Illescas.

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN
GENERAL PRIVADO

DECANO Ing. Herbert René Miranda Barrios.
EXAMINADOR Ing. Lisely de León Arana.
EXAMINADOR Ing. Manuel Galván Estrada.
EXAMINADOR Ing. Rosa María Girón Ruiz.
SECRETARIA Ing. Gilda Marina Castellanos de Illescas.

Guatemala, 10 de noviembre de 1998.

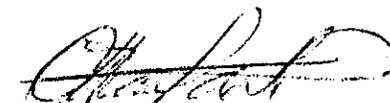
Ing, Julio Rivera
Coordinador del Area de Operaciones Unitarias
Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala

Apreciable Ingeniero Rivera:

Por este medio me permito informarle que he revisado el informe Final de Tesis del estudiante de la Carrera de Ingeniería Química Ariel Alexander Pernilla Mejía, carné 94-15447, titulado **Implementación Del Flujo Transversal En El Secador De Túnel Ubicado En El laboratorio De Operaciones Unitarias.**

He encontrado el trabajo satisfactorio por lo que lo remito a su consideración para proseguir con los trámites correspondientes.

Atentamente,


Ing. Qco. Otto De León.
Asesor de tesis.

Guatemala 26 De Noviembre De 1998.

Ingeniero
Julio Chávez Montúfar
Director Escuela De Ingeniería Química
Facultad De Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Chávez:

Por este medio me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que, he revisado el protocolo del trabajo de tesis del estudiante ARIEL ALEXANDER PERNILLA MEJIA, titulado: IMPLEMENTACION DEL FLUJO TRANSVERSAL EN EL SECADOR DE TUNEL UBICADO EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS, por lo que acepto ser asesor del mismo.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing: Otto Raúl De León.
ASESOR



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 25 de noviembre de 1,998.

Ingeniero
Julio Chávez Montúfar
Director Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Ingeniero Chávez.

Por este medio me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que, he revisado el Informe final de Tesis del estudiante **ARIEL ALEXANDER PERNILLA MEJIA**, titulado: **IMPLEMENTACION DEL FLUJO TRANSVERSAL EN EL SECADOR DE TUNEL UBICADO EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**, dejo constancia de aprobación para la autorización del respectivo trabajo.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS

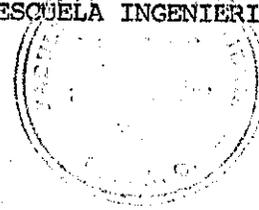

Ing. Julio Rivera Palacios
REVISOR



FACULTAD DE INGENIERIA

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, Ingeniero Otto Raúl de León de Paz, después de conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de Departamento, al trabajo de Tesis del estudiante **ARIEL ALEXANDER PERNILLA MEJIA**, titulado: **IMPLEMENTACION DEL FLUJO TRANSVERSAL EN EL SECADOR DE TUNEL UBICADO EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS**, procede a la autorización del mismo.


Ing. Otto Raúl de León de Paz
DIRECTOR ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



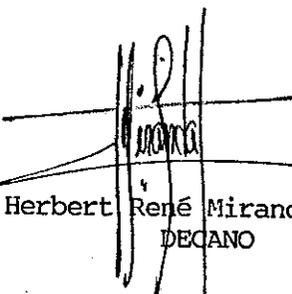
Guatemala, 25 de febrero de 1,999.

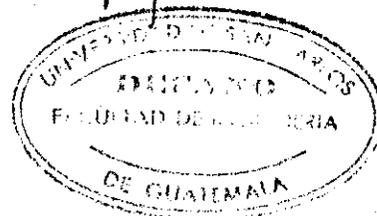


FACULTAD DE INGENIERIA

El Decano de la Facultad de Ingeniería, luego de conocer la autorización por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de Tesis titulado: **IMPLEMENTACION DEL FLUJO TRANSVERSAL EN EL SECADOR DE TUNEL UBICADO EN EL LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS** del estudiante **ARIEL ALEXANDER PERNILLA MEJIA**, procede a la autorización para la impresión de la misma.

IMPRIMASE:


Ing. Herbert René Miranda Barrios
DECANO



Guatemala, 25 de febrero de 1,999.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme permitido alcanzar este triunfo.

A mis padres, por el apoyo que me han brindado en todo momento y por sus sabios consejos.

A mis hermanos, por brindarme su afecto y confianza.

A mi novia, por su apoyo y comprensión.

A mi asesor Otto de León por haber confiado en mí para poder realizar mi trabajo de tesis.

Al Centro Universitario Ciudad Vieja, por la ayuda que me brindaron durante mi carrera.

DEDICATORIA

ACTO QUE DEDICO:

A MIS PADRES (Emilio e Izabel).

A MIS HERMANOS (Silvana, Gerson, Lileana y
Roxana).

ÍNDICE GENERAL

	Página
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	iv
GLOSARIO	viii
RESUMEN	X
INTRODUCCIÓN	Xii
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	2
2.1 Conceptos fundamentales de secado	2
2.2 Métodos generales de secado	3
2.3 Equipo para secado	4
2.3.1 Secador rotativo	4
2.3.2 Secador de tambor	4
2.3.3 Secador de bandejas	5
2.3.4 Secadores por pulverización	6
2.3.5 Secadores indirectos de vacío con anaqueles	6
2.3.6 Secador de cosechas y granos	7
2.3.7 Secadores continuos de túnel	7
2.3.8 Secadores continuos con circulación directa	9
2.4 Pruebas de secado	10
2.5 Movimiento de la humedad dentro del sólido	11
2.5.1 Difusión del líquido	11
2.5.2 Movimiento capilar	12

2.6	Actores del secado	13
2.7	Forma de humedad	13
2.7.1	Agua de cristalización	13
2.7.2	Agua intracelular	13
2.7.3	Agua extracelular	14
2.7.4	Agua en exceso	14
2.8	Promotores o aceleradores del secado	14
2.8.1	Temperatura	14
2.8.2	Velocidad del medio	15
2.8.3	Vacío	15
2.8.4	Espesor de la partícula	15
3.	METODOLOGÍA	16
3.1	Implementación del flujo transversal en el secador de túnel	16
3.2	Verificación del control automático del secador de túnel	16
3.3	Operación del equipo	17
3.3.1	Calibración del ventilador y determinación del flujo másico	17
3.3.2	Operación de los bancos del intercambiador de calor de superficies extendidas	18
3.4	Medición de la temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco	18
3.5	Productos utilizados	18
3.6	Parámetros de operación que se varían	19
3.7	Condiciones de trabajo	19
3.8	Secado del producto	19

3.9	Peso seco	20
3.10	Humedad en base seca	20
3.11	Velocidad de secado	20
4.	RESULTADOS	22
5.	DISCUSIÓN	23
	CONCLUSIONES	26
	RECOMENDACIONES	27
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
	BIBLIOGRAFÍA	29
	APÉNDICE	30

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

No.	Título	Pág.
1	Diagrama esquemático de un secador rotatorio con calentamiento directo	50
2	Secador de tambor rotatorio	50
3	Secador de bandejas o anaqueles	51
4	Diagrama de flujo del proceso para una unidad de secado por pulverización	51
5	Secador vertical de flujo continuo para granos	52
6	Tres tipos de secadores de túnel	53
7	Peso versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 bandejas	54
8	Peso versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 bandejas	55
9	Peso versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 bandejas	56
10	Peso versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 bandejas	57
11	Peso versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 bandejas	58
12	Peso versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 4 bancos	

	de vapor y 4 bandejas	59
13	Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 bandejas	60
14	Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 bandejas	61
15	Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 bandejas	62
16	Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 bandejas	63
17	Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 bandejas	64
18	Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 bandejas	65
19	Velocidad de secado versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 bandejas	66
20	Velocidad de secado versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 bandejas	67
21	Velocidad de secado versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 bandejas	68
22	Velocidad de secado versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 bandejas	69
23	Velocidad de secado versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 bandejas	70
24	Velocidad de secado versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 bandejas	71

TABLAS

No.	Título	Pág.
i	Flujo másico Versus abertura del "Damper"	31
ii	Peso versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 parrillas	32
iii	Peso versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 parrillas	33
IV	Peso versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 parrillas	34
V	Peso versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 parrillas	35
VI	Peso versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 parrillas	36
VII	Peso versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 parrillas	37
VIII	Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 parrillas	38
IX	Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 parrillas	39
X	Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 parrillas	40
Xi	Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 parrillas	41
Xii	Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 parrillas	42

Xiii	Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 parrillas	43
Xiv	Velocidad de secado versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 parrillas	44
Xv	Velocidad de secado versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 parrillas	45
Xvi	Velocidad de secado versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 parrillas	46
Xvii	Velocidad de secado versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 parrillas	47
Xviii	Velocidad de secado versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 parrillas	48
Xix	Velocidad de secado versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 parrillas	49

GLOSARIO

- Capilaridad** Es el movimiento de la humedad a través de los capilares e intersticios de los sólidos mediante un mecanismo en que interviene la tensión superficial.
- Difusión** Movimiento de un gas, líquido o sólido, como resultado del movimiento aleatorio térmico de sus partículas. La difusión en los sólidos ocurre lentamente a temperatura normal.
- Flujo másico** Relación de masa por unidad de tiempo.
Flujo másico= Area*velocidad*densidad.
- Humedad en base seca** Relación de masa de agua por masa seca (Hbs).
 $Hbs = [(Peso(t) - Peso\ seco) / Peso\ seco] * 100.$
- Peso Seco** Peso libre de humedad. Se determina dejando la sustancia durante 24 horas a 105°C.
- Secado** Eliminación de agua de los materiales de proceso y de otras sustancias volátiles. El término secado también se puede utilizar con referencia a la eliminación de otros líquidos orgánicos.

Secador de túnel	Es un aparato que tiene una serie de bandejas sobre las cuales se colocan los sólidos que se van a procesar. Las bandejas están a lo largo del túnel, en donde están en contacto directo con gases calientes.
Temperatura de bulbo húmedo	Temperatura de estado estable y no de equilibrio que se alcanza cuando se pone en contacto una pequeña cantidad de agua con una corriente continua de gas en condiciones adiabáticas.
Temperatura de bulbo seco	Temperatura real de la mezcla aire-vapor de agua.
Velocidad de secado	Relación de Kg de agua por unidad de tiempo y área.

RESUMEN

En el presente informe se estudia la metodología para implementar el flujo transversal en el secador de túnel ubicado en el laboratorio de operaciones unitarias, con el objeto de proporcionar un conocimiento práctico en cuanto a secado se refiere. Asimismo, se pretende ejemplificar este tipo de secado, utilizando la cabeza de camarón como producto para secar.

La metodología que se implementa para utilizar un flujo transversal incluye el diseño de las bandejas que sostienen el producto y de las formas en que se toma la temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco. Los parámetros que se manejan son: el flujo másico de aire, la temperatura de bulbo seco y la densidad del producto a secar, por lo tanto, ya controlados los parámetros (flujo másico [785.07 Kg/h y 563.86 Kg/h], bancos de vapor [4 y 7], bandejas [2 y 4]) se mide la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco a la entrada y salida del secador, juntamente con el peso del producto que se está secando a intervalos de tiempo que muestren resultados significativos.

Para determinar el final del periodo de secado en cada una de las corridas se trabajó hasta alcanzar un peso constante, obteniendo con ello humedades en base seca entre 8.00% y 16.00%. La experimentación se realizó en un rango de temperatura de 70 a 87°C y se obtuvo un promedio de 11 datos para cada una de las corridas.

Luego, de los distintos valores obtenidos se determinó que las mejores condiciones de trabajo se alcanzan utilizando un flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 bandejas.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de secado permiten la eliminación de agua y de otras sustancias volátiles de los materiales de proceso. Sin embargo, el término secado también se puede utilizar con referencia a la eliminación de otros líquidos orgánicos.

El secador de túnel con flujo transversal es un proceso por lotes, el cual permite que el producto se introduzca en el equipo de secado y el proceso se verifica por un período de tiempo. En este trabajo el secado se refiere a un sistema de extracción de agua por un método no mecánico.

En el presente informe se desarrolla un laboratorio experimental para la unidad de flujo transversal en el secador de túnel del laboratorio de operaciones unitarias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Para ello fue necesario equipar la unidad, implementando las bandejas para secado e instalar una báscula.

En el desarrollo de este trabajo se tienen los siguientes objetivos: implementar una práctica adicional en el laboratorio de Operaciones Unitarias, diseñar y efectuar modificaciones necesarias en el secador de túnel y determinar las condiciones que presenten mayores ventajas en el secado.

1. ANTECEDENTES

En la escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, se ha realizado sólo un estudio acerca del secador de túnel, el cual consistió en la "Evaluación de la eficiencia del intercambiador de calor de superficies extendidas, aire, vapor de agua, ubicado en el secador de túnel del laboratorio de operaciones unitarias", realizado por Mario Fernando Ayala Cabrera en 1992.

Para la elaboración de ese informe se hizo un reacondicionamiento del equipo verificando el funcionamiento del medidor de Thomas y calibrando el medidor de temperaturas de bulbo húmedo y seco del psicrógrafo Honeywell.

MARCO TEÓRICO

2.1 Conceptos fundamentales de secado

El secado es un proceso que durante muchos años se ha venido efectuando de distintas formas, pero en general este término se refiere a la eliminación de humedad en una sustancia. Se aplica tan fácil e incongruentemente que es necesario restringir su significado en el análisis presente del tema. Por ejemplo, un sólido húmedo, como madera, tela o papel, puede secarse por evaporación de la humedad ya sea en una corriente de gas o sin el beneficio del gas para acarrear el vapor; sin embargo, generalmente no se considera como secado la eliminación mecánica de esta humedad mediante el exprimido o centrifugado. 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.

Como parte del estudio del secado es importante incluir los siguientes conceptos:

- Contenido de humedad, en base húmeda. El contenido de humedad de un sólido se describe en función del porcentaje en peso de agua, es decir, como $[\text{Kg humedad}/(\text{Kg sólido seco} + \text{Kg humedad})]*100$.
- Contenido de humedad, en base seca. Se expresa como $(\text{Kg de humedad}/\text{Kg de sólido seco})*100$. (Ref. 3)

El secado o deshidratación de materiales biológicos (en especial los alimentos), se usa también como técnica de preservación. Los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua. Además muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua. En estudios que se han realizado se ha llegado a determinar que los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10% en peso; sin embargo, generalmente es necesario reducir este contenido de humedad por debajo del 5% en peso en los alimentos, para preservar el sabor y su valor nutritivo.

2.2 Métodos generales de secado

Los métodos y procesos de secado pueden clasificarse de diferentes maneras. Estos procesos pueden dividirse por lotes cuando el material se introduce en el equipo de secado y el proceso se verifica por un periodo de tiempo, o continuos, donde el material se añade sin interrupción al equipo de secado y se obtiene material seco con régimen continuo.

Los procesos de secado pueden clasificarse también de acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer el vapor de agua: a) en la primera categoría, el calor se añade por contacto directo con aire caliente a presión atmosférica, y el vapor de agua formado se elimina por medio del mismo aire; b) en el secado al vacío, la evaporación del agua se verifica con más rapidez a presiones bajas, y el calor se añade indirectamente por contacto con una pared metálica o por radiación; c) en el secado por congelación, el agua se sublima directamente del material congelado.

2.3 Equipo para secado

2.3.1 Secador rotativo

Los secadores rotativos son de gran utilidad a nivel industrial y consisten en un cilindro hueco que gira sobre un eje, por lo general con una ligera inclinación hacia la salida. Los sólidos granulares húmedos se alimentan por la parte superior tal como se muestra en la figura 1 y se mueven por el cilindro a medida que éste gira. Por medio de contacto directo con gases calientes y con flujo a contracorriente se produce el calentamiento, sin embargo en algunas ocasiones se produce un calentamiento por contacto indirecto a través de la pared calentada del cilindro.

2.3.2 Secador de tambor

Básicamente consiste en un tambor de metal calentado, como se muestra en la figura 2, en cuyo exterior se evapora la capa delgada de un líquido o una suspensión hasta lograr secarla. El sólido seco final se raspa del tambor, que gira lentamente.

Para el procesamiento de suspensiones o pastas de sólidos finos, así como para soluciones verdaderas, los secadores de tambor son muy adecuados. Es importante notar que el secador de tambor funciona en parte como evaporador y en parte como secador.

2.3.3 Secador de bandejas

También se llaman secadores de anaqueles, de gabinete o de compartimiento; el material, que puede ser un sólido en forma de terrones o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal con una profundidad de 10-100 mm. Un secador de bandejas tal como el que se muestra en la figura 3 contiene bandejas que se cargan y se descargan de un gabinete.

Para recircular el aire calentado con vapor sobre la superficie de las bandejas se utiliza un ventilador; también se utiliza calor obtenido con electricidad, en especial cuando el calentamiento es bajo. Más o menos el 10-20% del aire que pasa sobre las bandejas es aire nuevo, siendo el resto aire recirculado.

Al terminar el secado, se abre el gabinete y se reemplazan las bandejas por otras con nuevo material a secar. Una de las modificaciones de este tipo de secador es la de bandejas con carretillas, donde las bandejas se colocan en carretillas rodantes que se introducen al secador. Ésto significa un considerable ahorro de tiempo, puesto que las carretillas pueden cargarse y descargarse fuera del secador.

Si el material a secar es de tipo granular se puede colocar sobre bandejas cuyo fondo es un tamiz. Con esto se obtiene un tiempo de secado más corto debido a que la circulación atravesadora favorece el proceso.

2.3.4 Secadores por pulverización

En este tipo de secadores, un líquido o una suspensión se pulveriza o se rocía con una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se vaporiza de dichas gotas con rapidez, obteniéndose partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. El flujo de gas y de líquido de la cámara de pulverización puede ser a contracorriente, en paralelo o una combinación de ambas.

Las gotas finas se forman al introducir el líquido en toberas de pulverización o discos giratorios de rociado de alta velocidad, en el interior de una cámara cilíndrica. Ver figura 4. Es necesario asegurarse de que las gotas o partículas húmedas del sólido no choquen ni se adhieran a las superficies sólidas antes de que se hayan secado. Por consiguiente, es necesario emplear cámaras bastante grandes. Los sólidos secos salen por el fondo de la cámara a través de un transportador de tornillo. Los gases de escape fluyen hacia un separador de ciclón para recuperar las partículas muy finas. Las partículas que se obtienen son muy ligeras y bastante porosas. La leche en polvo se obtiene mediante este proceso.

2.3.5 Secadores indirectos de vacío con anaqueles

Los secadores de vacío con anaqueles se calientan indirectamente y son de tipo lotes, similares a los de bandejas. Esta clase de secador consiste de un gabinete construido de hierro colado o plancha de acero con puertas herméticas, de tal manera que se pueda operar con vacío. Los anaqueles huecos de acero se montan dentro de la cámara y se conectan en paralelo con los colectores de

vapor de entrada y de salida. Las bandejas que contienen los sólidos mojados se colocan sobre los anaqueles huecos. El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Para operaciones a temperaturas más bajas, se usa circulación de agua caliente en lugar de vapor, para suministrar el calor que vaporiza la humedad. Los vapores se colectan en un condensador.

Estos secadores son muy aconsejables cuando se requiere secar materiales costosos o sensibles a la temperatura o bien que se oxiden fácilmente. Son muy útiles para manejar materiales con disolventes tóxicos o valiosos.

2.3.6 Secador de cosechas y granos

Los granos contienen aproximadamente 30-35% de humedad y para almacenarlos sin problemas durante un año deben secarse hasta obtener un 13% de humedad en peso. En la figura 5 se muestra un secador de flujo continuo típico. En la tolva de secado, el espesor de la capa de grano, a través de la cual pasa el aire caliente, es de 0.5 mm o menos. Una corriente de aire sin calentar, en la sección del fondo, enfría el grano seco antes de la salida. (Ref. 1).

2.3.7 Secadores continuos de túnel

Los túneles continuos son, en muchos casos, compartimientos por lotes de carretillas o bandejas operados en serie. Los sólidos que se van a procesar se colocan en bandejas o carretillas que se desplazan progresivamente a lo largo del túnel, en donde están en contacto con gases calientes. El funcionamiento es

semicontinuo y, cuando el túnel está lleno, una de las carretillas se extrae por el extremo de descarga al mismo tiempo que se introduce otra por el extremo de admisión. En algunos casos las carretillas se desplazan sobre carriles o monorraíles y usualmente se transportan por medios mecánicos usando propulsores de cadenas conectados a la base de cada carretilla. En la figura 6 se ilustran diagramas esquemáticos de tres configuraciones comunes de túnel. Los túneles de transportador de banda y transportador de criba o pantalla tienen un funcionamiento realmente continuo, puesto que arrastran una capa de sólidos en un transportador sin fin.

La circulación del aire puede ser totalmente a contracorriente o de corriente paralela, o bien, una combinación de estas dos formas, como se ilustra en la figura 6. Además, con frecuencia se emplean diseños de flujo transversal, en donde el aire de calentamiento circula en uno y otro sentido sobre las carretillas colocadas en serie. Se pueden instalar bobinas o serpentines de recalentamiento después de cada paso de flujo transversal, con el fin de mantener una temperatura constante durante la operación: en cada etapa se instalan ventiladores de circulación del tipo de hélices grandes, y el aire se introduce o extrae en cualquier punto conveniente. Los equipos de túnel poseen la máxima flexibilidad para cualquier combinación de corriente de aire y escalonamiento de temperaturas. Cuando se trata del manejo de sólidos particulados granulados, que no ofrecen resistencia poderosa al flujo del aire, se emplean transportadores de banda perforada o tipo criba con circulación directa de gas, con objeto de mejorar las velocidades de transferencia de calor y masa.

En los equipos de túnel, los sólidos se calientan usualmente por contacto directo con los gases calientes. En operaciones a temperaturas elevadas, la

radiación de la pared y el recubrimiento refractario adquieren una importancia especial. El aire que está dentro de la unidad de calor directo se calienta en forma directa o indirecta por combustión o bien, a temperaturas inferiores a 475°K, por medio de serpentines de vapor con aletas.

Los equipos de túnel son más apropiados para producción a mayor escala y representan por lo común ahorros de inversión e instalación en comparación con los compartimientos por lotes. Los transportadores de banda y criba, que son realmente continuos, representan ahorros de mano de obra importantes en comparación con las operaciones por lotes, pero requieren una inversión adicional para los dispositivos automáticos de alimentación y descarga.

2.3.8 Secadores continuos con circulación directa

Estos operan basándose en el principio del soplado de aire caliente a través de un lecho permeable del material mojado, que pasa en forma continua por el secador. Las velocidades de desecado son altas debido a la amplia superficie de contacto y a la distancia corta de desplazamiento para la humedad interna.

El tipo más utilizado es el secador horizontal de transportador de criba o pantalla en el cual se transporta el material mojado formando una capa de 2 a 15 cm de profundidad sobre una banda horizontal perforada o de malla, mientras se hace pasar aire calentado, en sentido ascendente o descendente, por el lecho de material. (Ref. 2).

Después de hacer mención de los diferentes secadores que hay, es importante definir que la temperatura de bulbo húmedo es la temperatura de estado estable y no de equilibrio que se alcanza cuando se pone en contacto una pequeña cantidad de agua con una corriente continua de gas en condiciones adiabáticas. Puesto que la cantidad de líquido es pequeña, la temperatura y la humedad del gas no cambian, contrariamente a lo que sucede en el caso de saturación adiabática, donde la temperatura y la humedad del gas sí varían.

2.4 Pruebas de secado

Con respecto a la muestra de una sustancia, la rapidez de secado puede determinarse suspendiendo la muestra en un gabinete o tubería, en una corriente de aire, para un balance. Entonces, el peso de la muestra secada puede medirse como una función del tiempo. Deben observarse ciertas precauciones para que los datos sean de máxima utilidad. La muestra no debe ser muy pequeña. Más aun, las siguientes condiciones que, según se prevé, predominarán en la operación a gran escala: a) la muestra debe soportarse sobre un plato o estructura, de forma similar al modo de trabajo a gran escala; b) debe tener la misma relación de superficie que se seca a la que no se seca; c) la muestra debe sujetarse a condiciones de transferencia de calor por radiación, similares a las utilizadas en el trabajo a gran escala; d) el aire debe tener la misma temperatura, humedad y velocidad (con la misma velocidad y dirección con respecto a la muestra). Si es posible, se deben realizar varias pruebas sobre muestras de diferente espesor. También debe obtenerse el peso seco de la muestra.

La exposición de la muestra a aire de temperatura, humedad y velocidad constantes constituye el secado en condiciones constantes de secado.

2.5 Movimiento de la humedad dentro del sólido

Cuando ocurre la evaporación superficial, debe haber un movimiento de la humedad desde el interior del sólido hasta la superficie. La naturaleza del movimiento modifica el secado durante el período decreciente de la rapidez. Con el fin de apreciar la naturaleza diversa de las porciones observadas en el período decreciente de la rapidez de la curva de secado, se analizarán algunas de las teorías expuestas para explicar el movimiento de la humedad y la relación de éstas con las curvas de decaimiento de la rapidez.

2.5.1 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, como en el caso del jabón, goma, gelatina y similares, y en ciertos casos en que se está secando la humedad ligada, como en el secado de las últimas partes de agua en arcillas, harina, textiles, papel y madera. Se ha descubierto 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 período 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 rapidezces 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 período de evaporación superficial no saturada; el período decreciente de la rapidez controlado por la difusión empieza inmediatamente después de que termina el período de rapidez constante.

2.5.2 Movimiento capilar

La humedad no ligada en sólidos granulares y porosos como arcillas, arena, pigmentos para pinturas y similares, se mueve 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.

También existen algunas fuerzas mecánicas como la filtración, centrifugación, sedimentación y expresión, que permiten la eliminación o extracción de agua.

2.6 Actores del secado

Los principales controles que se deben tener durante el secado son: a) humedad (agua contenida en el sólido), b) sólido (como soporte de la humedad), c) el medio coadyuvante (medio en contacto con el sólido) y d) acelerador del secado (velocidad de viento, temperatura y contenido de humedad relativa).

2.7 Forma de humedad

La mayoría de compuestos y el ser humano lleva hidrógeno (H) y oxígeno (O) que de una forma pueden llegar a formar agua. Esto forma el agua química que no puede ser extraída por secado.

2.7.1 Agua de cristalización

Esta se extrae sólo por calcinación (temperatura mayor a 400°C) y no por secado. Ejemplo: Sílica gel y algunos minerales.

2.7.2 Agua intracelular

Todos los líquidos dentro de la célula se toman como agua intracelular.

Aquí se puede utilizar el secado. Al sacar el agua intracelular se le llama deshidratación, que es una variación del secado.

2.7.3 Agua extracelular

Se extrae por secado y es menos difícil que sacar el agua intracelular.

2.7.4 Agua en exceso

Hay alguna cantidad de agua que sale no por difusión sino por capilaridad. El agua extracelular generalmente es por difusión; sin embargo, en donde hay aglomeraciones se da capilaridad.

Para obtener un secado adecuado se deben desarrollar algunos procesos previos a éste como lo son: a) eliminación mecánica del exceso de agua y b) presecado.

Los dos medios más utilizados que ayudan a quitar la humedad y se la llevan son: a) aire (lleva energía y quita humedad del sólido) y b) vacío (consiste en bajar la presión y la salida es más rápida).

2.8 Promotores o aceleradores del secado

2.8.1 Temperatura

Con la temperatura se pueden manejar dos parámetros: a) entalpía del aire y b) humedad del aire. Es recomendable subir la temperatura; sin embargo,

cuando hay exceso de agua sólo se necesita aire no saturado.

2.8.2 Velocidad del medio

A mayor velocidad de contacto interfacial más rápido es el proceso.

2.8.3 Vacío

Esta operación consiste básicamente en bajar la presión, lo cual permite que la temperatura necesaria para que el agua se elimine del sólido sea menor.

2.8.4 Espesor de la partícula

Básicamente este parámetro influye mucho para el tiempo de secado, pues dependiendo del espesor será la resistencia para la extracción del agua.

3. METODOLOGÍA

En el laboratorio de Operaciones Unitarias se tiene un secador de túnel, que consta básicamente de: a) un túnel de secado, b) una resistencia eléctrica, c) un ventilador con "Damper" para regular la alimentación de aire al sistema, d) un intercambiador de calor de superficies extendidas para el sistema aire-vapor de agua y e) un medidor de Thomas. Para operar el secador de manera deseada es importante realizar lo siguiente:

3.1 Implementación del flujo transversal en el secador de túnel

- Diseñar las parrillas que se van a utilizar y para los fines prácticos se utilizan diferentes números de parrillas para cada corrida, llegando a utilizar un máximo de cuatro.
- Instalar una báscula para esa sección.

3.2 Verificación del control automático del secador de túnel

Debido a que los resultados de temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo obtenidos en el psicrógrafo no son los mismos que los obtenidos de una forma directa con termómetros, no es aconsejable utilizar el control automático, además el componerlo resulta bastante caro y difícil.

3.3 Operación del equipo

3.3.1 Calibración del ventilador y determinación del flujo másico

Para ello se deben seguir de forma ordenada los siguientes pasos:

- Revisar que la posición de los "Damper" se encuentre de la siguiente forma:
 - "Damper" de entrada de aire, abierto 100%.
 - "Damper" de salida de aire, abierto 100%.
 - "Damper" de recirculación de aire, cerrado 100%.
- Poner a funcionar el motor del ventilador con velocidad constante.
- Colocar un termómetro antes de la resistencia y otro después de ella.
- Conectar la resistencia y esperar que los termómetros estabilicen sus lecturas de temperatura.
- Registrar los siguientes datos:
 - Abertura del "Damper" de regulación de flujo de aire.
 - Amperaje y voltaje.
 - Temperatura de entrada y salida del aire.
- Empezar con la máxima abertura del "Damper" de regulación de flujo de aire, esperar que el sistema se estabilice y seguidamente se va cambiando la abertura para obtener la curva de calibración de: flujo másico de aire versus abertura del "Damper" de regulación de flujo de aire. Se toma un mínimo de diez puntos para el trazado de la gráfica.
- Apagar el sistema. Después de haber finalizado la calibración, primero se debe desconectar la resistencia, esperar que se enfríe, poniendo al máximo la abertura del "Damper" de regulación de flujo de aire durante unos siete minutos; posteriormente se apaga el motor.

3.3.2 Operación de los bancos del intercambiador de calor de superficies extendidas

En esta sección del secador de túnel se deben seguir los siguientes pasos:

- Abrir las válvulas correspondientes a cada uno de los bancos del intercambiador de calor y fijar una presión que sea constante.
- Colectar el condensado de vapor de agua que se ha producido.

3.4 Medición de la temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco

Para medir la temperatura de bulbo húmedo se utiliza un termómetro al cual se le pone en el bulbo una gasa que esté conectada a un sistema de goteo de agua, lo cual permite que el bulbo del termómetro siempre esté húmedo. Para medir la temperatura de bulbo seco se utiliza un termómetro expuesto directamente a la corriente de aire.

3.5 Productos utilizados

Primero se realizó una prueba preliminar de secado a los siguientes productos: a) cabeza de camarón y b) viruta de madera. Seguidamente, el producto de mayor utilidad industrial y que presentó mejores condiciones para el secado con flujo transversal de aire, se trabajó en varias corridas para obtener mayor precisión en los resultados.

3.6 Parámetros de operación que se varían

Durante el desarrollo del estudio se variaron los siguientes parámetros:

- El flujo másico de aire, que se regula con el "Damper".
- La temperatura de bulbo seco, que varía conforme varía el número de bancos del intercambiador de calor que se utilizan.
- La densidad del producto a secar, que depende de la cantidad que se ponga a secar y del número de bandejas que se utilicen.

3.7 Condiciones de trabajo

Durante el proceso de secado se trabajaron las siguientes condiciones:

- El flujo másico de aire en un rango de [613 Lb/h - 1702 Lb/h].
- La temperatura de bulbo seco en un rango de [70°C - 87°C].

La condición final más importante es la de humedad en base seca y se espera que esté en un rango de [8 - 16%].

3.8 Secado del producto

- Se colocó el producto de tal forma que en la parrilla inferior se aproveche el flujo directo a través de los espacios vacíos de la parrilla superior.
- Se registraron los siguientes datos:

El peso del producto que se utilizó.

La temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco antes de que la corriente de aire tuviera contacto con el producto que se secó.

La temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco después

de que la corriente de aire secase el producto.

El flujo másico de aire que se utilizó.

El tiempo de secado.

El peso del producto después de haberse secado.

- Determinar que condiciones son las más favorables para el proceso.

3.9 Peso seco

- Pesar el producto que se va a secar.
- Dejar el producto durante 24 horas a 105°C.
- Pesar nuevamente el producto.
- Determinar el porcentaje del peso inicial que corresponde al peso seco.

3.10 Humedad en base seca

Para ello se debe utilizar la siguiente fórmula:

$$HBS = [(P(t) - P(x)) / P(x)] * 100$$

Donde:

$P(t)$ = Peso a determinado tiempo.

$P(x)$ = Peso seco.

3.11 Velocidad de secado

Calcular el gradiente de pesos a un determinado tiempo, el peso seco y el área superficial expuesta al secado, para emplear la siguiente ecuación:

$$\text{Velocidad} = - (Ls/A) * (\Delta X / \Delta t)$$

Donde:

L_s = Kg de sólido seco usado...

A = área superficial expuesta al secado.

ΔX = pérdida de peso en un determinado tiempo.

ΔT = diferencia de tiempo.

4. RESULTADOS

- El modelo matemático que relaciona el flujo másico de aire en función de la abertura del "Damper" es:

$$m \text{ (Kg/h)} = 297.263181 * A \text{ (cms)}^{0.408125}$$

donde: m = Flujo másico de aire

A = abertura del "Damper".

- El uso de dos bandejas produce un período de secado mayor que al utilizar cuatro bandejas.
- Las condiciones óptimas para el secado de cabeza de camarón fueron: a) flujo másico de 563.86 Kg/h, b) 7 bancos de vapor y c) 4 bandejas.
- La velocidad constante de secado para las condiciones de secado dadas en el inciso anterior fue 1.50 Kg H₂O/h.m².

5. DISCUSIÓN

Las condiciones óptimas se determinaron después de observar las gráficas de los resultados y determinar cual nos permite alcanzar una humedad en base seca de 8%, en el menor tiempo y con el mayor número de bandejas.

El resultado de utilizar diferente número de bandejas para algunas corridas nos permitió establecer que al emplear dos bandejas el tiempo de secado era mayor que al emplear cuatro. Este fenómeno puede ser consecuencia de que el viento no se canalizó bien al utilizar dos bandejas, y además cuando se utilizan las cuatro bandejas el aire se distribuye con un mejor perfil y las caídas de presión son más uniformes.

En la figura 9 se observa que el tiempo de secado fue menor que para todas las demás. Esto se debe a que sólo esta corrida se trabajó con cabeza de camarón más delgada, lo que permitió que el tiempo difusivo del agua fuera mayor. Es importante tener presente para cada corrida el espesor del sólido que se va a secar porque conforme este varíe van a variar nuestros resultados.

Las humedades en base seca estuvieron en un rango de [8%-16%], las cuales se calcularon tomando como peso seco el 25% del peso inicial del producto. Se tomó el 25% porque fue el porcentaje que se obtuvo después de dejar la cabeza de camarón veinte y cuatro horas a ciento cinco grados centígrados.

Las curvas de velocidad de secado versus humedad en base seca presentan las fases siguiente: a) Velocidad creciente, b) Velocidad constante y c) Velocidad decreciente.

La velocidad creciente al inicio se debe a que al principio, el sólido suele estar a una temperatura inferior a la que tendrá al final, y la velocidad de evaporación irá en aumento.

Durante el período de velocidad constante la superficie del sólido está al principio, muy mojada y sobre ella existe una película de agua continua. Las ondulaciones y hendiduras sobre la superficie del sólido ayudan a obtener una velocidad más alta que la que tendría una superficie completamente plana. Como el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el período de velocidad constante proviene del interior del sólido. Este período continua mientras el agua continua llegando a la superficie con la misma rapidez con la que se evapora.

En el período de velocidad decreciente no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente mojada, y la porción mojada comienza a disminuir durante este período de velocidad decreciente, hasta que la superficie queda seca en su totalidad. El plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. El calor para la evaporación se transfiere a través del sólido hasta la zona de vaporización. El agua vaporizada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire.

Las corridas que se realizaron con viruta de madera dieron buenos resultados; sin embargo, no se expusieron en el presente informe porque se seleccionó únicamente el producto de mayor interés industrial, siendo este la cabeza de camarón.

CONCLUSIONES

- La metodología propuesta en este trabajo es válida para el secado con flujo transversal de aire en un secador de túnel.
- La variación del flujo másico no modifica de manera significativa la temperatura de bulbo seco de entrada.
- El uso de cuatro bandejas permite que el aire se distribuya con un mejor perfil y que las caídas de presión sean más uniformes.

RECOMENDACIONES

- Utilizar, para cada corrida, producto con mucha similitud en el espesor para evitar que los resultados difieran grandemente.
- Distribuir de la mejor forma sobre las bandejas el sólido que se va secar.
- Finalizar el secado al alcanzar la humedad en base seca que se haya establecido desde un inicio. Para ello es necesario tener el peso seco del sólido que se va secar antes de empezar el proceso de secado.
- La toma de datos se debe hacer de una forma directa sin estar interviniendo en el proceso de secado y a intervalos de tiempo que muestren resultados significativos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Geankoplis Christie J, **Procesos de transporte y operaciones unitarias**. (2a. ed. México: Compañía editorial Continental, S. A., 1995). p. 335-440.
2. Perry Robert H., **Manual del ingeniero químico**. (6a. ed. México: Editorial McGraw-Hill). p. 20-28, 20-29.
3. Treybal Robert E., **Operaciones de transferencia de masa**. (2a. ed. México: Editorial McGraw-Hill, 1995). p. 723-759.

BIBLIOGRAFIAS

1. DAINTITH, John. **Diccionario de química.** 1a. ed. Bogotá, Colombia: Editorial Norma: 221-222, 1985.
2. KERN, Donald Q. **Procesos de transferencia de calor.** 26a. ed. México: Compañía Editorial Continental, S. A. De C. V.: 660, 1995.
3. MORTIMER, Charles E. **Química.** 5a. ed. México: Grupo Editorial Iberoamérica: 225-226, 1983.

APÉNDICE

DATOS ORIGINALES

Tabla I. Flujo másico versus abertura del "Damper".

A	T1	T2	V	Am	Tc	Cp	Q	ΔT	m
10.8	35	50	240	13.5	42.5	1006.413	3240	15	0.215
10.3	37	52.5	240	13.5	44.8	1006.587	3240	15.5	0.208
9.8	38	53	240	13.5	45.5	1006.640	3240	15	0.214
8.8	39	55	240	13.5	47	1006.753	3240	16	0.201
7.8	39	55.5	240	13.5	47.2	1006.768	3240	16.5	0.195
6.8	40	58	240	13.5	49	1006.904	3240	18	0.179
5.8	41	60	240	13.5	50.5	1007.017	3240	19	0.169
4.8	42.5	63	240	13.5	52.8	1007.191	3240	20.5	0.157
3.8	44.5	68	240	13.5	56.2	1007.448	3240	23.5	0.137
2.8	55	79	240	13.5	67	1008.264	3240	24	0.134
1.8	58.5	89	240	13.5	73.8	1008.778	3240	30.5	0.105
0.8	58.5	102	240	13.5	80.2	1009.262	3240	43.5	0.074

en donde:

A= Abertura del "Damper", en cms.

T1= Temperatura antes del medidor de Thomas, en °C.

T2= Temperatura después del medidor de Thomas, en °C.

V= Voltaje.

Am= Amperaje.

Tc= Temperatura calórica, en °C.

Cp= Calor específico, en J/(Kg*°K).

Q= Calor, en J/s.

ΔT= Cambio de temperatura, en °C.

m= Flujo másico, en Kg/s.

Tabla II. Peso versus tiempo. Utilizando un flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 parrillas.

Tiempo (min).	TBS Inicial (°C)	TBH Inicial (°C)	TBS Final (°C)	TBH Final (°C)	Peso (Lbs).
0	35	24	35	24	2.00
15	85	35	77	31	1.71
30	85	35	78	31	1.42
45	86	35	79	32	1.21
60	86	35	79	31	1.14
75	85	36	78	32	1.00
90	86	35	79	30	0.86
105	86	40	79	38	0.86
110	86	40	79	38	0.78
120	86	39	79	36	0.71
125	86	39	79	36	0.71
140	86	40	79	36	0.64
155	86	40	79	36	0.57
165	86	40	79	35	0.56

En donde:

TBS= Temperatura de bulbo seco.

TBH= Temperatura de bulbo húmedo.

Tabla III. Peso versus tiempo. Utilizando un flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 parrillas.

Tiempo (min).	TBS Inicial (°C)	TBH Inicial (°C)	TBS Final (°C)	TBH Final (°C)	Peso (Lbs).
0	35	26	35	26	1.00
15	83	38	75	33	0.86
30	85	40	77	34	0.78
45	86	39	78	36	0.71
60	85	38	78	34	0.64
75	85	38	78	34	0.57
90	85	38	78	36	0.50
105	85	37	78	34	0.50
120	85	38	78	34	0.43
130	85	37	78	35	0.43
145	86	38	79	35	0.36
155	85	38	79	35	0.36
170	85	38	79	35	0.28

En donde:

TBS= Temperatura de bulbo seco.

TBH= Temperatura de bulbo húmedo.

Tabla IV. Peso versus tiempo. Utilizando un flujo másico de 785.07 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 parrillas.

Tiempo (min).	TBS Inicial (°C)	TBH Inicial (°C)	TBS Final (°C)	TBH Final (°C)	Peso (Lbs).
0	27	27	27	23	2.00
15	70	38	62	29	1.60
30	70	38	62	31	1.33
35	70	40	62	31	1.27
40	70	40	62	31	1.20
45	70	40	62	31	1.13
50	74	41	65	32	1.07
55	74	41	65	32	1.00
60	74	41	65	32	0.99
65	74	41	65	32	0.86
70	74	41	65	31	0.80
75	74	41	65	31	0.80
85	72	38	64	31	0.73
95	72	38	64	31	0.66
105	71	38	64	31	0.60
125	72	38	64	31	0.54

En donde:

TBS= Temperatura de bulbo seco.

TBH= Temperatura de bulbo húmedo.

Tabla V. Peso versus tiempo. Utilizando un flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 parrillas.

Tiempo (min).	TBS Inicial (°C)	TBH Inicial (°C)	TBS Final (°C)	TBH Final (°C)	Peso (Lbs).
0	29	26	29	26	2.00
15	86	37	74	37	1.70
30	87	37	76	37	1.33
45	86	37	79	37	1.21
60	86	42	79	40	1.15
75	85	39	66	40	1.03
90	84	39	78	38	0.97
105	84	39	78	38	0.97
120	82	38	72	38	0.85
135	84	38	76	38	0.73
150	84	38	76	38	0.67
165	86	39	75	38	0.54

En donde:

TBS= Temperatura de bulbo seco.

TBH= Temperatura de bulbo húmedo.

Tabla VI. Peso versus tiempo. Utilizando un flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 parrillas.

Tiempo (min).	TBS Inicial (°C)	TBH Inicial (°C)	TBS Final (°C)	TBH Final (°C)	Peso (Lbs).
0	29	26	29	26	1.00
15	86	36	73	36	0.89
30	87	36	74	35	0.75
45	87	37	75	36	0.70
60	86	37	74	35	0.68
75	86	39	75	36	0.64
90	85	39	78	36	0.57
105	84	38	77	35	0.50
120	84	38	76	35	0.45
135	84	38	75	35	0.39
150	85	38	78	35	0.36
165	85	37	78	36	0.32
175	85	38	77	36	0.27

En donde:

TBS= Temperatura de bulbo seco.

TBH= Temperatura de bulbo húmedo.

Tabla VII. Peso versus tiempo. Utilizando un flujo másico de 563.86 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 parrillas.

Tiempo (min).	TBS Inicial (°C)	TBH Inicial (°C)	TBS Final (°C)	TBH Final (°C)	Peso (Lbs).
0	55	27	55	26	2.00
15	77	35	70	34	1.77
30	78	35	71	34	1.46
45	78	35	71	35	1.38
60	78	34	71	34	1.15
75	78	36	71	33	1.08
90	77	35	70	34	1.00
105	77	36	70	33	0.93
120	77	35	70	33	0.85
135	77	35	70	33	0.77
150	77	35	70	34	0.74
165	77	35	70	34	0.69
180	78	36	71	34	0.62
195	78	35	71	34	0.62
210	77	35	71	34	0.58

En donde:

TBS= Temperatura de bulbo seco.

TBH= Temperatura de bulbo húmedo.

DATOS CALCULADOS

Tabla VIII. Humedad en base seca versus tiempo. Utilizando un flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 parrillas.

Tiempo (min).	Humedad en Base Seca (%)
0	300.00
15	242.00
30	184.00
45	142.00
60	128.00
75	100.00
90	72.00
105	72.00
110	56.00
120	42.00
125	42.00
140	28.00
155	14.00
165	12.00

Tabla IX. Humedad en base seca versus tiempo. Utilizando un flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 parrillas.

Tiempo (min).	Humedad en Base Seca (%)
0	300.00
15	244.00
30	212.00
45	184.00
60	156.00
75	128.00
90	100.00
105	100.00
120	72.00
130	72.00
145	44.00
155	44.00
170	12.00

Tabla X. Humedad en base seca versus tiempo. Utilizando un flujo másico de 785.07 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 parrillas.

Tiempo (min).	Humedad en Base seca (%)
0	300.00
15	220.00
30	166.00
35	154.00
40	140.00
45	126.00
50	114.00
55	100.00
60	98.00
65	72.00
70	60.00
73	60.00
85	46.00
95	32.00
105	20.00
125	8.00

Tabla XI. Humedad en base seca versus tiempo. Utilizando un flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 parrillas.

Tiempo (min).	Humedad en Base Seca (%)
0	300.00
15	240.00
30	166.00
45	142.00
60	130.00
75	106.00
90	94.00
105	94.00
120	70.00
135	46.00
150	34.00
165	8.00

Tabla XII. Humedad en base seca versus tiempo. Utilizando un flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 parrillas.

Tiempo (min).	Humedad en Base seca (%)
0	300.00
15	256.00
30	200.00
45	180.00
60	172.00
75	156.00
90	128.00
105	100.00
120	80.00
135	56.00
150	44.00
165	28.00
175	8.00

Tabla XIII. Humedad en base seca versus tiempo. Utilizando un flujo másico de 563.86 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 parrillas.

Tiempo (min).	Humedad en Base seca (%)
0	300.00
15	254.00
30	192.00
45	176.00
60	130.00
75	116.00
90	100.00
105	86.00
120	70.00
135	54.00
150	48.00
165	38.00
180	24.00
195	24.00
210	16.00

Tabla XIV. Velocidad de secado versus humedad en base seca. Utilizando un flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 parrillas.

Humedad en base seca (%)	Velocidad de secado (Kg H ₂ O/h.m ²)
300.00	0.00
242.00	3.62
184.00	3.62
142.00	2.62
100.00	1.74
72.00	1.74
42.00	1.31
28.00	0.87
14.00	0.87
12.00	0.18

Tabla XV. Velocidad de secado versus humedad en base seca. Utilizando un flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 parrillas.

Humedad en base seca (%)	Velocidad de secado (Kg H ₂ O/h.m ²)
300.00	0.00
244.00	0.87
212.00	0.50
184.00	0.44
156.00	0.44
128.00	0.44
100.00	0.44
72.00	0.44
44.00	0.44
12.00	0.50

Tabla XVI. Velocidad de secado versus humedad en base seca. Utilizando un flujo másico de 785.07 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 parrillas.

Humedad en base seca (%)	Velocidad de secado (Kg H₂O/h.m²)
300.00	0.00
220.00	4.99
166.00	3.36
140.00	2.62
126.00	2.61
100.00	2.61
60.00	2.24
46.00	1.31
32.00	1.31
20.00	1.12
8.00	0.56

Tabla XVII. Velocidad de secado versus humedad en base seca. Utilizando un flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 parrillas.

Humedad en base seca (%)	Velocidad de secado (Kg H ₂ O/h.m ²)
300.00	0.00
240.00	3.74
166.00	4.61
142.00	1.50
106.00	1.50
70.00	1.50
46.00	1.50
34.00	0.75
8.00	1.62

Tabla XVIII. Velocidad de secado versus humedad en base seca. Utilizando un flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 parrillas.

Humedad en base seca (%)	Velocidad de secado (Kg H₂O/h.m²)
300.00	0.00
256.00	0.68
200.00	0.87
128.00	0.44
100.00	0.44
80.00	0.31
44.00	0.19
8.00	0.46

Tabla XIX. Velocidad de secado versus humedad en base seca. Utilizando un flujo másico de 563.86 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 parrillas.

Humedad en base seca (%)	Velocidad de secado (Kg H ₂ O/h.m ²)
300.00	0.00
254.00	2.87
192.00	3.86
130.00	2.87
100.00	1.00
70.00	1.00
54.00	1.00
38.00	0.62
16.00	0.50

FIGURA 1

Diagrama esquemático de un secador rotatorio con calentamiento directo

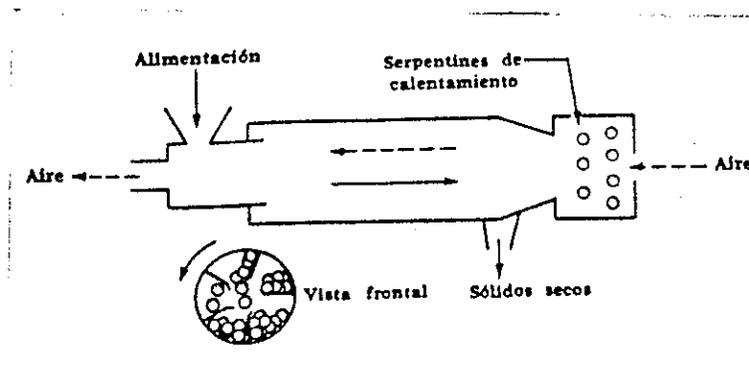


FIGURA 2

Secador de tambor rotatorio

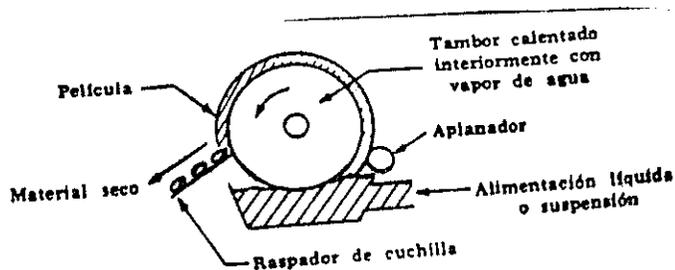


FIGURA 3

Secador de bandejas o anaqueles

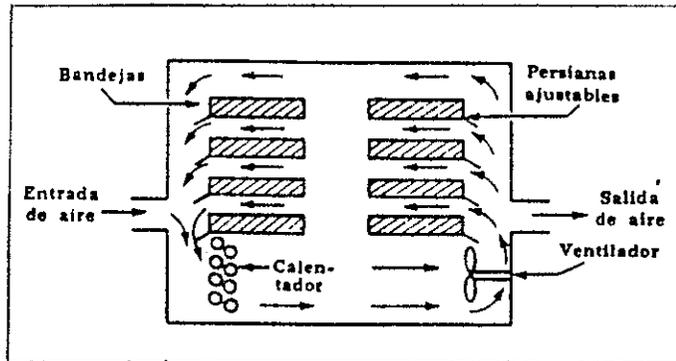


FIGURA 4

Diagrama de flujo del proceso para una unidad de secado por pulverización

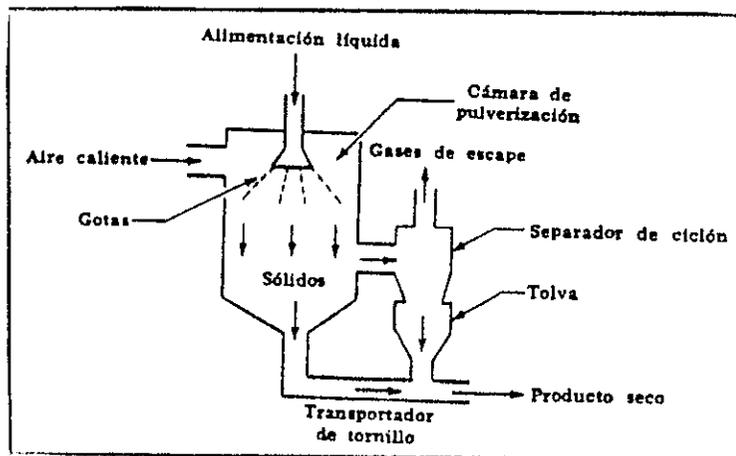


FIGURA 5

Secador vertical de flujo continuo para granos

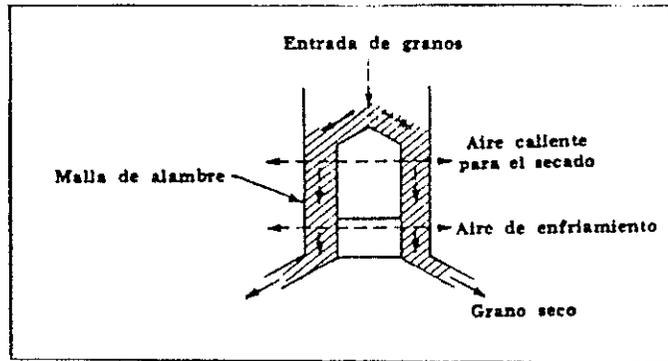


FIGURA 6

Tres tipos de secadores de túnel

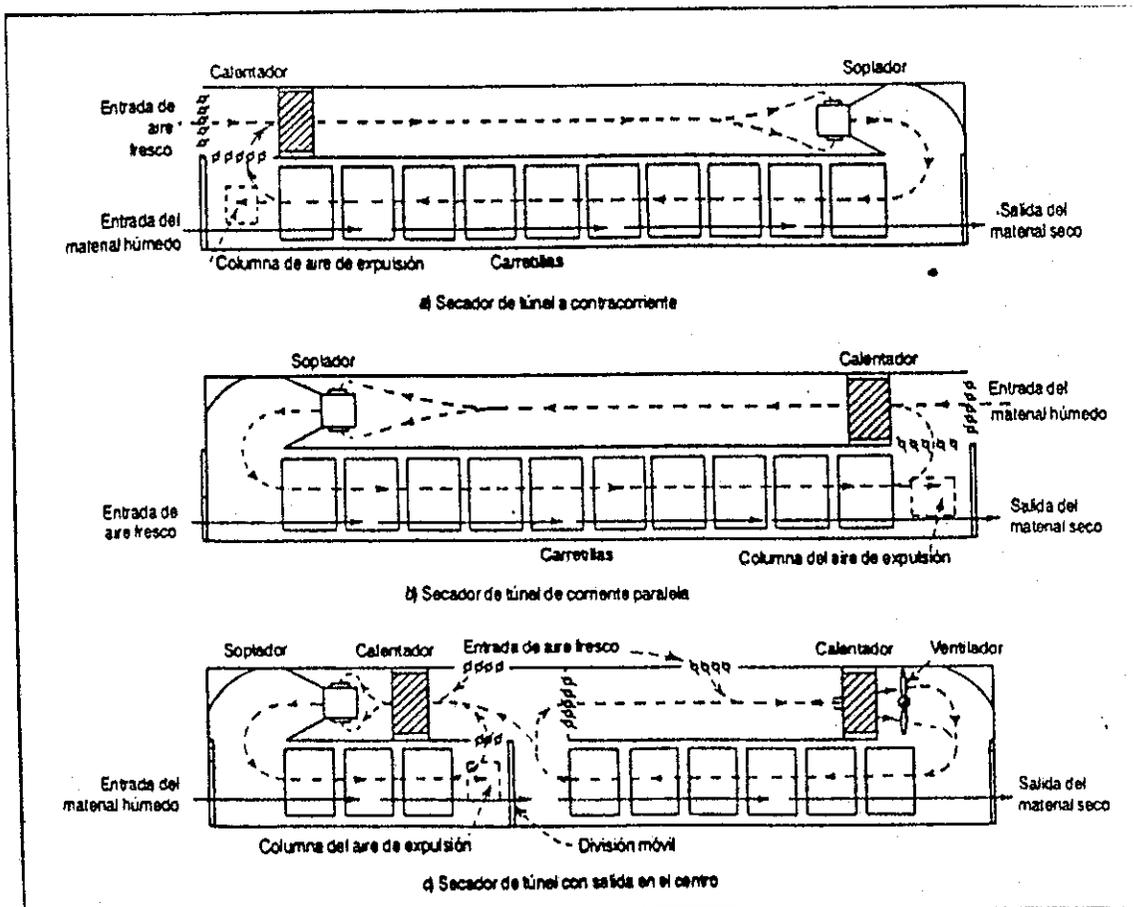


FIGURA 7

**Peso Vrs. Tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h,
7 bancos de vapor y 4 bandejas.**

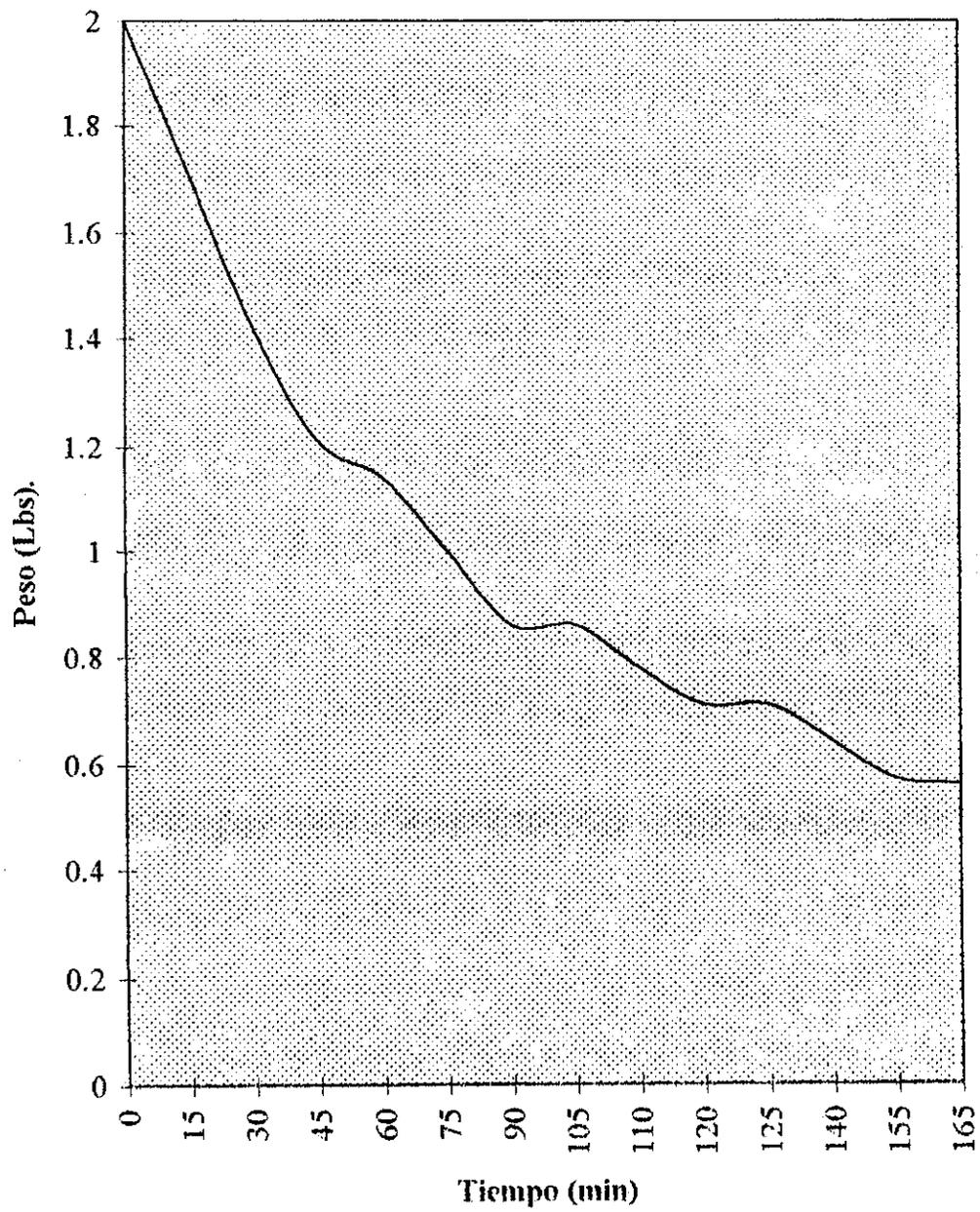


FIGURA 8

Peso versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 bandejas.

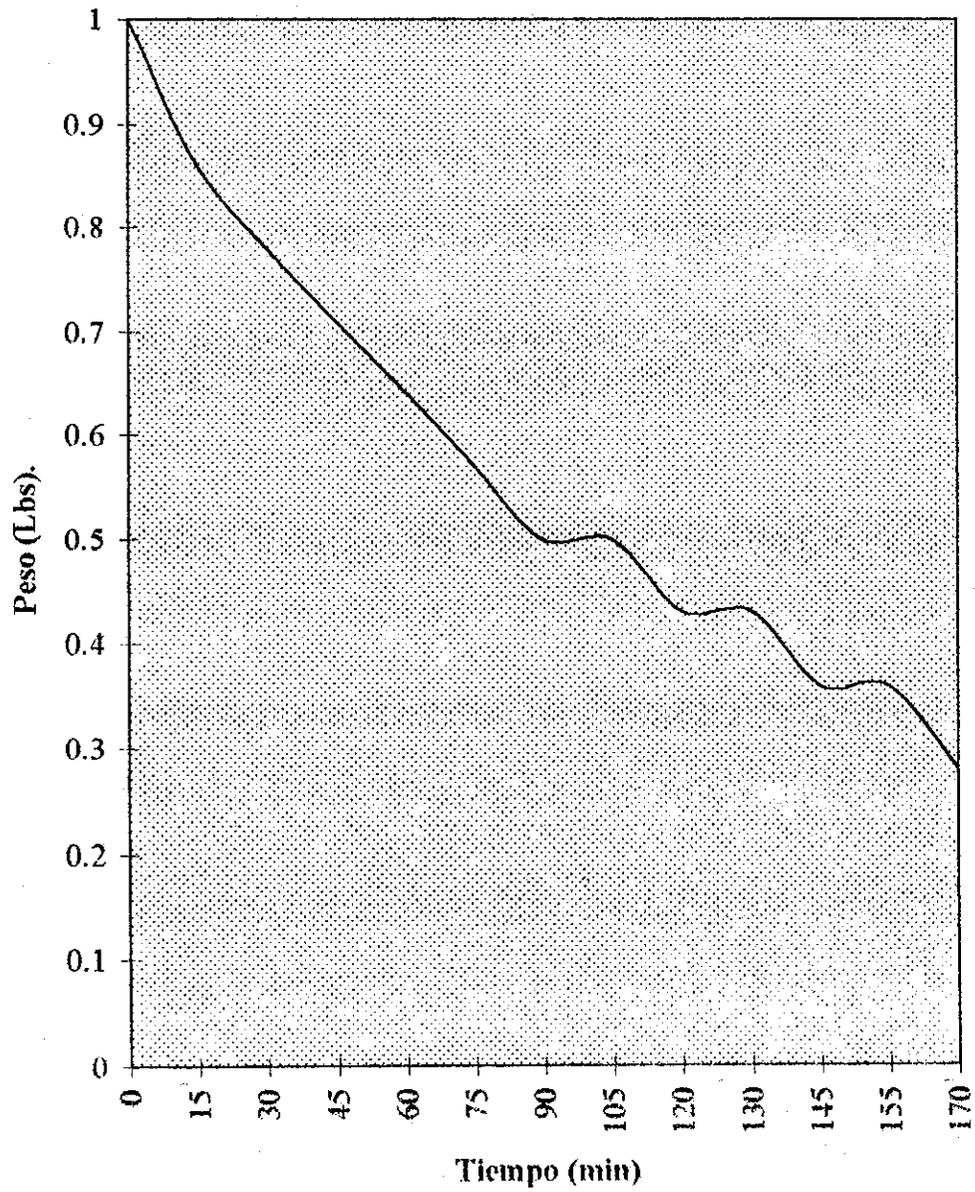


FIGURA 9

Peso versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 bandejas.

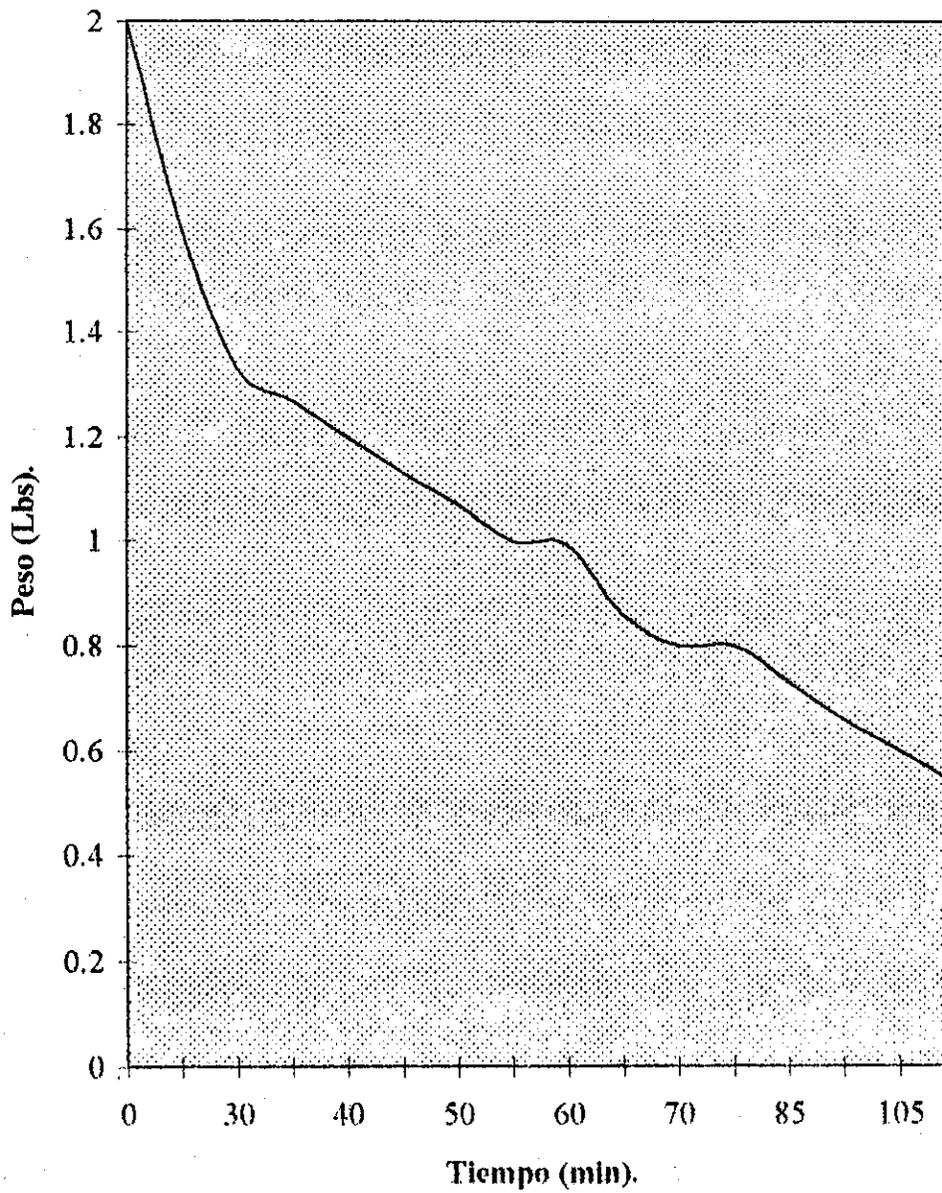


FIGURA 10

Peso versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 bandejas.

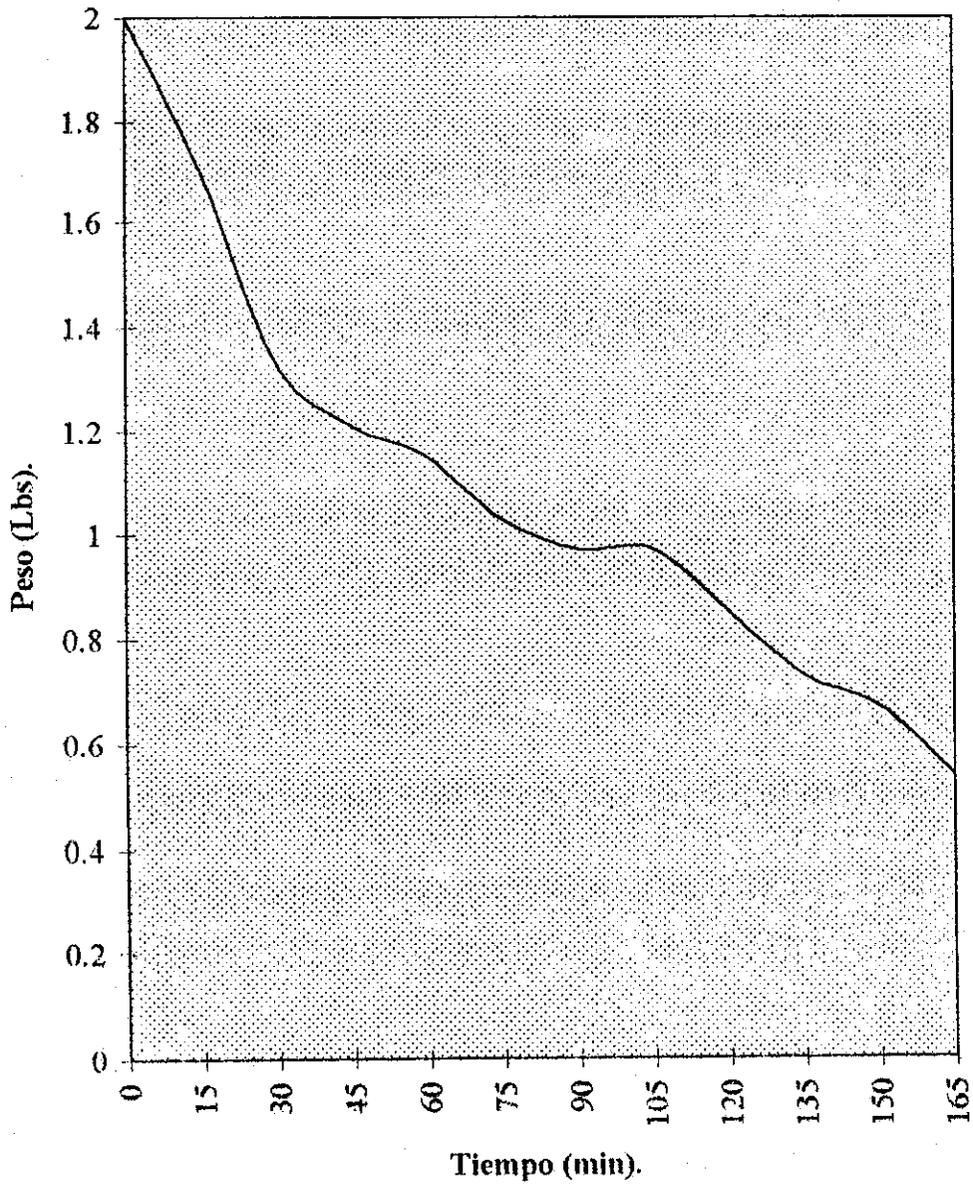


FIGURA 11

Peso versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 bandejas.

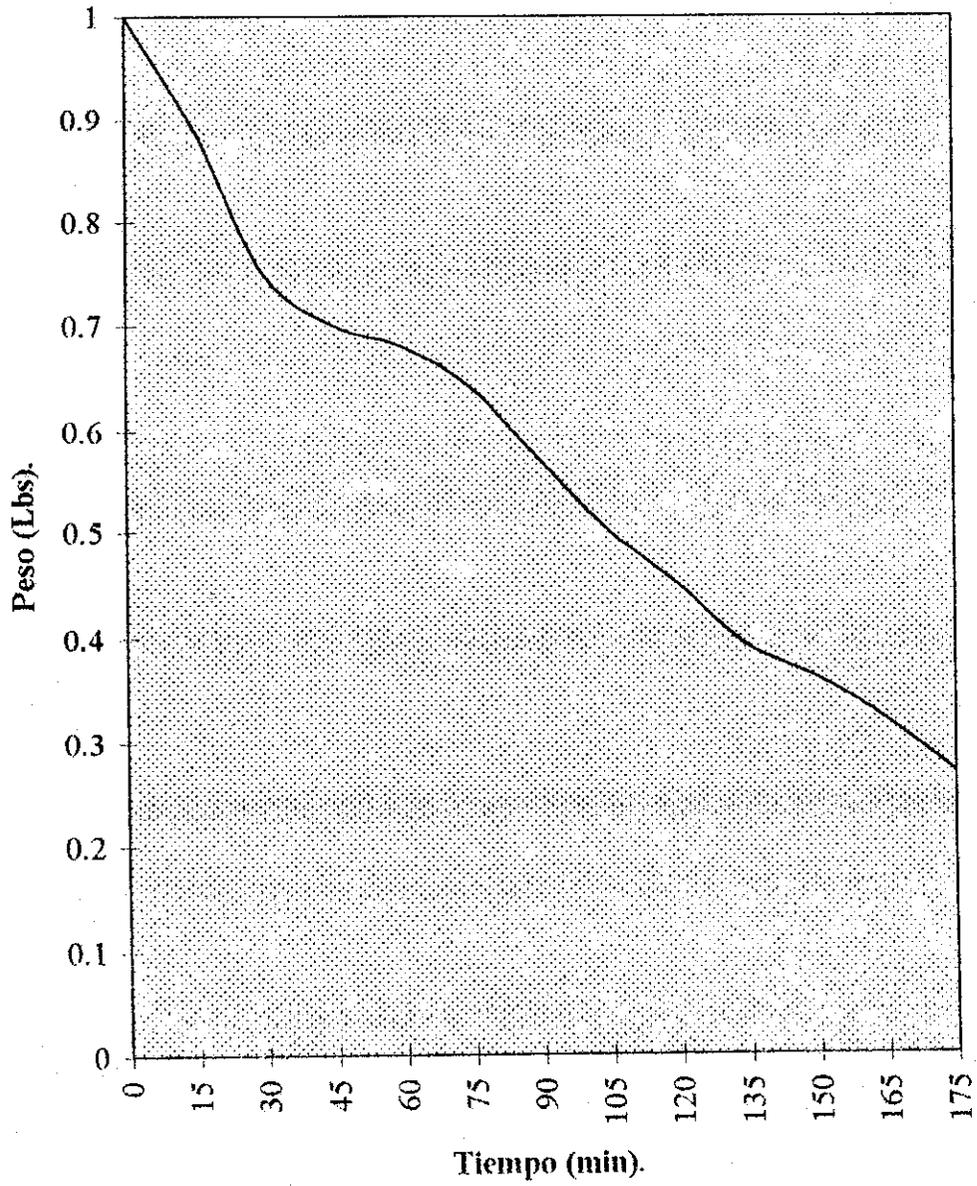


FIGURA 12

Peso versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 bandejas.

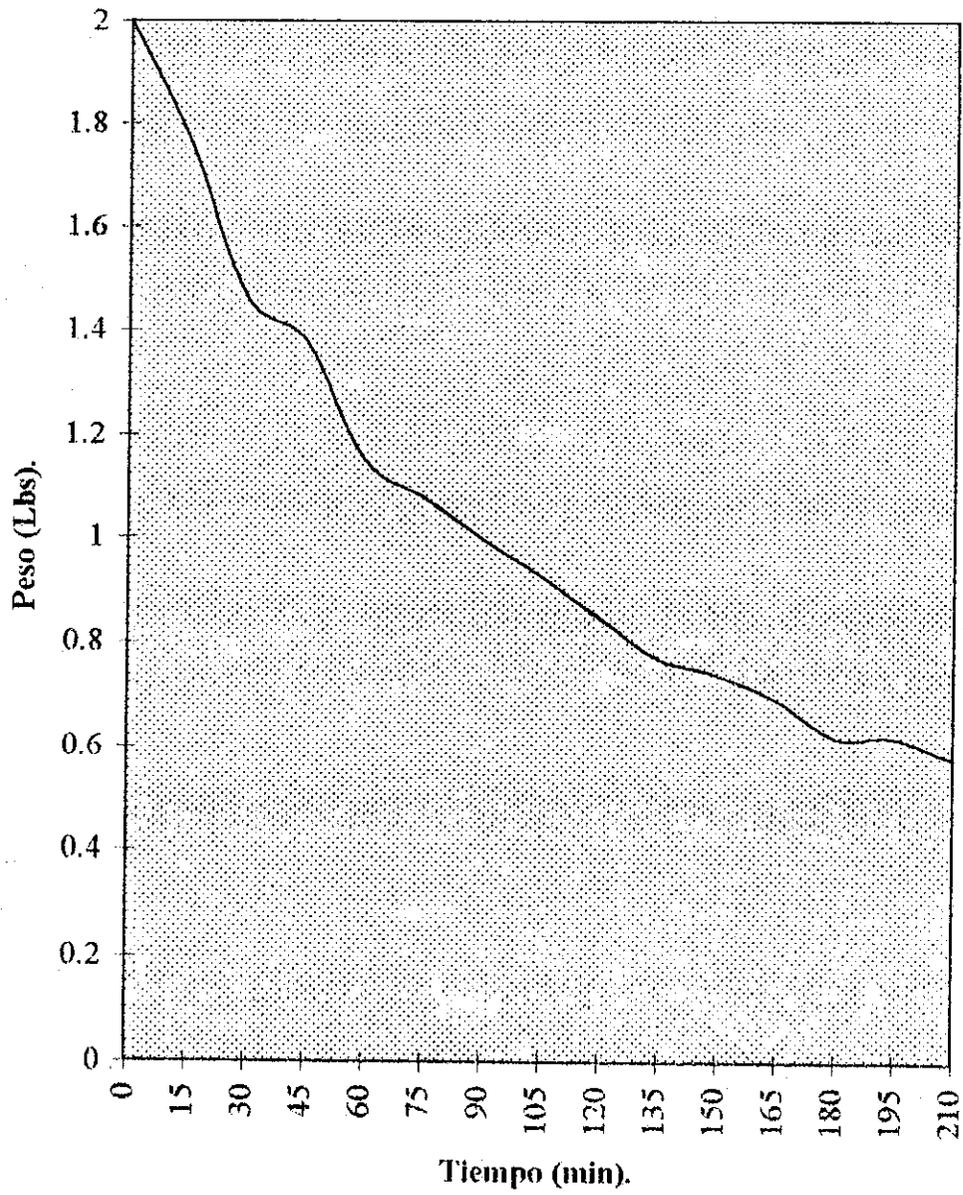


FIGURA 13

Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 bandejas.

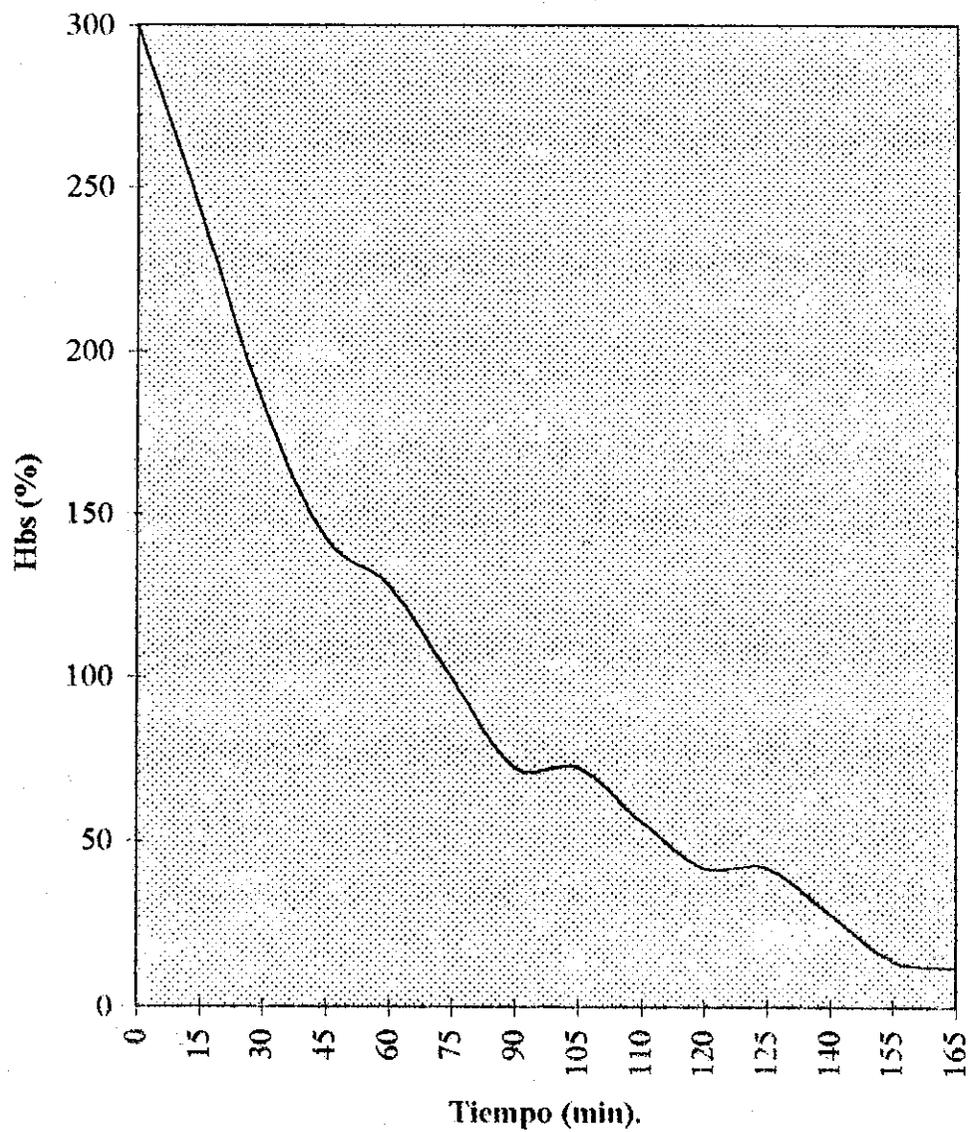


FIGURA 14

Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 bandejas.

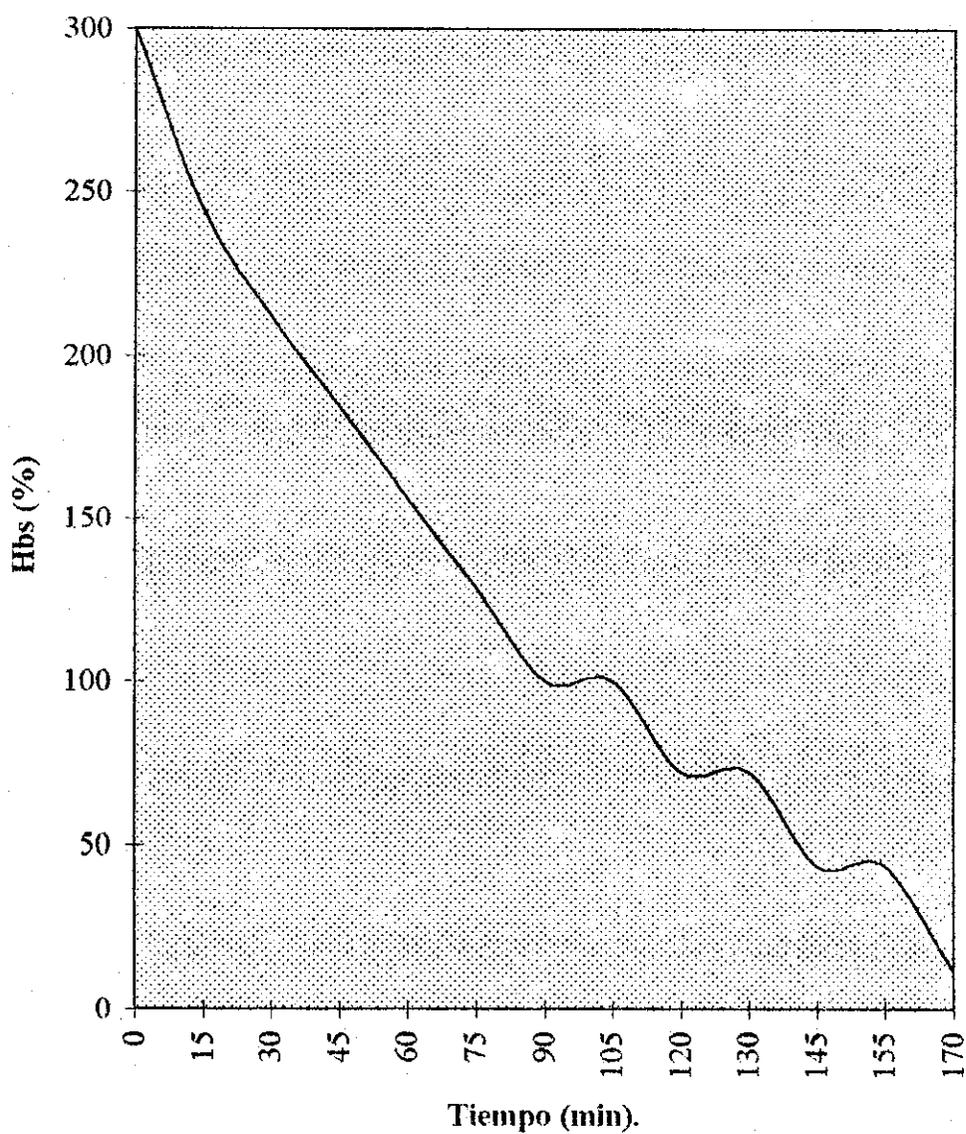


FIGURA 15

Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 bandejas.

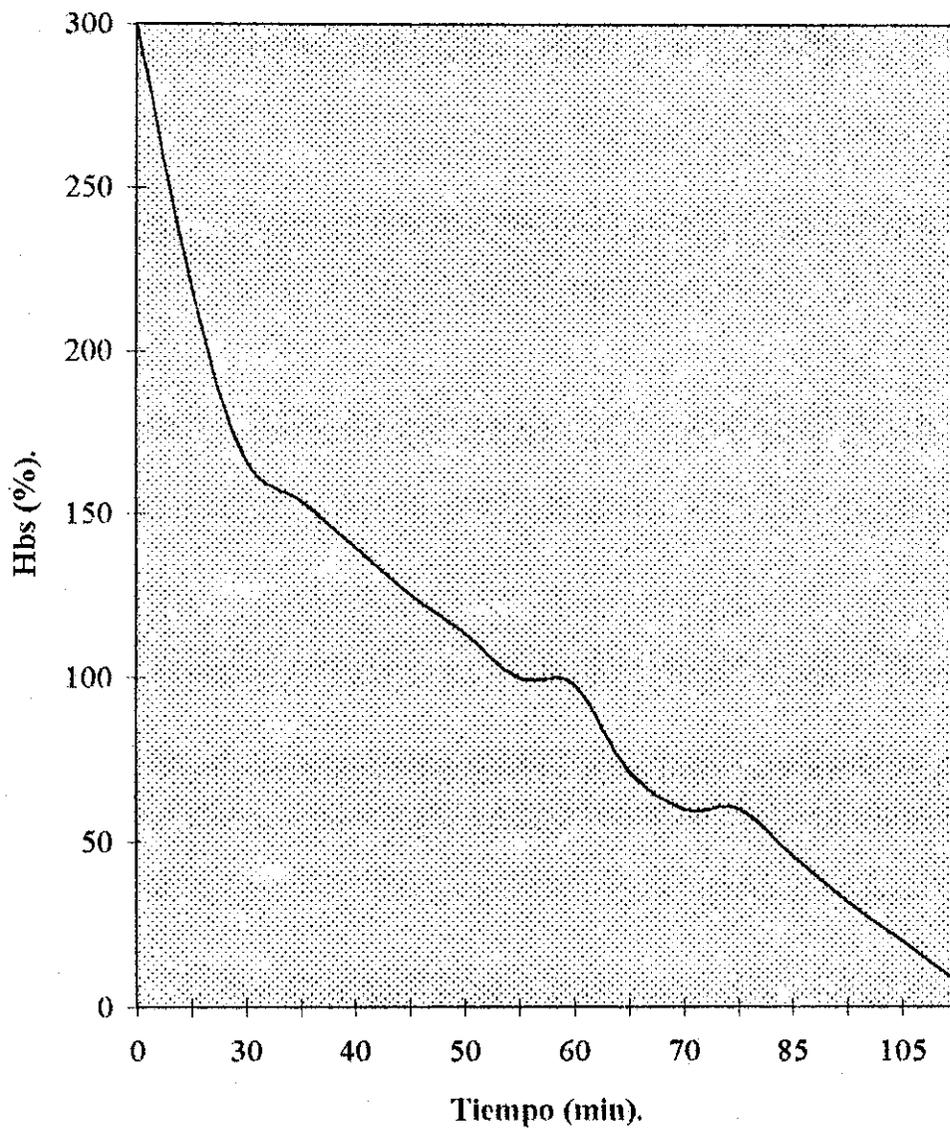


FIGURA 16

Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 bandejas.

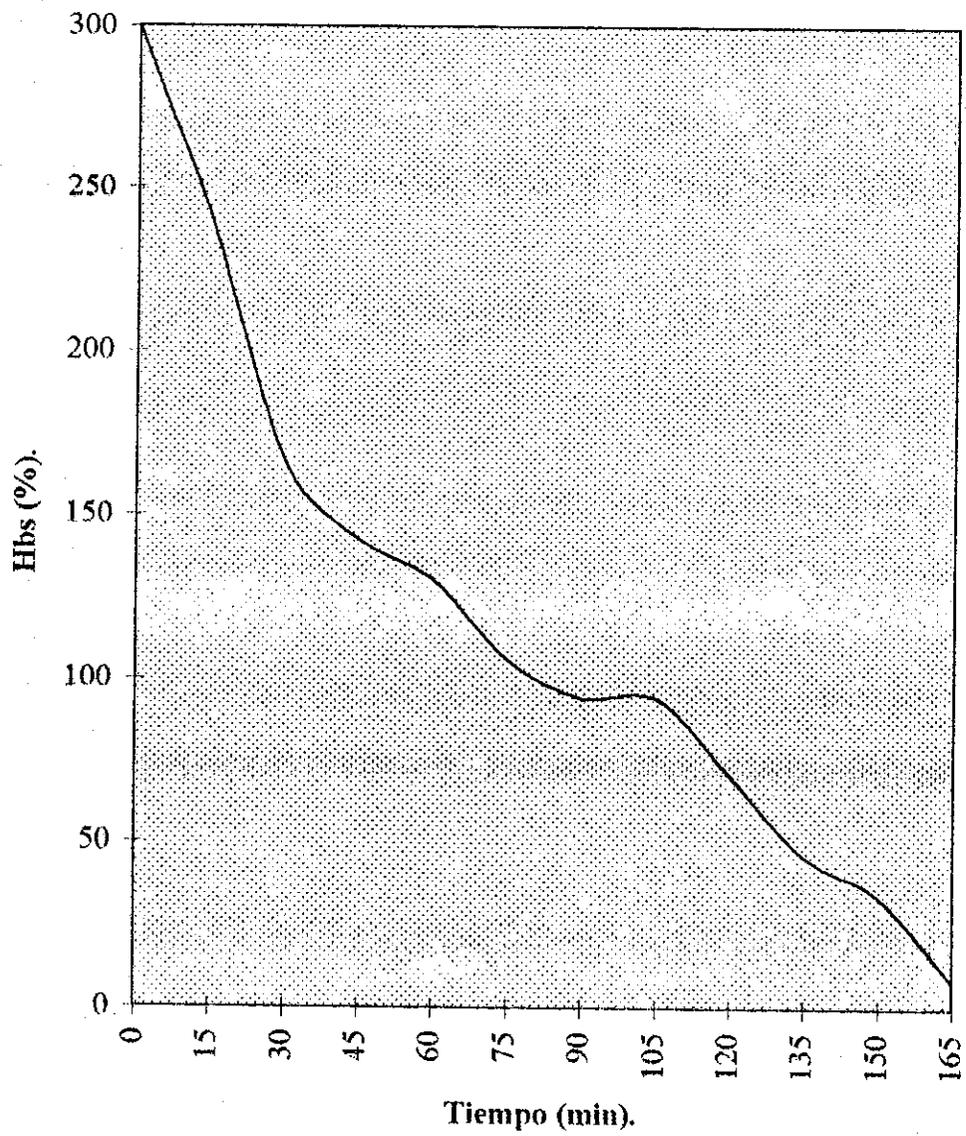


FIGURA 17

Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 bandejas.

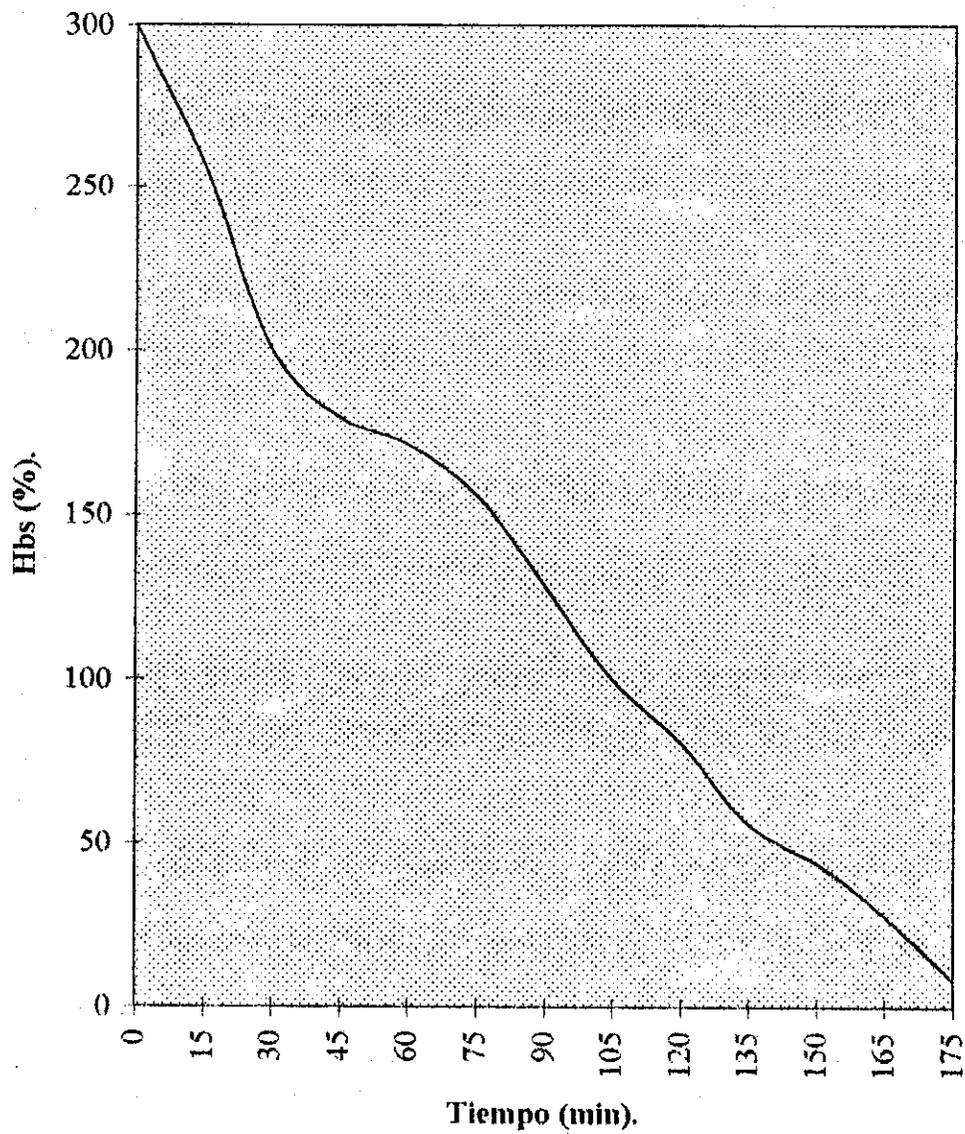


FIGURA 18

Humedad en base seca versus tiempo. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 bandejas.

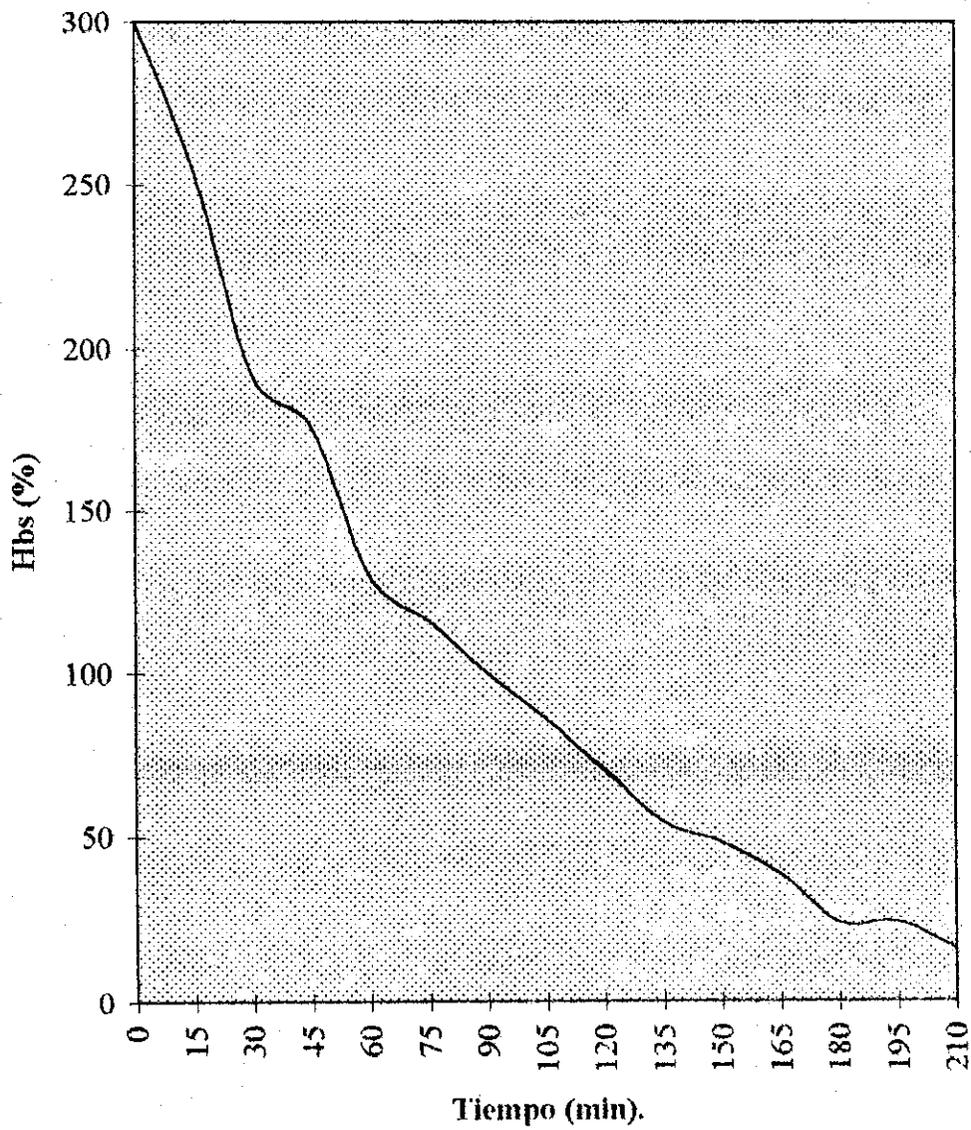


FIGURA 19

Velocidad de secado versus humedad en base seca. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 bandejas.

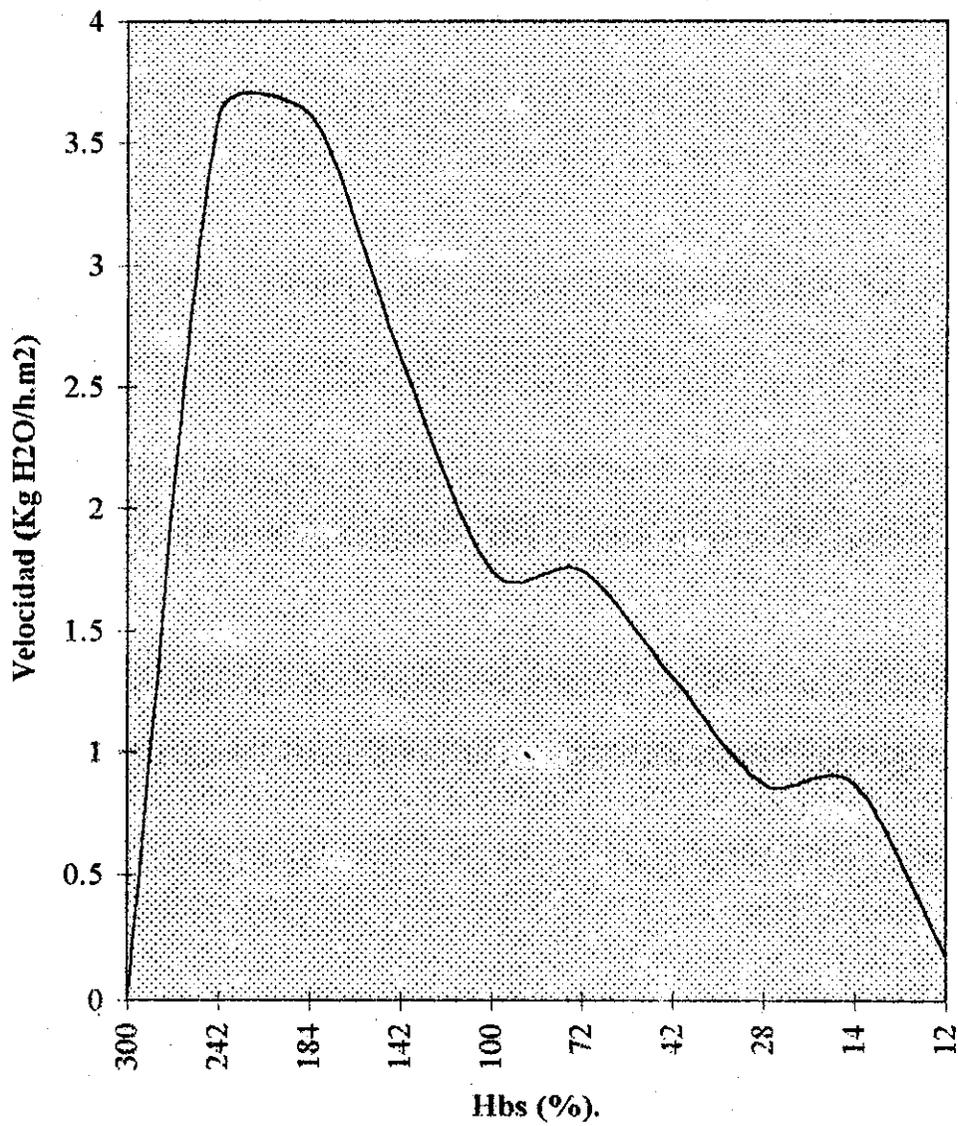


FIGURA 20

Velocidad de secado versus humedad en base seca. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 bandejas.

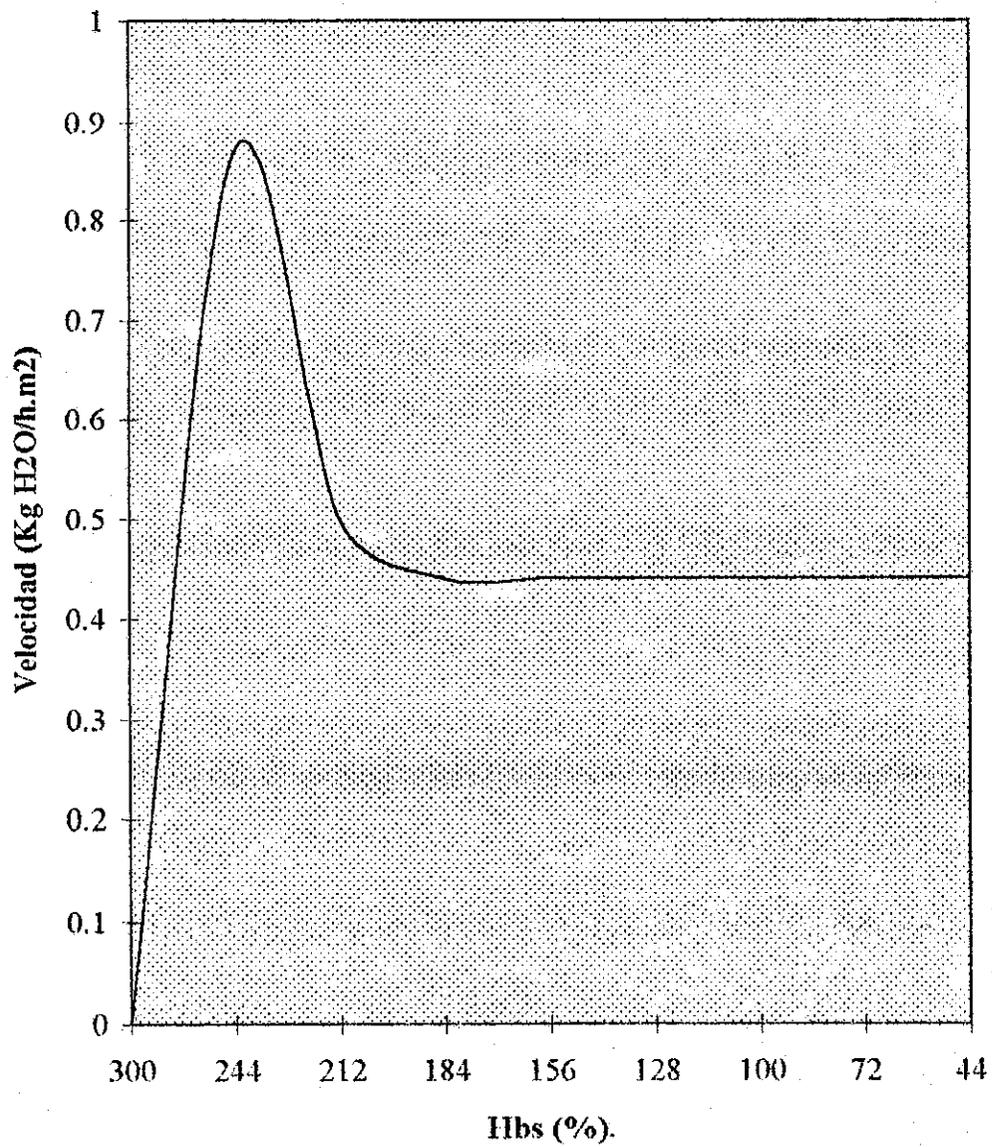


FIGURA 21

Velocidad de secado versus humedad en base seca. Flujo másico de 785.07 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 bandejas.

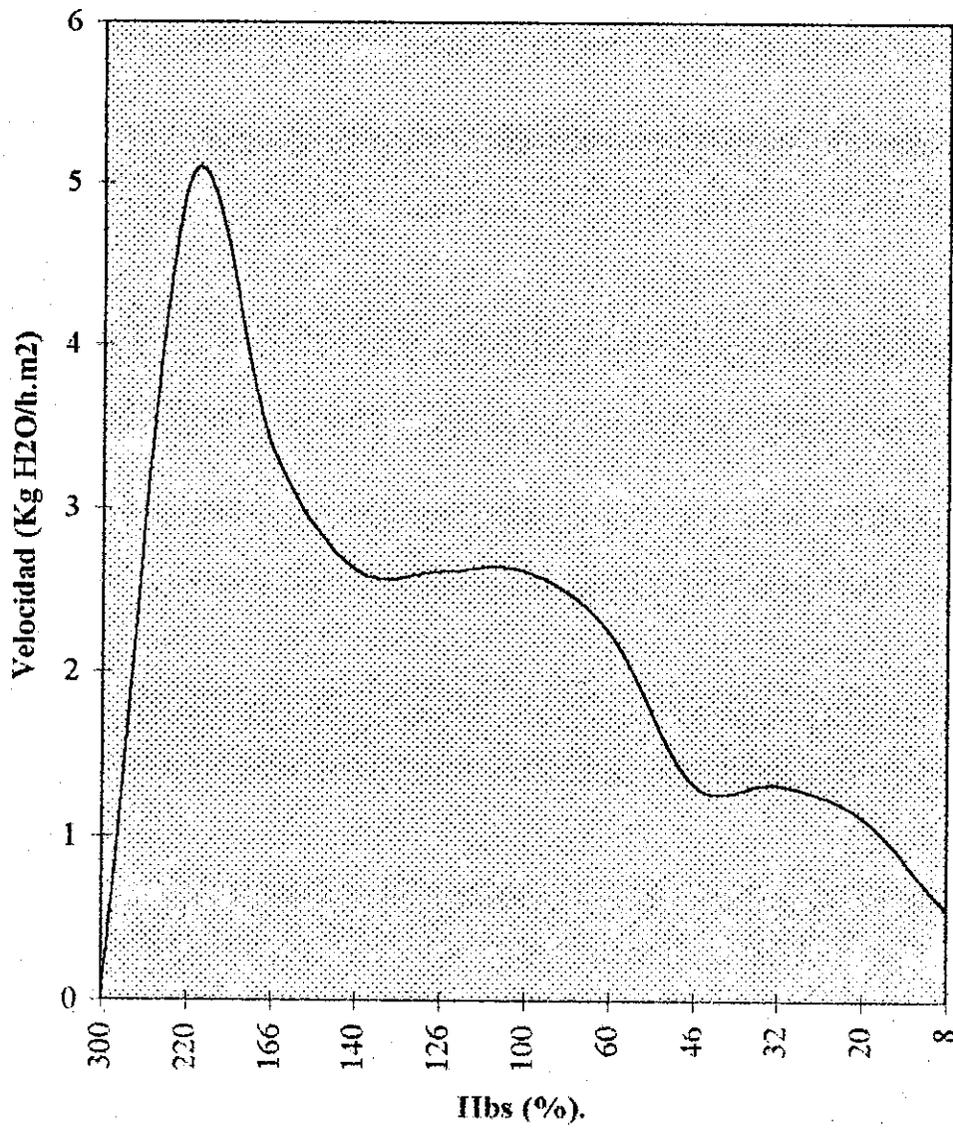


FIGURA 22

Velocidad de secado versus humedad en base seca. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 4 bandejas.

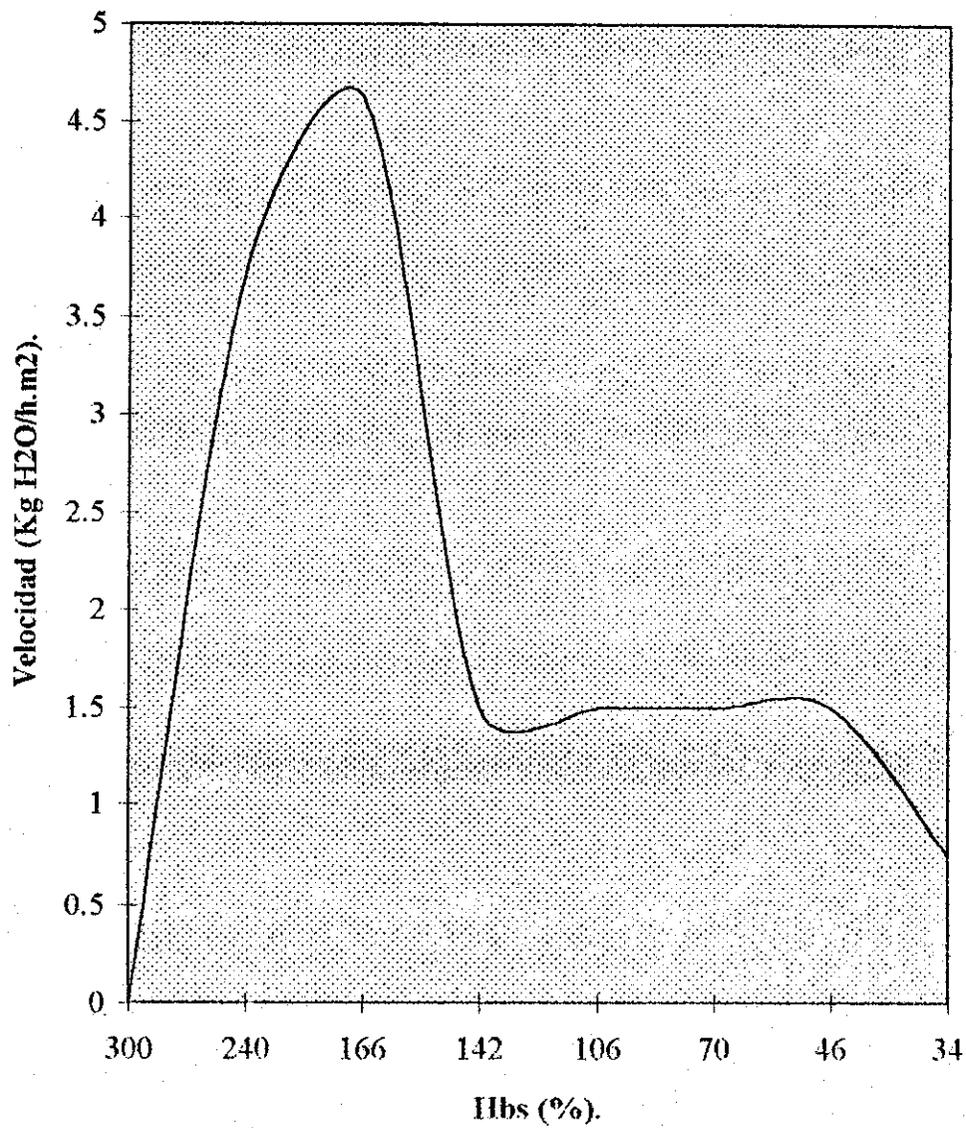


FIGURA 23

Velocidad de secado versus humedad en base seca. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 7 bancos de vapor y 2 bandejas.

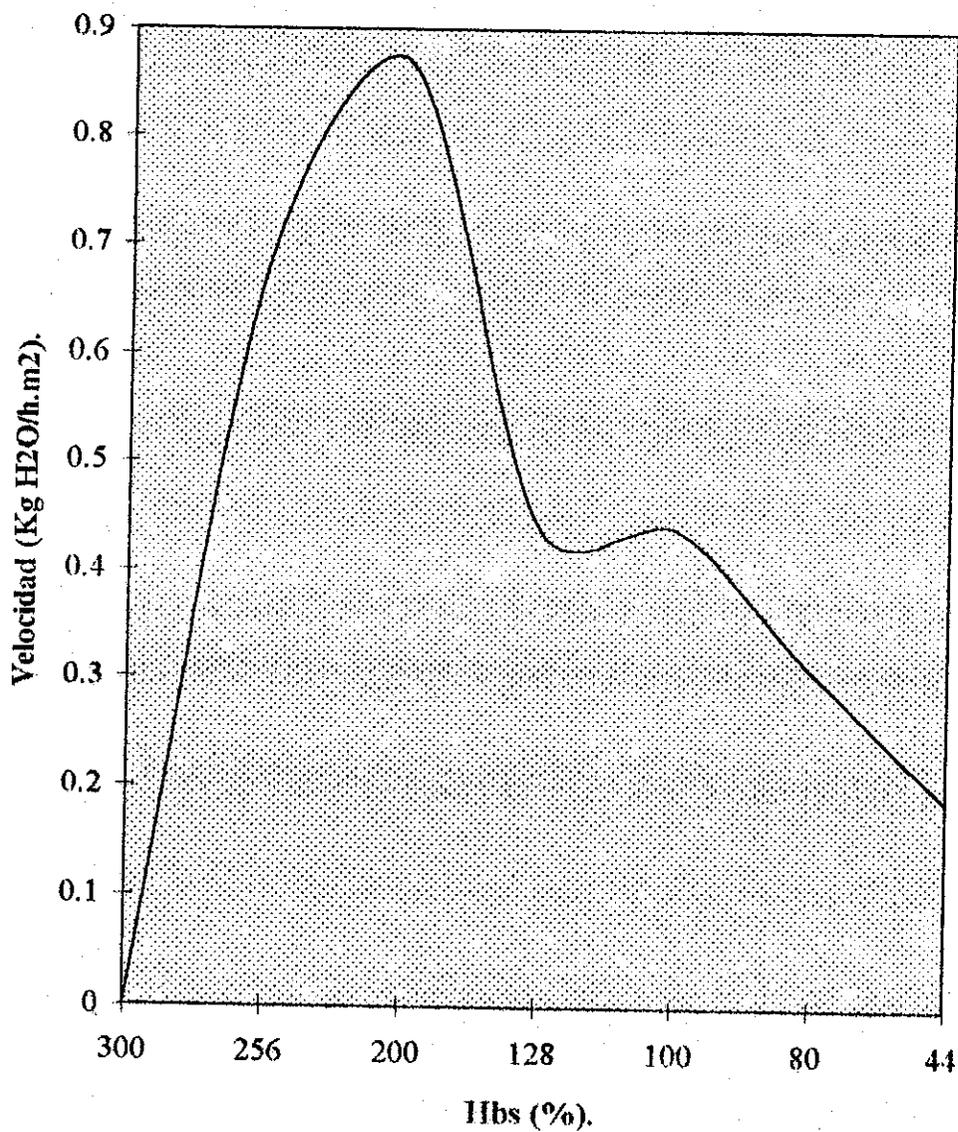


FIGURA 24

Velocidad de secado versus humedad en base seca. Flujo másico de 563.86 Kg/h, 4 bancos de vapor y 4 bandejas.

