

FACULTAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

AHORRO ENERGETICO EN UN PROCESO DE SECADO  
EN LA INDUSTRIA FARMACEUTICA

TESIS

PRESENTADA A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
POR

HUGO GIOVANNI ESCOBAR MONTENEGRO

AL CONFERIRSELE EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 1997

FACULTAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

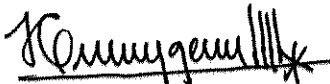
T(3909)  
C 4

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:

**AHORRO ENERGETICO EN UN PROCESO DE SECADO  
EN LA INDUSTRIA FARMACEUTICA**

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Química

  
Hugo Giovanni Escobar Montenegro

Guatemala, febrero de 1997

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

MIEMBROS DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO: ING. HERBERT RENE MIRANDA BARRIOS  
VOCAL 1o: ING. MIGUEL ANGEL SANCHEZ GUERRA  
VOCAL 2o: ING. JACK DOUGLAS IBARRA SOLORZANO  
VOCAL 3o: ING. JUAN ADOLFO ECHEVERRIA MENDEZ  
VOCAL 4o: BR. VICTOR RAFAEL LOBOS ALDANA  
VOCAL 5o: BR. WAGNER GUSTAVO LOPEZ CACERES  
SECRETARIA: INGA. GILDA MARINA CASTELLANOS DE ILLESCAS

TRIBUNAL QUE PRACTICO EL EXAMEN  
GENERAL PRIVADO

DECANO: ING. JULIO ISMAEL GONZALEZ PODSZUECK  
EXAMINADOR: ING. RODOLFO ESPINOZA SMITH  
EXAMINADOR: ING. JULIO ENRIQUE CHAVEZ MONTUFAR  
EXAMINADOR: ING. WILLIAMS GUILLERMO ALVAREZ MEJIA  
SECRETARIO: ING. FRANCISCO JAVIER GONZALEZ LOPEZ

## ACTO QUE DEDICO

- A DIOS  
Por ser siempre mi luz y guía. Y por permitirme alcanzar una meta importante en mi vida.
- A LA VIRGEN MARIA  
Por su amor, protección e intersección mariana.
- A MIS PADRES  
Vidalia Montenegro de Escobar  
Hugo Escobar Cáceres  
Eterno agradecimiento por sus sacrificios, enseñanzas y dedicación.
- A MI HERMANA  
Ivett  
Por su apoyo brindado.
- A MIS ABUELITOS  
A los que viven y a quienes ya fallecieron.
- A MIS TIOS Y PRIMOS  
A todos y cada uno de ellos, gracias por su entusiasmo, cariño y apoyo.
- A MI NOVIA  
Mildred Xiomara Figueroa Molina  
Por su amistad, amor y ser tan especial.
- A MIS AMIGAS Y AMIGOS  
Ingenieros Químicos. En especial a Paula, Rosita, Sinthya, Claudia, Ivonne, Zulma, Maritza, Anibal, Mario, César, Ray, Heber, Maco, Hayro, Oscar.  
Exitos a todos en el futuro.

## AGRADECIMIENTOS A

Ing. Guillermo Alejandro Lam Guzmán:

Por su asesoría en el presente trabajo, así como por su amistad, dedicación y esfuerzo en la elaboración del mismo.

Ing. Otto Raúl de León de Paz:

Por su amistad y enseñanzas transmitidas a lo largo de mi formación profesional. Así como por su colaboración en la revisión de este trabajo de tesis.

Guatemala, 6 de enero de 1997

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

Estimado Ingeniero Chávez:

Por medio de la presente le informo que he concluido la revisión final del trabajo de tesis titulado **AHORRO ENERGETICO EN UN PROCESO DE SECADO EN LA INDUSTRIA FARMACEUTICA**, que efectuara bajo mi asesoramiento el estudiante de Ingeniería Química, Hugo Giovanni Escobar Montenegro, carnet número 91-10007.

Considero que dicho trabajo no sólo cumple con los requisitos de tesis de grado, sino que además constituye un valioso aporte para el desarrollo de la industria farmacéutica en nuestro país. Por lo que recomiendo su aprobación.

Atentamente,



Guillermo Alejandro Lam Guzmán  
Ingeniero Químico  
Colegiado Activo No. 545

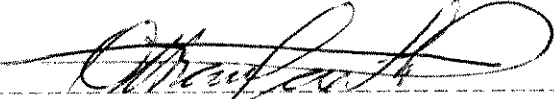
Guatemala, 21 de Enero de 1997.

ING. JULIO E. CHAVEZ M.  
DIRECTOR DE ESCUELA DE ING. QUIMICA.  
FACULTAD DE INGENIERIA. U.S.A.C.

Estimado Sr. Director, después de saludarlo deseo hacer de su conocimiento que he procedido a revisar el Protocolo de Tesis del Sr. HUGO GEOVANNI ESCOBAR MONTENEGRO, de título: "AHORRO ENERGETICO EN UN PROCESO DE SECADO EN LA INDUSTRIA FARMACEUTICA".

Una vez revisado este trabajo, lo he encontrado satisfactorio para su aprobación. Por tanto le pido que se proceda con los trámites subsiguientes al efecto.

Muy Atentamente:



---

Ing. Otto Raúl de León de Paz.  
Revisor del Informe Final de Tesis.



**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

El Director de la Escuela de Ingeniería Química, después de  
conocer el dictamen del Asesor con el Visto Bueno del Jefe de  
Departamento, al trabajo del estudiante; HUGO GIOVANNI ESCOBAR  
MONTENEGRO, titulado: AHORRO ENERGETICO EN UN PROCESO DE SECADO  
EN LA INDUSTRIA FARMACEUTICA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Julio ~~Chavez~~ Montúfar  
DIRECTOR  
ESCUELA INGENIERIA QUIMICA



Guatemala, 19 de febrero de 1,997.





**FACULTAD DE INGENIERIA**

Escuelas de Ingeniería Civil, Ingeniería  
Mecánica Industrial, Ingeniería Química,  
Ingeniería Mecánica Eléctrica, Técnica  
y Regional de Post-grado de Ingeniería  
Sanitaria.

Ciudad Universitaria, zona 12  
Guatemala, Centroamérica

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: AHORRO ENERGETICO EN UN PROCESO DE SECADO EN LA INDUSTRIA FARMACEUTICA del estudiante; HUGO GIOVANNI ESCOBAR MONTENEGRO, procede a la autorización para la impresión de la misma.

**IMPRIMASE:**

  
Ing. Herbert René Miranda Barrios



Guatemala, 19 de febrero de 1,997.

PROPIEDAD DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
Biblioteca Central

## INDICE

	Página
RESUMEN	1
INTRODUCCION	2
ANTECEDENTES	3
JUSTIFICACION	7
OBJETIVOS	8
HIPOTESIS	9
METODOLOGIA	10
RESULTADOS	14
DISCUSION DE RESULTADOS	23
CONCLUSIONES	27
RECOMENDACIONES	28
REFERENCIAS	29
ANEXOS	31

## RESUMEN

El presente trabajo de tesis se realizó con el propósito de contribuir en el ahorro de energía en un proceso de secado, con la utilización de un secador de bandejas en una industria farmacéutica. Esto se ha logrado mediante el estudio de las variables principales involucradas en el proceso de secado: temperatura de secado, tiempo de proceso, humedad del material, carga de material, flujo de aire, consumo de energía y costo del proceso.

El material utilizado fue glucosa con un 99.2% de pureza y 1.80% de humedad. La carga del material varió entre 100 y 120 kilogramos.

Los resultados corresponden a un período de actividades de dos meses, y se basan en mediciones efectuadas durante el proceso de secado.

Se presentan 6 opciones para ahorrar energía, así como los perfiles de consumo de energía como resultado de las mediciones que se efectuaron y del análisis e interpretación conjunta de los datos obtenidos.

La opción 1 es la que ofrece mejores resultados, con un ahorro energético del 12%, un ahorro en el costo de operación de Q 2.08, y un ahorro en el costo de secado de Q 0.02 /kg de sólido, respecto a los costos y consumos energéticos del procedimiento que se utiliza actualmente.

## INTRODUCCION

En la actualidad, la mayor parte de industrias siguen dependiendo del petróleo o sus derivados como fuente principal de energía. A partir de 1973, el impacto del costo del petróleo y sus derivados por unidad de producción ha sido un factor fundamental para que la industria busque desesperadamente fuentes de ahorro de energía. Los métodos de ahorro de energía varían desde procedimientos sencillos de cambio en operaciones, hasta el uso de complejos dispositivos que requieren de una fuerte inversión de capital.

Primordialmente el ahorro de energía exige prestar mucha atención a los detalles. Para obtener éxito en un programa de ahorro, se requiere de un registro cuidadoso de datos, técnicas de operación y mantenimiento.

La situación de Guatemala en el presente es crítica y la necesidad urgente de ahorrar energía es evidente. Además, la industria se beneficia directamente con dicho ahorro.

El propósito fundamental del presente trabajo ha sido contribuir al ahorro de energía en un proceso de secado en una industria farmacéutica.

El estudio se basa en que es posible ahorrar energía en un proceso de secado en una industria farmacéutica, al poner en práctica las opciones presentadas para diferentes condiciones de operación que se analizaron en el presente trabajo.

## ANTECEDENTES

En la actualidad, el mundo occidental padece una crisis causada por el aumento de los costos de los derivados del petróleo con que se produce energía útil. Desde que el petróleo entró a formar parte de la civilización moderna, se obtuvo de él, directa o indirectamente, energía abundante y barata. Esto dio su forma característica al estilo actual de vida y al sistema económico mundial. Transcurrieron muchos años, en los cuales se consumió energía sin medida, se vivió en la abundancia y se consolidaron costumbres de consumo y despilfarro. (Ref. 1)

Hace algún tiempo, algunos expertos indicaron que los recursos estimados de petróleo no eran infinitos y que, de seguir con el mismo ritmo de consumo de entonces, todas las reservas conocidas y probables se agotarían al finalizar este siglo. Otros expertos que no comparten totalmente esta opinión la criticaron sobre la base de que estaba fundada en extrapolaciones, que no necesariamente han de cumplirse en forma estricta, y concluyeron que la fecha de agotamiento es un poco más remota.

Independientemente de estos vaticinios, o tal vez, en parte a causa de ellos, los países productores decidieron realizar un embargo de los suministros de petróleo, y luego acordar precios uniformes y más altos por su producto. A partir de ese momento, se considera que inicia el fin de la era de la energía barata.

A medida que se aumentan los costos de los combustibles y de la electricidad, aumentan también los beneficios que se derivan de las inversiones hechas en los proyectos de ahorro de energía.

Desde hace algunos años, en todos los países industrializados, se ha iniciado un movimiento tendente a conservar los recursos petrolíferos con el fin de posponer en la mayor medida posible aquella trágica fecha en que estos recursos se agoten. Por aparte, se han emprendido investigaciones de gran envergadura para aprovechar otras fuentes de energía, en especial aquellas de tipo renovable.

Numerosas investigaciones realizadas demuestran que en la mayoría de plantas industriales se desperdician cantidades importantes de energía, y que esos desperdicios pasan inadvertidos o se aceptan como algo natural, lo cual siempre ha sido así y son parte del precio que es necesario pagar por mantener la producción.

En los países que tienen que importar petróleo, como es el caso de Guatemala, la política de ahorro de energía resulta doblemente necesaria, porque cada barril ahorrado representa divisas que no hay que gastar, y estas pueden aplicarse a otros rubros importantes de la economía, en especial a insumos y materias primas para las industrias esenciales.

En Guatemala, la institución que se ha dedicado al estudio del ahorro de energía en todas sus formas es el Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología -ICAITI- que creó

el Proyecto de Eficiencia Energética en la Industria Regional - PEEIR-. Esta institución ha desarrollado cursos de capacitación para personal encargado de plantas industriales, en los cuales se recalca la necesidad de ahorrar energía. Además dispone de panfletos, boletines y gráficas con datos prácticos, los cuales se distribuyen en todos los sectores involucrados con el consumo de energía.

El PEEIR cuenta con un equipo de profesionales especializados, que constantemente realizan investigaciones y recaban información sobre los logros de ahorro de energía en toda Centroamérica.

Los resultados que ha obtenido el PEEIR han sido bastante satisfactorios en toda Centroamérica, y se tienen registrados ahorros que van aumentados en porcentaje.

La industria farmacéutica utiliza una gran cantidad de energía en sus procesos de secado de sólidos, ya sea materia prima, productos intermedios o productos finales.

El secado es un proceso por medio del cual se remueve agua u otro líquido contenidas en un material sólido, con la finalidad de reducir el contenido de líquido hasta un valor aceptablemente bajo (Ref. 2). En el secado, el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire; pero este aire que entra en contacto con el sólido húmedo necesita calentarse, por lo que debe transferírsele energía en forma de calor para elevar su temperatura. Esta energía puede transferírsele al aire normalmente por energía de vapor o energía eléctrica.

En Guatemala, el costo de la energía eléctrica se ha incrementado en los últimos años; el costo del kilovatio-hora es mayor para el sector industrial que para el sector residencial. Un alto porcentaje de los secadores utilizados en la industria farmacéutica consumen una considerable cantidad de energía eléctrica, tal es el caso de los secadores de bandejas que utilizan termocuplas para el calentamiento del aire por contacto directo.



## JUSTIFICACION

Actualmente es prohibitivo el uso inadecuado de la energía, y su uso racional es más que necesario. Sobre todo, si se tiene en consideración que el precio de los combustibles se ha triplicado en la última década y que por la dependencia externa de nuestro país para su suministro, se debe maximizar la eficiencia de su utilización. Por ello, es necesario que el equipo industrial sea utilizado con la mayor productividad.

El presente estudio es importante realizarlo, pues el ahorro de energía ayuda al país a equilibrar su balanza de pagos, que implica una reducción en el gasto de divisas; además, le permite a los empresarios de la industria farmacéutica disminuir sus costos de producción, y pueden ser más competitivos en el mercado y contar con medios de encontrar soluciones a los problemas de tipo administrativo, de mercado, económico y financieros.

La razón de este estudio es hacer la operación de secado una actividad más técnica, reducir el costo de la misma al ahorrar energía. El estudio se desarrolla para un material específico, sin embargo, la idea generalizada y el procedimiento de evaluación que se utiliza, podría servir de base para otros materiales y secadores con el mismo principio de operación.

Por otro lado, se enfatiza la necesidad de buscar opciones de menor costo para las operaciones que involucra el proceso de secado en la industria farmacéutica.

## OBJETIVOS

### Objetivo general:

Aprovechar mejor las diversas fuentes de energía disponibles, optimizando el consumo de energía con base en el incremento de la eficiencia de secadores de bandejas utilizados en el proceso de secado en una industria farmacéutica.

### Objetivos específicos:

1. Tecnificar y reducir el costo por consumo de energía en el proceso de secado de glucosa, en un secador de bandejas en una industria farmacéutica.
2. Evitar el sobresecaado de glucosa, en un secador de bandejas.
3. Buscar opciones de menor costo para las operaciones que involucra el proceso de secado en la industria farmacéutica.

## HIPOTESIS

Es posible ahorrar energía al evitar el sobresecado del producto analizado.

## METODOLOGIA

### Materiales

El material analizado es glucosa granular No. 5, utilizada para la producción de sueros orales.

### Equipo

- secador de bandejas marca Gruenberg,
- balanza para determinar humedad,
- higrómetro,
- termómetros,
- balanza electrónica Toledo.

### Metodología

Los valores determinados durante la parte experimental para cada corrida realizada fueron los siguientes:

- Tiempo de secado del producto analizado.
- Carga por bandeja y carga total.
- Temperatura de secado.
- Humedad del sólido analizado para diferentes tiempos de secado.
- Temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire en la entrada y salida del secador.
- Humedad relativa del aire a la entrada y salida del secador
- Velocidad de la fase gaseosa.

Con base en estos valores obtenidos, se determinaron las curvas de secado del material analizado: humedad libre en función del tiempo.

Para cada prueba realizada, se determina la cantidad de energía consumida y el costo por consumo.

#### Procedimiento:

Para obtener los valores que se desean determinar se realizaron 4 corridas para cada condición de secado, en las cuales se variaron los siguientes parámetros:

- carga por bandeja y carga total,
- temperatura de secado,
- tiempo de secado,
- velocidad de la fase gaseosa.

El procedimiento a seguido es el siguiente:

1. Se evalúan 3 cargas distintas de material, comprendidas en el rango de 100 a 120 kilogramos, con un incremento constante de 10 kilogramos.
2. La temperatura de secado se varía para cada carga en un rango de 55 a 70°C, con un incremento constante de 5°C.
3. Para cada carga evaluada bajo diferentes condiciones de temperatura, se realiza un plan de muestreo para determinar la uniformidad de secado del material analizado, el cual se realiza cada 30 minutos, desde el inicio del secado hasta que se logre obtener un porcentaje de humedad no mayor del 1.00 %, en el material analizado.

4. Para cada muestra se determina el porcentaje de humedad libre (kilogramos de agua/ kilogramos de sólido seco)\*100, utilizando la balanza para determinación de humedad.
5. El flujo másico de aire se trabaja para 2 y 3 lb de aire por segundo. Para medir el flujo de aire, se utiliza un medidor electrónico para flujo volumétrico de aire marca Magnehelic, el cual mide el flujo en pie cúbico/min (ver anexo 7).  
Para convertirlo en flujo másico (lb aire/s), se utiliza la densidad del aire a la temperatura ambiente promedio de trabajo 70°F ( 22°C), 0.807 lb/pie<sup>3</sup>, y se aplica la siguiente conversión:  
$$\text{lb aire/s} = \text{pie}^3 / \text{min} * 1 \text{ min} / 60\text{s} * 0.807 \text{ lb} / \text{pie}^3.$$
6. Para cada carga de material evaluada se determinan las curvas de secado: humedad en función del tiempo.
7. Con base en estas gráficas, se determina para qué carga de material se obtiene un porcentaje de humedad permitido, con un tiempo mínimo de funcionamiento del secador.
8. Para cada carga evaluada con diferente condición de temperatura, velocidad del aire y tiempo de secado, se evalúa el costo de operación, que involucra el gasto en electricidad y el consumo de energía. Se obtiene la relación:  
$$\text{Costo} = \text{gasto energía} / \text{carga de material} = \text{Quetzales/kilogramo}.$$
9. Se establece la comparación entre los resultados obtenidos en los numerales del 1 al 8.

10. Se determina la conveniencia de cada alternativa y se establecen las conclusiones correspondientes.
11. Se determina las condiciones ideales del secado del producto bajo las cuales el consumo y costo de energía es mínimo, y se obtiene el producto con el porcentaje de humedad esperado, se maximiza el ahorro por consumo de energía y se evita un sobresecado del producto analizado.

## RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados para las diferentes condiciones de operación analizadas.

Para el cálculo de los resultados (ver anexo 3), se utilizaron los datos obtenidos durante la parte experimental (ver anexos 1 y 2).

Cuadro No. 1

Temperatura de secado= 55°C Temperatura de bulbo seco del aire= 47°C Flujo de aire= 2.0 lb/s			
Consumo de energía eléctrica (kW)	Costo de energía eléctrica (Quetzales/hora)		Costo de operación para 2 horas (Quetzales)
13.48	7.48		14.96
	Carga de material (kg)		
	100	110	120
Costo de secado (Quetzales/kg de sólido)	0.15	0.136	0.125
Humedad libre (%) para tiempo= 2 horas	0.93	1.01	1.10



Cuadro No. 2

\* Condiciones actuales de operación

Temperatura de secado= 60°C Temperatura de bulbo seco del aire= 50°C Flujo de aire= 2.0 lb/s			
Consumo de energía eléctrica (kW)	Costo de energía eléctrica (Quetzales/hora)	Costo de operación para 2 horas (Quetzales)	
15.00	8.32	16.64	
	Carga de material (kg)		
	* 100	110	120
Costo de secado (Quetzales/kg de sólido)	0.167	0.15	0.14
Humedad libre (%) para tiempo= 2 horas	0.65	0.80	0.83

Cuadro No. 3

Temperatura de secado= 60°C Temperatura de bulbo seco del aire= 50°C Flujo de aire= 2.0 lb/s			
Consumo de energía eléctrica (kW)	Costo de energía eléctrica (Quetzales/hora)	Costo de operación para 1.75 horas (Quetzales)	
15.00	8.32	14.56	
	Carga de material (kg)		
	100	110	120
Costo de secado (Quetzales/kg de sólido)	0.146	0.13	0.12
Humedad libre (%) para tiempo=1.75 horas	0.82	0.90	0.93

Cuadro No. 4

Temperatura de secado= 60°C Temperatura de bulbo seco del aire= 50°C Flujo de aire= 2.0 lb/s			
Consumo de energía eléctrica (kW)	Costo de energía eléctrica (Quetzales/hora)	Costo de operación para 1.85 horas (Quetzales)	
15.00	8.32	15.39	
	Carga de material (kg)		
	100	110	120
Costo de secado (Quetzales/kg de sólido)	0.154	0.14	0.13
Humedad libre (%) para tiempo=1.85 horas	0.80	0.84	0.90

Cuadro No. 5

Temperatura de secado= 65°C Temperatura de bulbo seco del aire= 56°C Flujo de aire= 2.0 lb/s			
Consumo de energía eléctrica (kW)	Costo de energía eléctrica (Quetzales/hora)	Costo de operación para 1.75 horas (Quetzales)	
18.04	10.00	17.50	
	Carga de material (kg)		
	100	110	120
Costo de secado (Quetzales/kg de sólido)	0.175	0.16	0.1458
Humedad libre (%) para tiempo=1.85 horas	0.80	0.90	0.92

Cuadro No. 6

Temperatura de secado= 70°C Temperatura de bulbo seco del aire= 59°C Flujo de aire= 2.0 lb/s			
Consumo de energía eléctrica (kW)	Costo de energía eléctrica (Quetzales/hora)	Costo de operación para 1.50 horas (Quetzales)	
19.55	10.85	16.28	
	Carga de material (kg)		
	100	110	120
Costo de secado (Quetzales/kg de sólido)	0.16	0.15	0.135
Humedad libre (%) para tiempo=1.50 horas	0.82	0.86	0.90

Cuadro No. 7

Temperatura de secado= 70°C Temperatura de bulbo seco del aire= 59°C Flujo de aire= 2.0 lb/s			
Consumo de energía eléctrica (kW)	Costo de energía eléctrica (Quetzales/hora)	Costo de operación para 1.70 horas (Quetzales)	
19.85	10.85	18.44	
	Carga de material (kg)		
	100	110	120
Costo de secado (Quetzales/kg de sólido)	0.184	0.168	0.156
Humedad libre (%) para tiempo=1.70 horas	0.70	0.77	0.80

Cuadro No. 8

Temperatura de secado= 55°C Temperatura de bulbo seco del aire= 45°C Flujo de aire= 3.0 lb/s			
Consumo de energía eléctrica (kW)	Costo de energía eléctrica (Quetzales/hora)		Costo de operación para 2.00 horas (Quetzales)
18.04	10.00		20.00
	Carga de material (kg)		
	100	110	120
Costo de secado (Quetzales/kg de sólido)	0.20	0.18	0.17
Humedad libre (%) para tiempo= 2.0 horas	0.78	0.83	0.85

Cuadro No. 9

Temperatura de secado= 60°C Temperatura de bulbo seco del aire= 49°C Flujo de aire= 3.0 lb/s			
Consumo de energía eléctrica (kW)	Costo de energía eléctrica (Quetzales/hora)		Costo de operación para 1.70 horas (Quetzales)
21.08	11.70		19.89
	Carga de material (kg)		
	100	110	120
Costo de secado (Quetzales/kg de sólido)	0.20	0.18	0.167
Humedad libre (%) para tiempo=1.70 horas	0.83	0.87	0.90

Cuadro No. 10

Temperatura de secado= 65°C Temperatura de bulbo seco del aire= 54°C Flujo de aire= 3.0 lb/s			
Consumo de energía eléctrica (kW)	Costo de energía eléctrica (Quetzales/hora)		Costo de operación para 1.65 horas (Quetzales)
24.87	13.80		22.77
	Carga de material (kg)		
	100	110	120
Costo de secado (Quetzales/kg de sólido)	0.23	0.21	0.19
Humedad libre (%) para tiempo=1.65 horas	0.80	0.82	0.88

Cuadro No. 11

Temperatura de secado= 70°C Temperatura de bulbo seco del aire= 58°C Flujo de aire= 3.0 lb/s			
Consumo de energía eléctrica (kW)	Costo de energía eléctrica (Quetzales/hora)		Costo de operación para 1.30 horas (Quetzales)
27.92	15.50		20.15
	Carga de material (kg)		
	100	110	120
Costo de secado (Quetzales/kg de sólido)	0.20	0.18	0.15
Humedad libre (%) para tiempo=1.30 horas	0.86	0.90	0.93

## OPCIONES DE AHORRO ENERGETICO

Con base en los resultados obtenidos y realizando una comparación entre las diferentes condiciones de operación, respecto a las condiciones actuales de operación (ver cuadro No. 2 de resultados), se presentan las siguientes opciones de ahorro energético para el proceso de secado analizado.

### Opción 1:

Reducir el tiempo de secado para las condiciones actuales de operación a 1.75 horas (1 hora 45 minutos), dado que para este tiempo de secado, el porcentaje de humedad libre es de 0.80%, que es un valor aceptable. (ver cuadro No. 3 de resultados)

Ahorro en el costo de secado= Q 0.02/ kg de sólido.

Ahorro en el costo de operación= Q 2.08 .

Ahorro energético= 12%

### Opción 2:

Aumentar la carga para las condiciones actuales de operación a 120 kg. Si se observa en el cuadro No. 2 la humedad libre final, es de 0.83% .

Ahorro en el costo de secado= Q 0.03 /kg de sólido .

Ahorro en el costo de operación= 0% ; su costo es igual al procedimiento actual.

Ahorro energético= 0% ; consume igual energía que el procedimiento actual de secado. (cuadro No. 2)

Opción 3:

Reducir el tiempo de secado para las condiciones actuales de operación a 1.85 horas (1 hora 50 minutos); aumentar la carga a 110 kg, dado que para este tiempo de secado el porcentaje de humedad libre es de 0.84% (ver cuadro No. 4 de resultados).

Ahorro en el costo de secado= Q 0.02/ kg de sólido.

Ahorro en el costo de operación= Q 1.25 .

Ahorro energético= 7.5% .

Opción 4:

Trabajando con las condiciones del cuadro No. 6 de resultados, para un tiempo de secado de 1.50 horas ( 1 hora 30 minutos) con una carga de 110 kg y una humedad libre de 0.86% para este tiempo de secado, se presenta la siguiente opción:

Ahorro en el costo de secado= Q 0.016/kg de sólido

Ahorro energético= 3.0%

Opción 5:

Con base en las las condiciones del cuadro No. 7 de resultados, para un tiempo de secado de 1.70 horas ( 1 hora 40 minutos) con una carga de 120 kg , con una humedad libre de 0.80% para este tiempo de secado, se presenta la siguiente opción:

Ahorro en el costo de secado= Q 0.01/kg de sólido.

Opción 6:

Con base en los resultados del cuadro No. 11, para una carga de 120 kg, presenta una humedad libre de 0.93%, luego de 1.30 de secado (1 hora 20 minutos), se tiene la siguiente opción de ahorro:

Ahorro en costo de secado= Q 0.01/ kg de sólido.



## DISCUSION DE RESULTADOS

En el cuadro No. 1, se puede observar que para estas condiciones de operación el porcentaje de humedad es 0.93%; pero se prefiere valores de humedad en un rango de 0.80 a 0.90%, ya que permite una diferencia, al menos de 0.10% respecto al valor máximo permitido (1.0%).

De acuerdo con los resultados experimentales para las condiciones actuales de operación (cuadro No. 2), el material se está sobresecando, debido a que presenta una humedad final de 0.65%, la cual se encuentra muy por debajo del 1.0%, lo que indica que se está utilizando un porcentaje de energía, que podría ahorrarse si se reduce el tiempo de operación.

La opción 1 de ahorro energético (cuadro No. 3) muestra que para las condiciones actuales de secado, al reducir el tiempo de operación a 1.75 horas, se obtiene un ahorro energético considerable del 12%, ya que al compararse con el cuadro No. 2 de condiciones actuales de secado, se observa que se evita el sobresecado del material. Esta opción se considera la mejor de las 6 presentadas, pues presenta ahorro energético (12%) y ahorro en el costo de operación (Q 2.08) mayores.

Para la opción 2 (cuadro No. 2), se presenta el mayor ahorro en el costo de secado (Q 0.03/ kg de sólido), sin embargo, no presenta ahorro energético y ahorro en costo de operación de manera directa; pero si se toma en cuenta que para secar 600 Kg de material, con las condiciones actuales se necesitan 6 procesos de

secado, mientras que con ésta opción, únicamente se requieren 5 procesos; el ahorro se presenta en la diferencia de procesos necesarios para secar el material.

La opción 3 (cuadro No.4) presenta un ahorro de Q 1.25 en el costo de operación, 7.5% de ahorro energético directo y Q 0.02/kg de sólido en costo de secado, sin embargo, la opción 1 presenta mejores beneficios de ahorro, aunque esta opción puede considerarse como alterna.

Los resultados del cuadro No. 5 no son tan significativos debido a que para la carga de 100 kg con un valor de humedad de 0.8%, presenta un costo de secado mayor que en las condiciones actuales.

El cuadro No. 6 presenta los resultados de la opción 4, el consumo en energía eléctrica es más elevado, ya que la temperatura de secado (70°C) es 10°C mayor que las condiciones actuales, pero al reducirse el tiempo de secado a 1.5 horas, se ahorra un 3% de energía, que es significativo.

En la opción 5 (cuadro No. 7), se presenta un ahorro en el costo de secado de Q 0.01/kg de sólido; sin embargo este valor es menor comparado con el valor de las opciones 1 y 2.

En el cuadro No. 8, se observa que al aumentar el flujo de aire (3.0 lb/s) se eleva el consumo de energía en 4.5 kW si se compara con el cuadro No. 1, en el cual las condiciones son similares pero el flujo de aire es 2.0 lb/s. Sin embargo, los resultados obtenidos no son menores que los obtenidos para la condición actual de secado, por lo que no se considera adecuada.

El cuadro No. 9 con condiciones similares a las actuales de secado, excepto que presenta un flujo de aire 1.0 lb/s mayor, no satisface las condiciones de ahorro, aun cuando se reduce el tiempo de secado en 20 minutos, pero su mayor consumo de energía no compensa esta reducción de tiempo.

El ahorro de tiempo en el cuadro No. 10 no equilibra el costo de consumo de energía eléctrica, ya que el costo de operación y secado es mayor que en el cuadro No. 2 y no presenta un ahorro energético aceptable.

En el cuadro No. 11, se presenta un ahorro significativo de Q 0.01 /kg de sólido; esta es la opción que presenta un menor tiempo de secado, ya que la temperatura de secado y el flujo másico de aire es mayor que para las actuales condiciones, lo cual aumenta la velocidad de secado.

Los resultados obtenidos muestran que al incrementar la temperatura de secado se reduce el tiempo de secado (ver anexo 2), sin embargo, al tener que calentar el aire a mayor temperatura, el consumo de energía por parte de las termocuplas aumenta. El mismo caso se presenta cuando se aumenta el flujo másico del aire, ya que al aumentar la masa de aire se debe incrementar la energía que debe transferírsele al aire, para lograr que el aire se mantenga a la misma temperatura que tiene cuando el flujo es menor.

El dar seguimiento a las opciones de ahorro energético presentadas, beneficia de manera directa el proceso de secado al ahorrar energía eléctrica y evitar que el material sufra un sobresecado.

El seguimiento a largo plazo de un ahorro energético según las opciones presentadas, pero principalmente la opción 1, se demostrará la importancia de la aplicación de alguna de estas opciones al disminuir costos de operación y costos por consumo de energía.

## CONCLUSIONES

1. Con el procedimiento actual de secado, el producto analizado se sobreseca, y al variar las condiciones de operación, se evita el sobresecado y se ahorra energía.
2. El ahorro energético en el proceso de secado de glucosa, al utilizar un secador de bandejas, es posible al poner en práctica alguna de las 6 opciones de ahorro energético del presente trabajo.
3. La opción 1 de ahorro energético ofrece mejores resultados, con un ahorro energético del 12%, tanto en el costo de operación de Q 2.08, como en el costo de secado de Q 0.02 /kg de sólido.
4. La opción 2 de ahorro energético es la que presenta un mayor ahorro en el costo de secado, que es de Q 0.03 /kg de sólido.
5. La opción 3 de ahorro energético como opción alterna brinda un ahorro en el costo de secado de Q 0.02/kg de sólido, otro en el costo de operación de Q 1.25, y otro ahorro energético de 7.50%.

## RECOMENDACIONES

1. Si las condiciones de operación para el secado de glucosa se varían de acuerdo con las opciones de ahorro energético 1, 2 y 3 , se ahorra energía, y se reduce el costo de operación y de secado. La opción 1 es la que presenta mejores resultados, por lo que se considera que es la que debe seguirse.
2. Para las industrias farmacéuticas que tienen proceso de secado de materiales sólidos granulares, en secadores de bandejas, el presente estudio puede servir de base para la búsqueda de opciones para menor costo de operación y ahorro de energía.

## REFERENCIAS

1. AUSTIN, George. Manual de procesos químicos en la industria. Quinta edición, 3 tomos, traducido por Matilde Espinosa, México: Editorial McGraw-Hill, 1990, pp. 55-62.
  
2. GEANKOPLIS J, Chistie. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Segunda edición, traducido por Jorge Rodríguez Gonzales, México: Editorial CECSA, 1995, pp. 435-440.
  
3. PERRY H, John. Manual del Ingeniero Químico. Sexta edición, 6 tomos, traducido por Fernando Corral, México: Editorial McGrawHill, 1992, pp. 20.16-20.30
  
4. JEANNIN, Charles . Ingeniería Farmacéutica. Traducido por María Hidalgo, México: Editorial El Manual Moderno, 1989 pp. 206-230.
  
5. ICAITI. Ventajas de establecer un programa de ahorro de energía en la industria. Revista, año 1, No. 1, Guatemala enero- marzo 1985.

6. ICAITI. Cómo establecer un programa de ahorro de energía. Revista, año 1, No 3, Guatemala julio- septiembre 1985.
  
7. ICAITI. Uso eficiente de energía eléctrica en la industria. Revista, año 1, No 3, Guatemala julio- septiembre 1985.
  
8. JEREZ, Luis. Ahorro energético en un proceso de fabricación de levadura para panificación. Tesis de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería, USAC, julio de 1992, 50 pp.
  
9. HELMAN, José. Farmacotecnia teórica y práctica. 8 tomos, México: Editorial CECSA, 1986, 2230 pp.
  
10. MUNOZ, Luis Felipe. Optimización del horneado de bicarbonato de sodio en un secador de cama fluida, comparación con un secador de bandejas. Tesis de Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería, USAC, febrero de 1990, 169pp.
  
11. USP, United States of America Pharmacopea. Vol XXIII. USP, Publishing Company, 1992.



**ANEXOS**

## ANEXO 1

Datos experimentales obtenidos:

Tabla No. 1

Temperatura de secado= 55°C Carga de material= 100 kilogramos Flujo másico de aire= 2 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 47°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 24°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.80
30	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5	1.48
60	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.3	1.28
90	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.10
120	0.9	0.9	0.9	1.0	0.9	1.0	0.93

Tabla No. 2

Temperatura de secado= 55°C Carga de material= 110 kilogramos Flujo másico de aire= 2 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 47°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 24°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.78
30	1.5	1.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.48
60	1.4	1.3	1.4	1.4	1.3	1.4	1.35
90	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.2	1.20
120	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.01

Tabla No. 3

Temperatura de secado= 55°C Carga de material= 120 kilogramos Flujo másico de aire= 2 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 47°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 24°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.8	1.8	1.7	1.8	1.7	1.77
30	1.5	1.5	1.6	1.5	1.6	1.5	1.53
60	1.4	1.4	1.5	1.4	1.4	1.3	1.40
90	1.3	1.2	1.3	1.3	1.2	1.2	1.25
120	1.2	1.1	1.1	1.2	1.0	1.1	1.10

Tabla No. 4

Temperatura de secado= 60°C Carga de material= 100 kilogramos Flujo másico de aire= 2 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 50°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 25°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.82
30	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.40
60	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.20
90	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.05
120	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	0.65

Tabla No. 5

Temperatura de secado= 60°C Carga de material= 110 kilogramos Flujo másico de aire= 2 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 50°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 25°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.7	1.8	1.7	1.8	1.8	1.77
30	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.30
60	1.1	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.15
90	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.03
120	0.8	0.8	0.8	0.7	0.9	0.8	0.80

Tabla No. 6

Temperatura de secado= 60°C Carga de material= 120 kilogramos Flujo másico de aire= 2 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 50°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 25°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.8	1.9	1.8	1.8	1.8	1.80
30	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.3	1.37
60	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.15
90	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.03
120	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	0.83

Tabla No. 7

Temperatura de secado= 65°C Carga de material= 100 kilogramos Flujo másico de aire= 2 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 56°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 28°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.9	1.9	1.7	1.8	1.8	1.82
30	1.4	1.4	1.4	1.3	1.4	1.3	1.37
60	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.15
90	0.9	1.0	0.9	0.9	1.0	0.9	0.95
120	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.62

Tabla No. 8

Temperatura de secado= 65°C Carga de material= 110 kilogramos Flujo másico de aire= 2 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 56°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 28°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.7	1.8	1.7	1.8	1.8	1.77
30	1.4	1.3	1.4	1.3	1.4	1.3	1.35
60	1.1	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.15
90	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00
120	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.77

Tabla No. 9

Temperatura de secado= 65°C Carga de material= 120 kilogramos Flujo másico de aire= 2 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 56°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 28°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.7	1.9	1.8	1.8	1.8	1.8	1.80
30	1.3	1.4	1.4	1.3	1.4	1.3	1.35
60	1.1	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	1.17
90	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.02
120	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.80

Tabla No. 10

Temperatura de secado= 70°C Carga de material= 100 kilogramos Flujo másico de aire= 2 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 59°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 30°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.9	1.9	1.7	1.8	1.8	1.82
30	1.3	1.4	1.4	1.3	1.4	1.3	1.35
60	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	1.07
90	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.82
120	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4	0.50

Tabla No. 11

Temperatura de secado= 70°C Carga de material= 110 kilogramos Flujo másico de aire= 2 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 59°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 30°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.9	1.9	1.7	1.8	1.8	1.82
30	1.3	1.4	1.4	1.4	1.4	1.3	1.37
60	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.12
90	0.8	0.9	0.8	0.9	0.9	0.8	0.85
120	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.55

Tabla No. 12

Temperatura de secado= 70°C Carga de material= 120 kilogramos Flujo másico de aire= 2 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 59°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 30°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.7	1.9	1.9	1.8	1.8	1.82
30	1.3	1.3	1.3	1.4	1.4	1.4	1.37
60	1.1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.1	1.15
90	0.9	1.0	0.9	1.0	0.8	0.8	0.90
120	0.5	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.60

Tabla No. 13

Temperatura de secado= 55°C Carga de material= 100 kilogramos Flujo másico de aire= 3 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 45°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 22°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.7	1.8	1.8	1.7	1.8	1.9	1.78
30	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.4	1.38
60	1.2	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.17
90	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.98
120	0.7	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.78

Tabla No. 14

Temperatura de secado= 55°C Carga de material= 110 kilogramos Flujo másico de aire= 3 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 45°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 22°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.7	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.77
30	1.4	1.3 <sup>*</sup>	1.4	1.5	1.4	1.4	1.48
60	1.2	1.2	1.2	1.3	1.2	1.2	1.22
90	1.1	1.0	1.1	1.2	1.0	1.0	1.07
120	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	0.9	0.83





Tabla No. 17

Temperatura de secado= 60°C Carga de material= 110 kilogramos Flujo másico de aire= 3 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 49°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 24°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.7	1.7	1.8	1.8	1.9	1.9	1.80
30	1.3	1.4	1.4	1.3	1.4	1.3	1.35
60	1.1	1.2	1.2	1.1	1.2	1.1	1.15
90	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	0.97
120	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.63

Tabla No. 18

Temperatura de secado= 60°C Carga de material= 120 kilogramos Flujo másico de aire= 3 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 49°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 24°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.9	1.7	1.9	1.7	1.8	1.80
30	1.3	1.4	1.4	1.3	1.4	1.4	1.37
60	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.17
90	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.98
120	0.6	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.70

Tabla No. 19

Temperatura de secado= 65°C Carga de material= 100 kilogramos Flujo másico de aire= 3 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 54°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 26°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.9	1.8	1.9	1.8	1.8	1.7	1.82
30	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.33
60	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.13
90	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	1.0	0.90
120	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.62

Tabla No. 20

Temperatura de secado= 65°C Carga de material= 110 kilogramos Flujo másico de aire= 3 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 54°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 26°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.8	1.9	1.8	1.8	1.7	1.80
30	1.4	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.35
60	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	1.17
90	1.0	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.93
120	0.8	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6	0.68



Tabla No. 23

Temperatura de secado= 70°C Carga de material= 110 kilogramos Flujo másico de aire= 3 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 58°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 29°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.8	1.7	1.8	1.8	1.8	1.8	1.78
30	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.32
60	1.2	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.07
90	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.82
120	0.5	0.4	0.4	0.5	0.4	0.6	0.45

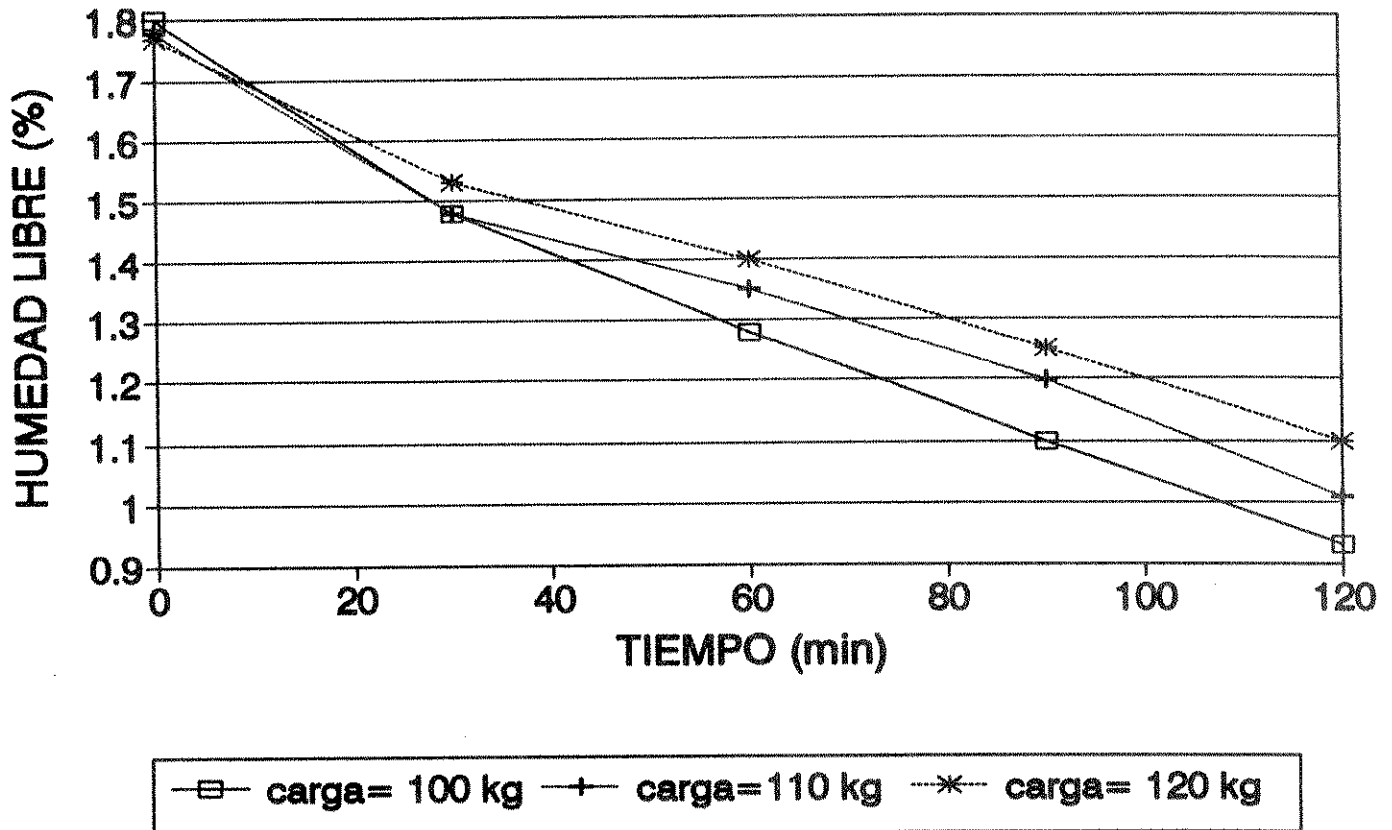
Tabla No. 24

Temperatura de secado= 70°C Carga de material= 120 kilogramos Flujo másico de aire= 3 lb/s Temperatura de bulbo seco del aire= 58°C Temperatura de bulbo húmedo del aire= 29°C							
Tiempo (min)	Humedad libre (%)						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio
0	1.7	1.9	1.7	1.9	1.8	1.8	1.80
30	1.3	1.4	1.3	1.4	1.3	1.3	1.33
60	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.10
90	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.85
120	0.6	0.5	0.5	0.5	0.6	0.5	0.53

## ANEXO 2

# GRAFICA No. 1

## HUMEDAD LIBRE (%) EN FUNCION DEL TIEMPO



Condiciones de operación:

Temperatura de secado= 55°C

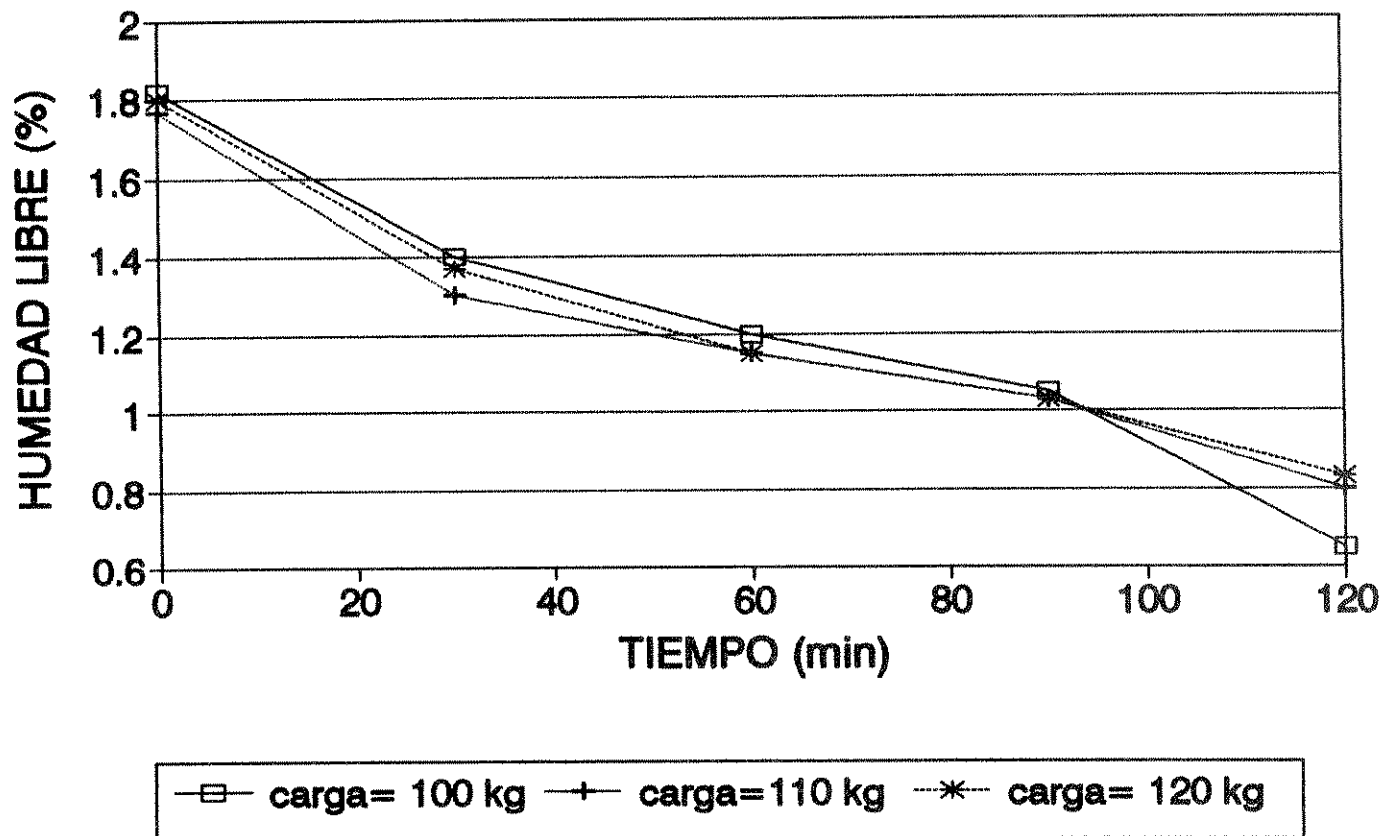
Flujo másico de aire= 2.0 lb/s

Temperatura de bulbo seco del aire= 47°C

Temperatura de bulbo húmedo del aire= 24°C

## GRAFICA No. 2

### HUMEDAD LIBRE (%) EN FUNCION DEL TIEMPO



Condiciones de operación:

Temperatura de secado= 60° C

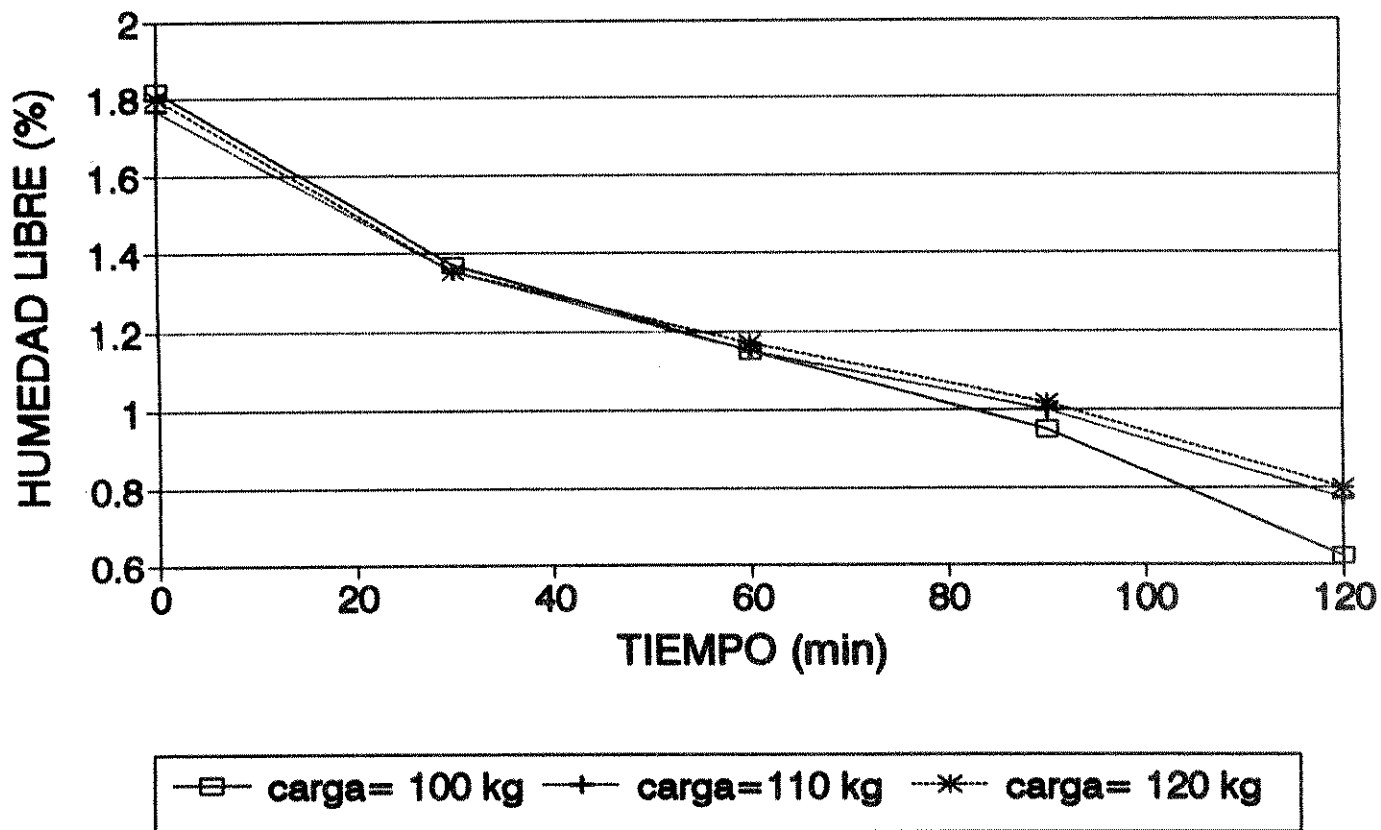
Flujo másico de aire= 2.0 lb/s

Temperatura de bulbo seco del aire= 50° C

Temperatura de bulbo húmedo del aire= 25° C

### GRAFICA No. 3

#### HUMEDAD LIBRE (%) EN FUNCION DEL TIEMPO



Condiciones de operación:

Temperatura de secado= 65° C

Flujo másico de aire= 2.0 lb/s

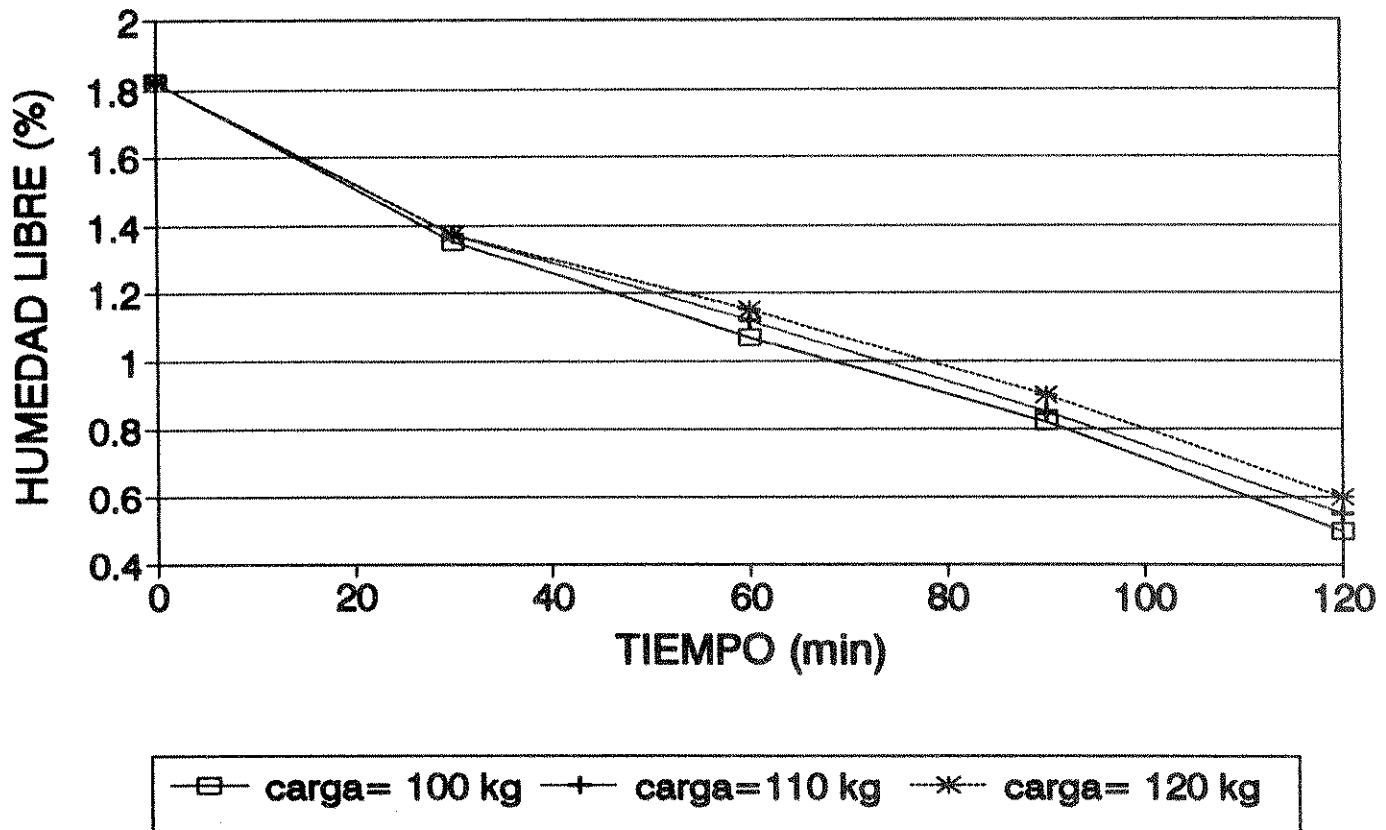
Temperatura de bulbo seco del aire= 56° C

Temperatura de bulbo húmedo del aire= 28° C



## GRAFICA No. 4

### HUMEDAD LIBRE (%) EN FUNCION DEL TIEMPO



Condiciones de operación:

Temperatura de secado= 70° C

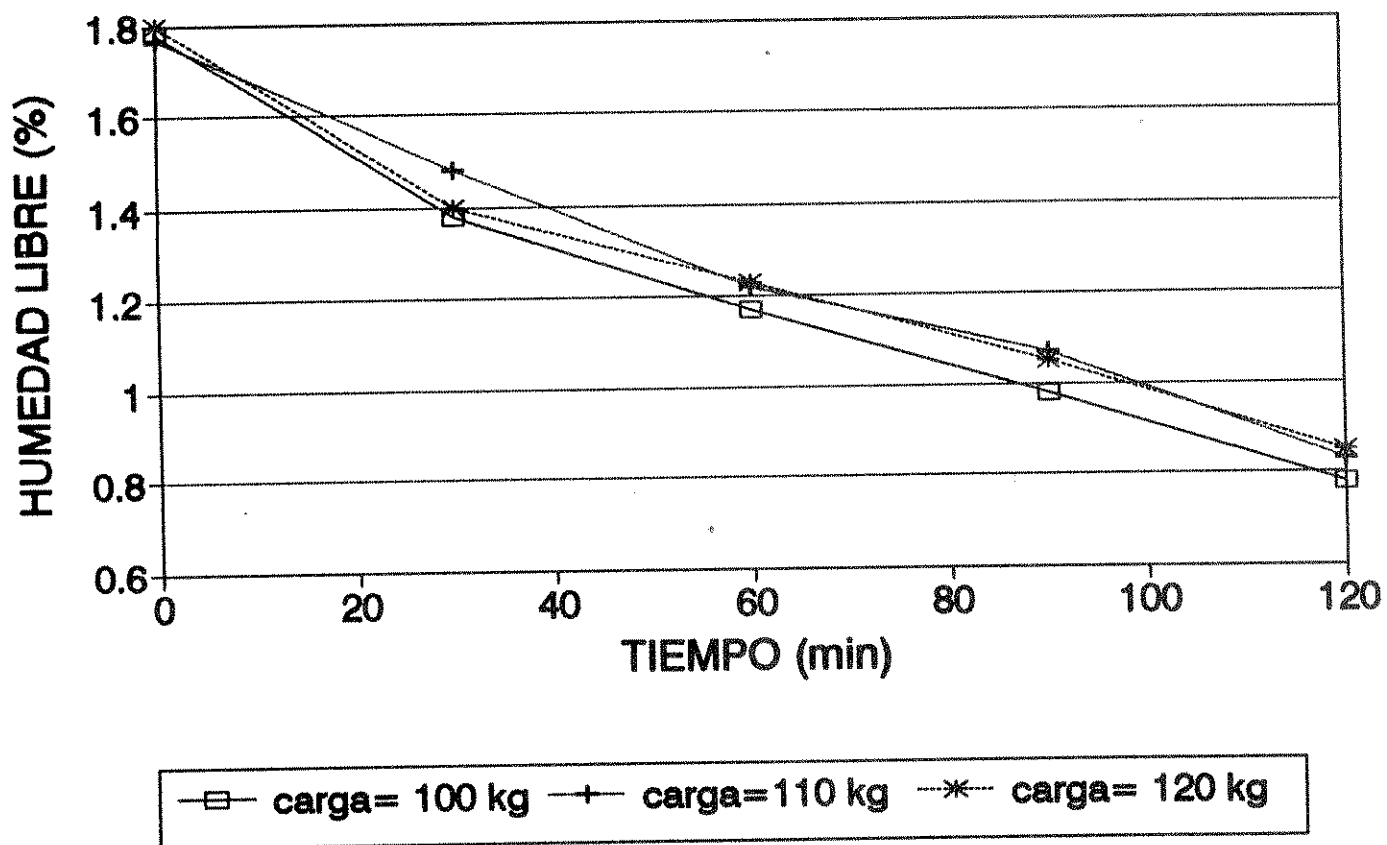
Flujo másico de aire= 2.0 lb/s

Temperatura de bulbo seco del aire= 59° C

Temperatura de bulbo húmedo del aire= 30° C

## GRAFICA No. 5

### HUMEDAD LIBRE (%) EN FUNCION DEL TIEMPO



Condiciones de operación:

Temperatura de secado= 55°C

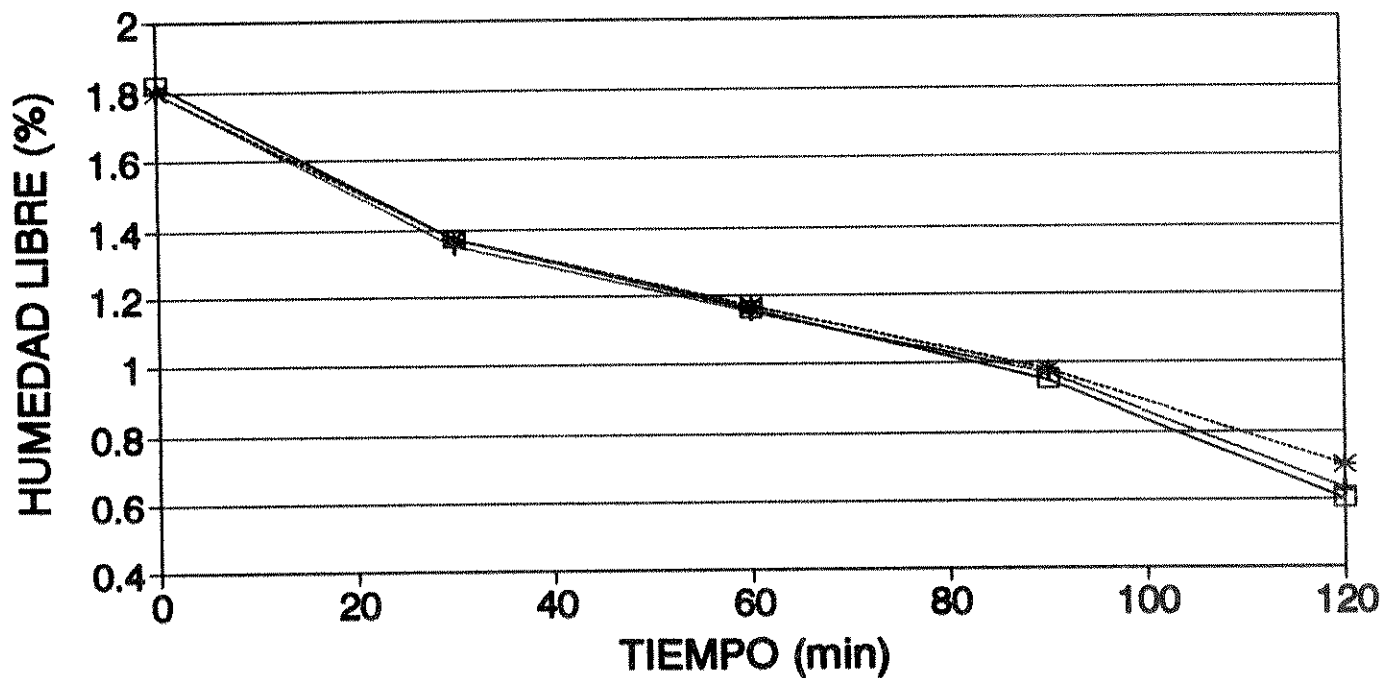
Flujo másico de aire= 3.0 lb/s

Temperatura de bulbo seco del aire= 45°C

Temperatura de bulbo húmedo del aire= 22°C

## GRAFICA No. 6

### HUMEDAD LIBRE (%) EN FUNCION DEL TIEMPO



—□— carga= 100 kg —+— carga= 110 kg —\*— carga= 120 kg

Condiciones de operación:

Temperatura de secado= 60°C

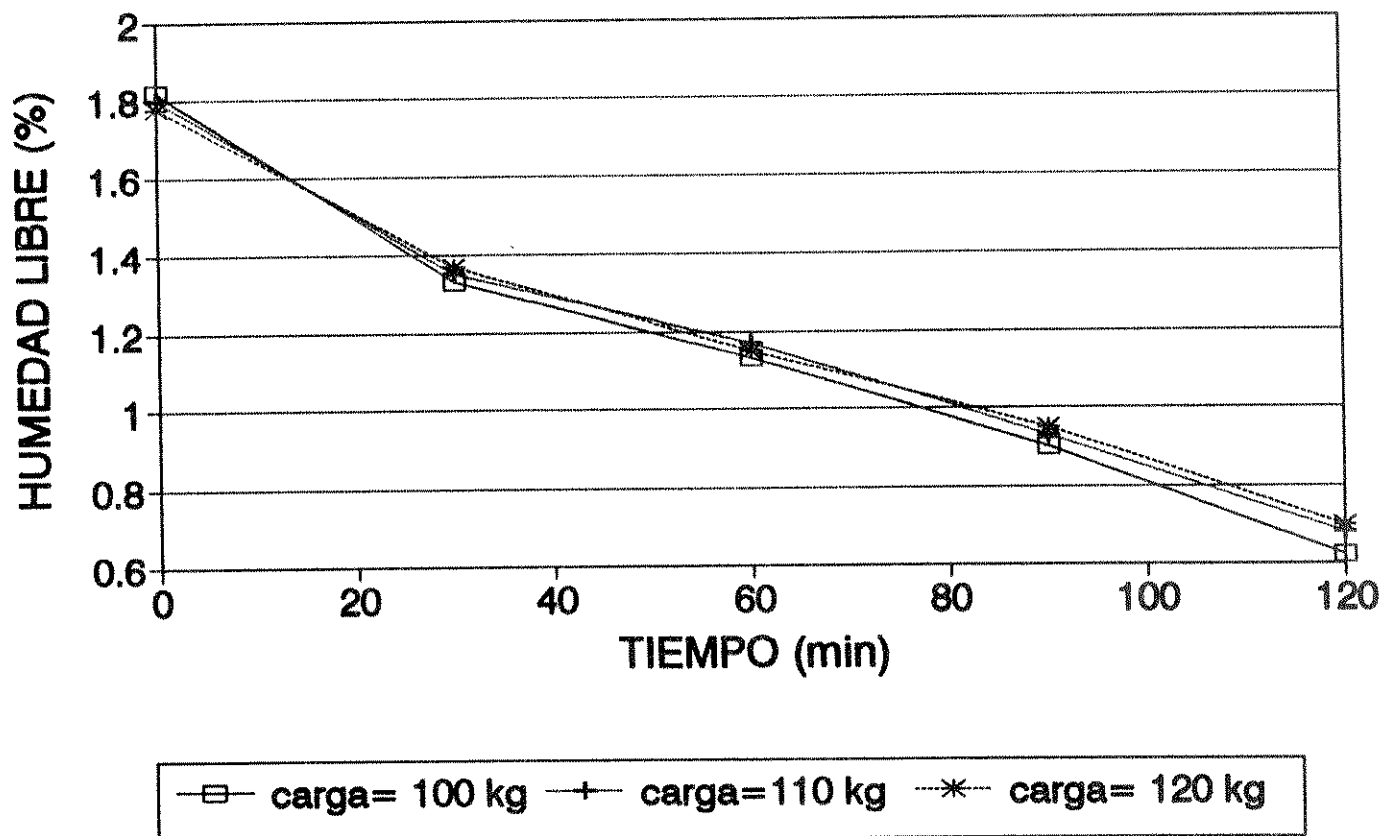
Flujo másico de aire= 3.0 lb/s

Temperatura de bulbo seco del aire= 49°C

Temperatura de bulbo húmedo del aire= 24°C

## GRAFICA No. 7

### HUMEDAD LIBRE (%) EN FUNCION DEL TIEMPO



Condiciones de operación:

Temperatura de secado= 65° C

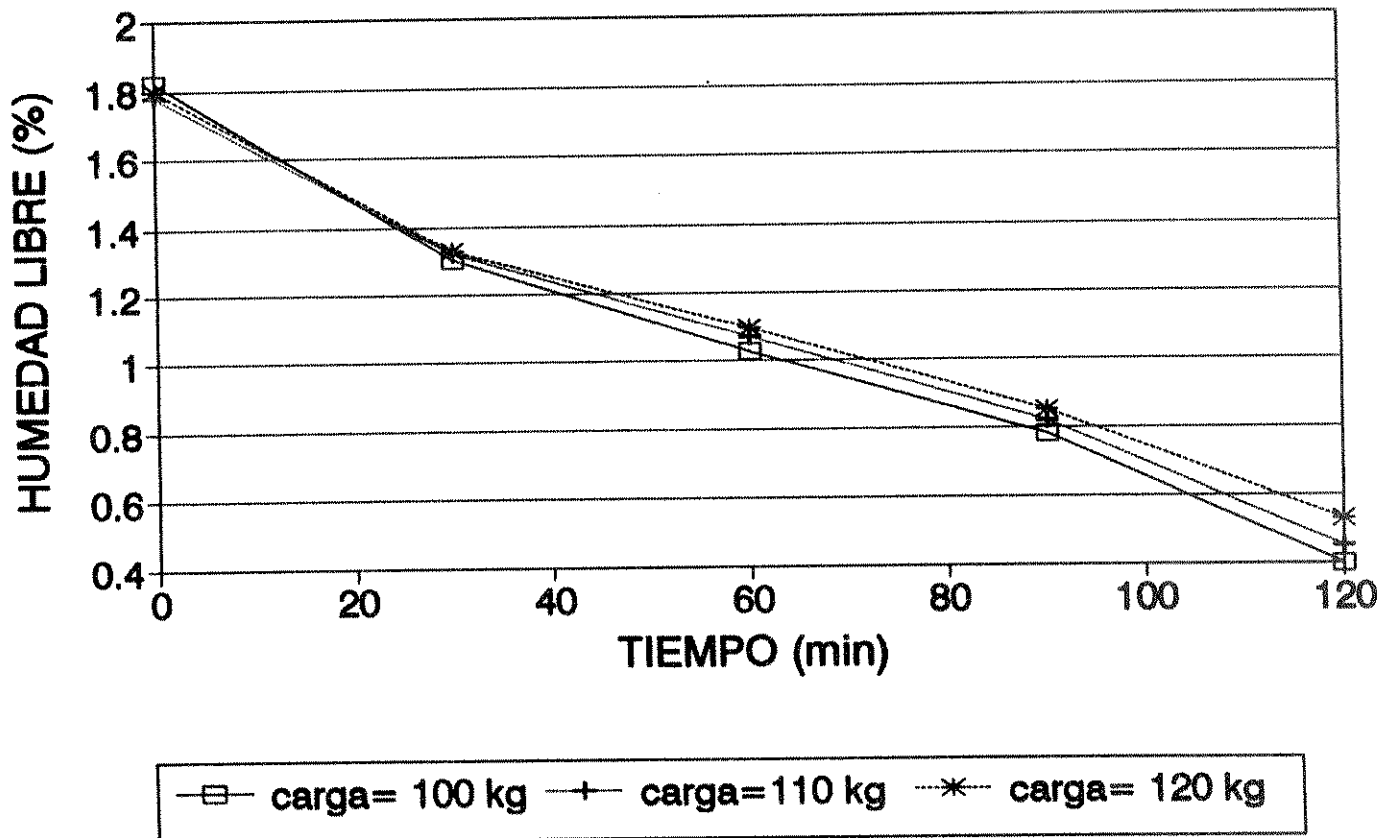
Flujo másico de aire= 3.0 lb/s

Temperatura de bulbo seco del aire= 54° C

Temperatura de bulbo húmedo del aire= 26° C

## GRAFICA No. 8

### HUMEDAD LIBRE (%) EN FUNCION DEL TIEMPO



Condiciones de operación:

Temperatura de secado= 70°C

Flujo másico de aire= 3.0 lb/s

Temperatura de bulbo seco del aire= 58°C

Temperatura de bulbo húmedo del aire= 29°C

## ANEXO 3

## Cálculo de consumo de energía y costo energético

Para ejemplificar los cálculos realizados para el consumo de energía y costo energético para las condiciones analizadas, se utilizan los datos de las tablas 1, 2, 3 (anexo 1) y la gráfica No. 1 (anexo 2). El procedimiento que se utiliza para calcular los consumos de energía y costos energéticos de las otras condiciones de secado es similar; varía únicamente el valor de los datos obtenidos.

1. Consumo de energía:

Datos del secador:

motor del ventilador= 1/4 hp

motor de circulación de aire= 1.5 hp

calentamiento del aire es por termocuplas.

Consumo de energía eléctrica= consumo de ventilador + consumo motor de circulación + consumo de termocuplas.

Consumo ventilador:  $1/4 \text{ hp} * 0.746 \text{ kW/hp} = 0.187 \text{ kW}$  .

Consumo motor de circulación:  $1.5 \text{ hp} * 0.746 \text{ kW/hp} = 1.12 \text{ kW}$

Consumo de termocuplas:

Cantidad de energía transmitida al aire (Q) =  $m * C_p * \Delta T$

m= flujo másico del aire , 2 y 3 lb/s

$C_p$ = capacidad calorífica del aire a presión constante

$C_p = 0.24 \text{ BTU /lb } ^\circ\text{F}$  (Ref. 1)

$\Delta T$  = temperatura de calentamiento del aire ( $^\circ\text{F}$ ) -temperatura de entrada del aire ( $73^\circ\text{F}$ )

consumo ventilador= 0.187 kW

consumo motor de circulación= 1.12 kW

consumo termocuplas:

$$Q = 2 \text{ lb/s} * 0.24 \text{ BTU /lb } ^\circ\text{F} * ( 24^\circ\text{F}) = 11.53 \text{ BTU/s} * \frac{1.05 \text{ kJ}}{1.0 \text{ BTU}}$$

$$Q = 12.17 \text{ kJ/s} = 12.17 \text{ kW}$$

consumo de termocuplas = 12.17 kW

$$\text{Consumo de energía eléctrica} = 0.187 + 1.12 + 12.17 \text{ kW} = 13.48 \text{ kW}$$

## 2. Costo de energía eléctrica:

Costo de energía eléctrica = consumo de energía eléctrica \*  
costo kW-h + IVA

Costo del kW-h para la industria = Q 0.5046 + IVA

Costo de energía eléctrica= (consumo de energía eléctrica \*  
Q 0.5046/ 1 kW-h) \* 1.1 = Quetzales/hora .

Costo de energía eléctrica= (13.48 kW \* Q 0.5646/ 1 kW-h)\*1.1=  
7.48 Quetzales/hora.

## 3. Costo de operación:

Costo de operación= costo de energía eléctrica \* tiempo de  
secado.

$$\text{Costo de operación} = Q 7.48 \text{ /hora} * 2.0 \text{ horas} = Q 14.96$$

## 4. Costo de secado:

Costo de secado (Quetzales/ kg de sólido)=  $\frac{\text{costo de operación}}{\text{carga de material}}$

carga= 100 kg, costo secado= Q 14.96/100 =Q 0.15/kg de sólido

carga= 110 kg, costo secado= Q 14.96/110 =Q 0.136/kg de sólido

carga= 120 kg, costo secado= Q 14.96/120 =Q 0.125/kg de sólido.

## ANEXO 4

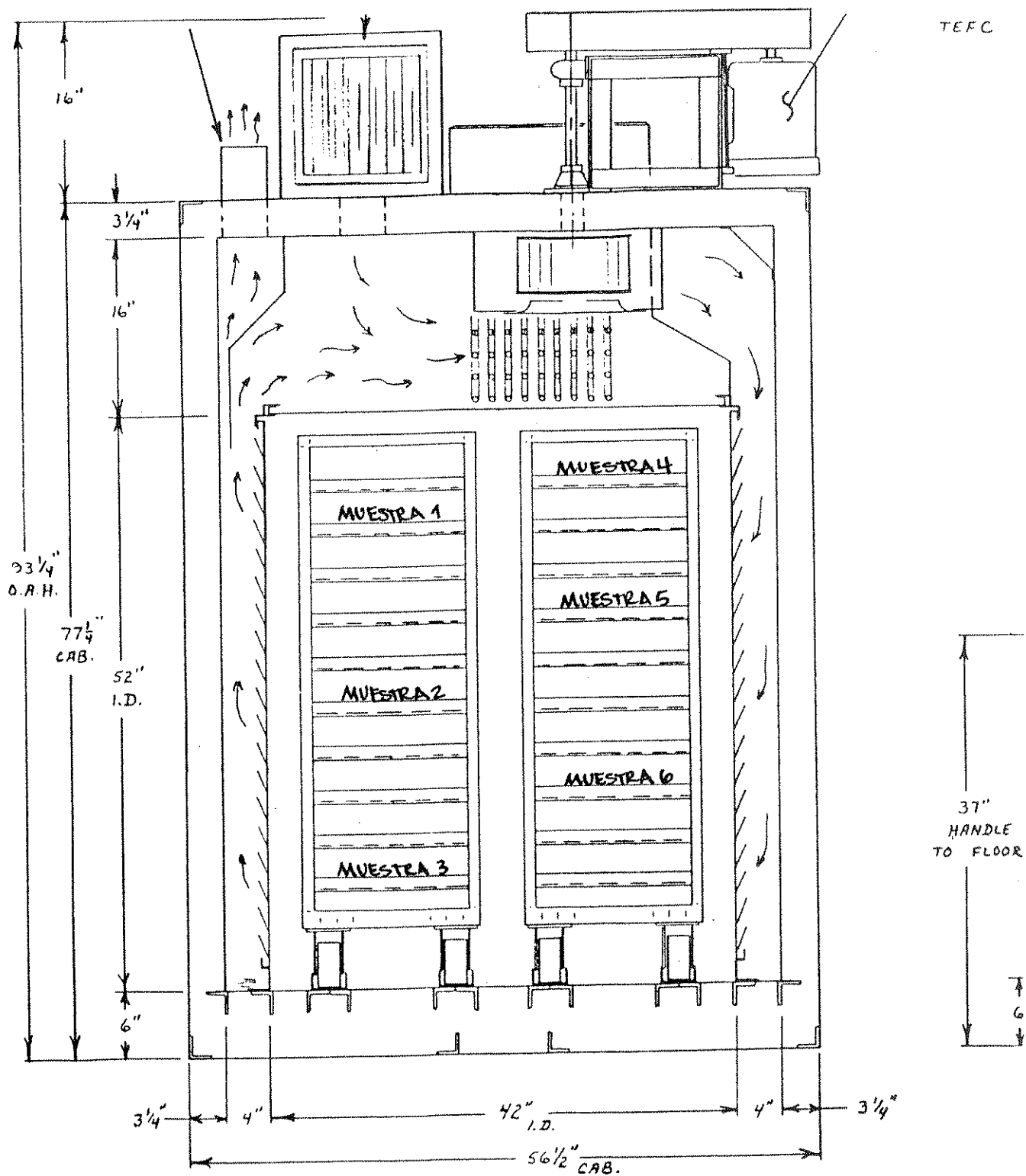
**Procedimiento actual de secado:**

El procedimiento actual de secado es el siguiente:

- El secador tiene 2 carretillas portabandejas con 10 bandejas cada una.
- La carga máxima por bandeja debe ser de 5 kilogramos de material a secar.
- El ciclo de secado debe seguir los requerimientos de tiempo y temperatura, 2 horas a una temperatura de 60°C, con un flujo de aire de 2.00 libras/segundo.
- Después de completado el ciclo de secado, se tomarán 6 muestras para la determinación de humedad, y se sigue el plan de muestreo indicado en la gráfica de puntos para muestreo.



## Gráfica de puntos para muestreo.



## ANEXO 5

**Características del secador de bandejas utilizado:**

Marca: Gruenberg

Dimensiones del secador: 2.00 m de alto, 1.55 m de largo y 1.4 m de ancho.

Temperatura máxima de funcionamiento: 232°C

Bancos de control de temperatura: 2

Voltaje: 220 V, 60 Hz, 30 amperios

Motores: 2, el ventilador utiliza un motor de 1/4 hp y el motor del extractor de aire es de 1.5 hp.

Circulación del aire: forzada

Potencia de las termocuplas: 30 kW

Número de carretillas portabandejas: 2

Número de bandejas por carretilla: 10

Dimensiones de las bandejas: 4 cm de alto , 40 cm de ancho y 80 cm de largo.

El flujo del aire es forzado por un ventilador localizado en la parte superior de la unidad. Entra en la parte superior, procedente del medio ambiente, pasa a través de un filtro que le elimina el polvo y cualquier otro tipo de impurezas o contaminante que pudiera llevar, y luego es calentado por contacto directo con termocuplas.

El aire calentado fluye a través de la cámara y pasa por las bandejas de acero inoxidable que contienen el material. El aire es ahora inducido por un extractor, que lo descarga fuera del sistema.

## ANEXO 6

**Secador de bandejas - flujo de operación**

Partes ilustradas:

1. Entrada del flujo de aire
2. Filtro HEPA 95% de eficiencia
3. Termocuplas para calentamiento del aire
4. Sistema de circulación interna de aire
5. Punto para tomar datos de humedad relativa, temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire que entra.
6. Dirección del flujo de aire
7. Posición de las bandejas dentro del secador
8. Recirculación de aire
9. Salida de aire
10. Punto para tomar datos de humedad relativa, temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo del aire que sale.

Secador de bandejas - flujo de operación.

