

Datos técnicos para reducir el consumo de energía en secadoras de cacao tipo Samoa

**Rubén Vásquez León
Candelario Bolaina Torres
Fredy Valenzuela Murillo**

C O L E C C I Ó N
JOSÉ MARÍA PINO SUÁREZ
<i>Estudios regionales y desarrollo</i>

José Manuel Piña Gutiérrez
Rector

Datos técnicos para reducir el consumo de energía en secadoras de cacao tipo Samoa

**Rubén Vásquez León
Candelario Bolaina Torres
Fredy Valenzuela Murillo**



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Vásquez León, Rubén

Datos Técnicos Para Reducir El Consumo De Energía En Secadoras Tipo Samoa / Rubén Vásquez León, Candelario Bolaina Torres, Fredy Valenzuela Murillo – Villahermosa, Centro, Tabasco: Universidad Juárez Autónoma De Tabasco, 2013

1a. ed.

74 P. : Il. (Colección José María Pino Suárez, Estudios Regionales Y Desarrollo)

1. Cacao -- Tecnología \ 2. Cacao -- Cultivo \ 3.Cacao -- Industria Y Comercio -- Tabasco \ 4. Cacao -- Producción

L.C. HD9200 V37 2013

Primera edición, 2013

D.R. © Universidad Juárez Autónoma de Tabasco
Av. Universidad s/n. Zona de la Cultura
Colonia Magisterial, C.P. 86040
Villahermosa, Centro, Tabasco.

El contenido de la presente obra es responsabilidad exclusiva de los autores. Queda prohibida su reproducción total sin contar previamente con la autorización expresa y por escrito del titular, en términos de la Ley Federal de Derechos de Autor. Se autoriza su reproducción parcial siempre y cuando se cite la fuente.

ISBN: 978-607-606-100-8

Apoyo editorial: Francisco Morales Hoil
Diagramación: Ricardo Cámara Córdova

Hecho en Villahermosa, Tabasco, México

Índice

Prólogo	7
Introducción	
Problemática de la industria del cacao en Tabasco	9
Capítulo I	
Cultivo, Cosecha y Beneficio del cacao en Tabasco	13
Fermentado	14
Lavado	14
Secado	14
Control de la calidad del cacao en grano	16
Capítulo II	
Equipos para secar cacao: Secadoras de grano mecanizadas	19
Uso de secadoras tipo Samoa	19
Descripción de una secadora Samoa típica	20
Versión tabasqueña de la Samoa	22
Capítulo III	
Teoría básica para mejorar la eficiencia de una Samoa	25
Mecanismos de transferencia de calor	25
<i>Radiación</i>	25
<i>Convección</i>	26
<i>Conducción</i>	28
Aislamiento térmico	29
Capítulo IV	
Diagnóstico y solución de fugas de Energía en la Samoa	31
Puntos a identificar en un diagnóstico típico	32

Solución No. 1. Cómo evitar pérdidas de calor en los ductos de aire caliente	34
Solución No. 2: Cómo reducir las pérdidas por conducción en las paredes	35
Solución No. 3. Cómo reducir las pérdidas de calor por conducción a través de las paredes de la Samoa modificando el área total conductora	42
Solución No. 4. Cómo reducir las pérdidas durante el manejo y la distribución del Aire	44
Solución No. 5. Lineamientos para el diseño empírico de un sistema distribuidos de aire	46
Solución No. 6. Datos técnicos para construir una secadora Samoa que ahorre energía	48
Planos inclinados para inducir flujo del aire hacia el lecho de secado	51
Un comentario sobre la recuperación del calor	51
 Apéndice 1	
Parámetros críticos y su efecto sobre la eficacia del secado de cacao	55
 Apéndice 2	
Aplicación del método del elemento finito para obtener, por simulación, un campo de velocidades uniforme en el lecho de una secadora de cacao	63

Prólogo

Este libro, impreso con el apoyo de recursos otorgados por PIFI 2011. OP/PIFI-2011-27MSU0018V-12-03, reúne los resultados de investigación documental y experimental que se realizó durante la ejecución del proyecto Optimización Energética de una Secadora Industrial de Cacao, financiado por el CONACYT, el Gobierno del Estado de Tabasco, la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco y la Fábrica de Chocolates “La Esmeralda” de Comalcalco, Tabasco; a través del convenio FOMIX TAB-2003-C03-10961.

Dicho proyecto tuvo como objetivo general la aplicación directa de técnicas de ingeniería para mejorar, mediante la reducción sustancial del consumo de energía, la sustentabilidad de los procesos productivos de la industria de transformación del cacao en el estado de Tabasco.

En nuestro país, los productos de investigación científica suelen diluirse hasta casi perderse en el universo de congresos internacionales y revistas indexadas publicadas en idioma extranjero. El fenómeno se debe a que, motivados por el interés de pertenecer al SNI, los investigadores nacionales olvidan que el interés de la investigación es el conocimiento y no el reconocimiento.

Los autores de este libro, creemos firmemente que nuestro trabajo debe impactar directamente en el entorno socioeconómico en el que vivimos. De poco sirve publicar en países remotos la solución de los problemas nacionales.

Cabe destacar que, en Tabasco, el sector industria de transformación es incipiente y recurre a menudo a soluciones empíricas casi artesanales. Por eso, dicho sector es un espacio de oportunidades para el quehacer universitario. La industria estatal requiere del análisis cuidadoso de los procesos y, no raras veces, del desarrollo de prototipos y de la ejecución de obras y proyectos que coadyuven a mejorar la sustentabilidad de los diversos procesos productivos e incrementar la productividad y la competitividad de las empresas. El desarrollo sustentable requiere, entre otras cosas, de un eficiente aprovechamiento de los recursos energéticos.

Los avances científicos y tecnológicos hacen factible la reingeniería de los procesos tradicionales conservando un equilibrio entre los buenos resultados de los procesos tradicionales y el incremento del volumen de la producción.

En ese sentido, este libro se concentra en proceso de secado por lotes que se realiza en las secadoras tipo Samoa desde los fundamentos para realizar un diagnóstico de su funcionamiento energético hasta la capacidad para corregir los defectos que el diagnóstico arroje, ofreciendo soluciones que permiten, con un mínimo de inversión financiera, reducir el consumo de energéticos para así convertir la Samoa en uno de los elementos que eleven la productividad sin menoscabo de la calidad.

Se trata de un libro breve, de cuatro capítulos. En los primeros dos presentamos información contextual y cultural que puede parecer ajena a los fines de quien busca Datos Técnicos Aplicables a sus procesos de producción. Sin embargo, los datos estadísticos dan una idea de la importancia que el cacao ha conservado a pesar de la agresiva actividad petrolera de la región. También, con mucha discreción, se reseñan varios aspectos clave de la problemática del cacao en Tabasco entre los que destacan la resistencia de los productores a la mecanización de sus procesos y el desconocimiento de las Normas Oficiales que regulan la calidad del cacao y sus derivados.

Los capítulos 3 y 4 están dedicados a la presentación de los fundamentos teóricos cuya comprensión y aplicación es enriquecedora para los productores. En el capítulo 3 presentamos la teoría sin excedernos en el rigor, con la intención de lograr una comprensión intuitiva de los procesos de transferencia de calor. El capítulo 4 contiene nuestra más valiosa contribución porque se presentan Soluciones, cuyo funcionamiento ha sido verificado escrupulosamente, tanto en el laboratorio como en instalaciones reales. La idea es que, quien tenga una secadora Samoa pueda modificarla con el mínimo de inversión y, quien quiera construir una, lo haga de una vez energéticamente eficiente.

Al final del libro se incluyen como apéndices dos publicaciones un tanto más del tipo que suelen presentarse en los congresos. Esperamos que sirvan para estimular la inquietud y el deseo de profundizar en los aspectos científicos que subyacen al desarrollo tecnológico.

Esperamos que este libro llegue a las manos de los productores de cacao. Hemos procurado no abusar de tecnicismos y hemos caído en redundancias en aras de conseguir la claridad. Que sea para bien.

*Rubén Vásquez León
Candelario Bolaina Torres
Fredy Valenzuela Murillo*

Introducción

Problemática de la industria del cacao en tabasco

El cacao es uno de los productos más apreciados en el mercado internacional. Sus derivados tienen gran demanda y, por lo tanto, alto valor comercial. Además, su industrialización representa una importante fuente de ingresos y empleos. México es el noveno productor de cacao en grano del mundo. La producción nacional se genera principalmente en los estados de Tabasco, Chiapas, Guerrero y Oaxaca. El Servicio de Información y Estadística Agropecuaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) del gobierno mexicano reporta que, en el período de 1998 a 2008 la producción promedio de Tabasco cubría el 70.1 % del total de la producción nacional. En 2010, como consecuencia de la epidemia de moniliasis, la producción nacional disminuyó. Sin embargo, Tabasco sigue siendo el productor mayoritario con un 60 % de la producción nacional.

Tabla 1. Principales estados productores de cacao.

Estado	1999	2001	2003	2005	2007	2009	2011	Promedio	%
Tabasco	28550	33791	32947	24077	22321	19438	12940	24866.29	68.7
Chiapas	12146	12887	16746	12047	7367	7900	8172	11037.86	30.5
Guerrero	149	159.8	122.36	197.4	196	196	420	205.79	0.6
Oaxaca	210	100	149	44	25	14	36	82.57	0.2
Total	41055	46937.8	49964.36	36365.4	29909	27548	21568	36192.51	100

Fuente: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), con información de las Delegaciones de la SAGARPA www.siap.gob.mx, consultado el 31 de enero de 2012

Según el SIAP de la SAGARPA, en 2011, México produjo 21568 toneladas de cacao. Casi el 69 % de esta producción tuvo su origen en Tabasco. Tabasco ha sido un estado eminentemente agrícola, con larga experiencia en la explotación de sus productos primarios y su economía siempre ha estado fuertemente vinculada al aprovechamiento de los recursos naturales de suelo y subsuelo.

Históricamente y por razones geográficas, la economía local se desarrolló separada de las influencias y tendencias nacionales. Este hecho dio origen a pequeñas empresas e industrias orientadas hacia la transformación de productos

locales, para atender las necesidades y demandas de una economía autónoma y aislada del contexto nacional. Antes de que las vías de comunicación rompieran este aislamiento, en Tabasco se producía plátano, cacao y chocolate, copra y jabón, caña de azúcar, colorantes, harinas, especias, dulces de frutas tropicales y refrescos.

Paradójicamente, la apertura de las modernas carreteras y la presencia de PEMEX trajeron como consecuencia el abandono de buena parte de las actividades agrícolas tradicionales. Con las carreteras llegaron los intermediarios que compran los productos directamente en el sitio de producción para sacarlos del estado “ahorrándole” al productor “gastos” por concepto de fletes y las “complicaciones” que resultan de la implantación de instalaciones para agregar valor a la materia prima. Esto produjo un lamentable retroceso de la industria local. Destacan la quiebra de empresas prometedoras como “Oleaginosas del Sureste” y la notable contracción de la Industrializadora de Cacao de Tabasco (INCATABSA).

Así, Tabasco inició actividades para exportar materia prima, principalmente plátano, cacao, caña de azúcar y sus derivados. Actualmente, y desde 1995, el sector manufacturero tabasqueño ha exportado materiales de construcción, cemento gris, cacao en grano, cacao en pasta, manteca de cacao, jugo concentrado, productos alimenticios, mango industrializado, azúcar, piña industrializada y leche ultrapasteurizada.

Este preámbulo es necesario para comprender que, a pesar de todo, en Tabasco existen productores de cacao y pequeños empresarios que pugnan por recuperar el prestigio y los mercados que alguna vez tuvieron los productos tabasqueños.

En Tabasco la producción de cacao se comercializa mediante dos vías, una es la Unión Nacional de Productores de Cacao (UNPC), que compra aproximadamente el 50 por ciento de la producción, el otro 50 por ciento se comercializa a través de empresas comercializadoras privadas. Los productores envían el cacao lavado o en baba para su fermentación a los centros de recepción, propiedad de las Asociaciones de Productores y posteriormente, la Unión Nacional de Productores de Cacao se encarga de clasificar y vender el cacao en grano o sus derivados, que son distribuidos a los fabricantes de chocolates.

El volumen promedio de producción en los últimos tres años tan sólo en la región de Tabasco y el norte de Chiapas es de 23962 toneladas anuales. Sin embargo, las tres empresas más significativas que industrializan el cacao en esta zona apenas ocupan alrededor de 7 mil toneladas de esa oferta de materia prima, quedando alrededor de 17 mil toneladas de cacao con posibilidades de ser aprovechadas, sobre todo si se preprocesan para darles algún valor agregado.

El mercado nacional para el cacao tabasqueño es amplio debido a que el cacao tabasqueño tiene alta calidad aromática. En virtud de que el país es deficitario en varios derivados del cacao (pasta, manteca y cocoa) se ve obligado a importar volúmenes significativos del grano para satisfacer la demanda. Dado que el cacao tabasqueño es de calidad superior, las empresas chocolateras lo mezclan con la materia prima importada. El cacao tabasqueño funciona como un “mejorador” de la calidad de la mezcla.

No hay duda de que el cacao es una de las materias primas que se deben procesar en Tabasco. De hecho los precios nacionales e internacionales de los semielaborados a base de cacao son atractivos y aseguran la rentabilidad de estos productos y su industrialización. Sin embargo, los procesos para la obtención de productos y subproductos del cacao que se usan en Tabasco no compiten tecnológicamente con los de otros países que van a la vanguardia el procesamiento y transformación del cacao. Por lo tanto, uno de los retos de la industria local es la innovación de sus tecnologías.

Otro reto para la industria del cacao es la preferencia, cada vez mayor que se le da al cacao orgánico, sobre todo en el ámbito internacional. Así, es imperativo desarrollar la capacidad del estado para dar valor agregado al cacao y sus derivados, de manera que puedan ser comercializados con un beneficio mucho mayor.

Capítulo I

Cultivo, cosecha y beneficio del cacao en Tabasco

La forma en que se cultiva cacao en Tabasco le debe mucho a la cultura maya. Los mayas domesticaron el cacao sin romper el equilibrio ecológico. En las plantaciones de cacao tabasqueñas típicas se propicia la convivencia del cacao con otras especies maderables y de ornato, las cuales, reproducen en buena medida el ambiente de la selva tropical húmeda. Los métodos de producción son tan apegados a los legados de los mayas que en enero de 2012 la Secretaría de Desarrollo Agrícola, Forestal y Pecuario (SEDAFOP) inició los trámites ante el IMPI para que el cacao de Tabasco clasifique como denominación de origen.

Los productores de cacao de Tabasco y Chiapas se apoyan en esas técnicas tradicionales y, además, han introducido nuevas variedades. Inclusive, gracias al trabajo de varios pioneros, actualmente casi la tercera parte de las plantaciones de la región producen cacao etiquetado como cacao orgánico.

El cacao de Tabasco es famoso por su fino aroma. Su alta calidad se debe a la combinación de las variedades criollas locales con otras variedades forasteras. El cacao tabasqueño es muy apreciado y las mezclas que lo incluyen dan origen al mejor chocolate del mundo.

La cosecha “grande” de cacao se presenta anualmente, entre septiembre y mayo. Un productor promedio de Tabasco produce alrededor de 2.5 toneladas de cacao fresco, que al secarlo se convierte en una tonelada del grano fermentado y seco.

Para que el cacao pueda convertirse en chocolate previamente debe pasar por los procesos de fermentación y secado, en los cuales desarrolla las características de sabor y aroma que definen su calidad.

Para la fermentación, secado y comercialización, los productores del Estado están organizados y poseen plantas fermentadoras y una industria (INCATABSA) que produce pasta, manteca, cocoa y chocolates para el consumo nacional.

Fermentado

La fermentación es una operación clave para la calidad del cacao, sobre todo cuando este se destina a la elaboración de chocolate. La fermentación limpia las semillas, evita la germinación y mejora la presentación de las semillas.

Durante el fermentado, la acción combinada y balanceada de temperatura, alcoholes, ácidos, PH y humedad matan el embrión, disminuyen el sabor amargo ya que pierde theobromina y se producen ciertas reacciones bioquímicas que forman el chocolate.

La fermentación debe realizarse en lugares bien ventilados. Si las semillas no fermentan o el fermentado se realiza mal o en forma deficiente, el resultado es un producto de baja calidad, conocido como “cacao corriente”.

El tiempo de fermentación no debe ser mayor de tres días para los cacaos criollos o de cotiledón blanco y no debe ser mayor de ocho días para los cacaos forasteros o de cotiledón morado o púrpura. Existen varios métodos para realizar la fermentación, siendo los más empleados la fermentación en montones, en sacos, en cajas, y el método Rohan.

Lavado

En algunos países, después de la fermentación los granos se lavan a mano para eliminar residuos de pulpa. Esta no es una práctica común en Tabasco. El cacao bien fermentado generalmente no necesita lavado, puesto que la fermentación ha desintegrado completamente la pulpa.

Los cacaos criollos nunca son lavados. Existe cierta influencia del lavado sobre el aroma de las variedades forasteras. La tendencia mundial es la de suprimir el lavado y transferir los granos directamente de los tanques de fermentación a las secadoras

Secado

El secado es una operación unitaria mediante la cual se extrae humedad de un objeto. Dependiendo del objeto a secar, esta operación puede hacerse de varias maneras: En el caso del cacao, el secado permite que las semillas pierdan el exceso de humedad. El cacao se seca con fines de comercialización y conservación. Cuando se va secar cacao fermentado, es importante reconocer que la fermentación

continuará durante las etapas iniciales del secado. Durante este tiempo las semillas de cacao terminan los cambios para obtener el sabor y aroma a chocolate. También se producen cambios en el color, apareciendo el color típico marrón del cacao fermentado y secado correctamente. Durante el secado, lo ideal es reducir el contenido de humedad de las semillas desde el 55 % hasta un 6 u 8 %.

Existen distintos métodos de secado. El más económico es el secado natural, que aprovecha el calor radiante de los rayos solares. Este secado produce mejor aroma pero depende de las condiciones climatológicas. Si el cacao se moja con lluvia aparecerán hongos que anularán la calidad del producto.

Cuando la humedad se reduce demasiado rápido, la cáscara se vuelve excesivamente quebradiza, quedando los cotiledones aún húmedos lo que aumenta la susceptibilidad al ataque de hongos. Un secado lento, hace que las semillas permanezcan húmedas más tiempo y esto facilita la difusión de los ácidos orgánicos que eventualmente proporcionan las deseadas cualidades de sabor y aroma.

Si lo que se desea es mejorar la calidad del aroma del producto, es fácil concluir que el mejor secador de cacao será el que mejor imite la acción del secado al sol. Sin embargo, la tecnología de las secadoras típicas no se ha dirigido hacia ese objetivo. Esta posibilidad es un horizonte para la investigación a futuro.

La alternativa de uso más frecuente en la temporada de lluvias para secar cacao utiliza secadoras mecánicas o estufas (secador Samoa) en las cuales se hace pasar una corriente de aire seco y caliente a través del cacao dispuesto sobre una plataforma o lecho. En estas secadoras el secado ocurre por la combinación de tres efectos o mecanismos.

1. Efecto Convectivo, es decir, transporte de humedad por el movimiento del aire.
2. Efecto Conductivo, o evaporación de la humedad de la semilla por calentamiento de la misma.
3. Efecto Radiante, o evaporación de la humedad por el calor radiante presente.

En una secadora Samoa típica no es fácil saber cuál de estos tres efectos predomina. Según los experimentos que realizamos, el efecto radiante tiene influencia mínima y el predominio de cualquiera de los otros dos efectos depende de la combinación de tres parámetros críticos:

1. La temperatura del aire insuflado: A mayor temperatura mayor efecto conductivo

2. La rapidez con que el aire atraviesa el lecho de secado: a mayor rapidez, mayor efecto convectivo.
3. La altura o espesor del lecho de secado. Una altura menor favorece ambos efectos pero, en general, significa que se está desperdiciando energía.

Cuanto mayor es la temperatura del aire insuflado, tanto mayor será el efecto conductivo. De la misma manera, el efecto convectivo aumenta con la rapidez de tránsito del aire a través del lecho de secado. Finalmente, el espesor del lecho influye en la rapidez con que el aire lo atraviesa y también en el calentamiento del grano por conducción.

Otro factor, que generalmente no se toma en cuenta, es la cantidad de vapor de agua (humedad específica) presente en el aire insuflado. En general, el aire se toma directamente de la atmósfera y se mezcla con los productos de la combustión de gas LP para elevar su temperatura.

Los experimentos que realizamos prueban que, a temperatura constante, la eficacia del secado es notablemente mayor cuando la humedad específica del aire insuflado es menor. El contenido de humedad del aire atmosférico depende de las condiciones climatológicas. La práctica usual de calentar el aire se justifica porque, cuando se incrementa la temperatura del aire disminuye su humedad relativa.

Control de la calidad del cacao en grano

En México, la norma NMX-FF-103-SCFI-2003 establece las especificaciones que debe cumplir el cacao en grano (*Theobroma cacao*) destinado a la elaboración de productos alimenticios y farmacéuticos que se comercializa en la República Mexicana. Sin embargo, cuando se trata de fermentación y secado de cacao, los productores de Tabasco recurren a su experiencia, más que a la aplicación de normas y controles de calidad. Este es un indicador del desconocimiento de la norma por muchos productores. De hecho, en algunos casos, la norma es un “secreto” cuyo poseedor es el empleado más viejo de la plantación.

En las instalaciones objeto de este estudio son evidentes, además, la falta de instrumentos y equipo para el control de la calidad. La norma NMX-FF-103-SCFI-2003 se apoya, a su vez, en otras normas mexicanas vigentes. Un listado de las más relacionadas con este manual se presenta en la Tabla No. 2.

Tabla No. 2. Normas aplicables en la industria del Cacao

Norma	Aplicación
NOM-186-SSA1/SCF1-2002	Productos y Servicios. Cacao. Productos y Derivados. I Cacao. II Chocolate. III Derivados. Especificaciones Sanitarias. Denominación Comercial, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 8 de noviembre de 2002.
NMX-Z-012/1-1987	Muestreo para la inspección por atributos. Parte 1: Información general y aplicaciones. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de octubre de 1987.
NMX-Z-012/2-1987	Muestreo para la inspección por atributos. Parte 2: Métodos de muestreo, tablas y gráficas. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 28 de octubre de 1987.
NMX-Z-012/3-1987	Muestreo para la inspección por atributos. Parte 3: Regla de cálculo para la determinación de planes de muestreo. Declaratoria de vigencia publicada en el Diario Oficial de la Federación el 31 de julio de 1987.

El punto de vista práctico. La Tabla No. 3 es un resumen de las cualidades que en la práctica permiten distinguir entre el cacao fermentado y secado correctamente de otros que hayan sido mal procesados.

Tabla No. 3. Evaluación cualitativa del grano de cacao seco y fermentado

Grano bien fermentado	Grano mal fermentado
Granos esponjados.	Granos aplanados.
La apariencia externa de los granos es color café o canela.	Los granos muestran un color amarillento.
Color interno marrón o chocolate	Color violáceo o blanquecino en su interior
Grano quebradizo. Cuando se presiona entre los dedos se produce un chasquido. Los cotiledones presentan fracturas o resquebrajamientos.	Grano compacto. No cruje al presionarlo. Al hacer el corte del grano su superficie no tiene fracturas o es lisa
Fácil desprendimiento de la cáscara.	Es difícil desprender la cáscara.
Sabor medianamente amargo	Sabor y aroma desagradable (astringente)

Capítulo II

Equipos para secar cacao: Secadoras de grano mecanizadas

En el mercado existen varios equipos mecánicos para acelerar el secado de granos. La mayoría de los equipos que se comercializan como secadores de cacao fueron diseñados para secar otro tipo de granos o semillas y, por la experiencia de los productores usuarios no reúnen las características deseables para su utilización en el secado de cacao.

En esta sección se reseña la experiencia de los usuarios respecto a las ventajas que las secadoras comerciales que han sido utilizadas para secado de cacao. Al final se incluye el croquis con las dimensiones recomendadas en una publicación de la FAO dirigida a los interesados en construir su propia secadora Samoa de cacao.

Las secadoras rotativas comerciales fueron diseñadas para secar granos de café. Cuando se utilizan para secar cacao, el movimiento rotatorio produce la ruptura del grano ya que, cuando el cacao se fermenta y seca correctamente se vuelve muy frágil.

Adicionalmente, el secado ocurre demasiado rápido de manera que inhibe la complementación de la fermentación que, como mencionamos antes, continua durante las etapas iniciales del secado.

El equipo consume energía eléctrica para producir el movimiento rotatorio y no está provisto de aislamiento térmico que evite disipación de calor por conducción a través de las paredes metálicas.

Algunas secadoras rotatorias diseñadas para pequeños productores incluyen un sistema de aspiración de aire hacia un cilindro cerrado que contiene el grano de manera que posibilitan el secado en un proceso eficiente y de bajo costo, incluso cuando la secadora se encuentra solamente al 30% de su capacidad pero, en este caso, aumenta notablemente la merma por ruptura del grano seco.

Uso de secadoras tipo Samoa

En todas las instalaciones que procesan cacao en Tabasco y parte de Chiapas se utilizan secadoras tipo Samoa (también conocidas como secadoras de galpón). Los

miembros de algunas asociaciones nos informaron que en algún momento de su historia compraron, con financiamiento gubernamental, equipos rotativos cuyo uso ha sido totalmente abandonado por las siguientes razones:

1. La inversión inicial es fuerte comparada con la que se hace en una Samoa.
2. El equipo no se puede utilizar eficientemente cuando la cosecha es escasa.
3. El mantenimiento que requieren estos equipos es mayor ya que tienen partes móviles.
4. El movimiento rotativo rompe la semilla.
5. El secado demasiado rápido provoca que la semilla retenga ácido, lo cual resulta en mal sabor para el chocolate. Esto se atribuye a que muchas veces, el proceso de fermentado, identificable cualitativamente por el color “chocolate” del cotiledón, “termina” durante el proceso de secado. Si el secado se hace muy rápido, el cotiledón no termina de transformarse. El color “chocolate” es típico en el cotiledón que ha perdido la capacidad de germinar. Muchas veces, las semillas entran al proceso de secado con un cotiledón ligeramente violáceo y si el secado se hace demasiado rápido la fermentación queda inconclusa.

Cabe aclarar que algunas de las razones anteriores sugieren la necesidad de un control de calidad más estricto durante el fermentado e inclusive la necesidad del diseño de un proceso que optimice tanto la uniformidad, como la efectividad del fermentado. Estas necesidades no forman parte de las que dieron origen a este proyecto y se convierten en un horizonte para investigación futura.

El proyecto FOMIX TAB-2003-C03-10961 “Optimización energética de una secadora industrial de cacao” se fundamentó en una demanda específica del usuario, quien además especificó su preferencia por los secadores tipo Samoa.

La demanda específica se enunció como la necesidad de reducir el consumo global de energía del dispositivo conservando y de mejorar la calidad del producto seco.

Descripción de una secadora Samoa típica

La construcción básica de una Samoa, consiste de una fuente de calor (en Tabasco, generalmente un quemador de gas), un sistema conductor de aire caliente que incluye un ventilador centrífugo y una construcción prismática de mampostería

sobre la cual se coloca una plataforma o lecho de secado dejando un espacio libre (plenum) debajo para la insuflación del aire, son los componentes básicos de la Samoa.

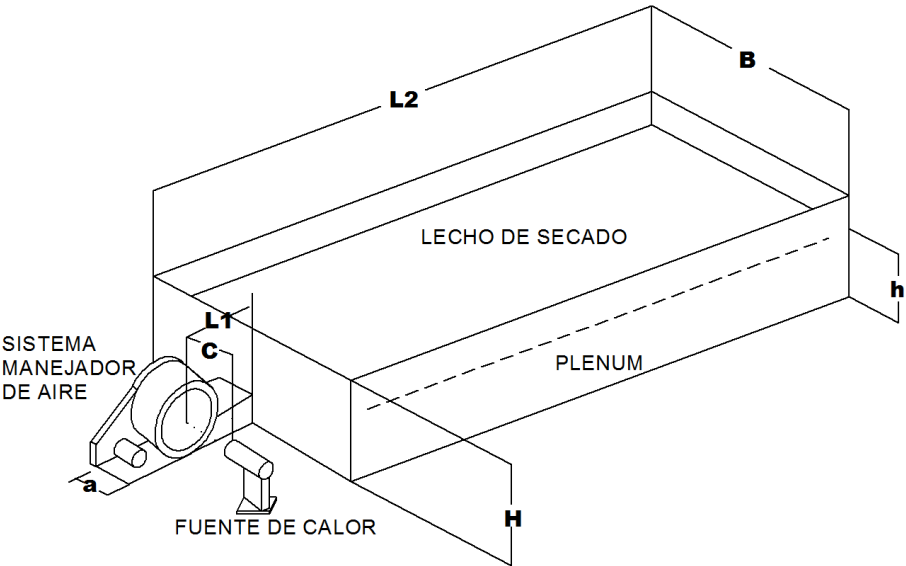


Figura 1. Croquis mostrando los componentes principales y las dimensiones relevantes de una secadora tipo Samoa típica recomendadas por la FAO.

Las dimensiones relevantes recomendadas, en función de la capacidad de secado, según una publicación de la FAO, aparecen en la Tabla No. 4 en la que **h** es la altura del piso de la Samoa hasta el lecho de semillas.

Tabla No. 4. Proporciones recomendadas por la FAO para secadoras de galpón (Samoa).
En general, las secadoras tabasqueñas no siguen este patrón.

Carga Qq	Ventilador	HP	Área m²	L1 m	L2 m	a m	h m	H m	B m	C m
200	BP-AL-3.7	5	12	0.50	6	0.65	0.50	1.8	2	0.8
400	BP-AL-7.5	10	24	0.70	8	0.82	0.60	1.9	2.0	1.0
600	BP-AL-11	15	36	0.90	10	0.97	0.65	2.0	3.0	1.2
800	BP-AL-15	20	48	0.90	12	1.08	0.70	2.1	2.6	1.2
1200	BP-AL-22	30	72	0.90	14	1,25	0.75	2.2	4.0	1.4
1600	BP-AL-30	40	96	0.82	16	1.45	0.82	2.3	6.0	1.4
2000	BP-AL-37	50	120	0.90	18	1.54	0.87	2.4	6.7	1.4

En general, en las instalaciones que visitamos no encontramos ninguna cuyas dimensiones coincidan con las de la Tabla anterior. Al parecer, en Tabasco, el ancho de los secadores está determinado por el tamaño de la malla o placa de acero perforada que se utiliza como lecho de secado. La altura del plenum en algunas es constante a lo largo de la secadora mientras que otros diseños reducen gradualmente la sección transversal del plenum conforme se aleja del punto de insuflación.

Versión tabasqueña de la Samoa

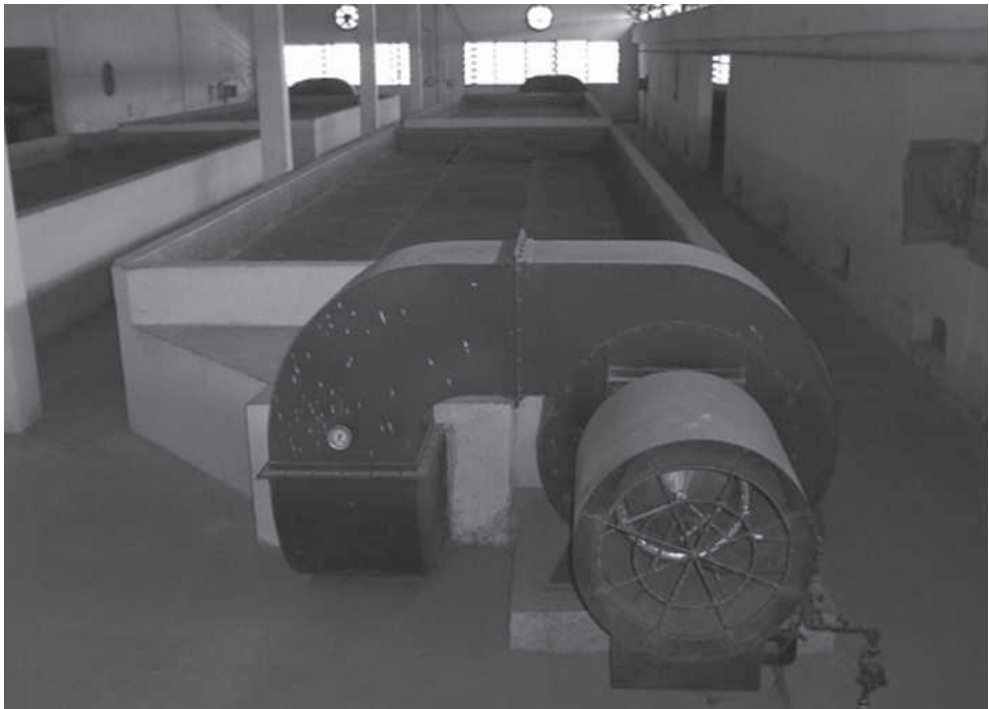


Figura 2. Secadora Samoa típica. Esta es propiedad de la Unión de Productores de cacao de Comalcalco, Tabasco

En la Figura 2 aparece una fotografía de una Samoa típica. Sus componentes principales son: 1). El generador de calor, 2). El ventilador. 3). El conducto de insuflación, 4). La cámara (plenum) de aire caliente y 5). El lecho de secado. Vea el esquema de la Figura 1.

El generador de calor más común es un quemador de gas LP colocado en serie con el ventilador. El gas quemado mezclado con aire se inyecta en el plenum a través del conducto de insuflación. El sistema conductor de aire puede tener varias formas y en algunos casos, como se aprecia en la figura 4, incluye una boquilla tronco piramidal que lo acopla con el plenum. Esta boquilla, cuando está bien diseñada, puede servir para recuperar presión del ventilador.

La cámara de aire caliente (plenum) es, Figura 2, un paralelepípedo rectangular acoplada a una pirámide cuadrangular truncada cuya base menor es el punto de insuflación. Las dimensiones varían y, en algunos casos se hacen depender de los tamaños comerciales de las placas de acero destinadas a servir como lecho de secado. Lo común es que el aire se insufla a través de la base menor de la pirámide truncada, misma que, cuando está bien diseñada, puede servir como boquilla recuperadora de presión.

Capítulo III

Teoría básica para mejorar la eficiencia de una Samoa

No es la intención de este libro abundar en consideraciones teóricas. Sin embargo, es indudable que la comprensión de los mecanismos de transferencia de calor es fundamental tanto para identificar los puntos donde posiblemente se está perdiendo energía, como para implantar acciones correctivas adecuadas y económicas. Por lo tanto, nos ha parecido indispensable propiciar esa comprensión a través de la siguiente presentación.

Mecanismos de transferencia de calor

El calor, cuando se transfiere lo hace por alguno de los siguientes mecanismos de transferencia o una combinación de los mismos:

Radiación

El término radiación se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas y ocurre aunque no haya materia de por medio. Se ha comprobado que el calor se transmite por radiación desde los cuerpos calientes hacia los cuerpos fríos que no están en contacto con ellos. La radiación puede ocurrir, inclusive, a través del vacío o a través de un medio material sin afectar la temperatura del mismo.

El modelo que describe la cantidad de calor radiado desde un cuerpo caliente es la ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q = eAs (T^4 - T_{alr}^4)$$

Este modelo nos dice que la cantidad de calor, Q , depende de la emisividad, ε , el Área, A , de la superficie del cuerpo caliente, de la temperatura del cuerpo caliente, T y de la de sus alrededores, T_{alr} . El símbolo σ es la constante de proporcionalidad de Stefan-Boltzmann.

Dejando a un lado la discusión del modelo, fijemos nuestra atención en la aritmética presente en el mismo. Puesto que se trata de una multiplicación es fácil concluir que cuanto mayor sea cualquiera de los factores tanto mayor será el producto, y viceversa. Los factores modificables en el modelo son la temperatura del cuerpo caliente, el área de la superficie y la emisividad. La temperatura de los alrededores es la del ambiente y depende de condiciones climatológicas.

La primera opción para reducir el calor radiado es disminuir la temperatura del cuerpo caliente. Sin embargo, al hacerlo debe evitarse que el descenso de temperatura reduzca la eficacia del secado. Esto deja como variables libres la emisividad y el área superficial del cuerpo caliente. La emisividad depende mucho del color del cuerpo caliente. Los colores oscuros favorecen la radiación. Ocurre lo contrario con los colores claros.

Así, podemos concluir que para reducir la radiación deben utilizarse colores claros y minimizar el área de la superficie radiante.

Convección

Toda transferencia de calor realizada por movimiento molecular de un fluido se conoce como convección. Existen dos tipos de convección, a saber: convección natural y convección forzada.

Convección natural. Todos hemos “visto” subir el aire cuando se calienta por contacto con el pavimento caliente, por ejemplo. Este es un ejemplo de convección natural. La convección natural es un proceso de transporte de energía realizado por moléculas de un fluido cuando estas se calientan. Este calentamiento generalmente ocurre porque la molécula entra en contacto con superficies calientes que a su vez se han calentado por efecto de la radiación o de la conducción de calor.

En otras palabras, la convección natural se debe al movimiento ascendente característico de las moléculas de fluido cuando se calientan por alguna razón. El calentamiento proporciona energía a las moléculas, las cuales tienden a alejarse unas de otras lo que hace disminuir la densidad del fluido. Cuando la densidad disminuye, el fluido pesa menos por unidad de volumen y sube.

Convección forzada. Para mover el fluido puede utilizarse un abanico o ventilador y forzar a que el movimiento molecular sea más rápido. De esta manera se consigue que más moléculas entren en contacto con la superficie caliente y literalmente arrastren el calor de la misma. La transferencia de calor crece con el área caliente, con la velocidad relativa del aire respecto de la superficie caliente, con la diferencia de temperaturas entre el aire y la superficie caliente y disminuye con la rugosidad de la superficie.

La transferencia de calor por convección se modela con la Ley del Enfriamiento de Newton:

$$\frac{dQ}{dt} = hA_s(T_s - T_{inf})$$

Donde h es el coeficiente de convección ó coeficiente de película, una constante experimental que engloba los efectos de la velocidad del aire y la rugosidad de la superficie, A_s es el área de la superficie en contacto con el fluido, T_s es la temperatura en la superficie y T_{inf} es la temperatura del fluido lejos del cuerpo.

Nuevamente, el modelo matemático sugiere que la cantidad de calor transferido por unidad de tiempo aumenta con el área y con la temperatura de la superficie.

El coeficiente de película depende de la velocidad con la que se mueve el aire y de la rugosidad de la superficie. Para velocidades constantes del aire, las superficies más rugosas pierden menos calor por convección que las superficies lisas.

Como las secadoras Samoa se instalan generalmente en recintos cerrados para proteger el producto de la intemperie, el aire de los alrededores de la Samoa se mueve muy lentamente por lo que, el coeficiente de película es un factor que no influye mucho para nuestros fines.

La temperatura T_{inf} puede suponerse fija y, en general, puesto que depende de las condiciones ambientales, queda fuera de nuestro control.

Así, podemos exponer en este punto dos conclusiones importantes:

1. Para reducir las pérdidas de calor por convección debe reducirse la temperatura de la superficie de la Samoa expuesta al aire ambiente y minimizar el área de la misma, y
2. Para aumentar la eficacia del secado por convección deben incrementarse el área de contacto del cacao con el aire caliente y la velocidad, la temperatura del mismo. El área de contacto y la velocidad del aire dependen del espesor del lecho de secado. Por su parte, la temperatura del aire no debe rebasar de cierto valor más allá del cual, el secado demasiado rápido de la superficie del grano bloquea la salida de humedad del interior del mismo.

Conducción

Es un proceso mediante el cual el calor se transmite por contacto molecular directo, de una parte de un cuerpo a otra parte del mismo, o de un cuerpo a otro que está en contacto físico con él.

La conducción térmica a través de una barrera continua de longitud x , área A , colocada de manera que uno de sus lados mantiene una diferencia de temperatura ΔT con respecto al otro está determinada por la ley de Fourier que establece: La tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada, es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección. Es decir,

$$Q_x = -\frac{kA}{x} \Delta T$$

Donde Q_x es la tasa de flujo de calor que atraviesa el área A en la dirección x . La constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica, una constante cuyo valor depende del material del que está construida la barrera, y ΔT es la diferencia de temperaturas entre las dos caras de la barrera.

El modelo predice que el espesor de la barrera hace disminuir la cantidad de calor conducido de un lado a otro de la misma y que esta cantidad de calor es tanto mayor cuanto mayor sea la conductividad del material, el área o la diferencia de temperaturas.

En conclusión, para un material dado y una diferencia de temperaturas fija, la menor pérdida por conducción ocurrirá para la menor área conductora.

La conductividad térmica es una propiedad física que mide la capacidad de conducción de calor o capacidad de una sustancia de transferir el movimiento cinético de sus moléculas a sus propias moléculas adyacentes o a otras sustancias con las que está en contacto. Valores típicos de la conductividad se dan en Tabla No. 5.

La conductividad térmica depende del material. La conductividad térmica es elevada en metales y en general en cuerpos continuos, y es baja en los gases (a pesar de que en ellos la transferencia puede hacerse a través de electrones libres) y en materiales iónicos y covalentes, siendo muy baja en algunos materiales especiales como la fibra de vidrio, que se denominan por eso aislantes térmicos.

Aislamiento térmico

Para reducir la conducción de calor, en la construcción de la Samoa, pueden utilizarse aislantes térmicos, o sea materiales de baja conductividad térmica y configuraciones, que reduzcan la conductividad de las paredes. Los aislamientos térmicos pueden calcularse para minimizar la contribución de cada mecanismo de transferencia de calor en la forma más eficiente y económica posible, evitando que se pierda energía costosa y útil que se debe conservar. Además, debe minimizarse el área expuesta a diferencias de temperatura que puedan dar origen a conducción. A medida que se incrementa la temperatura en el interior de la Samoa, aumenta la cantidad de calor conducido hacia el exterior, lo que a su vez incrementa la temperatura de las superficies exteriores provocando pérdidas por convección y radiación.

La conclusión importante aquí es: La conducción de calor desde el interior de la Samoa debe minimizarse. Esto significa construir con aislantes térmicos, o recubrir las paredes con aislamiento.

Tabla 5. Conductividades térmicas de algunos materiales

Material	Acero	Aluminio	Ladrillo	Block	Madera	Corcho
Conductividad (W/m K)	47-58	209,3	0,80	0,47-1,05	0,13	0,04-0,30

Capítulo IV

Diagnóstico y solución de fugas de energía en la Samoa

La teoría que revisamos deja claro que, en general, si se reduce el área total de la envolvente de la secadora, se reducirán las pérdidas de calor, tanto por conducción como por convección y radiación.

Al revisar una secadora por primera vez, es muy importante identificar los componentes de la secadora en los que pueden estar ocurriendo pérdidas de energía. En caso de estar presentes, las pérdidas caerán en una de las siguientes categorías:

Pérdidas en ductos:

- a. El aire caliente se fuga en algún punto del recorrido del aire desde la fuente de calor hasta el plenum de la Samoa.
- b. Existe transferencia de calor por conducción a través de las paredes de los ductos de aire caliente. Una carencia muy común en las secadoras que visitamos es la de aislamiento térmico sobre el exterior de los conductos metálicos que conducen el aire caliente desde el calentador hasta el punto de insuflación del aire.

Pérdidas por conducción en las paredes:

- c. Hay conducción de calor hacia el exterior del secador a través de las paredes de mampostería de la secadora.

Mala distribución de aire:

- d. La distribución del aire dentro del plenum es inadecuada. Velocidades de inyección muy altas provocan turbulencias dentro del plenum y, en general, mala distribución del calor en el lecho de secado. En algunos casos, la velocidad es tan alta que hace que el punto más alejado, con respecto al punto de insuflación, sea también el más caliente además

de que aparecerán zonas del lecho en las que, literalmente, el plenum succiona aire de la atmósfera a través del lecho de secado.

- e. El aire caliente se descarga a la atmósfera después de atravesar con excesiva rapidez el lecho de secado. El aire de la descarga, en general, será más húmedo y más caliente que el aire del ambiente. Sin embargo, conviene que la diferencia de temperaturas entre ambos fluidos no sea muy grande. Si no se puede regular la velocidad del ventilador, entonces el espesor del lecho de secado es una variable crítica.

Pérdidas por fricción

- f. Cuando el aire circula muy rápido por los ductos se incrementan las pérdidas de energía por fricción.
- g. Cojinetes y poleas en mal estado o bandas mal tensadas. Esto contribuye a incrementar el consumo de energía eléctrica que se utiliza para vencer la fricción en los cojinetes, o bien a que la energía se pierda por deslizamiento entre poleas y bandas.

Puntos a identificar en un diagnóstico típico

La secadora de la Figura 3, se localiza en las instalaciones de la Asociación de Productores de cacao de Comalcalco. Esta secadora es capaz de secar 5 toneladas de cacao fermentado, peso que se reduce hasta casi 2 toneladas una vez concluido el secado.

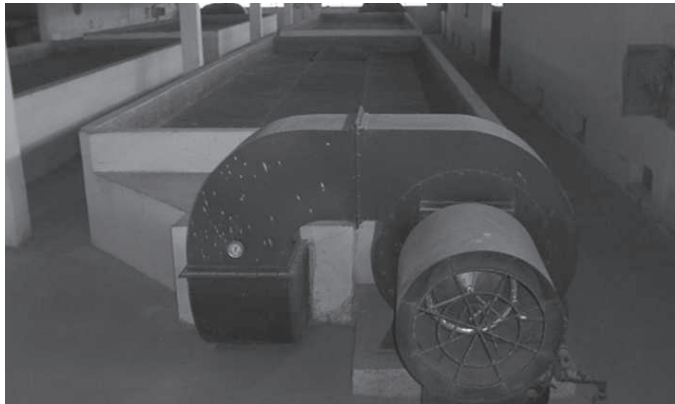


Figura 3. Secadora Samoa típica.

Observe en la figura que la secadora es un prisma rectangular construido con mampostería que se acopla en el extremo próximo con una boquilla de forma piramidal cuya cúspide se utiliza como punto de insuflación. Se observa que el quemador de gas está instalado junto al ducto de aspiración del ventilador de flujo radial que se utiliza para soplar la mezcla de aire y gas quemado hacia el interior de la secadora.

Ejemplo No. 1 Cómo hacer el diagnóstico de la secadora

Los puntos problemáticos identificados se enumeran a continuación:

1. Conducción por las paredes metálicas del quemador y de los conductos que llevan el aire caliente hacia el interior de la Samoa. Puede verse en la figura que los ductos metálicos carecen de aislamiento térmico y presentan dos cambios de dirección antes de “entrar” a la boquilla de forma piramidal.
2. Conducción a través de las paredes de la Samoa. Las paredes de la secadora carecen de aislamiento térmico y se calientan notablemente durante el secado.
3. La descarga de aire caliente directo a la atmósfera después de atravesar el lecho de secado.
4. Diseño inadecuado en la boquilla de transición, cambios bruscos del tamaño de la sección transversal que producen turbulencias indeseables.
5. Mala distribución del aire. El aire sale a velocidades notablemente diferentes en los distintos puntos del lecho de secado. Hay zonas de alta y baja presión.
6. Operación de volteo del cacao. El volteo y rotación del producto se realiza manualmente. Para evitar exponerse a corrientes de aire caliente (70 °C), la práctica usual es apagar el quemador y dejar funcionando el ventilador durante media hora. Después se procede al volteo y luego se enciende de nuevo el quemador de gas.
7. Contaminación del aire de secado con gases productos de la combustión.

ALGUNOS PROBLEMAS DETECTADOS EN EL DIAGNÓSTICO

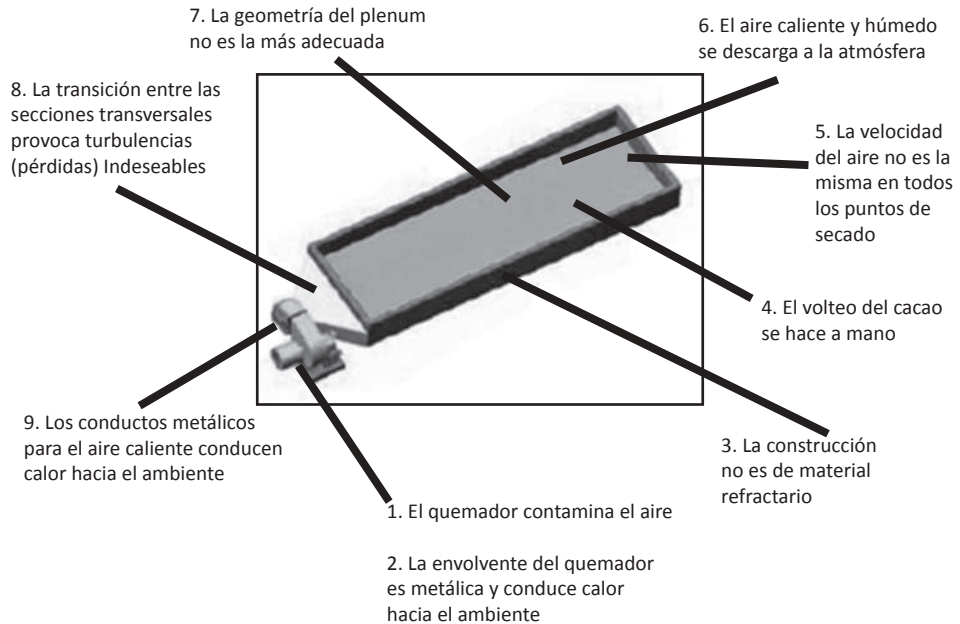


Figura 4. Esquema mostrando los puntos desfavorables de una secadora típica.

En la figura 4 aparece un esquema de la misma secadora en el que se indican los puntos desfavorables identificados en el diagnóstico.

Solución No. 1 Cómo evitar pérdidas de calor en los ductos de aire caliente

Consideraciones previas

Los ductos de aire caliente manejan aire mezclado con gas quemado. El aire no debe escaparse durante el recorrido del ducto. Las temperaturas en el interior son variables pero pueden alcanzar los 90 grados centígrados. Las paredes del ducto pueden conducir calor hacia el exterior.

Acciones a seguir:

- Antes de construir el ducto

- Recordar que un ducto corto y circular requiere menos material y menos aislamiento que uno largo o de sección rectangular.
- Evitar cambios de dirección en el ducto. Las curvas incrementan las pérdidas de energía.
- Construir el ducto con materiales de baja conductividad térmica. Ductos de material refractario o de doble pared, como los que se describen en la siguiente sección representan una inversión inicial que se amortiza por el ahorro de energía.
- Ductos Existentes contruidos con metal:
 - Revise el ducto en busca de rendijas o por donde pueda escapar el aire caliente. En caso de encontrar fugas, corríjalas.
 - Después, recubre el ducto con aislamiento térmico. Si el ducto es metálico, y temperaturas menores de 120 °C, basta un recubrimiento de fibra de vidrio compacta y aglutinada de 5 centímetros de espesor protegida con escudos de lámina.
- Ductos Existentes contruidos de tabique o de block.
 - Asegúrese de que no tiene rendijas ni agujeros.
 - Toque el ducto durante la operación para apreciar cuánto se calienta. Si el calentamiento es excesivo, recubre el ducto con aislamiento térmico. Basta un recubrimiento de fibra de vidrio compacto y aglutinado de 1 cm de espesor protegida con escudos de lámina.

ATENCIÓN: La fibra de vidrio no soporta esfuerzos mecánicos por lo que debe protegerse con escudos de lámina. Si no se maneja adecuadamente, la fibra de vidrio puede contaminar el producto.

Solución No. 2 Cómo reducir las perdidas por conducción en las paredes

Reducción de las pérdidas por conducción

La elección de los materiales de construcción es uno de los factores clave cuando se desea reducir al mínimo las pérdidas de calor por conducción, como se muestra en este ejemplo práctico.

Se estudia aquí una secadora típica, cuyos muros de un metro de altura y 0.15 m de espesor están contruidos con ladrillos de arcilla recubiertos con un aplanado rústico de cemento y arena. Las dimensiones de la secadora se muestran en la Figura 5.

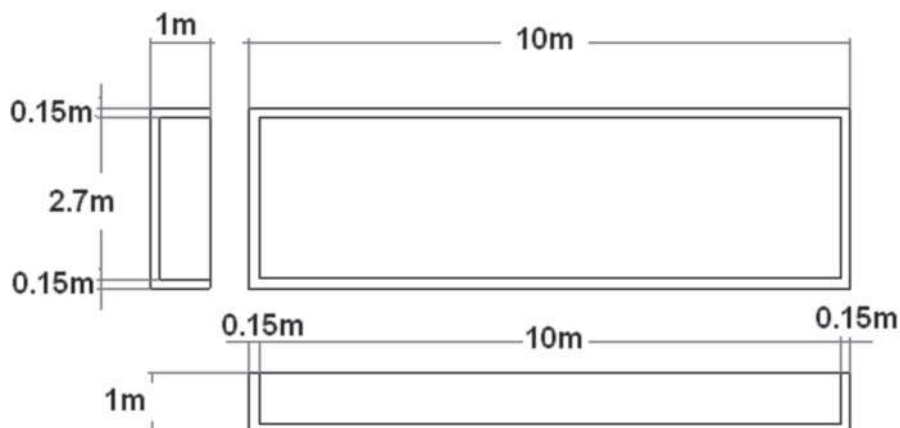


Figura 5. Dimensiones de la secadora del ejemplo.

Suposiciones simplificadoras

Para los fines de este ejemplo consideramos que:

1. El aire caliente ingresa a la secadora por uno de los cabezales al que llamaremos cabezal de insuflación.
2. El suelo se comporta como una barrera de espesor infinito que no almacena calor.
3. El aire sale por la parte superior, después de entregar calor al lecho de semillas.
4. Las áreas que conducen calor hacia el exterior son los lados largos del plenum y el cabezal colocado en el extremo opuesto al de inyección de aire. Esto significa un área total que conduce calor que es la suma del área del cabezal más las áreas de las bandas laterales.

$$A_{\text{conductora}} = (1\text{m} \times 2.7\text{m}) + 2 (1\text{m} \times 9.70\text{ m}) = 22.1\text{ m}^2$$

NOTA. En realidad, parte del calor se transfiere hacia el suelo y también hay conducción de calor hacia el exterior por el cabezal de insuflación. Sin embargo, el objetivo de este ejemplo es demostrar cómo disminuye la conducción de calor cuando se cambia el material de las paredes.

Estimación de la pérdida de calor para un muro construido con ladrillo refractario aislante

Un esquema mostrando la disposición de materiales en el muro y las variables a considerar para la estimación del calor transferido se muestra en la Figura 6.

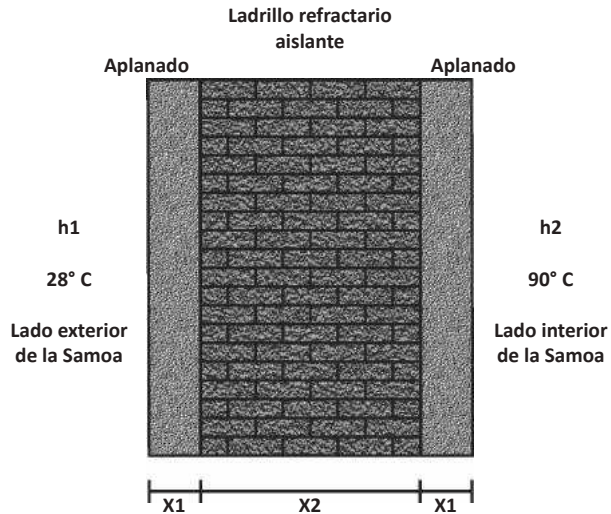


Figura 6. Vista de Perfil de una Pared Simple.

Datos:

Conductividad Térmica del Aplanado:

$$k_{\text{Aplanado}} = 13.872 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

Conductividad Térmica de Ladrillo:

$$k_{\text{Ladrillo}} = 0.0867 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

Coefficiente de Transferencia de Calor del aire caliente del interior de la Samoa:

$$h_1 = 34.177 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Coeficiente de Transferencia de Calor del aire Exterior del Horno:

$$h_2 = 9.398 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Espesor del Aplanado:

$$X1 = 0.0127 \text{ m}$$

Espesor del Ladrillo:

$$X2 = 13.73 \text{ m}$$

Temperatura del Aire del Interior:

$$T_1 = 90 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Temperatura del Aire Exterior:

$$T_2 = 28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La cantidad de calor transferido por unidad de área, en una configuración típica, que no utiliza aislamiento térmico es:

$$\frac{q}{A} = \frac{90 - 28}{\frac{1}{9.398} + \frac{0.0127}{13.872} + \frac{0.1373}{0.0867} + \frac{1}{34.177}} = 36 \text{ W / m}^2$$

Y multiplicando por el área conductora obtenemos el calor que se pierde por unidad de tiempo:

$$q = (36 \text{ W / m}^2)(22.1) = 795.6 \text{ W}$$

Efecto de agregar una capa de fibra de vidrio sobre la superficie del muro

En la Figura 7 se muestra la configuración propuesta.

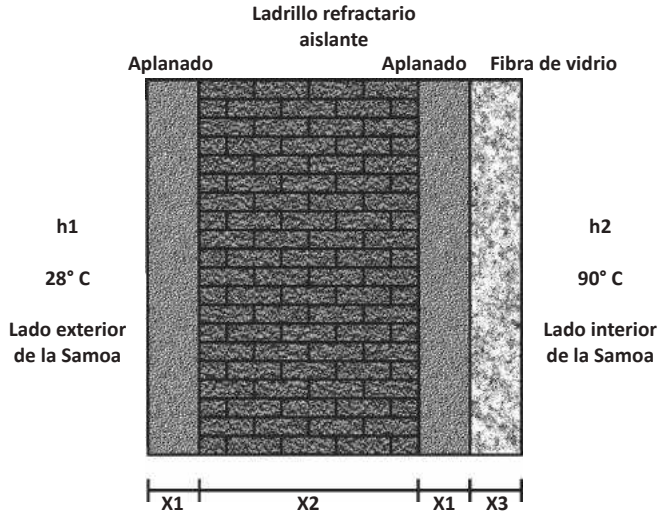


Figura 7. Aplicación de una capa de fibra de vidrio exterior

Datos para la Fibra de Vidrio:

Conductividad de la Fibra de Vidrio

$$K_{Fibra} = 0.038 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

Espesor de la Fibra de Vidrio

$$X3 = 0.0254 \text{ m}$$

La cantidad de calor transferido por unidad de área, cuando se instala placa de fibra de vidrio de una pulgada de espesor como aislamiento térmico es

$$\frac{q}{A} = \frac{90 - 28}{\frac{1}{9.398} + \frac{0.0127}{13.872} + \frac{0.1373}{0.0867} + \frac{0.0127}{13.872} + \frac{0.0254}{0.038} + \frac{1}{34.177}} = 25.94 \text{ W / m}^2$$

$$q = (25.94 \text{ W / m}^2)(22.1) = 573.4 \text{ W}$$

Muros dobles

Pérdida de calor para un muro doble construido con ladrillo refractario aislante. El espacio interior del muro se rellenó de fibra de vidrio.

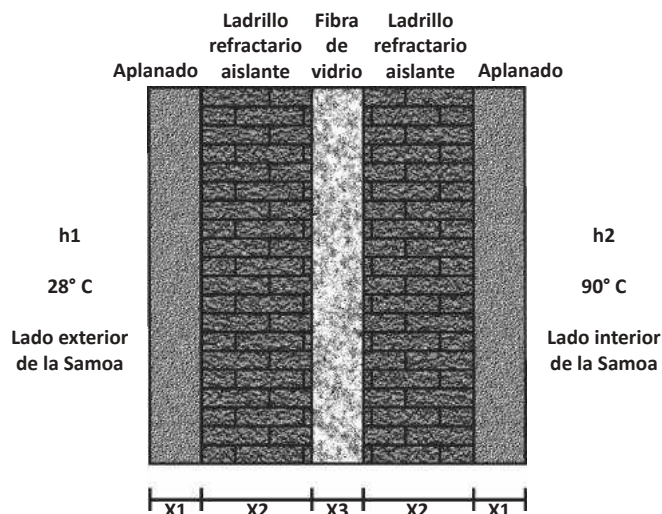


Figura 8. Configuración de doble pared con relleno de fibra de vidrio.

Datos para la Fibra de Vidrio:

Conductividad de la Fibra de Vidrio

$$K_{\text{Fibra}} = 0.038 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$$

Espesor de la Fibra de Vidrio

$$X3 = 0.0127\text{m}$$

$$\frac{q}{A} = \frac{90 - 28}{\frac{1}{9.398} + \frac{0.0127}{13.872} + \frac{0.06865}{0.0867} + \frac{0.0254}{0.038} + \frac{0.06865}{0.0867} + \frac{0.0127}{13.872} + \frac{1}{34.177}} = 25.94 \text{ W / m}^2$$

$$q = (25.94 \text{ W / m}^2)(22.1) = 573.27 \text{ W}$$

Pérdida de calor para un muro doble construido con ladrillo refractario aislante. El espacio interior del muro se deja lleno de aire.

En este caso la transferencia de calor ocurre desde la zona caliente hasta el hueco entre las paredes, donde la temperatura intermedia es T_i . Después, la misma cantidad de calor fluye desde el hueco hasta el exterior de la Samoa.

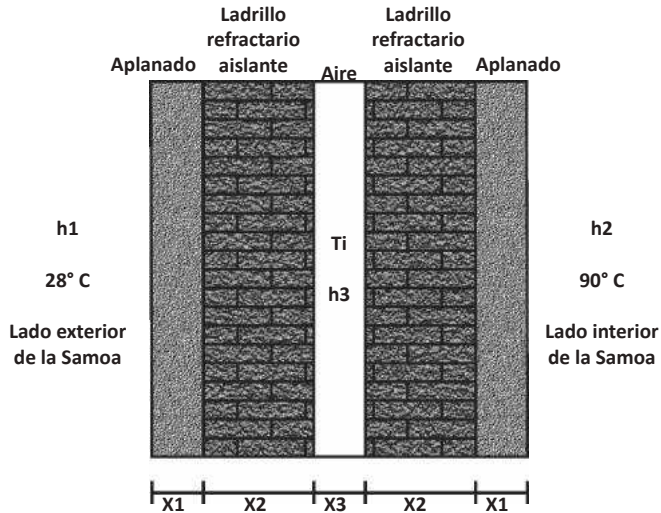


Figura 9. Configuración de doble pared sin relleno.

Se tiene, por lo tanto, con $X_3=0.0127\text{m}$:

$$\frac{90 - T_i}{\frac{1}{34.177} + \frac{0.0127}{13.872} + \frac{0.06865}{0.0867} + \frac{1}{9.398}} = \frac{T_i - 28}{\frac{1}{9.388} + \frac{0.0127}{13.872} + \frac{0.06865}{0.0867} + \frac{1}{9.398}}$$

De donde:

$$\frac{90 - T_i}{0.92839} = \frac{T_i - 28}{1.0055}$$

$$T_i = 60.25^\circ\text{C}$$

$$\frac{q}{A} = \frac{60.25 - 28}{1.0055} = 32.07 \text{ W / m}^2$$

$$q = (32.07 \text{ W / m}^2)(24.8) = 795.33 \text{ W}$$

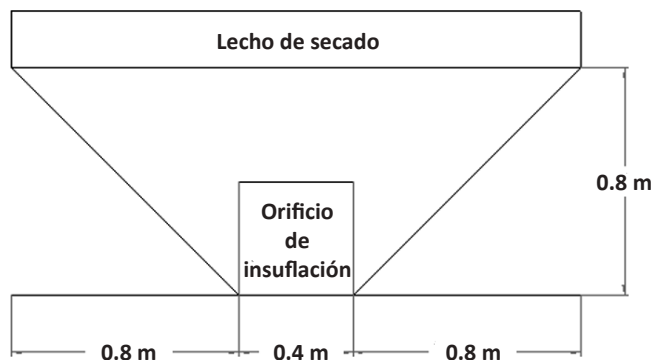
Se puede apreciar que la mejor solución es la que utiliza un recubrimiento de fibra de vidrio de una pulgada (2.54 cm) de espesor.

Solución No. 3 Cómo reducir las pérdidas de calor por conducción a través de las paredes de la Samoa modificando el área total conductora

Consideraciones previas

Las paredes de las secadoras Samoa típicas están construidas con mampostería a base de tabique de barro cocido o bloques de arena. La temperatura en el interior del plenum (de 60 a 80 °C) excede siempre a la temperatura ambiente que en un día lluvioso puede descender hasta 20 °C. La transferencia de calor conducido a través del muro de mampostería depende del área conductora del muro, de la conductividad térmica del material de construcción, del espesor de la pared, y de la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior durante la operación de la secadora.

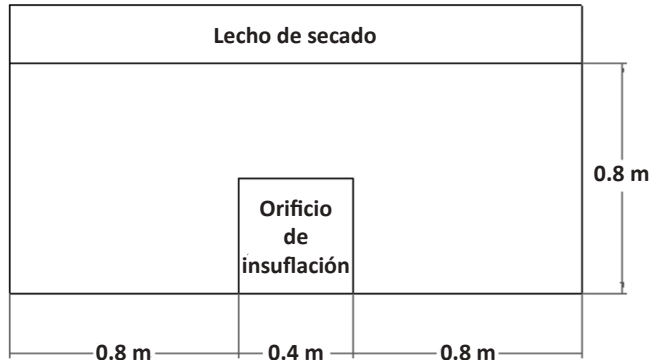
Acciones a seguir:



Perímetro del trapecio = 3.53 m

Área conductora = 35.3 m²

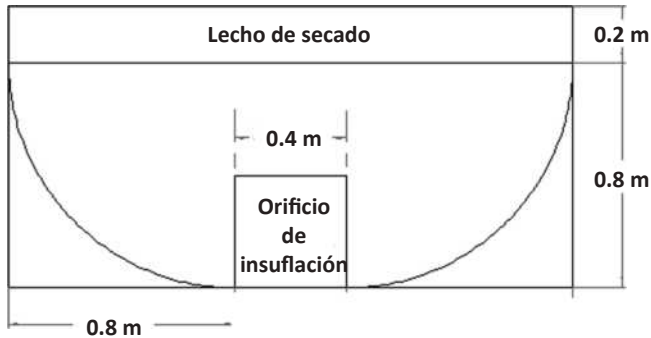
Figura 10. Plenum de Sección trapezoidal.



Perímetro del trapecio = 4.80 m

Área conductora = 48 m²

Figura 11. Plenum de Sección Rectangular



Perímetro del trapecio = 4.91 m

Área conductora = 49.1 m²

Figura 12. Plenum de sección con envolventes cilíndricas

- Antes de construir la Samoa, lo mejor es:
 - Elegir la forma más adecuada para minimizar el área conductora. El área conductora del plenum depende del perímetro de su sección transversal. La mejor configuración tendrá, por lo tanto, el perímetro mínimo posible y será fácil de construir. Para una referencia rápida, vea las figuras 10, 11, y 12 en las que se muestran tres formas de sección transversal posibles considerando una plataforma de 10 metros de largo por 2 metros de ancho. Observe que la sección transversal que tiene menor perímetro y por ende corresponde a una secadora con menor área conductora es la sección trapezoidal.

- o Elegir materiales refractarios e instalar aislamiento térmico.
- Si se trata de una Samoa existente. Las opciones, ordenadas de menor a mayor costo son:
 - o Recubrir el interior del muro con fibra de vidrio de una pulgada recubierta con papel aluminio.
 - o Construir un muro doble en el interior del plenum.
 - o Cambiar la configuración del plenum para reducir el área conductora. El área exterior del plenum, para una longitud dada depende del perímetro de su sección transversal.
 - o Construir el muro utilizando tabique refractario.
 - o Combinar las opciones anteriores.

Es importante destacar que cualquiera que sea el costo invertido en aislamiento térmico, será amortizado por el ahorro de energía resultante de su aplicación.

Solución No. 4 Cómo reducir las pérdidas durante el manejo y la distribución del aire

Consideraciones previas

En las secadoras típicas, el aire atmosférico se calienta al mezclarse con los productos de la combustión del gas LP. La mezcla de gases es impulsada hacia el interior del plenum de la secadora por un ventilador y después de atravesar el lecho de semillas a secar se descarga a la atmósfera. El secado ocurre principalmente porque:

1. El calor del aire calienta las semillas y provoca evaporación de la humedad contenida en las mismas. El mecanismo de transferencia es conducción de calor del aire a las semillas.
2. El aire en movimiento a través del lecho de semillas arrastra la humedad contenida en las mismas. El mecanismo de transferencia dominante aquí es la convección.

Garantizar homogeneidad en la temperatura del aire es relativamente fácil y es una de las funciones del plenum debajo del lecho de secado.

El principal defecto de las secadoras típicas está en la turbulenta distribución de aire. En todas las secadoras que visitamos observamos una mala distribución del

aire que se manifiesta por la presencia de zonas de alta presión de aire que alternan con zonas de baja presión a lo largo del plenum.

En las zonas de alta presión el aire atraviesa rápidamente el lecho de secado y se descarga a la atmósfera todavía muy caliente, lo cual representa pérdidas de energía. Obviamente, el producto localizado en estas zonas se seca más rápido que el que se localiza en zonas de baja presión. Para homogenizar el secado, los operadores le dan rotación al producto sobre el lecho de secado.

Es común en las instalaciones típicas que el punto más caliente del lecho de secado, “donde la secadora seca mejor”, se localice en el extremo lejano respecto al punto por el que se insufla el aire y también es común la presencia de una zona fría en el extremo del lecho cercano al punto de insuflación. Los operadores suelen tapar la zona fría colocando costales de henequén u otros obstáculos.

La transferencia de humedad del producto al aire insuflado depende de la capacidad del aire para absorber humedad, la que a su vez depende de:

1. La humedad específica o absoluta del aire atmosférico. Cuánto menos humedad contenga el aire, tanto más eficaz será el secado. Deshumidificar el aire antes de usarlo para secar sería lo mejor para conseguir un secado rápido y homogéneo pero, aparentemente, es una opción demasiado costosa. Por eso se prefiere calentarlo para reducir su humedad relativa
2. La temperatura de bulbo seco. Tanto más caliente esté el aire cuanto mayor será la rapidez de secado. Sin embargo, no se recomienda una temperatura mayor de 65 grados centígrados. Temperaturas mayores causan un secado demasiado rápido lo que provoca que la semilla quede excesivamente quebradiza por fuera, mientras en su interior los cotiledones permanecen húmedos lo que aumenta la susceptibilidad al ataque de hongos. Además, un secado demasiado rápido inhibe la complementación del fermentado durante el secado.
3. La velocidad con la que el aire atraviesa el lecho de producto. Tanto mayor sea velocidad del aire al cruzar el lecho de semillas, cuanto más rápido resultará el secado. Sin embargo, como se dijo arriba, no se recomienda un secado demasiado rápido. Además, si el aire pasa muy rápido, también sale más caliente. Esto significa que parte de la energía utilizada para calentarlo se pierde.
4. El espesor del lecho de semillas. Para condiciones dadas de temperatura y velocidad del aire insuflado, la velocidad de cruce (con la que el aire atraviesa el lecho de semillas) depende principalmente del espesor del

lecho de secado. Es muy importante, para ahorrar energía, determinar el espesor más adecuado. Los experimentos que hicimos prueban que, para un distribuidor de 10 metros de longitud, la mejor combinación es: Espesor 13 cm, Temperatura 67 °C y Velocidad de insuflación de 91 m/s.¹

Acciones a seguir

Sea que se trate de una secadora existente o de una por construir, lo mejor es construir un distribuidor de aire dentro del plenum para evitar las turbulencias y para optimizar la distribución del aire caliente, con puntos de inyección de tamaño y localización convenientes. Los parámetros del ventilador, gasto o capacidad y velocidad, además del tamaño de la secadora, son los factores clave del diseño del distribuidor si se desea un diseño de alta precisión. Sin embargo, para los fines de este libro, presentamos el siguiente procedimiento empírico, basado en simulaciones por computadora², que seguimos en la optimización de la secadora de la Procesadora de Cacao La Chontalpa. El proceso se ilustra con fotografías del proceso constructivo.

Solución No. 5 Lineamientos para el diseño empírico de un sistema distribuidor de aire

Los siguientes lineamientos aplican solo para secadoras existentes cuyo lecho de secado mida 2 m de ancho por 10 m de longitud. El ventilador es un ventilador centrífugo de 5 hp. Hemos elegido estas dimensiones por ser las más comunes en las instalaciones de los pequeños productores.

IMPORTANTE: Si las dimensiones son diferentes o si el ventilador es de flujo axial (tipo cañón, como se les conoce entre los productores) es indispensable realizar una serie de mediciones para elaborar una solución a la medida que garantice la eficiencia de la solución.

El primer paso es modificar la forma de la Samoa. Si ésta tiene boquilla difusora, la misma deberá demolerse para cerrar la Samoa a la forma prismática (Figura 13)

1 Véase el Apéndice 1

2 Véase el Apéndice 2



Figura 13. La boquilla se ha eliminado. La secadora es ahora de forma prismática. El punto de insuflación se ha ajustado atendiendo las dimensiones del ducto de descarga del ventilador.

Enseguida debe construirse un conducto difusor de forma ahusada. La altura sobre el piso de la Samoa será de 40 cm, suponiendo que la plataforma de secado se instalará a 60 cm de altura sobre el piso de la Samoa. En el punto de insuflación el ancho interior del ducto será igual que el ancho de la Samoa dividido por 4.5, o bien, deberá ajustarse a las dimensiones del ducto de descarga del ventilador (Figura 14). En el extremo del ducto más alejado del punto de insuflación, el ancho interior del ducto se habrá reducido a la mitad de lo que mide en el punto de insuflación. Esto determina la forma ahusada del ducto. Además, la forma de la sección transversal de la Samoa debe convertirse de rectangular a trapezoidal, como se aprecia en el esquema de la Figura 14 y en la fotografía de la Figura 15

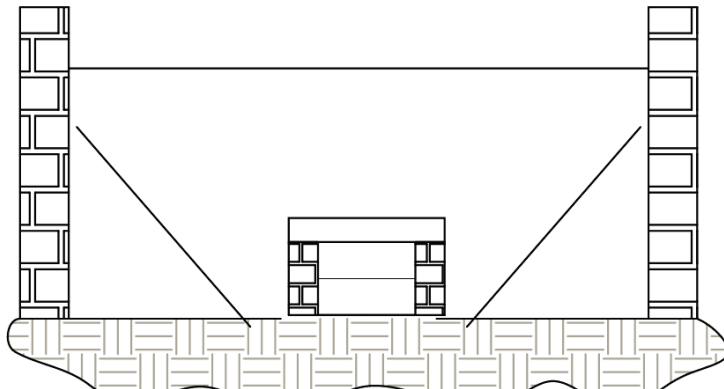


Figura 14. Esquema de la sección transversal modificada de rectangular a trapezoidal

A lo largo del ducto se dejarán varias aberturas iguales de 0.30 cm de ancho para que el aire salga hacia el plenum de la secadora. El espaciamiento entre aberturas es aproximadamente igual que la mitad del ancho de la secadora (Para una secadora que mida dos metros de ancho, el espaciamiento entre aberturas es de un metro). La distancia desde el punto de insuflación hasta la primera abertura será 0.375 veces el ancho de la secadora. El extremo lejano del ducto deberá quedar cerrado.



Figura 15. Modificación de la sección transversal, de rectangular a trapezoidal.



Figura 16. Aspecto del ducto cubierto con placa metálica multiperforada

El ducto debe cubrirse con placa de acero multiperforada con agujeros de 5 cm de diámetro. El paso o distancia entre agujeros de la misma fila será de 7.5 cm. (Figura 16).

Solución No. 6 Datos técnicos para construir una secadora Samoa que ahorre energía

Los resultados antes descritos se aterrizan en esta sección en la forma de croquis sencillos útiles para construir una secadora con capacidad para 5 toneladas húmedas.

Planta arquitectónica

Las dimensiones de la planta arquitectónica aparecen en el siguiente croquis:

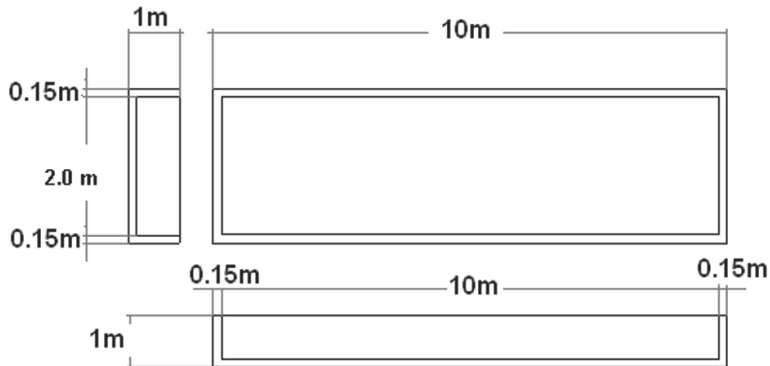


Figura 17. Croquis de la planta arquitectónica

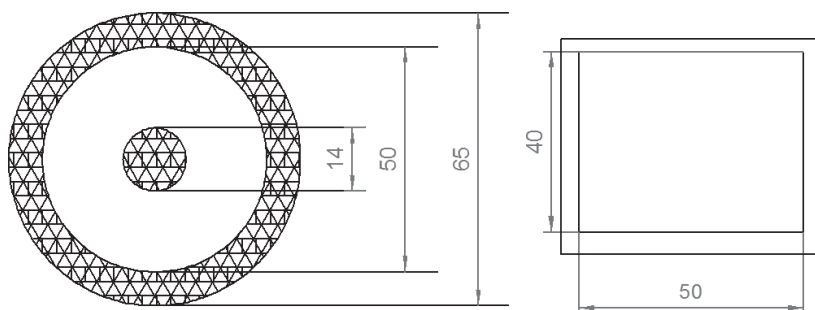
Ventilador

El ventilador recomendado es de tipo centrífugo, con capacidad para generar un diferencial de presión de 2 pulgadas de agua. Para hacer accesible esta información al lector no especialista, la información técnica del motor eléctrico se presenta en la siguiente tabla:

Tabla No. 6. Características del motor del ventilador

Potencia del motor	5 HP
Voltaje	220 V
Velocidad nominal	1750 RPM
Factor de potencia	0.83 o mayor
Tipo	Trifásico de inducción, nema B

El ventilador es un rodete centrífugo acoplado al motor por un sistema de bandas que reduce la velocidad. El eje del ventilador debe girar a 700 rpm. Las dimensiones importantes del ventilador corresponden a la circunferencia exterior y a la boquilla de succión. En el siguiente croquis aparecen las dimensiones en centímetros de la boquilla de succión y el área libre que debe tener la boquilla de descarga del ventilador.



**Vistas frontales de la toma de succión y descarga del ventilador
(cotas en centímetros)**

Figura 18. Dimensiones de la succión y descarga del ventilador.

Distribuidor de Aire

El componente más importante, como se dijo antes, es el distribuidor de aire. Para esta secadora el distribuidor tiene una altura de 40 cm en toda su longitud. El ancho, sin embargo se reduce desde un claro libre de 50 cm hasta un claro libre de 28 cm. El trazo se puede hacer en la obra. Se recomienda construirlo mampostería con tabique rojo ya que el tabique es más resistente al ataque del ácido. El efecto de distribución se consigue mediante las diez troneras que se construyen a ambos lados de las paredes del distribuidor. El ancho de las troneras se da en la siguiente tabla:

Tabla No. 7. Ancho de las troneras

Tronera	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ancho (m)	0.20	0.20	0.20	0.15	0.15	0.15	0.10	0.10	0.10	0.07

Para localizar las troneras con toda precisión, se recomienda trazar cada una a partir de su centro. La tronera número 1 es la más cercana al ventilador y su centro se localiza 0.50 m de la boquilla de descarga. Las distancias entre centros que permiten ubicar las demás troneras se dan en la siguiente tabla:

Tabla No. 8. Localización de las troneras (distancias en metros)

Tronera	1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
	0.50	0.60	0.80	1.10	1.10	1.20	1.20	1.20	1.30	1.30

Planos inclinados para inducir flujo del aire hacia el lecho de secado

Para dirigir el aire hacia el lecho de secado se deben instalar superficies deflectoras de madera para formar planos inclinados a ambos lados del ducto distribuidos. Cada plano debe empezar a 0.20 m del ducto (medidos desde el extremo más ancho) y terminar a 0.10 m por debajo de la plataforma de secado.

Aunque en la solución de la secadora de “La Esmeralda” se utilizaron placas perforadas para cubrir la parte superior del ducto. Es posible utilizar tapas sin perforaciones sin detrimento del funcionamiento del dispositivo.

Un comentario sobre la recuperación de calor

El aire caliente de la descarga de la Samoa no debería descargarse directamente a la atmósfera. Lo mejor es que ese aire se colecte con una campana y se descargue a través de un tubo. Concéntrico al tubo de descarga es posible instalar parte del tubo de succión de aire, como se representa en la Figura 19. Así es posible recuperar parte del calor remanente en el aire de descarga.

Cuando se cuente con recursos, conviene construir una campana colectora para implementar este sistema recuperador de calor. En este caso, conviene no debe olvidarse que la campana presentará superficies donde ocurrirá condensación de la humedad por lo que deberá construirse de material inoxidable e instalarse un sistema colector de agua que evite que la misma caiga sobre el lecho de secado.

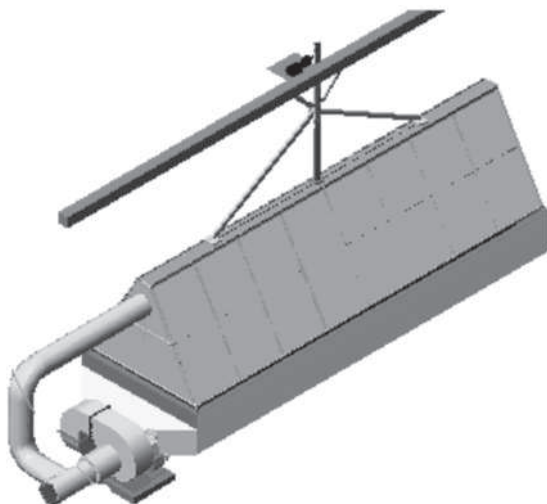


Figura 19. Campana recuperadora de calor.

Apéndices

Apéndice I

Parámetros críticos y su efecto sobre la eficacia del secado de cacao

Ing. Daniela Carolina Preciado Moreno
Ing. Luis Miguel Sánchez Córdova
Dr. Rubén Vásquez León

Resumen

Se reporta trabajo experimental realizado para identificar y cuantificar la influencia de las variables que más afectan la eficacia del secado de cacao en secadores de flujo cruzado y de esa manera discernir cuáles de estos parámetros son críticos. Las variables cuyo efecto fue analizado son: la temperatura y la humedad del ambiente, la temperatura y la velocidad de cruce del aire secante, y el espesor del lecho de semillas. Para realizar los experimentos se diseñó y se construyó un secador de laboratorio habilitado para controlar dichas variables y observar la variación de peso de la muestra sin retirarla del secador. Se encontró que la combinación de velocidad de cruce y temperatura del aire insuflado para maximizar la eficacia del secado independientemente de las condiciones ambientales y del espesor corresponde a los valores 67 °C y 1.5 m/s, respectivamente.

Introducción

El secado es una operación unitaria que remueve la humedad contenida en la materia a secar. La cantidad de humedad a eliminar depende de las propiedades que se deseen en el producto una vez seco. El término secado se usa también con referencia a la eliminación de otros líquidos orgánicos, como benceno o disolventes orgánicos, de los materiales sólidos. En el secado de cacao, se trata de eliminar agua y ácidos presentes en el cacao fermentado. Esto puede hacerse exponiendo el producto al sol, o utilizando un secador, sea de bandejas o de flujo cruzado. En todo

caso la mayor parte de la humedad se elimina en forma de vapor que es arrastrada por el aire. Los secadores de cacao más populares en Tabasco son conocidos como “Samoas” y caen en la clasificación de secadores por lote de flujo cruzado ya que la mezcla de aire con los gases producto de la combustión de gas LP atraviesa perpendicularmente el cacao previamente dispuesto sobre una plataforma o lecho de secado.

Durante la realización del proyecto FOMIX TAB-2003-C03-10961, “Optimización energética de una secadora industrial de cacao” surgió la pregunta sobre cuál es la mejor combinación de los parámetros presentes para optimizar el consumo de energía. En una primera aproximación a la solución, se buscó la mejor combinación de parámetros para hacer que el secado sea más eficaz, ya que la economía del secado es un compromiso entre eficacia del secado y eficiencia energética.

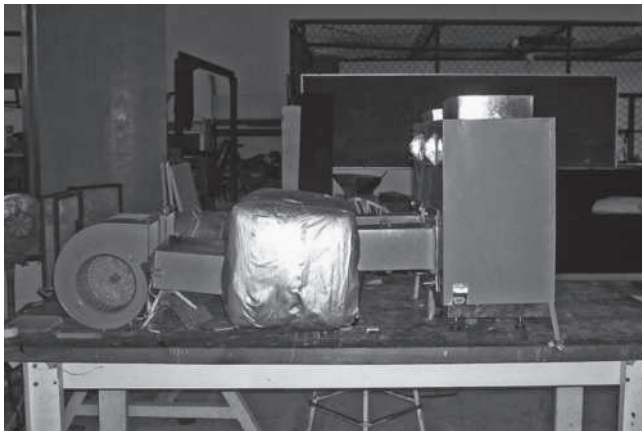
En una Samoa típica, el aire atmosférico es mezclado con los gases productos de la combustión de gas LP. Dicha mezcla se insufla en el plenum por uno de los extremos de la secadora y se espera que salga del mismo atravesando el lecho de secado. La temperatura promedio en el interior de la Samoa alcanza en algunos casos los 80 °C, pero hay diferentes valores de la temperatura más adecuada para un secado óptimo.

Puesto que el secado de cacao es una actividad casi cotidiana en la región de la Chontalpa, consideramos que este estudio es muy importante para mejorar la industrialización de este producto en Tabasco.

Objetivos y metas

El objetivo asociado a este reporte es determinar la combinación de parámetros: temperatura, velocidad de cruce y espesor del lecho de secado que hacen más eficaz el secado.

Es aparente que la velocidad de insuflación, la temperatura del ambiente y la del aire de secado, junto con el espesor del lecho influyen en el consumo de energía del ingenio. Sin embargo, un excesivo ahorro puede resultar en detrimento de la eficacia del secado. De allí que se haya propuesto un experimento para cuantificar el efecto real de estas variables. En una etapa posterior del proyecto, estos efectos se asociarán al consumo de energía correspondiente.



Materiales y métodos

Figura 1. Secador de Laboratorio utilizado en esta investigación.

El primer paso fue el diseño y construcción de un secador de laboratorio (Figura 1) habilitado para:

1. Permitir variaciones y ajustes continuos de temperatura y velocidad. La brecha diferencial de los controles es respectivamente de $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\pm 0.08\text{ m/seg}$.
2. Registrar la variación del peso de la muestra durante el secado sin necesidad de retirar la muestra ni de interrumpir la circulación de aire caliente.

El secador consta de tres componentes principales:

1. Ventilador, de flujo tangencial y suministra la cantidad de aire necesaria para el proceso de secado.
2. Sección de calentamiento y conducción de aire. Esta es una caja de lámina. Aislada con dos pulgadas de fibra de vidrio. En su interior se instalaron cuatro resistencias eléctricas de 800 W a 110 VCA colocadas en el interior de dos piezas de celosía de cerámica. Las resistencias generan el calor necesario para calentar la corriente de aire cuya circulación se regula con dos compuertas tipo mariposa.

3. Sección de secado. Que consta de un plato móvil para contener muestras de diferentes espesores, soportado por una columna que se apoya directamente en una báscula, que permite registrar el peso de la muestra y su variación. En esta sección, el aire caliente entra por la parte inferior del plato que contiene la muestra a secar.

Corridas de secado

Los experimentos tienen como objetivo observar el efecto que tienen sobre el secado las siguientes variables: Espesor del lecho de semillas a secar, temperatura y velocidad de cruce del aire desecante y temperatura y humedad ambientales. La imposibilidad de controlar la atmósfera del experimento obligó a realizar corridas repetidas durante días soleados y lluviosos para observar el efecto de las condiciones ambientales.

Todas las corridas tuvieron la misma duración (5 horas) y la eficacia del secado se determinó comparando los pesos finales así como la pendiente de la gráfica de la variación del peso, de la muestra con respecto al tiempo. Las variaciones de peso se registraron leyendo directamente en la báscula cada cinco minutos durante la primera hora, cada diez minutos durante la segunda y cada veinte minutos durante las tres últimas horas de secado. Esto es porque la rapidez de secado disminuye exponencialmente cuando transcurre el tiempo. La variación de las condiciones atmosféricas, humedad y temperatura se registró cada veinte minutos utilizando un higrómetro de pelo y un termopar.

Para prevenir errores en las mediciones o efectos indeseables por variación de las condiciones atmosféricas, las corridas se realizaron por duplicado y simultáneas, de manera que se garantizaron exactamente las mismas condiciones del aire de secado, el mismo espesor y la misma duración en cada corrida y en su réplica. Se utilizaron dos temperaturas de secado, una de 49 °C y otra de 67 °C controladas con una brecha diferencial de ± 2 °C. Ambas temperaturas se combinaron con dos espesores en el lecho de secado: el menor de 7 cm y el mayor de 13 cm.

De igual manera, se hizo circular el aire dos velocidades diferentes, la menor de 1.5 m/s y la mayor de 2.7 m/s. Estos valores de temperatura y velocidad son el máximo y el mínimo que se pueden obtener con el secador de laboratorio.

Para prevenir la inducción de tendencias sesgadas, los experimentos se numeraron y el orden de ejecución fue sorteado por un procedimiento aleatorio simple.

Resultados

En las tablas 1 y 2 se presentan los resultados.

Tabla 1. Espesor del lecho 7 cm

Condiciones ambiente		Condiciones del aire de secado		Variación del peso de la muestra		
Tbs (°C)	Humedad relativa Φ	Tbs (°C)	Vel. de cruce (m/s)	Peso Inicial kg	Peso Final Kg	%peso Perdido
28.87	0.67	49.5	1.5	1.5	1.0290	31.43
30.62	0.66	49.5	1.5	1.5	1.0285	31.43
30.06	0.62	48	2.7	1.5	1.0285	31.43
29.93	0.62	67	2.7	1.481	0.9820	33.69
33.46	0.60	66	2.7	1.5	0.9805	34.63
23.8125	0.53	50	2.7	1.5	0.9630	35.80
31.8125	0.67	67	1.5	1.5	0.8970	40.20
26.3125	0.52	67	1.5	1.5	0.8600	42.70

Tabla 2. Espesor del lecho 13 cm

Condiciones ambiente		Condiciones del aire de secado		Variación del peso de la muestra		
Tbs (°C)	Humedad relativa Φ	Tbs (°C)	Vel. de cruce (m/s)	Peso Inicial kg	Peso Final Kg	%peso Perdido
31.20	0.62	49.5	1.5	2.5	1.84	26.42
31.12	0.63	49.5	2.7	2.5	1.81	27.60
30.81	0.65	48	2.7	2.5	1.80	27.62
30.06	0.64	67	1.5	2.5	1.80	28.00
29.70	0.65	66	2.7	2.5	1.79	28.44
31.00	0.62	50	2.7	2.5	1.78	28.50
31.12	0.67	67	1.5	2.5	1.63	34.82
30.81	0.63	67	1.5	2.5	1.62	35.20

Discusión

Observamos que si todas las demás variables permanecen prácticamente constantes, el secado más eficaz se obtiene cuando se combina la temperatura más alta con la velocidad de cruce menor. El producto se seca tanto mejor cuanto menor es la humedad relativa ambiente. La temperatura ambiente sólo influye en el consumo de energía calorífica: se consume más energía para calentar aire frío. Como era de esperarse, el secado ocurre más rápido a medida que el espesor del lecho se reduce. Sin embargo, esto provoca dispendio de energía ya que el aire se descarga más caliente a la atmósfera después de atravesar el lecho de secado. Cuando se fijan la velocidad y el espesor, entonces tanto la rapidez como la eficacia del secado crecen con la temperatura.

Por otro lado, para espesores de lecho y temperaturas del aire fijas, la eficacia del secado aumenta cuando disminuye la velocidad de cruce del aire.

Las Figuras 18 y 19, 20 y 21 permiten observar directamente como depende el secado de la velocidad de insuflación cuando se dejan fijos el espesor y la temperatura del aire de secado.

En las Figuras 18 y 19 se observa que la combinación temperatura alta, velocidad baja produce una mayor pérdida de peso. Esto significa que en esta combinación de parámetros predomina el efecto conductivo.

También se observa, indirectamente, el efecto de las condiciones ambientales. La pérdida de peso es menor cuando la humedad relativa es mayor.

Lo que se observa en las Figuras 20 y 21 confirma el predominio del efecto conductivo ya que la velocidad alta no parece tener un efecto significativo en el secado cuando la temperatura es baja. Nuevamente, es visible el efecto de la humedad relativa. La pérdida de peso total es mayor para la velocidad menor.

Conclusiones

Para un espesor del lecho dado, el secado es más eficaz si la velocidad de cruce es baja, la temperatura alta y la humedad relativa ambiente baja. El aire seco seca mejor que el húmedo. Esto sugiere la posibilidad de mejorar el secado mediante el control de la humedad del aire atmosférico, que tradicionalmente es una variable no controlada. La eficacia del secado es mayor cuando se combinan temperatura mayor, la velocidad menor y el espesor menor. Sin embargo, no se puede decir lo mismo de la eficiencia ya que cuando el espesor es menor, el aire se descarga a una temperatura mayor que la atmosférica lo que significa que se desperdicia parte

del potencial del aire para evaporar humedad del producto. Una vez determinados los parámetros que hacen más eficaz el secado, la eficiencia del secado, entendida como el aprovechamiento óptimo de la energía utilizada en el proceso, depende principalmente del espesor. Es necesaria más experimentación para determinar el espesor que minimiza el consumo de energía.

Para secar el aire pueden utilizarse varios procedimientos, por citar algunos: 1) Exponer el aire al contacto con sustancias higroscópicas antes de utilizarlo para el secado. 2) Enfriarlo hasta la temperatura de rocío para que precipite la humedad y 3) Comprimirlo a temperatura ambiente para propiciar la condensación de la humedad. Estos tres procedimientos son el horizonte de investigación a futuro.

Para los valores de velocidad, espesor y temperatura que se utilizaron en la etapa experimental, la mejor combinación de parámetros, independientemente del espesor es temperatura de 67 °C y velocidad de 1.5 m/s.

Para una velocidad y un espesor dados, será la temperatura del aire desecante la que determinará la eficacia del secado. A mayor temperatura, mayor eficacia.

Referencias bibliográficas

- [1] Perry R., Green D, Maloney J. Manual del Ingeniero Químico. Tomo II. Tercera Edición en español. Edit. Mc Graw-Hill. 1992.
- [2] Foust S. A., A. Wenzel L., Maus L., Anderson L. Principios de Operaciones Unitarias. Editorial CECSA. Primera Edición, 1987.
- [3] Valdecir A. D., Márquez Pereira D. I A. Secado de Granos a Altas Temperaturas. Santiago de Chile, 1991. www.fao.org/docrep/x5059S/x5059S00.htm
. Fecha de consulta Diciembre 2009.
- [4] Geankoplis, J. C. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera edición. México .Edit. Compañía Editorial Continental, S.A. de C. V.1998.
- [5] Vásquez L. R. Reporte de investigación No.3, proyecto FOMIX TAB-2003-C03-10961, "Optimización energética de una secadora industrial de cacao". Pág. 12, septiembre del 2005.

Aplicación del método del elemento finito para obtener por simulación, un campo de velocidades uniformes en el lecho de una secadora de cacao

**Rubén Vásquez León
Candelario Bolaina Torres
Carlos Lázaro Naranjo**

Abstract

This paper describes the theoretical analysis and numerical simulation, using Finite Element Method, and the practical solution we got for the problem of finding the best geometry of a (Samoa) platform-type cocoa dryer in order to guarantee the best efficiency in the mass and heat transference between the seeds and the hot air used as drying fluid. One of the supporting hypotheses is that this condition is obtained when the field of velocities is constant over all the points of the drying platform. These works are part of a more general research project which searches to minimize the energy requirements of the drying process.

KEY WORDS: Finite Element Method, Cocoa drying, Platform-type (Samoa) dryer, Navier-Stokes equations, Finite Element Method,

Resumen

Este artículo describe el análisis teórico y simulación numérica, empleando Método del Elemento Finito, y la solución práctica que obtuvimos para el problema de encontrar la mejor geometría de un secador de cacao tipo plataforma (Samoa) para garantizar la máxima eficiencia en la transferencia de calor y masa entre las semillas y el aire caliente utilizado como fluido desecante. Una de las hipótesis que soportan este trabajo es que dicha condición se obtiene cuando el campo de velocidades es constante en todos los puntos de la plataforma de secado. Estos trabajos son

parte de un proyecto más general cuyo objetivo es minimizar los requerimientos de energía del proceso de secado.

PALABRAS CLAVE: Método del Elemento Finito, Secado de cacao, Secador tipo plataforma (Samoa), Ecuaciones de Navier-Stokes, Método del Elemento Finito.

Introducción

El secado es una operación indispensable durante la industrialización del cacao (Allison & Kenten 1964). Esta operación es decisiva para la calidad del producto y de sus derivados. Existen muchos métodos de secado, pero en Tabasco los productores prefieren la utilización de secadoras tipo Samoa, cuya construcción es sencilla y económica (McDonald & Freire, 1981).



Figura 1. Secadora de galpón (Samoa) para secado de cacao.

La Figura 1 es una fotografía de una secadora típica, como se aprecia, la secadora consta de un dispositivo, quemador de gas LP para calentar el aire, un ventilador para inyectar el aire caliente a una cámara cerrada (plenum) de forma prismática rectangular cuya tapa superior es una malla o una placa de acero con perforaciones para dejar pasar el aire caliente. Dicha tapa es el lecho sobre el que se coloca el cacao para secarlo después de pasar por la etapa de fermentado. La Figura 2 es un croquis con las dimensiones relevantes del ingenio.

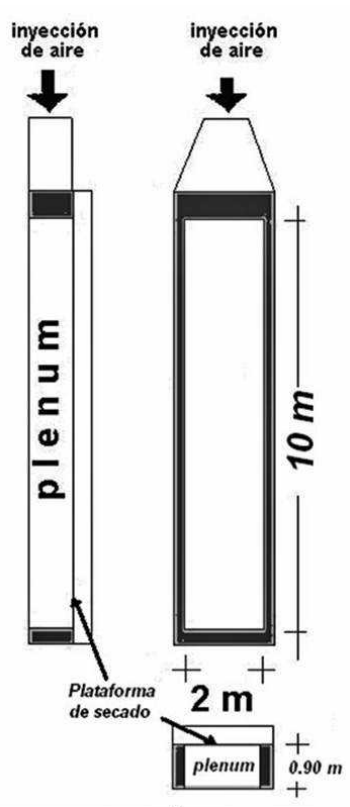


Figura 2. Dimensiones de la secadora de plataforma (Samoa) que son relevantes para este trabajo.

El fluido de secado es en una mezcla caliente de aire y productos de la combustión del gas. En estado estable, la temperatura del plenum es de alrededor de 80 °C. El lecho de fermentado tiene un espesor aproximado de 0.25 m. Periódicamente, el producto es volteado manualmente y redistribuido sobre la plataforma para uniformizar el secado.

Planteamiento del problema

Es posible señalar varios inconvenientes en el diseño del ingenio, sobre todo desde las perspectivas ecológica y de ahorro de energía. En este artículo nos concentramos en el problema de la distribución del aire en la plataforma de la secadora, partiendo

de la hipótesis de que una distribución uniforme del aire produce un secado más uniforme y éste, a su vez, produce un considerable ahorro de energía. Los objetivos principales de este trabajo fueron:

1. Realizar mediciones de la velocidad del aire a la salida de la plataforma del secador.
2. Realizar simulaciones con el método del elemento finito para identificar la geometría del secador que produce uniformidad en el valor de las velocidades de salida del aire en el lecho de secado.
3. Diseñar un sistema distribuidor de aire para garantizar que la velocidad del aire medida en cualquier punto sobre el lecho de secado sea virtualmente la misma.

Con las siguientes hipótesis y restricciones:

- i. El cacao a secar se distribuye uniformemente sobre la plataforma y suponemos que el contenido de humedad inicial es el mismo para cualquier muestra tomada de la misma.
- ii. Suponemos que la transferencia de calor y masa del grano al aire es un fenómeno dominado por los efectos de la convección forzada por el ventilador.
- iii. Que bajo estas condiciones, el tiempo de secado disminuye cuando la velocidad del aire que atraviesa el lecho de secado es la misma en todos los puntos del mismo, lo que a la vez disminuye la necesidad de voltear mecánicamente el producto durante el proceso de secado
- iv. La restricción más importante al hacer este trabajo es económica: Se desea mejorar la eficiencia del secador conservando la simplicidad de su construcción e invirtiendo poco dinero.

Metodología

Para determinar el campo de velocidades inicial, se trazó una retícula formada por cuadrados de 0.35 m por lado. Enseguida se activó el ventilador del equipo, sin encender el quemador y se midió la velocidad del aire colocando un anemómetro en posición vertical a 0.35 m de altura sobre cada uno de los nudos de la retícula. Los valores obtenidos se utilizaron para generar, por interpolación, el mapa de curvas de velocidad constante de la Figura 3. La máxima velocidad aparente ocurre

cerca del extremo del lecho más alejado del punto de inyección de aire. También se observa la presencia de zonas de baja velocidad en varias regiones de la plataforma y, claramente, en el extremo del lecho más cercano al punto de insuflación del aire.

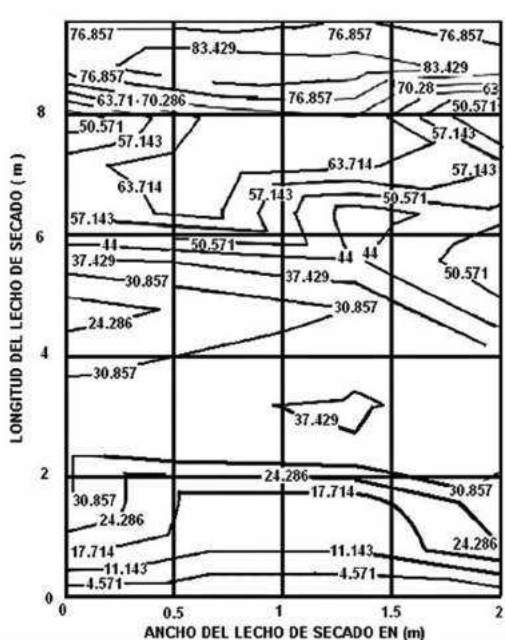


Figura 3. Curvas de velocidad constante del campo de velocidades.

Estas observaciones son consistentes con el reporte de los operadores del ingenio, quienes voltean y redistribuyen manualmente el cacao sobre la plataforma para asegurar que el secado sea uniforme. Estos afirman que la semilla que queda en el extremo lejano del secador se seca más rápido que el resto de la carga, por lo que es preciso darle, manualmente, rotación a la carga (5 toneladas al principio del secado, 2 toneladas al final) del secador a lo largo de los diez metros de longitud de la plataforma.

La notable diferencia de velocidades se interpreta entonces como causante de secado no uniforme y de pérdidas de energía, ya que el aire caliente que atraviesa el lecho es descargado a la atmósfera.

Se analizaron varias opciones para corregir las anomalías en la distribución del aire buscando la solución más económica. Aquí nos limitamos a hablar de la modificación de la geometría del plenum, que se realizó tomando como base la simulación del movimiento del aire dentro del mismo. Se propusieron cambios

simples en la geometría y se observó en las simulaciones la velocidad de salida del aire. De esta manera se determinó la forma geométrica del plenum que produce aproximadamente la misma velocidad de salida en todos los puntos de la plataforma. Los cambios propuestos son mínimos para economizar en la implantación.

Simulaciones con FEMLAB

La geometría del secador es simple (Figuras 1 y 2): consiste de una caja prismática rectangular hacia cuyo interior se insufla aire por uno de los extremos utilizando un ventilador centrífugo. Hay una pieza de transición que tiene forma de prisma trapezoidal, de 1.20 m de longitud, en la que se realiza la transición desde la sección transversal del tubo de descarga del ventilador, un cuadrado de 0.4 m por lado, hasta la sección transversal del plenum de la secadora, un rectángulo de 2 m de ancho y 0.9 m de altura. Si suponemos que el flujo en el interior del plenum es incompresible y adiabático, el flujo puede modelarse (Flügge. 1972) combinando las ecuaciones de continuidad:

$$v^m|_m = 0 \quad (1)$$

y las ecuaciones de Navier-Stokes):

$$\rho v^i + \rho v^i v^j \Big|_j - m v^j \Big|_j = X^i - p^i \quad (2)$$

en un dominio cuyas fronteras ofrecen las siguientes condiciones:

Paredes del secador (no-deslizamiento):

$$v^i = 0 \quad (3)$$

Rejilla del plenum (flujo transversal hacia la atmósfera):

$$p = 0 \quad (4)$$

Sección transversal del conducto de inyección (velocidad de flujo transversal conocida):

$$v^1 = 0 \quad (5)$$

Se realizaron varias simulaciones utilizando el Método de los Elementos Finitos implementado en FEMLAB. En este reporte se publican en forma gráfica algunos resultados de interés.

La Figura 4(a) muestra una simulación del comportamiento del flujo bidimensional en la configuración geométrica inicial. La concordancia entre los valores calculados en la simulación y los valores observados físicamente es buena. El campo de velocidades aparece en la figura 4a.

La figura 4(b) es el perfil de velocidades a lo largo del lecho de secado con la configuración geométrica inicial. Nótese que la velocidad crece conforme aumenta la distancia desde el punto de insuflación. De las simulaciones concluimos que ningún cambio simple de la geometría corrige totalmente este problema.

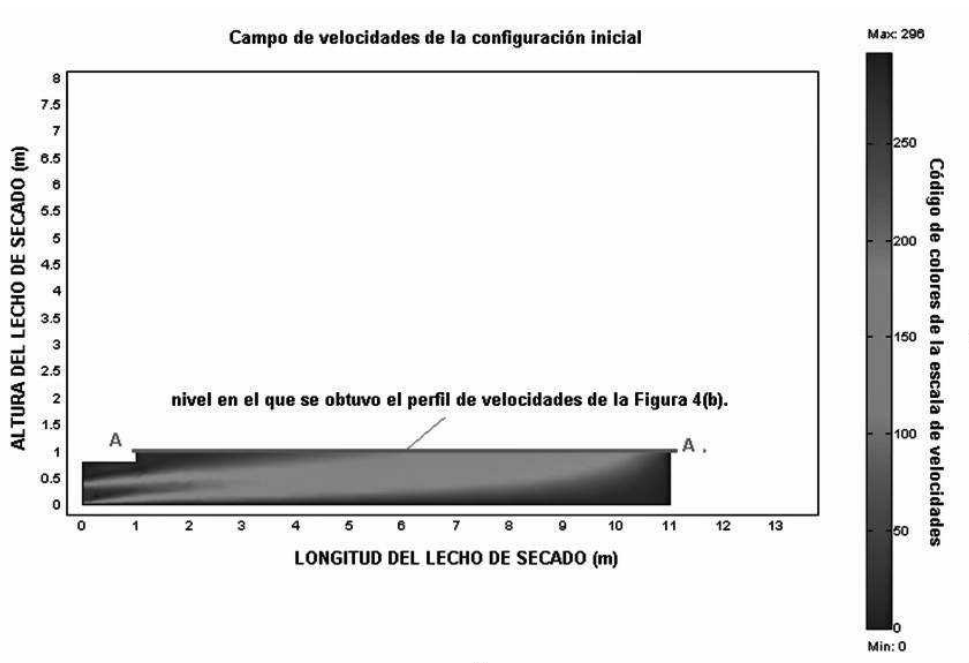


Figura 4(a) Simulación del flujo en la configuración inicial. Campo de velocidades.

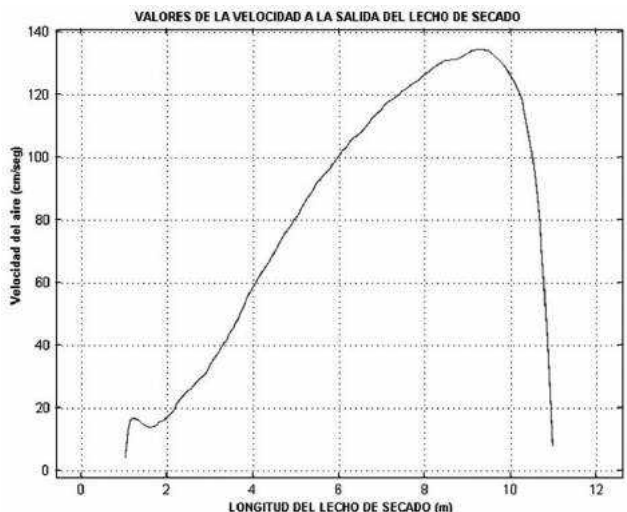


Figura 4(b). Simulación del flujo. Perfil de velocidades a lo largo de la plataforma de secado mostrando alta velocidad en el extremo más alejado del punto de insuflación.

En la Figura 5 presentamos un resultado donde el perfil de velocidades se ha corregido notablemente sin llegar a ser el ideal. Tres diferencias pueden observarse a simple vista entre las dos configuraciones mostradas: 1). En la Figura 5 aparece una superficie interior que simula un distribuidor de flujo con orificios de 0.25 cm, 2). El piso del plenum ofrece una pendiente favorable a la dirección del flujo, y 3). El cañón de insuflación es de sección uniforme, mide lo mismo que medía la anterior zona de transición trapezoidal y descarga directamente en el plenum a través de los orificios del distribuidor. La Figura 5 (b) muestra el perfil de velocidades que resulta a lo largo del lecho de secado, el cual es más uniforme que el que aparece en la figura 4 (b).

La idea de dar pendiente al piso no es original. Algunas de las secadoras que visitamos en el estado de Tabasco tienen un diseño ahusado pero con pendiente adversa al flujo. Las simulaciones mostraron que la pendiente adversa agudiza el problema de diferencia de velocidades.

El perfil de velocidades de la figura 5 presenta una zona de baja velocidad en el recorrido inicial del aire (1.60 m) y una zona de calma, de casi 6 m de longitud, en la parte media del recorrido.

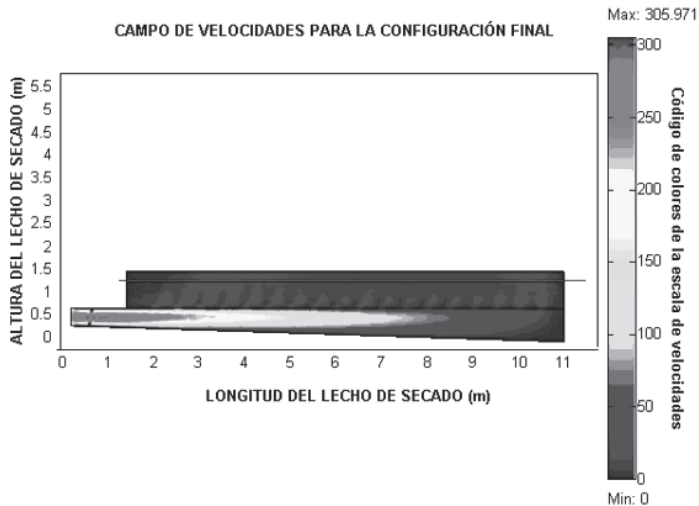


Figura 5(a). Flujo en el interior del secador para una de las mejores soluciones obtenidas por simulación. Campo de velocidades.

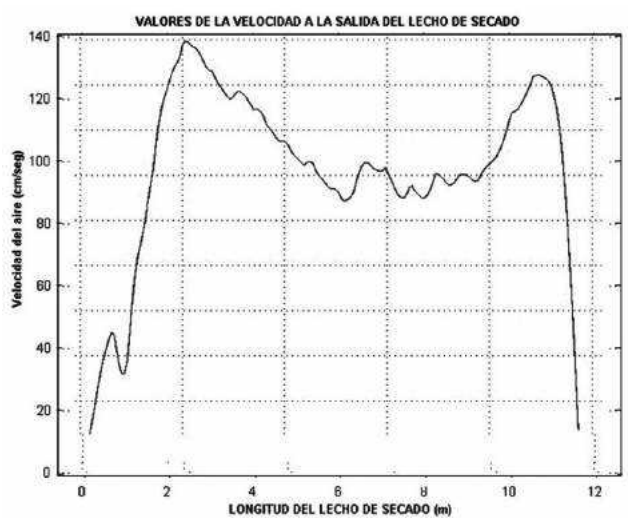


Figura 5(b). Flujo en el interior del secador para una de las mejores soluciones obtenidas por simulación. El perfil de velocidades es más uniforme.

Discusión de resultados

Se ha determinado el campo de velocidades que corresponde a la configuración inicial (Figura 3). Se confirmó que el campo de velocidades no es uniforme. Esto coincide con la práctica usual de voltear el cacao llevándolo desde el punto más alejado hasta el punto más cercano a la inyección del aire donde, inclusive los usuarios reportan zonas de succión de aire.

Las soluciones de gabinete halladas con el Método del Elemento Finito sugieren que la mejor solución desde el punto de vista técnico es la implantación de un distribuidor de flujo. No debe pasarse por alto que las simulaciones con MEF son bidimensionales. La mejor configuración para el distribuidor de flujo puede elegirse de un número ilimitado de alternativas y el criterio de la menor inversión económica determina cuál es la mejor solución.

Utilizando los lineamientos de ASHRAE (3) se diseñaron dos alternativas de distribución de aire. La primera, que es la más costosa, consiste en dividir el plenum en varias cámaras separadas por mamparas que son atravesadas por un conducto del que se derivan puntos de inyección, colocados en los centros geométricos de cada cámara. Esta solución permite controlar manualmente la cantidad de aire que se inyecta en cada cámara y asegurar la máxima uniformidad.

La segunda solución no utiliza mamparas divisoras sino que es una aplicación de la teoría del difusor lineal: Se propone un conducto único de forma de cono truncado en una de cuyas caras se deja una ranura longitudinal con dimensiones que garantizan que la cantidad de aire que escapa por la ranura es la misma a lo largo de toda la longitud. Los resultados de la primera solución se muestran en la Figura 6, donde puede observarse que el campo de velocidades es prácticamente uniforme.

El resultado que sobre el campo de velocidades tiene la primera solución analizada parece satisfactorio para fines de ingeniería. Algo similar se puede decir de la segunda solución, que no se muestra en este reporte por formar parte de una patente.

Conclusiones y puntos a destacar

Se ha aplicado con éxito el Método del Elemento Finito para simular soluciones al problema de Navier-Stokes en dos dimensiones.

Se identificó una solución para el problema planteado. El trabajo del diseñador en el gabinete se reduce, aparentemente, a comparar cualitativamente

Para comprobar en campo la validez de la solución repetimos el procedimiento de solución descrito en la sección de metodología. Debe destacarse que al realizar este trabajo se buscó desde el principio conseguir grandes mejoras con modificaciones mínimas. Esto fue así para reducir la inversión económica implícita. En Tabasco existen más de 200 ingenios de este tipo y la aplicación de estos resultados en todos ellos resultará en un considerable ahorro de combustible en los mismos.

Agradecimientos

Estos trabajos forman parte del proyecto de investigación y transferencia tecnológica: “OPTIMIZACIÓN ENERGÉTICA DE UNA SECADORA INDUSTRIAL DE CACAO” que es financiado a través del convenio **FOMIX: TAB-2003-C03-10961** suscrito por la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, el CONACYT y el Gobierno del Estado de Tabasco a través del programa Fondos Mixtos; y la Procesadora de Cacao “La Chontalpa”, de Comalcalco, Tabasco, beneficiaria del proyecto

Referencias bibliográficas

- Flügge, W., 1972 “Tensor Analysis and Continuum Mechanics”, Springer-Verlag, New York, pp. 93-96.
- Allison. H. W. and Kenten, R. H. 1964 “Mechanical Drying of cocoa”. *Tropical Agriculture*, vol. 41, 115-119.
- Macdonald C. R. and Freire, E. S. 1981, “Cocoa drying on a platform type dryer”. *Tropical Agriculture*, vol. 58, 253-265.
- ASHRAE Fundamentals Handbook (1997), Chapter 31: “Space Air Diffusion”. 31.1-31.17



Difusión y Divulgación
Científica y Tecnológica

José Manuel Piña Gutiérrez
Rector

Wilfrido Miguel Contreras Sánchez
Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

Fabián Chablé Falcón
Director de Difusión y Divulgación Científica y Tecnológica

Francisco Morales Hoil
Jefe del Departamento Editorial de Publicaciones No Periódicas

Esta obra se imprimió con recursos apoyados por PIFI 2011. OP/ PIFI-2011-27MSU0018V-12-03, con fecha de finalización del 24 de enero de 2013, con un tiraje de 1000 ejemplares en los Talleres de la Imprenta 16 de Septiembre; Calle Andrés García 455, Colonia Primero de Mayo; Villahermosa, Tabasco, México. El cuidado estuvo a cargo de los autores y del Departamento Editorial de Publicaciones No Periódicas de la Dirección de Difusión y Divulgación Científica y Tecnológica de la UJAT.



Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

COLECCIÓN
JOSÉ MARÍA PINO SUÁREZ
Estudios regionales y desarrollo

Datos técnicos para reducir el consumo de energía en secadoras de cacao tipo Samoa

Rubén Vásquez León
Candelario Bolaina Torres
Fredy Valenzuela Murillo

Datos técnicos para reducir el consumo de energía en secadoras de cacao tipo Samoa