

Diseño de equipos con energía solar para el secado del café:

Fundamentos teóricos y aplicaciones

Sergio Luis Burbano Muñoz

Oswaldo Osorio Mora

Oscar Arango Bedoya



Editorial
Universidad de Nariño

èditorial

Universidad de **Nariño**

Diseño de equipos con energía solar para el secado del café:

Fundamentos teóricos y aplicaciones

Diseño de equipos con energía solar para el secado del café:

Fundamentos teóricos y aplicaciones

Sergio Luis Burbano Muñoz
Oswaldo Osorio Mora
Oscar Aranago

editorial
Universidad de **Nariño**

Burbano Muñoz, Sergio Luis

Diseño de equipos con energía solar para el secado de café : fundamentos teóricos y aplicaciones / Sergio Luis Burbano Muñoz ... [et.al].--1ª. ed. -- San Juan de Pasto : Editorial Universidad de Nariño, 2025

253 páginas : ilustraciones, fotografías, gráficas, tablas

Incluye referencias bibliográficas p. 212-215 y reseña de los autores p. 251
ISBN: 978-628-7771-12-3

1. Secadores de café--Diseño 2. Secadores de café—Energía solar 3. Secado de café—Tecnologías 4. Métodos de secado—Energía solar 5. Equipo de secado—Radiación solar—Diseño 6. Equipo de secado—Espejos parabólicos—Diseño I. Osorio Mora, Oswaldo II. Arango Bedoya, Oscar

681.763 B946 – SCDD-Ed. 22



SECCIÓN DE BIBLIOTECA

DISEÑO DE EQUIPOS CON ENERGÍA SOLAR PARA EL SECADO DE CAFÉ: FUNDAMENTOS TEÓRICOS Y APLICACIONES

© Editorial Universidad de Nariño

© Sergio Luis Burbano Muñoz

Oswaldo Osorio Mora

Oscar Arango Bedoya

ISBN: 978-628-7771-12-3

Primera Edición

Corrección de estilo: Ana Cristina Chavez López

Diseño y diagramación: Jenny Narváez - Nathaly Rivadeneira

Fecha de publicación: Febrero de 2025

San Juan de Pasto, Nariño, Colombia

Prohibida la reproducción total o parcial, por cualquier medio o cualquier propósito, sin la autorización escrita de sus autores o de la Editorial Universidad de Nariño.

Contenido

Introducción	8
<hr/>	
Capítulo 1. Principios fundamentales del secado	11
Capítulo 2. Secado solar	40
Capítulo 3. Secado de café	66
Capítulo 4. Análisis matemáticos para el diseño de secadores solares	76
Capítulo 5. Simulación del proceso y diseños de secadores solares para café	117
<hr/>	
<i>Referencias</i>	212
<i>Apéndices</i>	216
<i>Índice de tablas</i>	239
<i>Índice de figuras</i>	243
<i>Índice de apéndices</i>	250
<i>Acerca de los autores</i>	251



Introducción

El crecimiento exponencial de la población mundial y el aumento de la demanda energética requerido para la producción agroalimentaria e industrial que se necesita para satisfacer las necesidades de consumo, tienen efectos ambientales negativos que, cada vez son más preocupantes; por lo tanto, se requiere avances en el desarrollo de sistemas productivos que usen energías limpias y eficientes para obtener la mayor energía posible con pérdidas mínimas hacia el entorno.

La principal fuente energética de uso actual son los combustibles fósiles, fuentes no renovables que son responsables en gran medida del calentamiento global y otros impactos negativos en el ambiente. En todos los sectores de la economía se usa estos combustibles, desde la producción primaria, pasando por los procesos industriales, hasta la comercialización. Los combustibles son indispensables para poner en funcionamiento equipos que, finalmente, redundan en trabajo y productos, pero, lastimosamente, causan un continuo daño ambiental.

Debido a una mayor conciencia ambiental a nivel mundial, en la actualidad existe un gran interés hacia el uso de energías renovables más limpias y amigables con el ambiente; una de ellas está a disposición de todos: **la energía solar**, que se puede transformar en energía eléctrica o térmica. Colombia es un país reconocido

a nivel mundial como uno de los principales productores de café, especialmente por la calidad excepcional de su grano, con propiedades únicas muy apetecidas por los consumidores. Gran parte del café en Colombia se seca al sol, en sistemas tradicionales poco innovadores y con una baja eficiencia operativa.

El procesamiento del grano de café necesita calor (energía térmica) para elevar la temperatura y así deshumidificar el grano en pergamino; para esto, muchos productores disponen de secadores mecánicos que usan biomasa o equipos que funcionan con combustibles fósiles para calentar el aire de secado; sin embargo, esto implica la generación de gases invernadero a la atmósfera. Entonces, se requiere estudios enfocados en el diseño de equipos que aprovechen los adelantos actuales en sistemas de recolección y aprovechamiento de la energía solar que pueda aplicarse al secado de café y que sean eficientes operativamente.

Este documento se enfoca en los fundamentos a considerar para el desarrollo de equipos de secado solar aplicados al café, aunque los mismos son aplicables al diseño de secadores para otros productos agroalimentarios de importancia en la economía de muchos países. En primer lugar, se presenta **los principios fundamentales del secado**, como un proceso general enfocado al café; luego se aborda **los análisis matemáticos para el diseño de secadores solares**, y, finalmente, se muestra la aplicación de las temáticas anteriores en **el diseño de secadores solares para el café**, incluyendo modelamientos matemáticos y bosquejos gráficos.

Se da a conocer varios métodos de secado con energía solar, pero se hace énfasis en dos de ellos, debido a su eficiencia y una tecnología más amigable con el ambiente. El primero es un equipo de secado con un método que implica recolectar la radiación solar mediante placas planas de absorción, mientras que el segundo es un equipo de secado que contiene un sistema de espejos parabólicos que permiten concentrar los rayos hacia un punto de recolección, con lo cual, ambos sistemas tienen la capacidad de calentar el aire de secado. Sin embargo, para simular la operación en cada sistema, optimizando las variables de proceso para el grano de café, es imprescindible el diseño de algoritmos mediante cálculos de ingeniería, utilizando los fundamentos teóricos que se presenta en los capítulos iniciales. El algoritmo de simulación se realiza usando una hoja de cálculo (Excel) que permite obtener los datos y gráficas de secado más importantes, mientras que el análisis estadístico se hace con ayuda de un software (Statgraphics Centurion), que permite optimizar los diseños en cuanto a la eficiencia del secado, evaluando los principales factores ambientales, operativos y dimensionales.

Entonces, ¿cuál de estos sistemas de secado solar aquí mencionados es el más eficiente?, a partir de los fundamentos tratados en este libro acerca del secado solar y el secado de sólidos como el café, será posible resolver dicho problema de investigación, en donde se requiere de un equipamiento que aproveche al máximo la energía del sol para esta importante operación, para ello se lleva a cabo una serie de cálculos para la obtención de la energía solar que llega al sistema de acuerdo a ciertos componentes como la Irradiación Solar, hora del día, entre otros; luego se presentan los cálculos relacionados con el área de colección solar, en donde se obtiene el modelo de temperatura del aire de secado y sus propiedades termofísicas, dependiendo de las dimensiones del colector así como la energía calórica incidente, el flujo del aire y otras variantes; por último, con la aplicación de los anteriores procedimientos, en donde se ha obtenido la temperatura del aire entrante y el calor que lleva consigo, se procede a calcular ciertos elementos necesarios para secar el grano de café, como la temperatura y la humedad del grano a través del tiempo, con lo cual se obtiene la velocidad con que se seca, además se tienen en cuenta aquellas condiciones como el grosor de la capa de grano, el área en la bandeja, la humedad inicial, entre otros.

La optimización se logró realizando las simulaciones con un diseño experimental de superficie de respuesta Box-Behnken que permitió apreciar la curvatura que provocan los factores o condiciones en las respuestas estudiadas y además redujo el número de corridas experimentales, cada una ejecutada con 3 niveles (valores de simulación) en los factores evaluados y así se analizaron los resultados para obtener los mejores diseños. Los diseños gráficos fueron obtenidos gracias al programa de diseño gráfico SketchUp utilizando los valores óptimos dados en el análisis estadístico a las simulaciones (corridas) realizadas.

Las simulaciones revelan que, el sistema con concentración solar es mucho más eficiente al reducir el tiempo de secado, en comparación al sistema de placa plana; además de esto, se verá que, en el primero los factores que más afectan la operación son las dimensiones del concentrador, del colector y la hora de operación; mientras que en el segundo, son: la hora del día, el ángulo del colector y el grosor de capa de secado. Como veremos, ambos sistemas son más eficientes al mediodía. Sin embargo, ambos métodos reducen considerablemente el tiempo de secado en comparación con el tradicional secado solar, utilizando simplemente el sol como fuente de energía renovable que está a disposición en el entorno ambiental, lo que representa una opción de uso de tecnología verde en la producción cafetera e, incluso, aplicable al campo agroalimentario en términos generales.

01

**Principios
Fundamentales
del Secado**

En todas las áreas del conocimiento, como las ciencias y las ingenierías, para tener la capacidad de generar soluciones a problemáticas prácticas y reales o desarrollar aplicaciones productivas, es necesario adquirir una base teórica específica y bien fundamentada y, el secado de materiales no es la excepción. Por esta razón, en este capítulo se presenta los fundamentos básicos para comprender los fenómenos ocurridos en esta operación, incluyendo los principios físicos y modelos matemáticos que permiten desarrollar tecnologías en este campo operacional, por medio de análisis ingenieriles. Primero, se define los términos usados en el secado, para comprender el lenguaje de este proceso; luego se analiza los métodos y equipos utilizados para el secado, pasando después a tratar los principios de balance de masa y energía, con lo que ya se podrá comprender la transferencia de calor en secadores y la cinética de secado. Es necesario abordar una serie de ecuaciones matemáticas que permiten modelar este proceso y desarrollar nuevos métodos y equipos.

Con todos estos conceptos claros, se enfatiza en un tipo de secado muy conocido y usado: el secado solar, que constituye el tema principal en este documento. Pero no es posible generar nuevas tecnologías en este método de secado, sin antes abordar temas como la radiación solar y los métodos para recolectar y acumular el calor, como los colectores de placa plana y los concentradores parabólicos, en los cuales se hará énfasis. Se da a conocer el balance de energía en el colector solar de placa plana, los coeficientes de transferencia de calor por convección, la estimación de la temperatura de la placa absorbente y, un modelamiento matemático de la parábola, con el fin de usarlo en el concentrador parabólico.

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido, con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo (Geankoplis, 1998; McCabe et al., 2007). El término 'secado' se usa también con referencia a la eliminación de otros líquidos orgánicos, como benceno o disolventes orgánicos, de los materiales sólidos. No se debe confundir la evaporación con el secado; en la operación de evaporación se elimina cantidades de agua bastante grandes; en ese caso, el agua se elimina en forma de vapor a su punto de ebullición, mientras que, en el secado, el agua casi siempre se elimina en forma de vapor con aire (Geankoplis, 1998).

El agua u otros líquidos puede separarse de los sólidos de manera mecánica mediante prensas o centrífugas, o bien, de modo térmico a través de evaporación, aunque por lo general resulta más barato eliminar líquidos por métodos mecánicos que por térmicos y, por esta razón, es aconsejable reducir el contenido de líquido tanto como sea posible, antes de alimentar el material a un secador térmico (McCabe et al., 2007).

El secado suele ser la etapa final de los procesos antes del empaque y permite que muchos materiales sean más adecuados para su manejo; además, el secado o deshidratación de materiales biológicos (en especial los alimentos), se usa también como técnica de preservación, dado que los microorganismos que provocan la descomposición no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua; además, muchas de las enzimas que causan cambios químicos en alimentos y materiales biológicos no pueden funcionar o actuar sin agua (Geankoplis, 1998). Los microorganismos dejan de ser



activos cuando el contenido de agua se reduce por debajo del 10 % en peso (McCabe et al., 2007). Algunos materiales biológicos y productos farmacéuticos que no pueden calentarse para secarse de la manera ordinaria, pueden secarse en frío, con métodos como la liofilización (McCabe et al., 2007).

El grado de presión de vapor que ejerce la humedad contenida en un sólido húmedo o en una solución líquida depende de la naturaleza de la humedad, del sólido y, la temperatura. Por tanto, si un sólido húmedo se expone a una corriente continua de gas fresco que contiene una presión parcial dada del vapor P_v , el sólido perderá humedad por evaporación o, ganará humedad del gas, hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido sea igual a P_v (Traybal, 2007). Entonces, el sólido y el gas están en equilibrio; el contenido de humedad del sólido se conoce como su contenido de humedad en el equilibrio en las condiciones predominantes (Treybal, 2007); es esta condición de equilibrio la que fundamenta el proceso de secado; es decir, es el determinante de la fuerza motriz para la variación de humedad.

Terminología del secado

Para estar en capacidad de entender el contenido temático que se tratará en esta sesión sobre los fundamentos del secado, es importante tener claridad en los conceptos de aquellos factores que intervienen en esta operación y que serán usados en las descripciones matemáticas.

Humedad absoluta: es la relación de masa de vapor de agua (u otro solvente) con aire seco.

Humedad relativa: es la presión parcial del vapor de agua dividida por la presión de vapor del agua pura (en equilibrio) a una temperatura dada. En otras palabras, la humedad relativa describe cuán cerca está el aire a la saturación (Green & Perry, 2008). (Revisar más adelante la definición de presión de vapor.)

$$HR = \frac{P_A}{P_S} \quad (1)$$

P_A : Presión parcial de vapor del agua

P_S : Presión de saturación del agua en aire; presión de vapor del agua pura

La saturación corresponde a las condiciones en que un gas se encuentra en equilibrio con su estado condensado; es decir, en esta condición el gas presentará fracciones o gotas líquidas; por arriba de ella (sobresaturación) empieza a condensar y así, la mayor proporción estará en estado líquido, pero debajo de la saturación (insaturación), todo se presenta en estado gaseoso.

Contenido crítico de humedad: es el contenido de humedad promedio cuando el periodo de *velocidad constante* termina, asumiendo que la dinámica de secado también es constante (Geankoplis, 1998; McCabe et al., 2007; (Green & Perry, 2008); Treybal, 2007).

Contenido de humedad de equilibrio: es la humedad límite a la cual un material puede ser secado bajo condiciones específicas de temperatura y humedad del aire (Green & Perry, 2008). Si el sólido se expone a una corriente de gas fresco que contiene una presión parcial dada del vapor p , el sólido perderá humedad por evaporación o, ganará humedad del gas, hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido sea igual a p ; entonces, el gas y el sólido están en equilibrio; el contenido de humedad del sólido es la humedad en el equilibrio (McCabe et al., 2007).

Humedad ligada: en un sólido, es el líquido el cual ejerce una presión de vapor menor que la del líquido puro a una temperatura dada. El líquido puede llegar a ligarse por retención en pequeños capilares, por solución en paredes celulares o fibrilares, sólido en completa solución homogénea, adsorción química o física en la superficie del sólido y, por hidratación de los sólidos (Green & Perry, 2008); esta humedad es más difícil de separar del sólido.

Humedad no ligada: en un material higroscópico, es aquella humedad en exceso del contenido de humedad en equilibrio correspondiente a la humedad de saturación. Toda el agua en un material no higroscópico es agua no ligada (Green & Perry, 2008).

Contenido de humedad libre: es aquel líquido removible a una temperatura y humedad dadas; puede incluir humedad ligada y no ligada; es decir, es la humedad en exceso de la humedad en equilibrio; por lo tanto, solo puede evaporarse la humedad libre; el contenido de esta humedad en un sólido depende de la concentración de vapor en el gas (Geankoplis, 1998; Green y Perry, 2008; Treybal, 2007).

$$X_L = X - X_e \quad (2)$$

X_L : contenido de humedad libre

X : contenido de humedad del sólido

X_e : contenido de humedad de equilibrio.

Es un término muy importante, ya que este tipo de humedad representa a la fuerza impulsora para evaporar, así que determina la velocidad de evaporación.

Material higroscópico: material que puede contener humedad ligada (Green & Perry, 2008).

Material no higroscópico: material que puede contener humedad no ligada (Green & Perry, 2008).

Presión de vapor: es la presión parcial de una sustancia en la fase gaseosa que está en equilibrio con la fase líquida o sólida de un componente puro (Green & Perry, 2008); es decir, es la presión que ejerce dicha sustancia en forma de vapor; por ejemplo, en un sólido húmedo será el vapor de agua contenida.



Actividad de agua (A_w): es la relación de la fugacidad de un componente en un sistema con relación a la fugacidad en estado estándar (25 °C y 1 atm). En un sistema de secado, es la presión de vapor de un solvente (por ejemplo, agua) en una mezcla con respecto a la presión de vapor del solvente puro a la misma temperatura. La ebullición ocurre cuando la presión de vapor de un componente en un líquido excede la presión total ambiental (Green & Perry, 2008). La actividad de agua se define entonces, como la humedad en equilibrio de un producto, determinada por la presión parcial del vapor de agua en su superficie; esto es, es una relación entre la presión parcial de vapor de agua en una sustancia con la presión de vapor parcial del agua pura a la misma temperatura. El valor de actividad de agua depende de la composición, la temperatura y el contenido en agua del producto.

Flujo capilar: es el flujo del líquido a través de los intersticios y sobre la superficie de un sólido, causado por la atracción molecular líquido-sólido (Green & Perry, 2008). Físicamente, se debe a la tensión superficial generada en el líquido (agua) adherido a una pared sólida (conductos capilares).

Base seca (W_d): expresa el contenido de humedad del sólido húmedo como kg de agua por kg de sólido seco, (Geankoplis, 1998; McCabe et al., 2007; Green & Perry, 2008; Treybal, 2007). A menudo para representar esta medida se simboliza con las siglas en español “b.s.” al final del valor.

Base húmeda (W_w): expresa la humedad en un material, como un porcentaje de peso con base al peso del sólido húmedo. La unidad se simboliza con las siglas “b.h.” al final del valor.

$$W_w = \frac{w_d}{1+w_d} \quad (3)$$

$$W_d = \frac{w_w}{1-w_w} \quad (4)$$

w_w = kg de humedad/kg sólido húmedo

w_d = kg de humedad/kg sólido seco

Punto de rocío de una mezcla de aire y vapor de agua: la temperatura a la cual cierta mezcla de aire y vapor de agua está saturada se llama temperatura de punto de rocío. Por ejemplo, a 26,7 °C, la presión de vapor de saturación del agua es de 3,5 kPa; por consiguiente, en una mezcla con esta presión parcial del vapor de agua, su punto de rocío es de 26,7 °C. Si una mezcla está a 37,8 °C (a la cual se le suele llamar ‘temperatura de bulbo seco’, puesto que se trata de la temperatura que indicaría para esta mezcla el bulbo seco de un termómetro) y contiene vapor de agua a una presión parcial de 3,5 kPa, la mezcla no estaría saturada; al enfriar a 26,7 °C, el aire estaría saturado; significaría que, alcanzaría su punto de rocío. Al seguir enfriando, parte del vapor de agua se condensaría, puesto que la presión parcial no puede ser mayor que la presión de vapor de saturación (Geankoplis, 1998).

Calor húmedo en una mezcla aire y vapor de agua (Cs): es la cantidad de calor en J o kJ requerido para elevar la temperatura de 1 kg de aire seco más el vapor de agua presente en 1 °C o 1 K. Las capacidades caloríficas del aire y el vapor de agua se pueden suponer constantes en el intervalo normal de temperaturas, e iguales a 1,005 kJ/ (kg de aire seco*K) y 1,88 kJ/ (kg de vapor de agua*K) respectivamente (Geankoplis, 1998). Por consiguiente, para unidades del SI y el sistema inglés:

$$C_S \frac{kJ}{kg \text{ aire seco} \cdot K} = 1,005 + 1,88H \text{ (SI)} \quad (5)$$

$$C_S \frac{btu}{lbm \text{ aire seco} \cdot ^\circ F} = 0,24 + 0,45H \text{ (Sistema inglés)} \quad (6)$$

Volumen húmedo de una mezcla aire y vapor de agua (V_H): es el volumen total en m³ de 1 kg de aire seco más el vapor que contiene a 101,325 kPa abs de la presión y temperatura del gas (Geankoplis, 1998; Treybal, 2007). Según la ley de los gases ideales:

$$V_H \frac{m^3}{kg \text{ aire seco}} = \frac{22,41}{273} T \text{ (K)} \left(\frac{1}{28,97} + \frac{1}{18,02} H \right) \quad (7)$$

Para una mezcla saturada de aire y vapor de agua, $H = H_s$ y V_H es el volumen saturado.

Métodos de secado

El equipo que se utiliza en el secado se puede clasificar de acuerdo con el tipo del equipo y por la naturaleza del proceso, según define Treybal (2007).

Según el método de operación, el secado se puede hacer por lotes o continuo: el secado por lotes o semilotes se opera intermitentemente en condiciones de estado no estacionario: el secador se carga con la sustancia, que permanece en el equipo hasta que se seca; entonces el secador se descarga y se vuelve a cargar con un nuevo lote. Los secadores continuos son operados generalmente en estado estacionario (Treybal, 2007).

Según el método de obtención del calor necesario para la evaporación de la humedad, los secadores pueden ser clasificados en secadores directos e indirectos. En los primeros, el calor se obtiene completamente por contacto directo de la sustancia con el gas caliente en el cual tiene lugar la evaporación. En los segundos, el calor se obtiene independientemente del gas que se utiliza para acarrear la humedad evaporada. Por ejemplo, el calor puede obtenerse por conducción a través de una pared metálica en contacto con la sustancia o, con menos frecuencia, por exposición de la sustancia a radiación infrarroja o calentamiento dieléctrico (Treybal, 2007). Según la naturaleza de la sustancia que se va a secar: la sustancia puede ser un sólido



rígido como madera, flexible como tela o papel, un sólido granular como una masa de semillas, una pasta ligera o un lodo ligero o, una solución. La forma física de la sustancia y los diferentes métodos de manejo necesario tienen, tal vez, la mayor influencia sobre el tipo de secador que se va a utilizar (Treybal, 2007).

Equipos para secado

Secador de bandejas por lotes: también se llama secador de anaqueles, de gabinete o, de compartimientos; el material, que puede ser un sólido o una pasta, se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100 mm de profundidad. Un secador de bandejas típico como el que se muestra en la Figura 1, tiene bandejas y gabinetes cargables y descargables. Un ventilador recircula aire calentado sobre la superficie de las bandejas, aunque también se usa calor eléctrico, cuando el calentamiento es bajo. En el caso de materiales granulares, estos pueden ser colocados sobre un tamiz, con una circulación cruzada del aire a través de un lecho permeable, obteniendo tiempos de secado más cortos, dado que, se aumenta el área superficial expuesta (Geankoplis, 1998). En la Figura 2 se muestra un ejemplar real de este tipo de secadores.

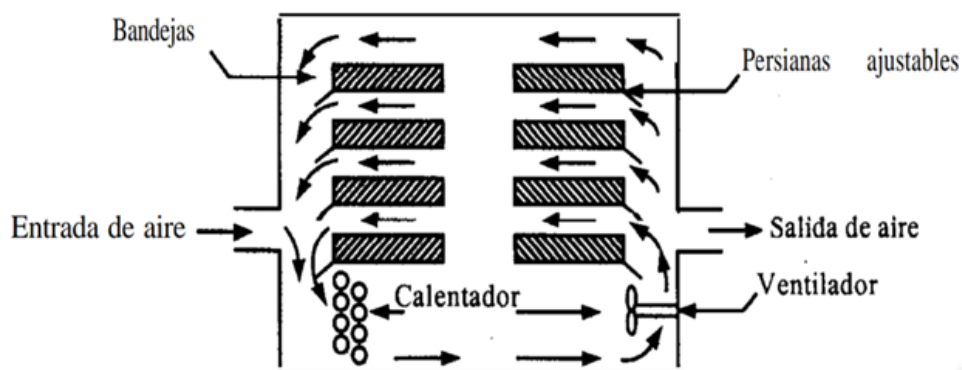


Figura 1
Secador de bandejas o anaqueles con recirculación de aire calentado paralelo a la superficie de secado
Fuente: Geankoplis (1998)



Figura 2
Secador de bandejas por lotes
Fuente: Focus Technology Co., Ltd. (2023)

Secadores indirectos al vacío con anaqueles: se calientan indirectamente y son del tipo por lotes, similares a los de las bandejas. Como se muestra en la Figura 3, constan de un gabinete construido de hierro colado o plancha de acero con puertas herméticas, de suerte que se pueda operar al vacío. Los anaqueles huecos de acero se montan dentro de las cámaras y se conectan en paralelo, con los colectores de vapor de entrada y de salida. Las bandejas que contienen los sólidos mojados se colocan sobre los anaqueles huecos. El calor se conduce a través de las paredes metálicas y por radiación entre los anaqueles. Para operaciones a temperaturas más bajas, se usa circulación de agua caliente en lugar de vapor para suministrar el calor que vaporiza la humedad. Los vapores se colectan en un condensador. Estos secadores se usan para secar materiales costosos o sensibles a la temperatura o, que se oxiden fácilmente. Son muy útiles para manejar materiales con disolventes tóxicos o valiosos (Geankoplis, 1998).



Figura 3
Secador indirecto al vacío con anaqueles
Fuente: TecnoEdu. Tecnología Educativa S.A. (s.f.)



Secadores continuos de túnel: suelen ser compartimentos de bandejas o carretillas que operan en serie, como se aprecia en las Figuras 4 y 5. Los sólidos son colocados sobre bandejas o en carretillas que se desplazan continuamente por un túnel con gases calientes que pasan sobre la superficie de cada bandeja. El flujo de aire caliente puede ser a contracorriente, en paralelo o, una combinación de ambos. Cuando se desea secar partículas sólidas granulares, puede utilizarse transportadores perforados o de fondo de tamiz. Los sólidos granulares húmedos son transportados en forma de una capa sobre una superficie de tamiz o perforada, a través de la cual se fuerza el paso de aire caliente, ya sea hacia arriba o hacia abajo. El secador consta de diversas secciones en serie, cada una con un ventilador y serpentines de calentamiento (Geankoplis, 1998; Treybal, 2007).

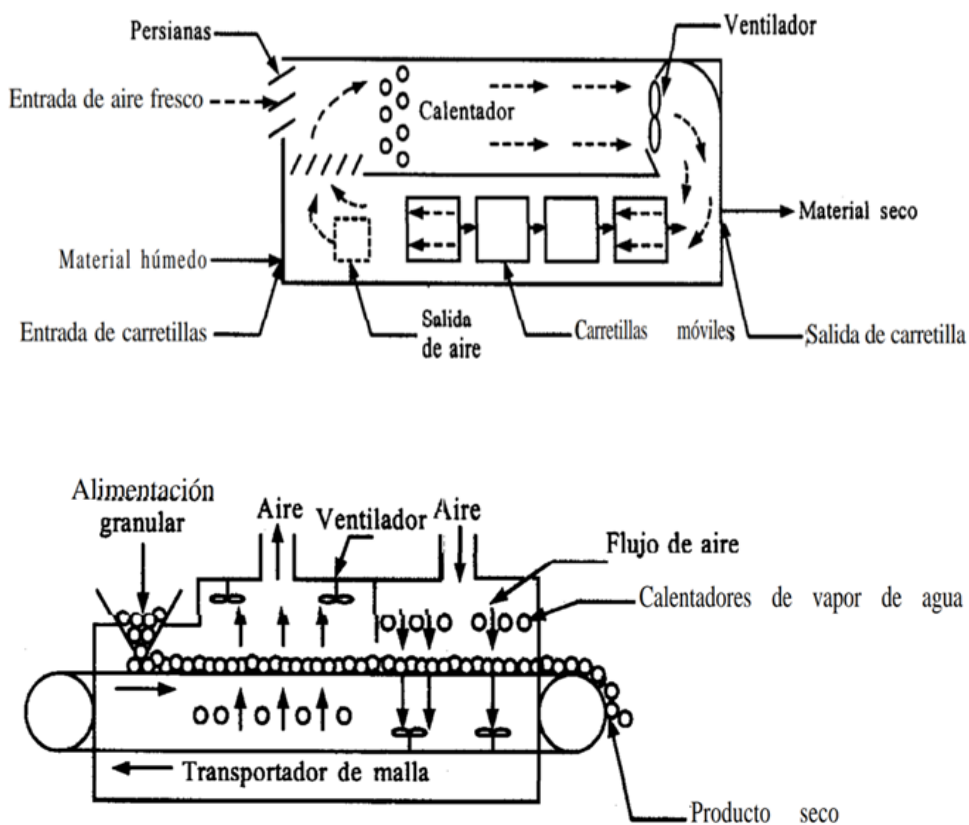


Figura 4
Secadores continuos de túnel: a) de carretillas con flujo de aire a contracorriente, b) secador de banda transportadora con circulación cruzada

Fuente: Geankoplis (1998)



Figura 3
Secador continuo de túnel con banda transportadora
Fuente: Diario de Ciencias Aplicadas (2023)

Secadores rotatorios: consta de un cilindro hueco que gira, por lo general, sobre su eje, con una ligera inclinación hacia la salida. Los sólidos granulares húmedos se alimentan por la parte superior, como se muestra en las Figuras 6 y 7 y, se desplazan por el cilindro a medida que este gira. El calentamiento se lleva a cabo por contacto directo con gases calientes mediante un flujo a contracorriente. En algunos casos, el calentamiento es por contacto indirecto a través de la pared calentada del cilindro (Geankoplis, 1998).

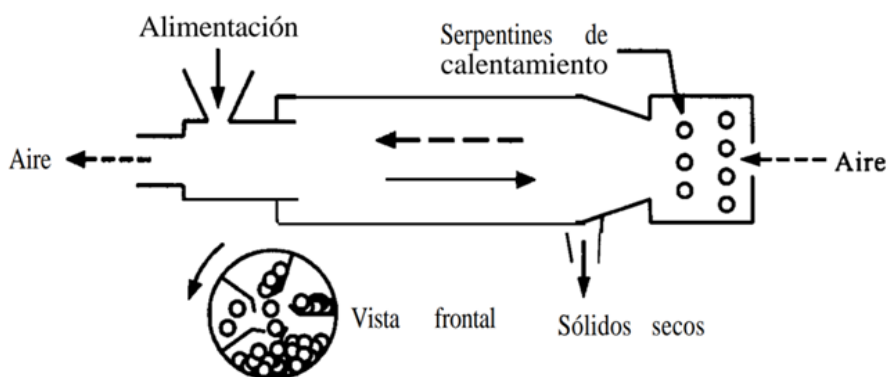


Figura 6
Esquema de un secador rotatorio con calentamiento directo
Fuente: Fuente: Geankoplis (1998)



Figura 7
Secador rotatorio industrial
Fuente: Alibaba.com (2023)

Secadores de tambor: consta de un tambor de metal calentado en cuyo exterior se evapora una capa delgada de un líquido o una suspensión, como se muestra en las Figuras 8 y 9. El sólido seco final se le raspa al tambor, que gira lentamente. Este equipo es adecuado para procesar suspensiones o pastas de sólidos finos, así como soluciones verdaderas.

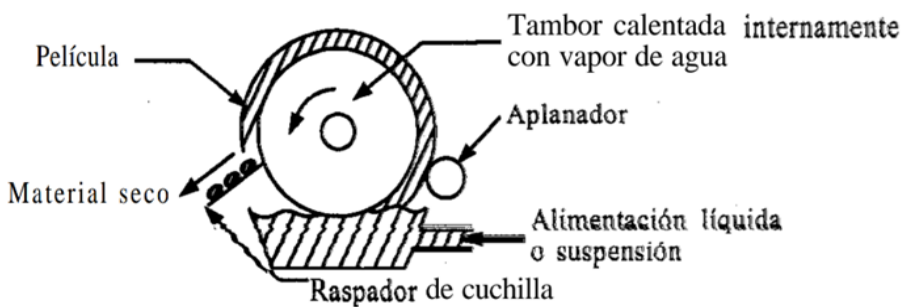


Figura 7
Secador de tambor rotatorio
Fuente: Geankoplis (1998)

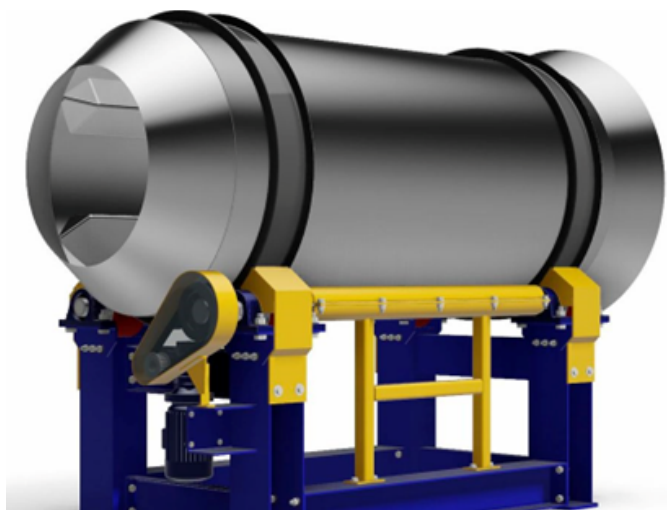


Figura 9
Secador de tambor rotatorio
Fuente: Direct Industry (s.f.)

Secadores por aspersión: un líquido o una suspensión se atomiza en una corriente de gas caliente (generalmente aire) para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se evapora de dichas gotas con rapidez y se obtiene partículas secas de sólido que se separan de la corriente de gas. El flujo de gas y de líquido de la cámara de aspersión puede ser a contracorriente, en paralelo o, una combinación de ambos. Los sólidos secos salen por el fondo de la cámara a través de un transportador de tornillo, como se puede apreciar en las Figuras 10 y 11 (Geankoplis, 1998).

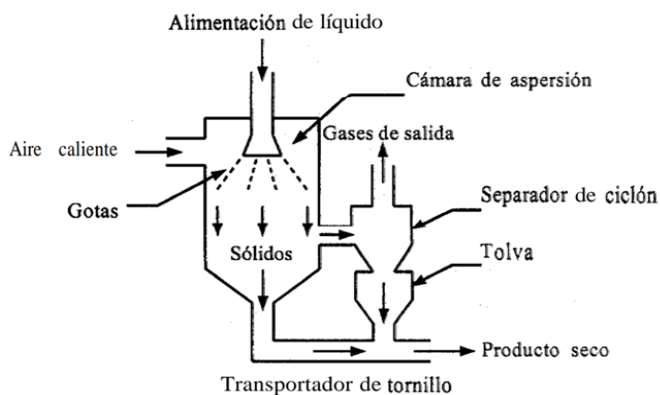


Figura 9
Diagrama de flujo para un sistema de secado por aspersión
Fuente: Geankoplis (1998)



Figura 11
Secador por aspersión con sistema de centrifugación
Fuente: Changzhou Yibu Drying Equipment Co., Ltd. (2022)

Balance de masa y energía

En este apartado se aplicará el enunciado de Lavoisier (citado por Aga, 2019): “la materia y la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma” (párr. 1), pues, gracias a esta ley de la naturaleza, el balance de materia y energía se puede aplicar en todas las operaciones industriales, lo que permite una gran cantidad de cálculos cuantitativos como la humedad en los materiales y la transferencia de calor en su entorno.

El tipo de cálculo más básico en un secador es el balance de masa y energía (Figura 12), pero este cálculo solo cuantifica la conservación de masa y energía en el sistema; por sí mismo, no responde importantes cuestiones de velocidad y calidad (Green y Perry, 2008).

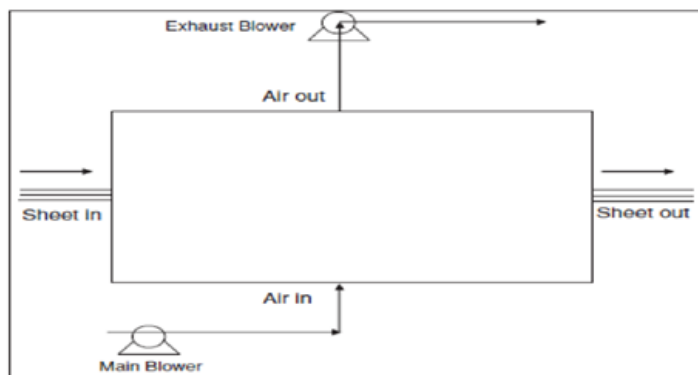


Figura 12
 Diagrama del balance general de masa y energía en el secado
 Fuente: Green & Perry (2008)

Sheet in: alimentación o sólidos de secado (en lámina) a la entrada (inicial).

Sheet out: alimentación a la salida (final).

Air in, Air out: aire a la entrada y salida, respectivamente.

Balance de masa

La ley de *conservación de masa dicta* que la masa que entra al sistema es igual a la que sale más la que se acumula en el proceso (Geankoplis, 1998). Los balances de masa normalmente son realizados para cada fase de la materia por separado o, para cada corriente implicada. Entonces, haciendo un balance con respecto a la alimentación, como se observa en la Figura 12, entra un flujo de sólidos y sale otro flujo de sólidos, cada uno con diferente contenido de líquidos (agua), pero la cantidad de sólidos secos (sin agua) será la misma de entrada y salida; por lo tanto:

$$F_{dry\ sheet\ in} = F_{dry\ sheet\ out} \quad (8)$$

Como se sabe, en el secado ocurre una evaporación de agua desde el sólido, por lo cual se tiene que, entra un flujo de sólidos húmedos, pero, a la salida se obtendrá un flujo de sólidos a los que se les ha retirado una cierta cantidad de agua y, además, esta sale como otro flujo, pero en forma de gas; es decir, que el flujo de agua a la entrada se conservará en la salida, ya sea en forma líquida o en forma gaseosa, así que:

$$F_{liquid\ water\ in} = F_{liquid\ water\ out} + G_{evaporated} \quad (9)$$

Respecto al flujo gaseoso, como el aire de secado y el vapor de agua, tomando solo al gas sin agua, no habrá transferencia de masa hacia los sólidos, ya que solo se transfiere agua, mas no dicho gas; por lo tanto, el flujo de entrada será el mismo que el de salida; pero, si se toma al aire húmedo, primero entrará un flujo de aire con



una cierta humedad (se toma como aire seco), más otro flujo de agua proveniente de aquella evaporada de los sólidos, la cual será transferida al aire seco, obteniendo a la salida un aire húmedo; en otras palabras, esto representa que el flujo de agua en forma de vapor, al final será igual al que entra con el aire (vapor de agua) más la añadida por los sólidos; entonces:

$$G_{dry\ air\ in} = G_{dry\ air\ out} \quad (10)$$

$$G_{water\ vapor\ in} + G_{evaporated} = G_{water\ vapor\ out} \quad (11)$$

(Green & Perry, 2008)

$F_{dry\ sheet\ in}$ y $F_{dry\ sheet\ out}$: masa de la alimentación a la entrada y salida, respectivamente.

$F_{liquid\ water\ in}$ y $F_{liquid\ water\ out}$: masa del agua líquida presente en la alimentación de entrada y salida, respectivamente.

$G_{evaporated}$: masa evaporada.

$G_{dry\ air\ in}$ y $G_{dry\ air\ out}$: masa del aire de secado (aire seco) a la entrada y salida, respectivamente.

$G_{water\ vapor\ in}$ y $G_{water\ vapor\ out}$: masa de vapor de agua a la entrada y salida, respectivamente.

Para estas ecuaciones, los contenidos de humedad en base húmeda a la entrada y salida de los sólidos son:

$$W_{w\ in} = \frac{F_{liquid\ water\ in}}{F_{liquid\ water\ in} + F_{dry\ sheet\ in}} \quad (12)$$

$$W_{w\ out} = \frac{F_{liquid\ water\ out}}{F_{liquid\ water\ out} + F_{dry\ sheet\ out}} \quad (13)$$

La relación entre el flujo total de aire, el flujo de aire seco y la humedad absoluta es:

$$G_{dry\ air} = G_{air} \frac{1}{1+Y} \quad (14)$$

La humedad absoluta de cada corriente de aire está dada por:

$$Y_{in} = \frac{G_{water\ vapor\ in}}{G_{dry\ air\ in}} \quad (15)$$

$$Y_{out} = \frac{G_{water\ vapor\ out}}{G_{dry\ air\ out}} \quad (16)$$

Balance de energía

La ley de *conservación de energía* postula que, toda la energía que entra a un proceso es igual a la que sale, más la que queda en el proceso (Geankoplis, 1998). Aunque la energía se manifiesta en muchas formas, en casos de ingeniería de proceso que, casi siempre son llevados a cabo a presión constante, como en el presente caso, solo se toma en cuenta la *Entalpía (H)* de los materiales (una forma de energía asociada con la energía interna, un tipo de energía química y, el trabajo realizado por o sobre el sistema) (Geankoplis, 1998). Así que, en el secado, la entalpía total en la entrada será igual a la entalpía total a la salida y el calor perdido al ambiente. Haciendo un balance detallado, la entalpía del agua líquida más la entalpía del aire seco, más la entalpía del vapor de agua y la entalpía de los sólidos secos a la entrada, será igual a la entalpía de cada componente a la salida, más el calor perdido al entorno; esto es:

$$H_{dry\ air\ in} + H_{water\ vapor\ in} + H_{dry\ sheet\ in} + H_{liquid\ water\ in} = H_{dry\ air\ out} + H_{water\ vapor\ out} + H_{dry\ sheet\ out} + H_{liquid\ water\ out} + \text{Calor perdido alrededor} \quad (17)$$

(Green & Perry, 2008)

Los subíndices contenidos en los símbolos corresponden a:

dry air in: aire de secado a la entrada.

water vapor in: vapor de agua de entrada (contenida en el aire seco).

dry sheet in: alimentación (sólidos) de entrada.

liquid water in: agua líquida de entrada (contenida en la alimentación).

dry air out: aire de secado a la salida (aire humedecido).

water vapor out: vapor de agua a la salida (aquella que entra con el aire más la evaporada desde el sólido).

dry sheet out: alimentación a la salida (sólidos secos).

liquid water out: agua líquida a la salida (contenida en los sólidos ya secos).

La pérdida de calor alrededor es despreciable para una primera aproximación. Las entalpías pueden ser calculadas de una referencia muy consistente; sin embargo, no hay forma de conocer la entalpía individual de reactivos y productos, por lo que en la práctica solo es posible medir la diferencia de sus valores, o sea, los cambios de entalpía para los materiales (Chang & Goldsby, 2017), así que también se puede usar el siguiente arreglo:

$$\Delta H_{dry\ air} + \Delta H_{water\ vapor} + \Delta H_{evaporacion} + \Delta H_{liquid\ water} + \Delta H_{dry\ sheet} = 0 \quad (18)$$

El cambio de entalpía para el secado se debe a la evaporación, la cual está dada por $\Delta H_{evaporación} = F_{masa\ evaporada} \lambda_w$, en donde $F_{masa\ evaporada}$ es el flujo de material evaporado, mientras que λ_w es el calor latente de vaporización del agua. El cambio de esta entalpía puede ser calculada directamente usando valores tabulares disponibles en la carta Psicrométrica de Grovesnor o el diagrama de Mollier (Apéndices 1-4) (Green & Perry, 2008).



Los términos en estas ecuaciones pueden ser evaluados usando,

$$\Delta H_{dry\ air} = G_{dry\ air\ in} C_{p,air} (T_{air\ in} - T_{air\ out}) \quad (19)$$

$$\Delta H_{water\ vapor} = G_{water\ vapor\ out} C_{p,water\ vapor} (T_{air\ in} - T_{air\ out}) \quad (20)$$

$$-\Delta H_{evaporacion} = -G_{evaporated} * \lambda = G_{evaporated} * \Delta H_{vap} \quad (21)$$

El signo negativo indica que se pierde entalpía desde los sólidos; es decir que, es un proceso exotérmico (libera calor al medio); de otra forma, también significa que el flujo de la masa evaporada ($G_{evaporated}$) sale desde el sólido.

$$\Delta H_{liquid\ water} = F_{liquid\ water\ out} C_{p,liquid\ water} (T_{sheet\ in} - T_{sheet\ out}) \quad (22)$$

$$\Delta H_{dry\ sheet} = F_{dry\ sheet} C_{p,sheet} (T_{sheet\ in} - T_{sheet\ out}) \quad (23)$$

C_p : calor específico correspondiente a cada componente (aire, vapor de agua, alimentación o sólidos y agua líquida)

$T_{0\ in}$ y $T_{0\ out}$: temperaturas de entrada y salida respectivamente, para cada componente descrito.

λ : Calor latente.

Transferencia de calor en secadores

El calor es energía transferida, debido a la diferencia de temperaturas; es algo que ocurre muy comúnmente en los procesos químicos; además, puede suceder acompañado de varias operaciones unitarias tales como el secado, la destilación, la combustión y la evaporación (Geankoplis, 1998); por eso, empezaremos hablando de los fundamentos de este fenómeno; por ejemplo, en el secado, el calor que fluye desde el aire caliente hacia los sólidos, facilita llevar a cabo la evaporación del agua contenida en ellos al hacer que ella ebulle. Dicha transferencia, debido a la fuerza impulsora que produce el diferencial de temperaturas, hace que el calor fluya desde el punto más caliente hasta el más frío, ya que los cuerpos siempre tienden naturalmente a mantener el equilibrio térmico con su entorno; este se va alcanzando hasta que aquella diferencia sea mínima.

Hay tres métodos de transferencia de calor: por **conducción**, **convección** y **radiación**.

Conducción: en este mecanismo, el calor puede ser conducido a través de sólidos, líquidos y gases, pues aquí se transfiere energía cinética entre partículas adyacentes; por ejemplo, las moléculas más calientes en un gas (más energía y movimiento) ceden energía a moléculas vecinas que están con menor grado energético, mientras

que, en los sólidos (metálicos) hay transferencia entre los electrones libres. Como ejemplos están: la transferencia a través de paredes o intercambiadores de calor en refrigeradores, el enfriamiento del suelo durante el invierno, el calentamiento de un recipiente metálico mediante una resistencia térmica, incluso el calentamiento de la misma resistencia, etc. (Geankoplis, 1998). El flujo de calor por conducción en una dirección x se rige por la *Ley de Fourier*:

$$Q = -KA \frac{dT}{dx}$$

Donde Q es la velocidad a la que se transfiere el calor; K es la conductividad térmica, una propiedad térmica de los materiales (Apéndice 5-14); dT refiere al diferencial de temperatura entre los puntos de conducción; A es el área perpendicular a la dirección de la conducción.

Convección: es la transferencia de energía por radiación y conducción en un medio fluido en movimiento, así que este movimiento es una parte esencial en la transferencia convectiva. Aclárese que, también puede haber intercambio de calor por este mecanismo entre una superficie sólida y un fluido. Además, hay dos métodos convectivos: la *convección natural*, en donde el fluido circula naturalmente por la diferencia de densidades en él, a causa del diferencial de temperaturas, mientras en la *convección forzada* el flujo se genera de forma artificial (con bombas o ventiladores). Aquí es muy importante determinar el *coeficiente convectivo de transferencia de calor* (h), el cual limita la velocidad con la que cambia la temperatura, aunque es un valor que varía con las condiciones del proceso; más adelante se verá cómo estimar este valor para el proceso de secado. Se produce, por ejemplo, en la pérdida de calor en el radiador de un automóvil, cuando un ventilador circula aire al enfriar un líquido en un recipiente soplando aire sobre él, etc. La convección entre una superficie y un fluido se rige por la *Ley de Enfriamiento de Newton*:

$$q = h(T_{superficie} - T_{fluido})$$

En donde q es el flujo de calor; h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

Radiación: en este fenómeno se puede transferir energía a través de un medio transparente y vacío; es decir, no se requiere un medio físico, así que se produce a distancia. Se transporta mediante ondas electromagnéticas, por lo cual se rige con las leyes de la luz. El calor solar transportado hacia la tierra es un ejemplo; también, el calentamiento con calentadores eléctricos, etc. Más adelante en la sección de *Secado Solar* se hablará detalladamente sobre este tema.

Como hemos visto, este fenómeno tiene mucha relevancia, ya que se presenta en una gran cantidad de procesos que implican calor y, el secado no es la excepción, ya que aquí se transfiere calor de varias formas, desde las paredes metálicas calentadas hacia los sólidos, desde el aire caliente circulado sobre los sólidos, desde los rayos



solares incidentes sobre el material e, incluso, desde las corrientes de aire calentado por el sol sobre los sólidos. Dado que hay muchas formas como este tipo de intercambio energético se presenta en la operación de secado, se verá a detalle todo este tema, por su importancia práctica en los cálculos para el diseño de equipos.

En el secado se da el fenómeno de difusión a través de los sólidos, lo cual no es una limitante; el problema es la transferencia de calor. En la mayoría de secadores, la temperatura superficial depende de la velocidad de transferencia de masa y de calor, pero muchos de ellos son diseñados solo con base en cálculos de transferencia de calor (McCabe et al., 2007).

Es necesario calcular la *carga térmica*, pues el calor se debe aplicar a un secador para lograr lo siguiente (McCabe et al., 2007):

1. Calentar la alimentación (sólidos y líquidos) hasta la temperatura de evaporación.
2. Evaporar el líquido.
3. Calentar los sólidos hasta su temperatura final.
4. Calentar el vapor hasta su temperatura final.
5. Calentar el aire u otro gas agregado hasta su temperatura final.

(McCabe et al., 2007)

Los puntos 1, 3, 4 y 5 son despreciables, en comparación con el 2. Si X_a y X_b son los contenidos de humedad inicial y final, la cantidad de calor transferido por unidad de masa de sólido, resultado de las bases matemáticas de balance y transferencia de calor -lo cual omitiremos-, es:

$$\frac{q_T}{\dot{m}_s} = c_{ps}(T_{sb} - T_{sa}) + X_a c_{pL}(T_v - T_{sa}) + (X_a - X_b)\lambda + X_b c_{pL}(T_{sb} - T_v) + (X_a - X_b)c_{pv}(T_{va} - T_v) \quad (24)$$

\dot{m}_s : masa de sólidos secos

T_{sa} : temperatura de la alimentación

T_v : temperatura de vaporización

T_{sb} : temperatura final de los sólidos

T_{va} : temperatura final del vapor

λ : calor latente de vaporización

c_{ps}, c_{pL}, c_{pv} : calores específicos del sólido, líquido y vapor, respectivamente.

$$q_T = \dot{m}_g c_{sb}(T_{hb} - T_{ha}) \quad (25)$$

\dot{m}_g : flujo másico del gas seco (aire).

c_{sb} : calor húmedo del gas a la humedad de entrada.

T_{hb}, T_{ha} : temperaturas del gas caliente (aire) de salida y entrada, respectivamente.

La transferencia convectiva de calor de la corriente de gas al sólido es:

$$q = hA(T_{ha} - T_s) \quad (26)$$

h : coeficiente de transferencia de calor por convección

A : área de secado expuesta

T_s : Temperatura del sólido

Para muchos cálculos de diseño de equipos, se supone que únicamente hay transferencia por convección, ya que comúnmente se usa solo fluido caliente para secar; por lo tanto, los otros mecanismos actúan en mínimo grado. Sin embargo, al interferir igualmente los otros métodos de transferencia de calor sobre los sólidos, se agrega al balance de calor, según corresponda su modelo matemático:

$$q = q_C + q_K + q_R$$

Donde q_C es el calor transferido por convección, q_K por conducción y q_R por radiación.

Cinética del secado

La cinética del secado (velocidad o rapidez con que un material se seca) determina el tamaño del equipamiento de secado, lo cual afecta directamente el costo de operación de un proceso de secado. La velocidad de secado también puede influir la calidad del producto, ya que pueden ocurrir otros fenómenos simultáneos (Green & Perry, 2008). Con el fin de fijar horarios de secado y el tamaño del equipo, es necesario saber el tiempo que se requerirá para secar una sustancia a partir de un contenido de humedad a otro en condiciones específicas; también se desea calcular el efecto que tendrán las condiciones del proceso en el tiempo de secado (Treybal, 2007). Pero, primero, empecemos conociendo, sin extendernos, los mecanismos por los que se mueve la humedad a través de los sólidos, ya que es la base fundamental de que el secado ocurra, para luego tratar sobre la cinética del proceso como tal.

Mecanismos de transporte de humedad dentro de sólidos

El secado de un sólido requiere que la humedad se transporte hacia la superficie de este material, por lo que hay varios mecanismos con los que esto puede suceder:

- **Difusión de humedad a través de sólidos:** la difusión es un proceso molecular llevado a cabo por moléculas individuales que deambulan aleatoriamente



en los materiales o componentes implicados, pues si todas las moléculas de agua son libres de migrar, ellas tenderán a difundirse desde una región de mayor concentración de humedad a una de menor concentración, por lo cual esto irá reduciendo el gradiente (diferencial) de humedad entre las regiones comprometidas hasta igualar dichas concentraciones, con el fin de alcanzar el equilibrio entre ambos (Green & Perry, 2008). Este fenómeno casi siempre ocurre en sólidos no porosos en los que se genera soluciones de una sola fase con la humedad, como una pasta, un jabón, gelatina y pegamento; aunque también ocurre en el secado de las últimas porciones de humedad en arcillas, harinas, madera, cuero, papel, almidones y textiles (Geankoplis, 1998).

- **Convección de humedad dentro de un líquido o pasta:** si una solución fluida se está secando en un sólido, aquí el líquido en movimiento dentro del material lleva o transporta más humedad hacia la superficie (Green & Perry, 2008).
- **Evaporación de humedad dentro del sólido y transporte de gas fuera del sólido por difusión y/o convección:** la evaporación puede ocurrir dentro de un sólido, si este está en punto de ebullición (hirviendo) o es poroso y, en efecto, el vapor debe salir del material (Green & Perry, 2008).
- **Flujo capilar de humedad en un medio poroso:** la reducción de la presión del líquido dentro de los pequeños poros debido a *fuerzas de tensión superficial*, causa que el líquido fluya en medios porosos por acción capilar, lo que se conoce como *capilaridad* (Green & Perry, 2008). A medida que se evapora el agua, se forma un menisco de líquido en cada poro del interior del sólido, lo que origina las fuerzas capilares por la *tensión interfacial* entre el agua y el sólido, impulsando así el desplazamiento del agua a través de los poros hacia la superficie (Geankoplis, 1998).

Curvas de velocidad de secado

Una curva de secado describe la cinética de secado y cómo cambia durante este proceso, pero esta curva es afectada por las propiedades del material, el tamaño o espesor del material de secado y, por las condiciones del proceso (Green & Perry, 2008). A partir de datos de humedad se puede graficar una curva del contenido de humedad en función del tiempo (Figura 13); esta será directamente útil para determinar el tiempo necesario para secar grandes lotes en las mismas condiciones de secado. Se puede obtener mucha información si los datos se convierten en flujos (o fluxes) de secado expresados como R (masa/(tiempo*área)) y, son graficados contra el contenido de humedad (Figura 14). Esto puede hacerse midiendo las tangentes trazadas a la curva de la Figura 6 o, determinando a partir de la curva, pequeños cambios en el contenido de humedad ΔX para los pequeños cambios de tiempo $\Delta \theta$ correspondientes (Treybal, 2007).

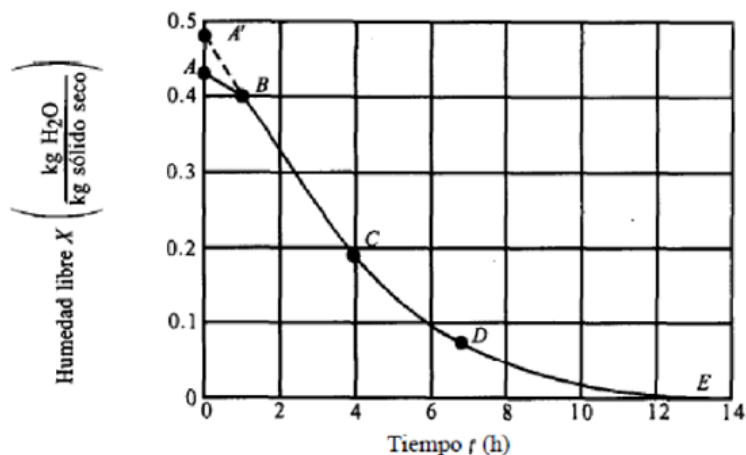


Figura 13
 Curva típica del contenido de humedad libre (eje Y) vs. el tiempo de secado (eje X)
 Fuente: Geankoplis (1998)

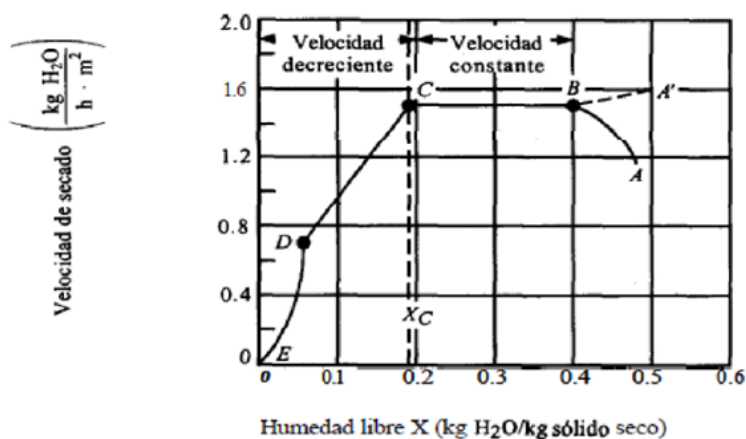


Figura 14
 Curva típica de la velocidad de secado R (eje Y) vs. el contenido de humedad libre (eje X)
 Fuente: Geankoplis (1998)

Nota: Aquí se expresa las variaciones de la velocidad de secado en condiciones de secado constantes.

Entonces, para determinar la velocidad de secado, se identifica primero dos zonas importantes: la velocidad constante y la velocidad decreciente de secado, las cuales se detallará más adelante. Cuando las condiciones de secado varían, la velocidad decreciente puede graficar diferente a como se presenta en la Figura 14 (Treybal, 2007). La velocidad de secado se expresa así:



$$R = -\frac{S_s dX}{A d\theta} \quad (27)$$

(Geankoplis, 1998; McCabe et al., 2007; Treybal, 2007).

S_s : Masa de sólido seco usado

X : contenido de humedad

θ : tiempo

A : área superficial de secado

Esta expresión está indicando cómo va cambiando el contenido de humedad en el tiempo, para una cierta carga de sólido.

Para un periodo determinado de tiempo, R es:

$$R = -\frac{S_s \Delta X}{A \Delta\theta} = \frac{S_s (X_1 - X_2)}{A (\theta_1 - \theta_2)} \quad (28)$$

(Geankoplis, 1998; Treybal, 2007)

Velocidad constante: en este período la velocidad de secado es constante y se refleja en una forma lineal plana en la curva, como se puede ver en la Figura 14. En la curva se presenta un punto de Humedad Crítica, marcado como el punto C en la gráfica, la cual consiste en el valor de humedad en donde comienza la velocidad de secado decreciente; por lo tanto, puede tomarse como el valor final de humedad para la velocidad constante; entonces:

$$R_c = -\frac{S_s (X_1 - X_c)}{A (\theta_1 - \theta_2)} \quad (29)$$

X_c : Humedad crítica

(Geankoplis, 1998; McCabe et al., 2007; Treybal, 2007)

La velocidad constante también se puede expresar a partir de las correlaciones desarrolladas para Evaporación desde la superficie de un líquido, con cálculos basados en la transferencia de masa o *transferencia de calor*, de la siguiente manera:

$$\dot{m}_v = \frac{M_v k_y (y_i - y)}{(1-y)_L} A \quad (30)$$

$$\dot{m}_v = \frac{hA(T_h - T_s)}{\lambda_s} \quad (31)$$

\dot{m}_v : locidad de evaporación

T_h, T_s : temperatura del gas y de la superficie de contacto, respectivamente. T_s es también definida como temperatura de bulbo húmedo T_w y, se puede tomar como la temperatura del sólido para cuestiones de cálculo.

λ_s : calor latente de vaporización a T_s

h : coeficiente de transferencia de calor

k_y : coeficiente de transferencia de masa

y_i : fracción molar del vapor en la superficie de contacto entre el sólido y el gas

y : fracción molar del vapor en el gas

$(1 - y)_L$: valor medio logarítmico entre (1-y)

Dado que, la *ecuación (30)* es bastante tediosa para cuestiones de práctica, no vamos a preocuparnos por aquellos valores que no han sido vistos aquí como el coeficiente k_y o el valor $(1 - y)_L$, pues este modelo de transferencia de masa no va a ser tratado en este apartado. Sin embargo, la *ecuación (31)* es más sencilla; además, en la literatura se dispone de valores como h y λ_s , incluso específicos para el grano de café, el cual es el enfoque de este libro; así que, la velocidad de secado constante es simplemente:

$$R_c = \frac{\dot{m}_v}{A} = \frac{h(T_h - T_s)}{\lambda_s} \quad (32)$$

(McCabe et al., 2007)

Velocidad decreciente

Quando se presenta un punto en el que ya no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua, se ha llegado a la humedad crítica (punto C en la gráfica de la Figura 14), donde la velocidad de secado (R) va decayendo; aquí, la superficie ya no está completamente mojada y la porción humedecida va disminuyendo hasta quedar totalmente seca. La causa de este período decreciente puede deberse a la presencia de posibles fenómenos como *la difusión de la humedad a través del sólido*, *el movimiento capilar en sólidos porosos* o, incluso, *el efecto de la contracción*, que consiste en el encogimiento del sólido al eliminarse la humedad; aunque los sólidos rígidos no se contraen, sí lo hacen los materiales coloidales y fibrosos como los productos vegetales o alimenticios; pero, al ocurrir esto se va formando una capa dura en la superficie sólida, generando así una impermeabilidad al flujo del líquido o vapor, con lo cual disminuye la velocidad de secado. Debido a estos eventos, esta velocidad varía a través del tiempo en dirección negativa. Entonces, si el secado ocurre bajo condiciones cambiantes de R , se hace lo siguiente:

Para cualquier forma de la curva decreciente de velocidad, la ecuación puede integrarse gráficamente mediante la determinación del área bajo la curva de $1/R$ como ordenada y X como abscisa.



$$R = mX + b \quad (33)$$

$$m = \frac{N_1 - N_2}{X_1 - X_2} \quad (34)$$

N_1 y N_2 : velocidades de secado en los puntos 1 y 2

$$\theta = \frac{S_s}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dX}{mX+b} = \frac{S_s}{mA} \ln \frac{mX_1+b}{mX_2+b} = \frac{S_s(X_1-X_2)}{A(N_1-N_2)} \ln \frac{N_1}{N_2} \quad (35)$$

Otro método aproximado puede ser, suponiendo que la velocidad R es proporcional a la humedad, entonces,

$$R = aX \quad (36)$$

De la Ecuación (27) se obtiene que,

$$aX = -\frac{S_s}{A} \frac{dX}{d\theta} \quad (37)$$

Integrando el contenido de humedad crítico X_c y el final X_2 se obtiene

$$\ln \frac{X_c}{X_2} = \frac{aA}{S_s} (\theta_T - \theta_c) \quad (38)$$

$$(\theta_T - \theta_c) = \frac{S_s X_c}{AR_c} \ln \frac{X_c}{X_2} \quad (39)$$

$$\theta_T = \frac{S_s}{AR_c} \left(X_1 - X_c + X_c \ln \frac{X_c}{X_2} \right) \quad (40)$$

Sin embargo, si la curva de secado muestra una caída muy pronunciada en la velocidad de secado en el período decreciente, esta última expresión no es aplicable.

Predicción de los coeficientes de transferencia de calor

Para predecir el R_c en la ecuación (32), se debe conocer el valor del coeficiente de transferencia de calor h , el cual depende de la mecánica del fluido (aire). Geankoplis (1998) expone que:

Primero, es esencial conocer los siguientes números adimensionales, los cuales establecen qué tipo de flujo tiene el gas de secado (laminar o turbulento): Número de Reynolds (Re) y Número de Prandtl (Pr) y, mediante el número de Nusselt (Un) puede ser calculado el h . Estos son definidos así:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (41)$$

$$Re = \frac{Lv\rho}{\mu} \quad (42)$$

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (43)$$

Para convección forzada se tiene que:

Flujo laminar, $Pr > 0,7$ y $Re < 3 \times 10^5$

$$Nu = 0,332Re^{0,5}Pr^{1/3} \quad (44)$$

Flujo turbulento, $Pr > 0,7$ y $Re < 3 \times 10^5$

$$Nu = 0,664Re^{0,5}Pr^{1/3} \quad (45)$$

Flujo turbulento, $Pr > 0,7$ y $Re > 3 \times 10^5$

$$Nu = 0,0366Re^{0,8}Pr^{1/3} \quad (46)$$

L : longitud de la placa o superficie de secado

k : conductividad térmica del fluido (aire) a las condiciones de proceso

v : velocidad del fluido

ρ : densidad del fluido

μ : viscosidad del fluido

c_p : calor específico del fluido

Así que, conociendo el valor de Un , se puede despejar h de la ecuación (41).

Para condiciones del aire en un flujo **paralelo** a la superficie de secado, temperatura de **45 a 150 °C**, un flujo másico G de **2450 a 29300** $\frac{Kg}{h \cdot m^2}$ o, una velocidad del aire de **0,61 a 7,6 m/s**,

Geankoplis (1998), expone:

$$h = 0,0204G^{0,8} \quad (\text{en unidades del SI}) \quad (47)$$

Para un flujo del aire **perpendicular** a la superficie de secado, un G de **3900 a 19500** $\frac{Kg}{h \cdot m^2}$ o a una velocidad de **0,9-4,6 m/s**, se tiene que:

$$h = 1,17G^{0,8} \quad (\text{en unidades del SI}) \quad (48)$$



Treybal (2007) establece para un flujo del aire **paralelo** a la superficie de secado:

$$h = 5,90 \frac{G^{0,71}}{de^{0,29}} (SI) \quad (49)$$

$$de = \frac{4(\text{sección transversal al flujo})}{\text{Perímetro}} \quad (50)$$

En donde, a partir de un estudio detallado del secado de arena sobre platos (Treybal, 2007) se ha obtenido lo siguiente para su uso:

$$h = 14,3G^{0,8} (SI) \quad (51)$$

Y para un flujo **perpendicular**, con un G de 1,08 a 5,04 $\frac{Kg}{s \cdot m^2}$ (0,9 a 4,4 m/s):

$$h = 24,2G^{0,37} (SI) \quad (52)$$

Otra correlación usada en un **secador solar indirecto con colector solar** en investigaciones previas (Roche et al., 2017), es la siguiente:

$$h = 0,0572G^{0,8} (SI) \quad (53)$$

Estas correlaciones son útiles como predicciones aproximadas, pero, es imprescindible la determinación de los valores de las variables en el proceso de secado a través de las mediciones experimentales, para factores o condiciones específicos de la operación; por ejemplo, cada producto tiene una humedad de equilibrio propia, lo cual es un factor que condiciona la velocidad de secado.

Efecto de las variables de proceso en la velocidad constante

Como se comentó en el párrafo anterior, es mejor hacer estudios experimentales para obtener correlaciones para el cálculo de h , aunque las anteriores expresiones son muy útiles a la hora de predecir los efectos de cambios en las variables, cuando se cuenta con datos experimentales limitados. Por lo tanto, Geankoplis (1998) estableció que se debe tener en cuenta los siguientes efectos:

- *La velocidad del aire:* cuando la transferencia de calor no se da por conducción y radiación, la velocidad de secado constante es proporcional a h (a $G^{0,8}$, como se expresa en las ecuaciones anteriores), aunque si hay conducción y radiación, la velocidad del gas no es muy importante.

- *Humedad del gas*: si la humedad del gas disminuye para determinado valor de temperatura del gas, la temperatura de la superficie de contacto T_s (o T_w) también disminuye, así R_C aumenta.
- *Temperatura del gas*: si la temperatura del gas aumenta, la temperatura de la superficie de contacto T_s también aumenta en un cierto grado y, por consiguiente, R_C aumenta.
- *Espesor del lecho sólido que se está secando*: cuando solo hay transferencia de calor por convección, R_C es independiente del espesor del sólido, aunque el tiempo necesario para secar entre las humedades X_1 y X_2 será directamente proporcional a dicho espesor.
- *Efecto experimental de las variables*: los datos obtenidos de resultados experimentales llevan a confirmar las conclusiones señaladas para los efectos de humedad del gas, temperatura del gas, espesor del lecho sólido y el diferencial de temperatura ($T_h - T_s$).

Es recomendable interpretar las correlaciones matemáticas anteriores, pues esto da claridad sobre cómo se rige el secado, cuáles son y, de qué forma los factores que intervienen en el proceso lo condicionan. Hagamos hincapié en un análisis según lo visto arriba: primero, se debe tener en cuenta que la transferencia de masa y calor, al igual que la velocidad de secado o la evaporación, son diferentes al comportamiento de la temperatura; es decir, si la velocidad de secado es alta, no quiere decir que la temperatura del sólido también subirá en gran proporción; al contrario, si las otras variables se mantienen constantes, bajará; asimismo con el calor transferido, aunque esta temperatura también dependerá de una gran cantidad de condiciones. Ahora veamos: la velocidad de secado es directamente proporcional a h , analizando el número de Nusselt, h aumentará si el valor Nu y de la conductividad térmica del fluido aumentan, mientras disminuye si la longitud de la superficie de secado crece, así que la velocidad de secado o evaporación crecerá, pero decrecerá si el calor latente de vaporación λ_s aumenta, pues esto indica que, para un valor alto de λ_s , se necesita más calor para evaporar una cantidad de agua; además, por la influencia de Nu hay muchas variables que intervienen, como las propiedades reológicas del fluido (son propiedades mecánicas de un fluido de las que hacen parte la viscosidad μ , la densidad ρ y la velocidad v), con el número de Reynolds Re , y aquellas térmicas (calor específico C_p y conductividad térmica k), con el número de Prandtl Pr .

Como se puede ver, el secado es un proceso que depende de muchos factores, los cuales determinan la velocidad con la que un material se seca; por ende, se hace indispensable tenerlos muy en cuenta. Hasta aquí se ha visto que, las bases para calcular los cambios en la humedad del gas y del sólido provienen del balance de masa del sistema, mientras que el calor transferido se basa en el balance de energía y, en este caso, usamos el cambio de entalpía para cada componente, aunque hay tres sistemas de transporte de calor, que son: la conducción, convección y radiación. Conocemos además que, el secado se basa en la evaporación del agua, pero también se da, gracias a los mecanismos de difusión molecular del líquido en el sólido, capilaridad dentro del sólido, entre otros; así que, la cinética de secado es proporcional de forma directa a factores como el coeficiente h y el diferencial de temperaturas implicadas en el proceso (del gas y del sólido); por lo tanto, cuando



se usa una temperatura alta en el gas, el diferencial será mayor y así, la velocidad de secado aumentará. También hay otros factores, ya mencionados: si la humedad del gas es muy baja, el secado será más rápido; por esto se usa gases lo bastante secos o calientes para que el proceso sea más eficiente, además de otras variables que pueden condicionar el secado, las cuales fueron analizadas en el párrafo anterior.

Una vez comprendida esta información, ya seremos capaces de planear condiciones para que el proceso de secado sea más eficiente, variando algunos factores que hagan que las velocidades de secado aumenten, así que, al tener conceptualizados los fundamentos del proceso general, se puede ir adentrando en campos específicos como el que se verá a continuación, sobre el secado solar.

02

Secado solar



En el secado, el componente más importante debido a su utilidad es la energía calórica, que lleva a cabo el proceso al evaporar el agua del producto, aunque hay métodos que no implican transferencia de calor, sino, netamente de masa, como es el caso de los deshumidificadores, que retiran humedad por medio de adsorción; sin embargo, el secado mediante uso de calor, mayormente mediante aire caliente, es el más usado y eficiente.

Entonces, la cuestión siguiente es pensar cuál es el tipo de energía a utilizar, pues hay varias opciones, como la energía termoquímica (combustibles fósiles, por ejemplo), energía eléctrica (para las resistencias termoeléctricas) y también, la energía de radiación (radiación solar). En la práctica deberíamos optar por una fuente de energía que sea barata, eficiente y amigable con el medio ambiente; así que, la energía solar es una muy buena opción, por su gran disponibilidad y reducido efecto ambiental, ya que actualmente hay muchos mecanismos para aprovecharla; además, en las zonas de producción de café, normalmente zonas cálidas con buenas cantidades de radiación solar a lo largo del año, el sol es la principal fuente de calor, por su bajo costo.

¿Cómo se produce la energía solar? En el núcleo del sol ocurre un proceso de fusión nuclear, una serie de reacciones químicas exotérmicas; esto es, que al ocurrir esta fusión se libera una gran cantidad de energía, la cual es transportada por radiación a través del espacio, contenida en partículas subatómicas llamadas fotones; esto se conoce como la **Radiación Solar**. La superficie del sol posee 70000 a 80000 KW/m² de intensidad de radiación (Tiwari, 2016), de la cual, una pequeña fracción llega a la tierra para ser aprovechada.

¿Cómo se aprovecha esta energía? Una forma es, mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos que convierten la radiación solar en electricidad; la otra forma es la obtención de energía térmica o calórica, que tiene varios métodos para generarla; aquí, algunos ejemplos: calentamiento con la radiación solar directa, absorción y almacenamiento de calor, concentración de la radiación hacia un punto, entre otros.

En este capítulo nos enfocaremos en la energía térmica, así que será indispensable tratar más detalladamente sobre la radiación solar; se verá las formas como llega a la tierra y se distribuye y, las expresiones matemáticas que permiten calcular sus valores de acuerdo con una serie de condiciones. Posteriormente, se dará a conocer algunos métodos para absorber y almacenar la energía solar térmica (recolección solar) y, también, mecanismos de concentración solar, puesto que estos son métodos más eficientes que el calentamiento directo; no obstante, pueden ser más efectivos si son combinados; todo depende de lo que se requiera, ya que, igualmente influye la sensibilidad del producto a secar a la temperatura por cuestiones de calidad. Aunque la energía solar térmica tiene muchas aplicaciones, solo se tratará su funcionamiento en el proceso de secado, pues, como veremos, el calor generado será usado para obtener aire caliente.

Radiación solar

Como ya se mencionó, la *radiación solar* es un mecanismo para transportar energía proveniente del sol mediante ondas electromagnéticas viajando a través del espacio hasta llegar a la tierra; un tipo de ondas que se compone de fotones, partículas energizadas que emiten luz. Gracias a este fenómeno, es posible obtener la energía solar para convertirla en calor necesario para el proceso de secado, pero veremos que no toda la fracción que llega a la atmósfera terrestre alcanza la superficie de trabajo, ya que, parte de la radiación solar es retenida en la atmósfera; además, la porción que llega dependerá de factores ambientales y climáticos de la zona respectiva; así que, para hacer cálculos acertados de la cantidad de energía que se puede obtener, es imprescindible realizar una serie de deducciones matemáticas para las fracciones de radiación existentes, de acuerdo con aquellas variables locales, lo cual se verá más adelante.

En lo que respecta al **secado solar**, la caracterización de la radiación solar disponible en el lugar resulta fundamental para el diseño y control óptimo del funcionamiento de los dispositivos de secado, con lo cual es necesario definir los diferentes conceptos. La forma como se define este término es la siguiente:

- *Irradiancia (potencia de la radiación)*: es la energía incidente sobre una superficie por unidad de tiempo y de área entregada por el sol. Se representa habitualmente por I y, sus unidades en el Sistema Internacional (S.I.) son: W/m^2 (Montero, 2005).
- *Irradiación (energía de la radiación)*: es la energía incidente sobre una superficie por unidad de área, durante un determinado período de tiempo. Se identifica generalmente por H y sus unidades en el S.I. son J/m^2 (Montero, 2005).

Componentes de la Radiación Solar

Radiación solar extraterrestre y la constante solar

Antes de llegar a la superficie terrestre, la radiación sufre una serie de transformaciones al atravesar la atmósfera; a la radiación solar existente antes de entrar en la atmósfera se le denomina *Radiación Solar Extraterrestre*. La irradiancia total que incide sobre una superficie normal a los rayos solares situada en el exterior de la atmósfera, I_0 , varía según la distancia al sol y los días del año, con lo cual se define la constante solar, I_{cs} como, el valor medio de la radiación extraterrestre, al cual el *World Radiation Center* le ha dado el valor más aceptado de $1367 W/m^2$ (Montero, 2005).

Irradiación solar en la superficie terrestre

Como consecuencia de las diferentes regiones y composición de la atmósfera, no toda la energía extraterrestre llega a la superficie de la tierra, modificándose su naturaleza y, sobre todo, su componente direccional (Duffi y Beckman, 1991; Tiwari, 2002). Así, la **radiación global**, I_g , que incide sobre una superficie inclinada en la tierra, consta de tres componentes:



- *Radiación directa (I_B)*: proviene directamente del disco solar sin sufrir alteraciones, suponiendo esta, el 90 % de la radiación global en los días muy soleados y, prácticamente nula, en días cubiertos (Montero, 2005).
- *Radiación difusa (I_D)*: es la energía dispersada por los componentes atmosféricos (Meizoso, 2012; Montero, 2005).
- *Radiación reflejada (I_R)*: también denominada albedo; llega a una superficie inclinada, procedente de la reflexión de la radiación solar en el suelo (Montero, 2005)

...donde

$$I_G = I_B + I_D + I_R \quad (54)$$

Variables básicas de la radiación solar

Declinación solar (δ): el eje de rotación de la tierra forma, con el eje normal al plano de la elíptica, un ángulo constante de $23,5^\circ$; debido a esto, el ángulo de los rayos solares con el plano del ecuador, denominado *declinación solar*, varía entre $23,45^\circ$ (verano) y $-23,45^\circ$ (invierno), donde:

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left(360 \times \frac{284+n}{365} \right) \quad (55)$$

(Meizoso, 2012; Montero, 2005).

n : número de día en el año ($n = 1$ para 1° de enero y $n = 365$ para 31 de diciembre).

Ángulo horario wh : es el formado en el ecuador, comprendido entre el plano meridiano de la tierra que contiene al sol y, el que contiene al observador del lugar.

$$wh = nh \times 15^\circ \quad (56)$$

...siendo nh , el número de horas antes o después del medio día solar, negativo para horas antes (<12) y positivo después (>12) (Meizoso, 2012; Montero, 2005).

Ángulo de incidencia θ : formado por la dirección de la radiación solar directa y la normal en un punto en la superficie considerada, donde:

$$\cos\theta = \text{sen}l \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}l \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{cos}wh \quad (57)$$

l : latitud ($^\circ$) (Meizoso, 2012; Montero, 2005).

Radiación sobre un plano inclinado

La mayor parte de los datos disponibles sobre radiación solar se da para superficie horizontal, por lo que es necesario conocer aquella que incide sobre un ángulo inclinado β , procediendo con el modelo propuesto por Alaiz (1981). En primer lugar, se debe determinar la *exposición solar extraterrestre sobre un plano horizontal I_0* en cualquier día del año, n , de la siguiente manera:

$$I_0 = I_{CS} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{2\pi n}{365} \right) \right) \cdot \cos\theta \quad (58)$$

$$I_{CS} = 1367 \text{ W/m}^2$$

Para determinar los componentes I_B y I_D se utiliza una serie de correlaciones matemáticas, donde se define el **coeficiente de transmisión total atmosférico** k_T como:

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (59)$$

Por otro lado,

$$k_B = \frac{I_B}{I_0} \quad (54) \quad \text{y} \quad k_D = \frac{I_D}{I_0} \quad (60)$$

Meizoso (2012) también propone la siguiente correlación:

$$\frac{I}{I_0} = K_r (T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})^{0,5} \quad (61)$$

$$K_r = K_{ra} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0,5} \quad (62)$$

$T_{m\acute{a}x}$ y $T_{m\acute{i}n}$: temperaturas máxima y mínima local

K_{ra} : coeficiente empírico, 0,17 para zonas de interior y 0,2 para zonas de costa (Meizoso, 2012).

P_0 : presión atmosférica al nivel del mar, 101,3250 KPa

P : presión atmosférica local:

$$P = P_0 e^{\frac{-Mgh}{RT}} \quad (63)$$

M : masa molar del aire = 28,9644

R = 8,31432

h : altura sobre el nivel del mar (msnm)

Las correlaciones más utilizadas entre la radiación difusa y global son las usadas en Alaiz (1981), Duffi & Beckman (1991), Montero (2005), Tiwari (2002):

$$\frac{I_D}{I} = 1 - 0,09k_T \quad \text{para } k_T \leq 0,22 \quad (64)$$

$$\frac{I_D}{I} = 0,951 - 0,16k_T + 4,3880k_T^2 - 16,6380k_T^3 + 12,3360k_T^4 \quad \text{para } 0,22 < k_T \leq 0,8 \quad (65)$$



$$\frac{I_D}{I} = 0,165 \quad \text{para } k_T > 0,8 \quad (66)$$

Además,

$$I_B = I - I_D \quad (67)$$

Los valores estimados con estas expresiones son para un plano horizontal; es decir, $\beta = 0$ o, expresado de otra manera: $I(0), I_B(0), I_D(0)$.

La radiación global incidente sobre una superficie inclinada a un ángulo β se expresa así:

$$I(\beta) = I_G = I_B(\beta) + I_D(\beta) + I_R(\beta) \quad (68)$$

Cada componente se puede estimar mediante expresiones de investigaciones previas (Abella, 2001; Meizoso, 2012):

$$I_B(\beta) = I_B(0) \cdot \cos\theta \quad (69)$$

$$I_D(\beta) = I_D(0) \cdot \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) \quad (70)$$

$$I_R(\beta) = I(0) \cdot \rho \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (71)$$

ρ : coeficiente de albedo; se puede tomar como $\rho = 0,2$ (Abella, 2001; Meizoso, 2012).

Como ya se ha visto los conceptos fundamentales de la radiación solar encaminadas a la determinación cuantitativa de sus componentes, es suficiente para estar en capacidad de estimar las cantidades de energía solar aprovechable que llega a nuestra zona de trabajo, la superficie, según sean las condiciones locales y operacionales, utilizando una serie de variables, algunas ambientales-climáticas y otras calculadas teóricamente a partir de aquellas empíricas y todas estas expresiones matemáticas, con el pleno objetivo de obtener un valor estimado de la irradiación global que incide sobre un plano inclinado.

Ahora, es el momento de tratar sobre qué métodos se puede aplicar para capturar aquella energía incidente de la manera más óptima y, con las mínimas pérdidas energéticas, pensando que todo esto podrá ser usado en un proceso de secado de un producto como el café; de modo que, en consonancia con el objetivo, nos enfocaremos hacia el método de *Recolección de energía solar*, mecanismo que capta dicha energía, minimiza sus pérdidas y, es transformada en calor transferido a algún fluido, para ser usado en procesos posteriores como el *secado solar*.

Recolección de energía solar

Para posibilitar el aprovechamiento de la energía solar aplicada al secado de materiales, existen distintos tipos de secadores, clasificados en: secadores solares directos, indirectos y, un híbrido de ambos, según la forma como se transfiere el calor. Adicionalmente, de acuerdo con la forma como la energía solar es utilizada y, a la circulación del aire dentro del mismo, son clasificados en: sistemas de secadores con energía solar activa y pasiva, que son los secadores con circulación natural y forzada (Weiss & Buchinger, 2016).

En los secadores solares directos, la energía solar que recibe el material procede directamente de los rayos de sol. En los indirectos, la energía solar que recibe el material es de forma indirecta, a través del aire, el cual recibe energía de los rayos de sol para aumentar su temperatura. Estos presentan un colector que se encarga de calentar el aire por medio de la energía de radiación solar (Roche et al., 2017). En los secadores de energía solar activa el aire que interactúa con el material a secar presenta una circulación forzada en su interior, mientras que en los secadores de energía solar pasiva el aire circula de forma natural en su interior (Montero, 2005). Cuando se pretende secar materiales biológicos, tales como granos de café, es conveniente utilizar secadores solares indirectos con circulación natural o con energía solar pasiva para evitar su deterioro (Roche et al., 2017); sin embargo, aquellos que usan el flujo de aire forzado, son más eficientes y controlables.

Se puede hablar de tres tipos de sistemas solares, según sea la disposición de los componentes del conjunto y, al modo de utilización de la energía solar:

- Secadores solares directos: en ellos, la radiación solar se recoge únicamente en la cabina o cámara de secado, revestida de algún material traslúcido que permita el paso de los rayos solares, los cuales serán transformados en energía calórica (Montero, 2005). Un claro ejemplo son los secadores tipo invernadero, como se ve en la Figura 15.
- Secadores solares indirectos: disponen de un colector solar que capta la energía de la radiación y la transmite al aire u otro fluido, provocando su calentamiento, el cual es dirigido hacia la cámara de secado que, está aislada (Montero, 2005) (Figura 16).
- Secadores solares mixtos: la radiación solar se transmite conjuntamente a un calentador solar y a la cámara de secado; es decir, se constituye de un sistema de recolección solar (colector solar) y, la cabina está revestida por un material traslúcido que permite el paso de los rayos solares (Montero, 2005) (Figura 17).

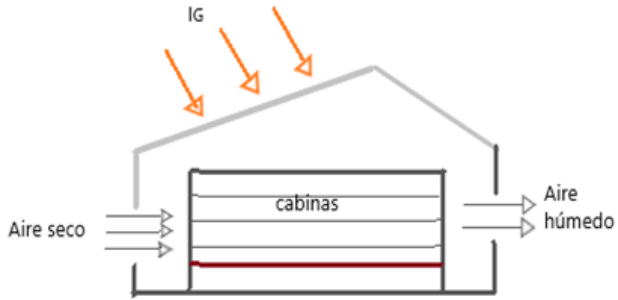


Figura 15
Secador solar directo

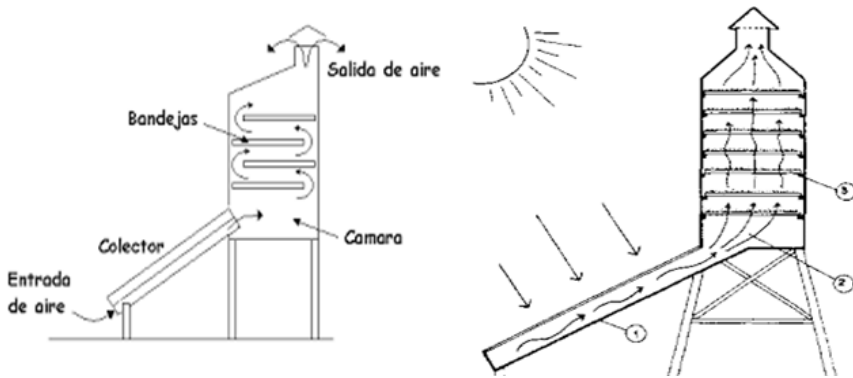


Figura 16
Secadero solar indirecto

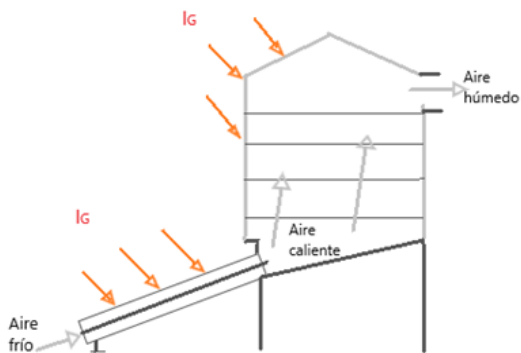


Figura 17
Secadero solar mixto de flujo cruzado

Fuente: Fuente: <https://energiasolargrupo77e.blogspot.com/2008/12/secador-solar.html>

Entre estos sistemas de secado, el secador solar indirecto y el mixto pueden ser más eficientes, ya que el colector, al tener un mecanismo para absorber la mayor cantidad de radiación solar y aislamiento para evitar pérdidas, permite acumularla para transmitirla al fluido (comúnmente aire); por lo tanto, el fluido calentado tendrá una baja humedad relativa y así, llevará a cabo un secado más efectivo. El sistema mixto puede adquirir mayor energía calórica, pero, es posible que se alcance altas temperaturas en el material de secado, lo cual no sería adecuado para productos termosensibles que afecten su calidad fisicoquímica o sensorial.

Para calcular la cantidad de calor obtenido, primero nos enfocaremos en el mecanismo de recolección solar; es decir, en los colectores y concentradores solares. Así, los tipos de captadores solares que se puede encontrar actualmente en el mercado, son los siguientes:

• **Colectores de Placa Plana**

Consisten en una caja plana metálica por la que circula un fluido que se calienta a su paso por el panel; es el más común de los colectores que se utiliza hoy en día, siendo al mismo tiempo, el más económico y apropiado para convertir energía solar en calor para temperaturas de hasta 100 °C. Las ventajas radican en su simple construcción, su costo relativamente bajo, la facilidad de reparación y, la durabilidad, encontrando muchos modelos comerciales en el mercado. Absorben, tanto radiación solar directa como difusa, por lo que tienen una gran ventaja en los climas nublados (Ibarra & Rojas, 2012).

Como se muestra en la Figura 18, estos captadores constan de una o varias cubiertas de vidrio que dejan pasar la irradiancia solar visible, la cual incide sobre una placa absorbidora selectiva, que se calienta y, por conducción, transfiere esta energía térmica hacia los conductos por los que fluye un fluido caloportador, que suele ser agua o aire. El sistema está aislado por los laterales, el fondo y la cubierta de vidrio que impide el paso de la radiación infrarroja de regreso a la atmósfera (Morillo, 2012), minimizando así las pérdidas energéticas; para esto comúnmente se utiliza materiales con bajo coeficiente de conducción de calor, como plásticos gruesos, maderas, polímeros, etc., teniendo precaución de que no tengan muy bajos puntos de fusión para no dañar el aislante con las altas temperaturas.

Cuando se habla del paso de aire o agua en un colector, se trata sobre el número y posición de los espacios alrededor de la placa absorbente por donde pasa el flujo; así, un *paso de aire inferior* querrá decir que solo habrá una corriente que pasa debajo de la placa; si es un *paso superior*, entonces la corriente está encima de la placa y, si se menciona un *doble paso*, entonces habrá dos corrientes: encima y debajo; sin embargo, en lo común se usa solo un paso de aire; lo que sí se suele encontrar es, el uso de más de una cubierta de vidrio en la parte superior.

Generalmente, como placa absorbente se usa constituyentes con alta conductividad de calor y propiedades ópticas de absorción de luz. Un material *metálico opaco o negro*, con el fin de obtener una alta conducción del calor y, como un cuerpo negro



para absorber en gran cantidad la energía irradiante; por ejemplo, una placa de aluminio galvanizada; esto permitirá que la transferencia de calor hacia el fluido caloportador se maximice. Así, con un monto de energía aislado del entorno más las considerables velocidades para ser transferido al fluido, se obtendrá una corriente con gran cantidad calórica para ser cedida al producto a secar; en consecuencia, se tiene un proceso más eficiente que el secado solar tradicional.

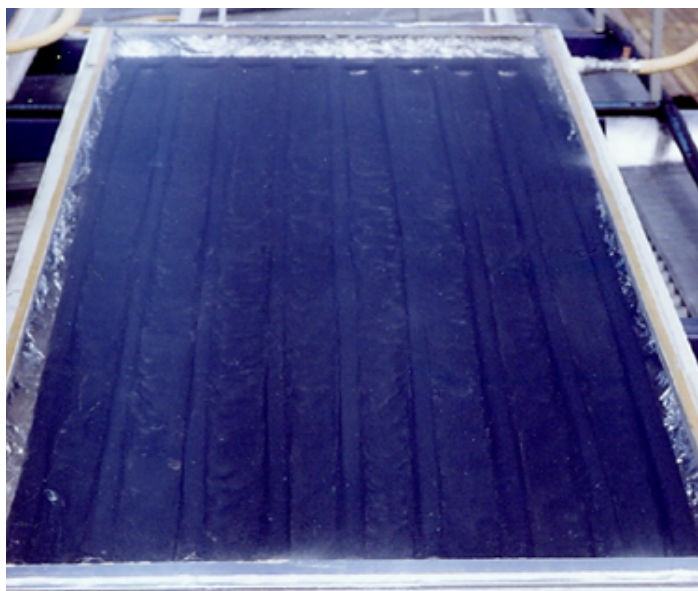


Figura 18
Colector solar de placa plana
Fuente: Fuente: Fauroux y Jagër (2013)

• **Colectores Parabólicos**

Para concentrar la radiación, es decir, obtener intensidades mayores por unidad de superficie, se debe recurrir a concentradores de la radiación solar. La concentración se logra mediante superficies reflectantes parabólicas; esto se debe a una propiedad de la parábola, la cual dictamina que, el ángulo formado por la tangente en cualquier punto de la parábola con la recta paralela al eje de la parábola en ese punto, es igual al formado por dicha tangente con la recta que une el punto de tangencia con el foco de la parábola, haciendo posible que todos los rayos de radiación que llegan a un área de estructura parabólica sean reflejados a un único punto, hacia el punto focal, como se muestra en la Figura 19 (Ibarra & Rojas, 2012; Rey Pastor, Santaló, & Balanzat, 1955); esto genera una concentración de radiación solar en dicho punto, recogiendo ahí grandes cantidades de calor, igual que lo hace una lupa. Se conocen dos tipos, según su geometría:

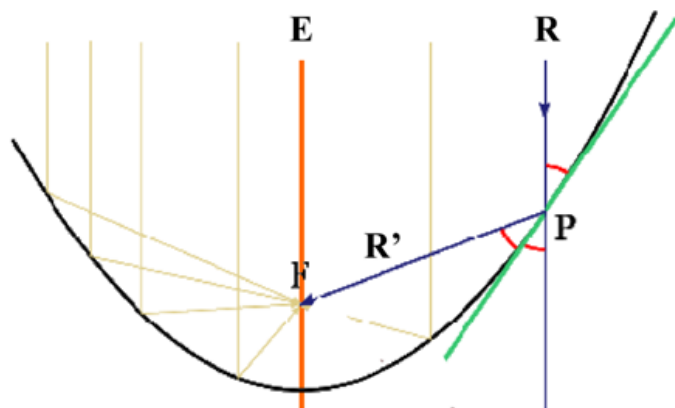


Figura 19
Distribución de los rayos incidentes sobre una geometría parabólica

- **Concentradores parabólicos 2D (cilíndrico):**

Son aquellos colectores que tienen una superficie especular semicilíndrica y cuya sección recta es una parábola; esto es, solo tienen dos dimensiones (Figura 20a), que es la razón de su nombre. Utilizan un mecanismo de seguimiento al sol en un eje para captar la mayor cantidad de rayos solares. Tienen una superficie reflectora, de forma que los rayos solares se concentran en un tubo absorbedor (foco lineal), el cual se constituye de algún fluido caloportador con una cubierta traslúcida para permitir el paso de los rayos concentrados en ese punto (Ibarra & Rojas, 2012; Morillo, 2012).

- **Concentradores parabólicos 3D (doble curvatura):**

Estos colectores poseen un reflector parabólico donde la mitad derecha e izquierda forman dos parábolas truncadas, así que tendrán una forma semiesférica (tridimensional); por esto son llamados 3D. Gracias a esta forma, los rayos que pasen por uno de los bordes del receptor son focalizados en la parábola opuesta; así, los rayos solares que pasen por la abertura van a concentrarse en el absorbedor, el cual se constituye de la misma forma que la estructura anterior, pero, con una geometría diferente (Figura 20b) (Ibarra & Rojas, 2012).

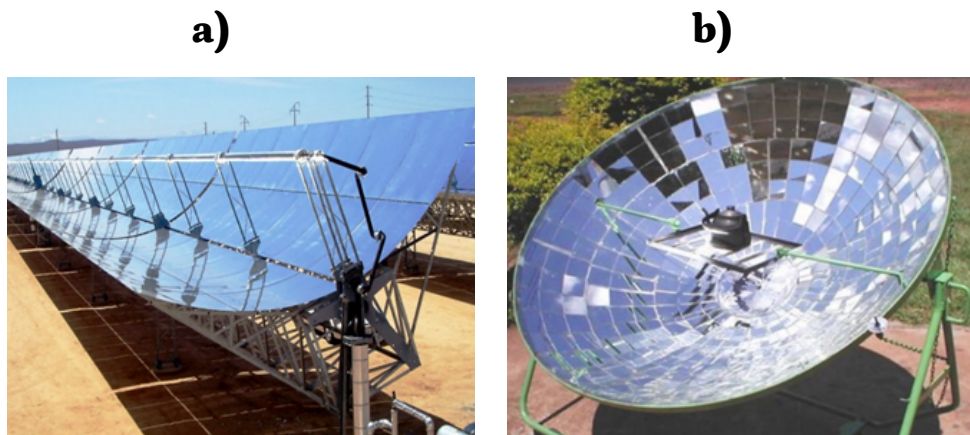
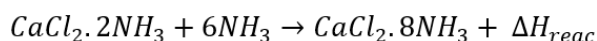


Figura 20
Concentrador solar parabólico: a) 2D, b) 3D (doble curvatura)
Fuente: a) Ricciulli (2021)
Fuente: b) Ahorro Energético (s.f.)

Estos sistemas de recolección solar pueden ser integrados con otros métodos, como, incorporar un panel solar para obtener energía eléctrica que sea usada para el funcionamiento del artefacto de ventilación y, si se instala un sistema de medición mediante tarjetas de control (Arduino o Raspberry, por ejemplo), la energía servirá para los dispositivos de medición (sensores de humedad, temperatura, flujómetros, etc.).

Otro método es agregar un *sistema generador de calor químico*, en donde se incorpora reacciones químicas exotérmicas; es decir, que generan calor al reaccionar los compuestos; así, este calor es usado para calentar el fluido de secado; por lo tanto, es necesario contar con un sistema de reacción que tenga un alto valor en la *entalpía de reacción* ($-\Delta H_{reac.}$), que es el calor liberado al reaccionar. Cada conjunto de reactivos tiene un valor " $-\Delta H_{reac.}$ " específico; además, en este método para producir calor, se usa reacciones *reversibles* con el fin de reciclar los compuestos y tener un flujo reactivo continuo. Ibrahim et al. (2009) desarrollaron un sistema de secado solar y generador de calor químico (Figura 21), en donde se tiene un reactor sólido-gas que contiene una sal ($CaCl_2 \cdot 2NH_3$) que reacciona con un gas (NH_3). La ecuación química que representa las reacciones es:



Cuando entra amonio gaseoso, reacciona con la sal, liberando calor a alta temperatura; luego, el calor generado en el colector solar y transportado por agua, es usado para regenerar los compuestos (descomposición del $CaCl_2 \cdot 8NH_3$); entonces, se produce amonio gaseoso (NH_3) caliente que transfiere su calor al aire en un condensador; mientras el amonio se condensa, el aire calentado pasa a la cámara de secado para el proceso. El amonio condensado pasa por un evaporador de baja temperatura para, nuevamente, pasar al sistema de reacción, en tanto una parte del aire que sale de la cámara de secado se desvía al evaporador; aquí se deshumidifica (a través de un sistema de *adsorción-desorción*) y es enfriado mientras cede calor al amonio condensado; así, este aire vuelve al condensador, para ser calentado.

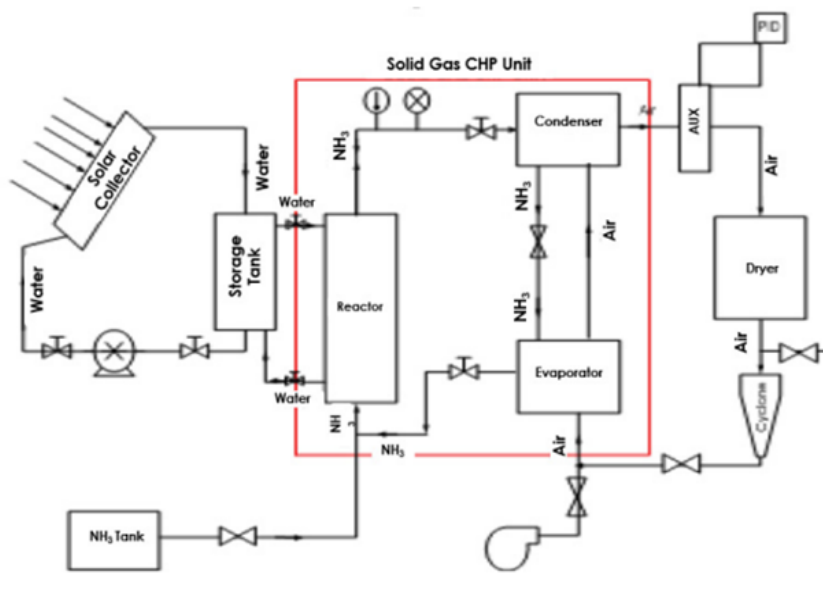


Figura 21
 Sistema de Secado Solar-Generador de calor químico
 Fuente: Ibrahim et al. (2009)

Igualmente, consta de un tanque de almacenamiento para el agua calentada por el colector solar y, uno para almacenar el amonio. La región encerrada por la línea roja corresponde a la unidad de bombeo del calor químico generado.

Para productos en los que se exige gran calidad, pero esta es sensible a las altas temperaturas a causa de la degradación o evaporación de sus compuestos activos y de aquellos que proveen cualidades sensoriales, inducción a reacciones indeseables, etc., se necesita un método que lleve a cabo la evaporación a bajas temperaturas. Para estos casos se puede usar el secado solar con sistema de deshumidificación, en donde un flujo de aire entra a ser deshumidificado al tener contacto con un material adsorbente que tiene una alta capacidad de adsorber agua; así, este proceso de evaporación está impulsado netamente por el principio de transferencia de masa (vapor de agua); luego el aire es usado para secar. (Yahya et al., 2008).



En investigaciones de Yahya et al., (2008) se ha desarrollado un sistema (Figura 22) que consiste de un *colector solar*, *equipo de bombeo*, un *calentador auxiliar*, un *tanque de almacenamiento (para el agua calentada)*, un *adsorbente*, *intercambiadores de calor* y, *la cámara de secado*. El aire es soplado a un intercambiador de calor, en donde es calentado por agua caliente del colector solar; este aire pasa al adsorbente para calentarlo; así, este reduce su contenido de agua por el calor ganado y, por lo tanto, le confiere al adsorbente mayor capacidad de adsorción; luego, dicho aire sale del sistema. Otra corriente de aire pasa al adsorbente en donde es deshumidificado, pasa por un intercambiador de calor para regular su temperatura solo si es necesario, pero no se usa para calentarlo a alta temperatura; de este modo este aire entra a la cámara de secado, en donde la evaporación será impulsada por el gran diferencial de humedades entre el aire y el producto. El secado en este sistema ocurrió con una baja temperatura en la cámara (35 °C) y, aunque el incremento de temperatura aumenta la capacidad de evaporación, para productos sensibles a ella es recomendable usar este tipo de sistema de deshumidificación.

En la Figura 23 se puede apreciar un deshumidificador usado en la finca cafetera *Villa Loyola* al sur de Colombia (Chachaguí, Nariño), que posee un sistema de captación solar térmico-eléctrico, así que tiene un panel para generar energía eléctrica y operar todo el equipo, además de un acumulador de calor para ser usado también en la deshumidificación o el secado; este equipo consta de un serpentín para el flujo a ser calentado, luego la corriente deshumidificada es soplada al producto a secar.

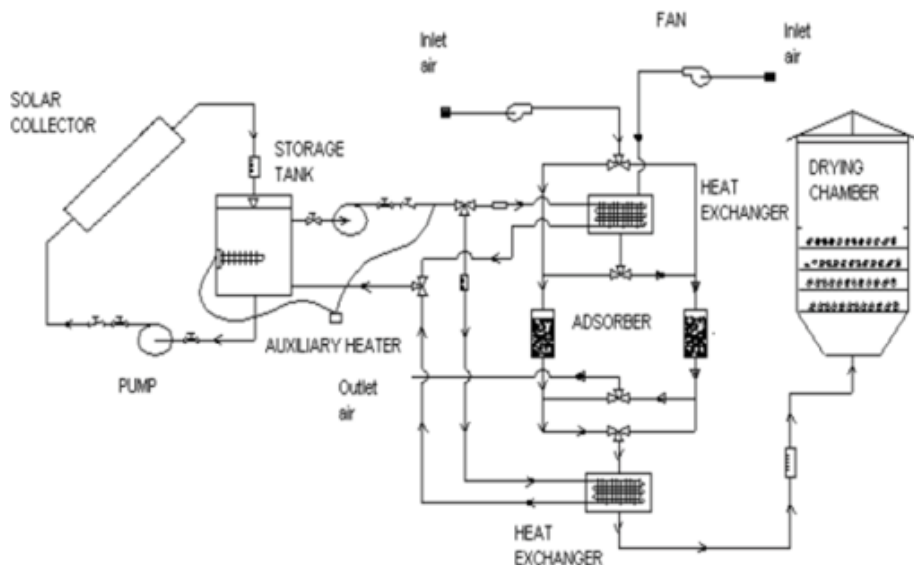


Figura 22

Sistema de secado solar con un sistema de deshumidificación

Fuente: Yahya et al. (2008)



Figura 23
Deshumidificador con sistema de captación solar térmico-eléctrico, usado en la finca Villa Loyola al sur de Colombia (Chachagüí-Nariño)

El equipo de la Figura 23 es usado para secar cafés de especialidad, que no pueden ser sometidos a altas temperaturas, aunque generalmente se usa para una primera etapa de secado de estos productos; después ya son sometidos a un secado solar, ya que para el sistema, es difícil alcanzar bajos contenidos de humedad en el material (para el café se requiere una humedad de 11 % a 12 % b.s.), al depender únicamente de las propiedades psicrométricas del adsorbente; entonces, luego de secar todo lo posible el grano en el deshumidificador, se lleva al secador solar o al equipo de secado con el que se cuenta.

En la primera etapa se tiene un producto con alta humedad, donde es susceptible a la contaminación microbiana, así que debe ser secado de manera rápida a temperatura moderada, si es sensible térmicamente.

En conclusión, hay varios sistemas de secado solar que pueden ser usados en conjunto con otros métodos; esto es lo más recomendable para prevenir la incertidumbre de los procesos, pues la energía solar depende del clima, como: condiciones de nubosidad, precipitaciones, entre otros, que interfieren en la captación solar, por lo que resulta conveniente contar con alternativas energéticas frente a estos sucesos.

Balance de energía en colector solar de placa plana

Como ya se explicó, la fuente de energía que ingresa al sistema de recolección solar es la radiación solar incidente; conociendo el valor de dicha cantidad energética, será posible cuantificar lo que es transferido al fluido caloportador; es decir, la



energía que ingresará a la cámara de secado, pues no todo lo ingresado saldrá hacia el proceso posterior, a causa de las pérdidas. Cuando la radiación solar incide en la cubierta translúcida, una fracción de ella es **absorbida**, otra es **reflejada**, lo que es casi despreciable y, la mayor parte es **transmitida**. La energía transmitida pasa a través de un espacio fluido e incide en la placa absorbente; una gran fracción es absorbida y, a través de ella, la fracción absorbida es transferida por **conducción** de calor y luego una parte por el espacio fluido; esta pequeña fracción transferida por **convección** y **radiación** incide en el aislante, el cual conduce una muy pequeña parte, como se muestra en la Figura 24, para un colector con paso inferior del aire.

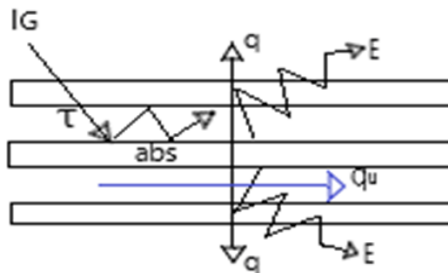


Figura 24
Esquema de los principales componentes energéticos del colector, donde IG: Irradiancia global; q: calor transferido (conducción y convección); E: Radiación emitida; qu: Calor útil; T: IG transmitida; abs: energía absorbida por la placa absorbente

Por lo tanto, el balance general es:

$$\text{Energía obtenida} = \text{Energía recibida} - \text{Energía perdida}$$

...donde, *Energía obtenida* (Q_u): es el calor útil; es decir, la energía que se transferirá al fluido para ser calentado. Se define como:

$$Q_u = \dot{m}C(T_{fo} - T_{fi}) = UA_c(T_{fo} - T_{fi}) \quad (72)$$

\dot{m} : flujo másico del fluido que pasa por el colector.

C : calor específico del fluido.

T_{fo}, T_{fi} : temperatura final e inicial del fluido, respectivamente.

U : coeficiente global de transferencia de calor hacia el fluido.

A_c : área del colector, expuesta a la radiación solar.

Energía recibida: es la energía que llega a la placa de absorción, en forma de radiación solar. Según Bergman et al. (2011), Montero (2005) y Morillo (2012) se define como:

$$Q = \tau_c \alpha_p I_G A_c \quad (73)$$

α_p : coeficiente de absorptividad de la placa, la cual determina la fracción de radiación, que es absorbida por la placa.

τ_c : coeficiente de transmisividad de la cubierta; esta determina la fracción de radiación que es transmitida hacia la placa absorbente.

Energía perdida: se transfiere hacia los alrededores por convección y radiación. Según Bergman et al. (2011), Ibarra & Rojas (2012), Montero (2005) y Morillo (2012), se define como:

$$Q_L = U_L A (T_{fm} - T_{amb}) \quad (74)$$

U_L : coeficiente global de transferencia de calor de las pérdidas por convección y radiación.

A : área expuesta a las pérdidas.

T_{fm} : temperatura media del fluido en el colector.

T_{amb} : temperatura del aire ambiental.

Sin embargo, el calor útil está directamente relacionado con el *factor de remoción de calor* F_r , el cual se corresponde con la capacidad para remover o captar el calor que queda en el sistema para ser tomado como calor útil; es característico para cada sistema de colectores solares. Según investigaciones previas (Duffie & Beckman, 2013; Ibarra & Rojas, 2012; Montero, 2005; Morillo, 2012) se tiene lo siguiente:

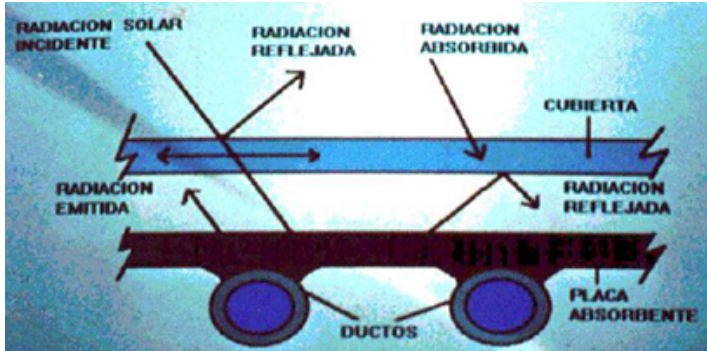
$$Q_u = F_r (Q - Q_L) = F_r \left(\tau_c \alpha_p I_G A_c - U_L A (T_{fm} - T_{amb}) \right) \quad (75)$$

...donde

$$F_r = \frac{\dot{m} c_{pf}}{A_c U_L} \left(1 - e^{\left(-\frac{A_c U_L F}{\dot{m} c_{pf}} \right)} \right) \quad (76)$$

C_{pf} : calor específico del fluido

F : factor de eficiencia del colector; indica qué tan eficiente es el mecanismo para almacenar el calor; es característico para cada diseño del sistema. Fauroux & Jagér (2013) y Morillo (2012) sostienen que, para los siguientes sistemas (Figura 25) se expresa como:



$$F = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left(\frac{1}{U_L(D+(W-D)F')} + \frac{1}{K} + \frac{1}{\pi D i h_{tf}} \right)} \quad (77)$$

$$F' = \frac{\tanh \tanh \left(\frac{m(W-D)}{2} \right)}{m(W-D)/2} \quad (78)$$

Figura 25
 Sistema de recolección de energía solar con ductos inferiores para el paso de aire
 Fuente: Fauroux & Jagër (2013).

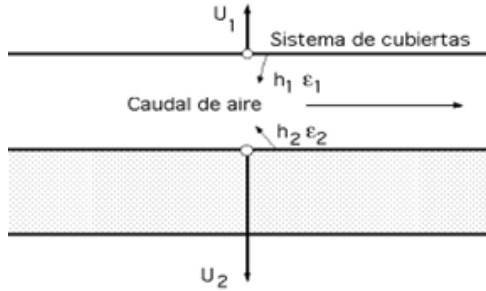
- W : distancia de separación entre tubos.
- D : diámetro del tubo.
- K : conductividad del material.
- D_i : diámetro interno del tubo.
- h_{tf} : coeficiente de transferencia de calor entre el tubo y el fluido.
- m : factor dependiente de la conductividad del material.

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{KL}} \quad (79)$$

L : grosor del material

(Duffie & Beckman, 2013; Rodríguez, 2016).

En la Figura 26 se muestra un sistema de recolección de energía solar simple de una cubierta con un paso de aire en la parte superior, mientras que en la Figura 27 se presenta un sistema de recolección pero con doble cubierta.



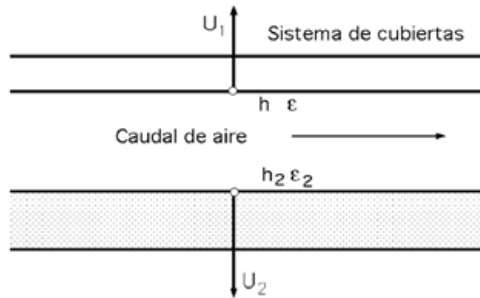
$$F = \frac{1}{1 + \frac{h_r U_1}{h_1 h_2 + h_1 h_r + h_2 h_r + h_2 U_2}}$$

(80)

(Ávila et al., 2010)

Figura 26

Sistema de recolección de energía solar simple, de una cubierta con paso de aire superior



$$F = \frac{1}{1 + \frac{U_c}{h_1 + \frac{1}{\frac{1}{h_2} + h_r}}}}$$

(81)

(Ávila et al., 2010)

Figura 27

Sistema de recolección de energía solar con doble cubierta



...donde

$$U_c = \frac{U_1 + U_2}{1 + \frac{(U_1 + U_2)h_r}{h_1 h_2 + h_1 h_r + h_2 h_r}} \quad (82) \text{ y}$$

$$h_r = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (83)$$

(Ávila et al., 2010)

h_1 y h_2 : coeficientes de transferencia de calor por convección en la sección de paso de aire. Su valor es aproximadamente igual.

T_1 y T_2 : temperaturas en el paso de aire correspondientes a cada sección referentes a h_1 y h_2 .

Coefficiente de pérdidas:

$$U_L = U_{L1} + U_{L2} = \frac{1}{\sum_i^n R_i} \quad (84)$$

U_{L1} , U_{L2} : coeficientes de pérdidas hacia la parte superior de la placa y hacia la parte inferior o fondo, respectivamente. Están determinados por las pérdidas de calor por convección, conducción y radiación sobre cada componente del sistema.

R_i : resistencia térmica de cada componente hacia arriba y abajo de la placa.

Por lo tanto, tenemos que,

$$U_L = \left(\frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{L}{K} + \frac{1}{h_r}} \right)_1 + \left(\frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{L}{K} + \frac{1}{h_r}} \right)_2 \quad (85)$$

Los subíndices 1 y 2 indican la sección, superior e inferior; así que, cada coeficiente es diferente en cada sección.

Coeficientes de transferencia de calor por convección

Para la transferencia de calor entre la cubierta, el aislante y el ambiente, se puede usar una correlación muy sencilla que depende únicamente de la velocidad del viento (Abella, 2001; Alaiz, 1981; Duffie & Beckman, 2013; Fauroux & Jagër, 2013; Roche et al., 2017; Rodríguez, 2016).

$$h_{amb} = 5,7 + 3,8v \quad (86)$$

v : velocidad del viento local (m/s).

Se asume al colector (Figura 28), como “una cavidad rectangular con flujo interno en convección libre” (Bergman et al., 2011, p. 624); por ende, las correlaciones para determinar el coeficiente de transferencia de calor están dadas por Bergman et al. (2011, pp. 622–624) para las condiciones establecidas en un plano inclinado a un ángulo β (τ), como se muestra a continuación:

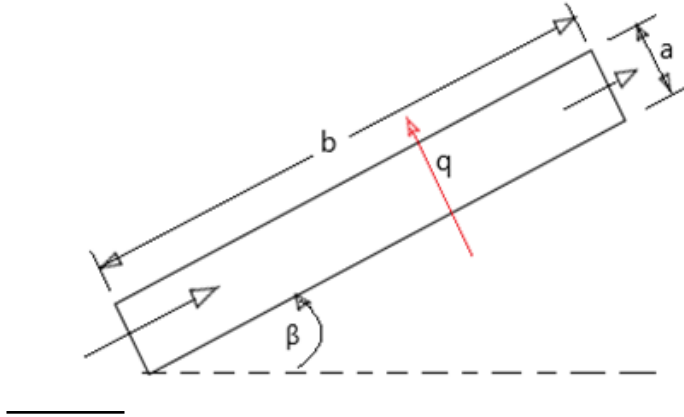


Figura 28
Convección libre con flujo interno en una cavidad rectangular

Para un plano horizontal, es decir para $\beta = \tau = 0$, Globe & Dropkin (1959, p. 24) proponen:

$$\underline{Nu} = \frac{hL}{k} = 0,069Ra_L^{\frac{1}{3}}Pr^{0,074} \quad (87)$$

...donde Ra_L es el número de Rayleigh y Pr el número de Prandtl:

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_f)L^3}{\alpha v} \quad (88)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (89)$$

Todas las unidades en el S.I.

h : coeficiente de transferencia por convección ($W/m^2K = W/m^2^\circ C$)

k : conductividad térmica del fluido ($W/m \cdot K$)

g : gravedad (m/s^2)

β : coeficiente de expansión volumétrica del fluido, $\beta = 3\alpha_d$ ($1/K$)



α_d : coeficiente de dilatación térmica lineal

T_s : temperatura de la superficie

T_f : temperatura del fluido

L : espacio entre la abertura, $L = a$ (m)

α : coeficiente de difusividad térmica del fluido (m^2/s)

ν : viscosidad cinemática del fluido (m^2/s)

Para una cavidad vertical ($\tau = 90^\circ$), Catton (1978) sugiere las siguientes correlaciones:

$$\underline{Nu} = 0,22 \left(\frac{Pr}{0,2+Pr} Ra_L \right)^{0,28} \left(\frac{b}{a} \right)^{-1/4} \quad \left[2 \leq \frac{b}{a} \leq 10 \right] \quad (90)$$

$$\underline{Nu} = 0,18 \left(\frac{Pr}{0,2+Pr} Ra_L \right)^{0,29} \quad \left[1 \leq \frac{b}{a} \leq 2 \right] \quad (91)$$

Para grandes valores de b/a (son factores dimensionales, b : largo y a : espacio interno. Véase la Figura 28), MacGregor y Emery (1969) proponen la siguiente correlación:

$$\underline{Nu} = 0,42 Ra_L^{1/4} Pr^{0,012} \left(\frac{b}{a} \right)^{-0,3} \quad \left[10 \leq \frac{b}{a} \leq 40 \right] \quad (92)$$

En planos inclinados se tiene en cuenta el ángulo crítico τ^* (ver Tabla 1). Para valores grandes de b/a se sugiere la siguiente correlación, de acuerdo con Hollands et al. (1976):

$$\underline{Nu} = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1708}{Ra_L \cos \tau} \right) \left(1 - \frac{1708 (\sin(1,8\tau))^{1,6}}{Ra_L \cos \tau} \right) + \left[\left(\frac{Ra_L \cos \tau}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad \left[\frac{b}{a} \geq 12, 0 < \tau \leq \tau^* \right] \quad (93)$$

Para pequeños cocientes b/a se puede obtener buenos resultados con una correlación de la forma (Catton, 1978):

$$\underline{Nu} = \underline{Nu}(\tau = 0) \left(\frac{\underline{Nu}(\tau = 90)}{\underline{Nu}(\tau = 0)} \right)^{\frac{\tau}{\tau^*}} \sin^{\tau^*} \tau^{4/\tau^*} \quad \left[\frac{b}{a} \leq 12, 0 < \tau \leq \tau^* \right] \quad (94)$$

Para cualquier valor de b/a se cuenta con la siguiente correlación, según Ayyaswamy y Catton (1973):

$$\underline{Nu} = \underline{Nu}(\tau = 90^\circ)(\sin \tau)^{1/4}$$

$$[\tau^* \leq \tau < 90^\circ] \quad (95)$$

Tabla 1
 Ángulo crítico para cavidades rectangulares
 Fuente: Bergman et al. (2011, p. 624)

b/a	1	3	6	12	>12
τ^*	25°	53°	60°	67°	70°

Temperatura de la placa

Ya que la placa se expone a la radiación solar, su temperatura varía con el tiempo; es decir, está en un *régimen transitorio*; por lo tanto, se debe estimar su temperatura según esta condición. Duffie y Beckman (2013) aplican un *modelo de dos nodos*, según los efectos de la capacidad calórica del colector. Este método se basa en asumir que no hay energía útil en el captador y, por tanto, se estudia el período de calentamiento en las primeras horas de la mañana y, el período de enfriamiento en las últimas horas de la tarde. Se considera un colector con una sola cubierta; la temperatura de la placa absorbente, el fluido dentro y una mitad del aislamiento están todos a la misma temperatura T_p , y, la temperatura de la cubierta es uniforme y diferente a T_p (Duffie y Beckman, 2013; Rodríguez, 2016). Entonces, el balance de energía en la placa absorbente, el fluido y la mitad del aislante resultan en:

$$(mC)_p \frac{dT_p}{dt} = A_c (\tau_c \alpha_p I_G - U_{p-c} (T_p - T_c)) \quad (96)$$

C : calor específico del sólido

T_c : temperatura de la cubierta

A_c : área expuesta del colector

t : tiempo de exposición a la energía

U_{p-c} : coeficiente de pérdidas de calor desde la placa a la cubierta

m : masa del componente sólido (placa o cubierta)

Los subíndices p y c en las expresiones hacen referencia a la placa y la cubierta, respectivamente.



Un balance de energía en la cubierta resulta en:

$$(mC)_c \frac{dT_c}{dt} = A_c \left(U_{p-c} (T_p - T_c) + U_{c-amb} (T_{amb} - T_c) \right) \quad (97)$$

U_{c-amb} : coeficiente de pérdidas de calor desde la cubierta al ambiente.

Una gran simplificación ocurre si se asume que $(T_{amb} - T_c)/(T_p - T_c)$ permanece constante como estado estacionario; es decir:

$$U_{c-amb} (T_{amb} - T_c) = U_L (T_p - T_{amb}) \quad (98)$$

Por lo tanto, con T_{amb} constante se tiene:

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{U_L}{U_{c-amb}} \frac{dT_p}{dt} \quad (99)$$

Relacionando las ecuaciones (96) y (97), se obtiene la siguiente ecuación diferencial para la temperatura de la placa:

$$\left[(mC)_p + \frac{U_L}{U_{c-amb}} (mC)_c \right] \frac{dT_p}{dt} = A_c \left(\tau_c \alpha_p I_G - U_L (T_p - T_{amb}) \right) \quad (100)$$

La expresión en corchetes se conoce como la capacidad calorífica efectiva del colector, a la cual se denotará como $(mC)_{col}$. Para un colector con n cubiertas será:

$$(mC)_{col} = (mC)_p + \sum_{i=1}^n a_i (mC)_{c,i} \quad (101)$$

a_i es el cociente entre U_L y U_{c-amb} . En la Tabla 2 se puede observar sus valores.

Asumiendo a $\tau_c \alpha_p I_G$ y T_{amb} constantes, finalmente se obtiene:

$$\frac{\tau_c \alpha_p I_G - U_L (T_p - T_{amb})}{(\tau_c \alpha_p I_G - U_L (T_{pi} - T_{amb}))} = e^{-\frac{A_c U_L t}{(mC)_{col}}} \quad (102)$$

T_{pi} : temperatura inicial de la placa

Tabla 2
 Constantes a_i para estimar $(mC)_{col}$
 Fuente: Duffie y Beckman (2013, p. 270).

Número de cubiertas	a_i	$\epsilon_p = 0,95$	$\epsilon_p = 0,50$	$\epsilon_p = 0,10$
1	a_1	0,27	0,21	0,13
	a_2	0,62	0,53	0,40
3	a_1	0,14	0,08	0,06
	a_2	0,45	0,40	0,31
	a_3	0,75	0,67	0,53

Nota: ϵ_p es el Coeficiente de Emisividad de la placa

Concentrador parabólico: Modelo matemático de la parábola

Para el diseño de un concentrador parabólico, con el fin de obtener sus dimensiones, primero se debe llegar con la ecuación que define a la parábola, para así determinar la distancia focal, donde estará el colector, el ancho de la parábola que corresponde al valor x y su altura que es y , en las coordenadas gráficas. La ecuación de la parábola se define como:

$$y = \frac{x^2}{4p} \quad (103)$$

Con vértice en el origen (0,0), donde p es la distancia focal, x es la coordenada horizontal e y la vertical, como se muestra en la Figura 29.

La energía recibida por el colector está en relación inversa a su área expuesta; por balance de energía se obtiene que la energía que llega al concentrador (se supone que está constituido de un material altamente reflectivo), llega toda al colector, como se aprecia en la Figura 29; entonces, se tiene:

$$I_{G1}A_1 = I_{G2}A_2 \quad (104)$$

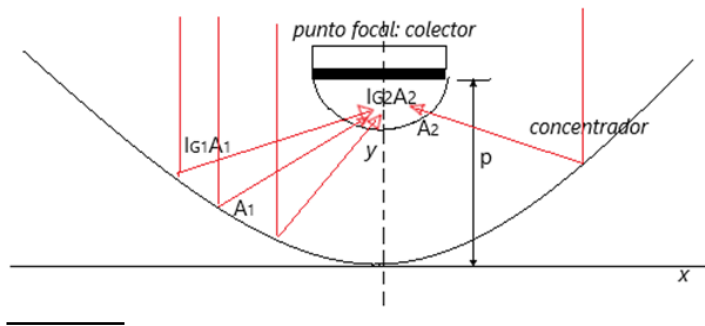


Figura 29
Esquema de la distribución de energía en la parábola formada hacia el punto focal

- I_{G1} : radiación solar que incide en la superficie del concentrador.
 I_{G2} : radiación solar que incide en la superficie del colector.
 A_1, A_2 : área superficial del concentrador y del colector, respectivamente.

Esto indica que, la energía recibida por el concentrador será transferida hacia el colector, siempre y cuando, esté dispuesto en el punto focal. Cabe aclarar que, los receptores de la radiación reflejada por el concentrador, comúnmente son estructuras cilíndricas o tubos traslucidos, pero, en este caso, se ha optado por disponer de un colector semicilíndrico. Aunque se disponga de diferentes geometrías, no afectará el punto focal, solo la cantidad de energía a ser recibida por la distinta área superficial, pues se puede ser creativo en estos sistemas de recolección solar, emprendiendo métodos que recojan la mayor cantidad de radiación, logrando muy buena eficiencia y, que tengan facilidad de operación; recomendando ejecutar los calculos, como se han presentado en esta investigación, buscando una mayor aproximación en los diseños.

Todos los conceptos teóricos presentados, muchos de ellos basados en datos empíricos de investigaciones previas, tienen el objetivo de cuantificar el calor que podrá ser aprovechado y el modelo de temperatura estimada en la placa absorbente, factores importantes para tener conocimiento de la energía que llevará el fluido caloportador hacia la cabina de secado; es decir, hasta aquí ya es posible estimar la cantidad de energía para el proceso de manera teórica (serán valores aproximados mas no exactos, a causa de los factores cambiantes en el entorno y, por estar basados en muchos datos empíricos de investigaciones experimentales). Ahora, nos podemos enfocar en el secado del producto con el uso de dicha energía contenida en el fluido. Como ya se ha mencionado, este libro está enfocado en el secado del café, de lo cual se tratará en el siguiente capítulo.

03

Secado de café



Hasta ahora hemos visto de forma general los principios teóricos de la operación unitaria del secado, así como la *radiación solar* como fuente energética para llevar a cabo el proceso; en este capítulo entraremos a aplicar dichos fundamentos a un producto específico: el **grano de café pergamino o verde**. En este apartado se verá la importancia del secado del café como un proceso que debe ser controlado, ya que tiene implicaciones en la calidad del producto (aspectos de inocuidad, físico-químicos y sensoriales) y, en aspectos cuantitativos (productividad, tiempos de operación, costos, etc.). Para realizar un análisis confiable del proceso de secado, dispondremos de datos de investigaciones previas, pues hay muchos factores que controlan el proceso y algunos son muy variables según el entorno o el método operacional, por lo que deberemos hacer modelos de cálculo para obtener valores estimados de parámetros como la *humedad relativa de equilibrio* y el *calor latente en el grano*, entre otros, que son específicos para cada producto.

Importancia del control de la humedad

En el 41 % de las fincas de café de Colombia, el secado se realiza al sol, donde los granos son expuestos al aire y al sol por largos períodos de tiempo (Figura 30), dependiendo de las condiciones ambientales de la región, de las propiedades termo-higrómetras del grano y, hasta de los sistemas de beneficio usados. Por ejemplo, en una localidad con temperaturas promedio de 27 °C, de acuerdo con datos experimentales de la zona cafetera del norte de Nariño (Colón, Génova), con un proceso en seco (secado con cáscara), como se aprecia en la Figura 31, se requiere un tiempo de tres a cuatro semanas para que el grano alcance un 12 % de humedad.



Figura 30
Café pergamino secado en patio y al sol, en la finca La Molienda del municipio de Colón Génova (Nariño), Colombia



Figura 31
Café pergamino tipo Honey (amarillo ámbar) y café cereza de proceso seco o natural (al fondo) secados en bandejas al sol

En general, estas fincas tienen un tamaño menor a 5 ha y utilizan instalaciones como los carros secadores, los secadores parabólicos y los patios, entre otros. El 95 % de los secadores solares son utilizados regularmente, aunque el área total disponible corresponde solo al 59 % de la requerida para secar la producción del café en estas fincas. Por otra parte, en un 2 % de las fincas cafeteras, principalmente en aquellas con más de 5 ha, se usa los secadores mecánicos y, entre los más usados están los secadores de silos (Puerta-Quintero, 2008).

Se debe tener en cuenta que, el café es un producto de valorable calidad, siendo susceptible a las condiciones de los procesos que se le aplica, como es el caso de la temperatura, pues se sabe que cuando el grano supera los 50 °C en el secado, su estructura se cristaliza, lo cual es un defecto; por lo tanto, no se debe prescindir del control de la temperatura en esta etapa (Puerta-Quintero, 2008). Para garantizar la calidad del grano con balance de productividad, se ha desarrollado secadores, entre los que se destaca la categoría de secadores solares. El uso de sistemas térmicos solares para conservar vegetales y otras cosechas ha mostrado que son una opción práctica, económica y ambientalmente compatible; estos sistemas pueden mejorar la calidad del producto, a la vez que reducen desechos y el uso de combustibles tradicionales; es por esto que hay un especial interés en el desarrollo de secadores solares innovadores (Roche et al., 2017).



Inocuidad del café

Existen diferentes peligros a los que se expone el producto en el proceso de secado: contaminaciones de tipo físico (polvos, tierra, partículas metálicas, etc.), químico (trazas de pesticidas, plaguicidas, toxinas, combustibles, etc.) y, biológicos (hongos, bacterias, insectos, etc.), que afectan la inocuidad del grano y sus características fisicoquímicas y sensoriales. Así que, un aspecto relevante en la inocuidad del grano es la *Actividad acuosa* (a_w), una propiedad que indica el contenido de agua libre, la cual podrá estar disponible para el desarrollo de microorganismos que deterioran el producto, tomando valores entre 0 a 1,0. Para valores grandes o cercanos a 1, hay un apreciable riesgo de proliferación microbiana, de suerte que, se requiere valores bajos, aunque cada alimento tiene un valor diferente de a_w para el óptimo crecimiento microbiano. En el caso del café, el valor en el que se estabiliza y no se presenta dicho crecimiento está entre 0,60 - 0,67 (humedad de 10 % - 12 % b.h.). En esta etapa de beneficio, si la humedad no es controlada y perdura mucho tiempo, se pueden desarrollar muchos hongos del género *Aspergillus* y *Penicillium*, que no son benéficos al consumo humano, debido a las toxinas que producen. En la Tabla 3 se muestra los principales hongos que se puede encontrar en el grano de café, aunque también puede haber mohos de los géneros *Fusarium*, *Rhizopus*, *Cladosporium* y *Mucor* (Puerta-Quintero, 2006a).

Tabla 3

Hongos encontrados en el café, los valores mínimos de actividad de agua para su crecimiento y producción de toxinas

Fuente: Puerta-Quintero (2006a)

Hongo	a_w mínima para el crecimiento del hongo	a_w mínima para la producción de toxinas	Toxina
<i>Aspergillus ochraceus</i>	0,76 – 0,83	0,83 – 0,87	Ochratoxina A
<i>A. ochraceus</i>	0,76 – 0,83	0,81 – 0,88	A. penicílico
<i>A. clavatus</i>	0,85	0,99	Patulina
<i>A. flavus</i>	0,78 – 0,80	0,83 – 0,87	Aflatoxina
<i>A. parasiticus</i>	0,78 – 0,82	0,87	Aflatoxina
<i>Penicillium expansum</i>	0,82 – 0,85	0,99	Patulina
<i>P. verrucosum</i>	0,81 – 0,83	0,83 – 0,9	Ochratoxina A

El café procesado por vía seca (como las pasillas) se mantiene por más de nueve días con humedad del 18 al 35 %, condiciones adecuadas para la producción de Ochratoxina A (OTA) secretada por *Aspergillus ochraceus* y, cerca de 20 días en circunstancias favorables para que sucedan fermentaciones indeseables que generan sabores como vinagre y *stinker* y, para que proliferen en él, mohos. En consecuencia, los riesgos para la calidad de café por el desarrollo de mohos son altos

cuando el café pergamino se seca con granos con cáscara, restos de pulpa, mucílago adherido o, con granos defectuosos que causan retrasos en el secado, humedad no homogénea, decoloración y defectos en la bebida (Puerta-Quintero, 2006a).

A pesar de estas afirmaciones, actualmente en el mercado hay una demanda creciente por cafés que han sido obtenidos por un beneficio por vía seca, así como también por granos secados con el mucílago adherido (*café Honey*). Según Puerta-Quintero (2006a), aunque los hongos que generan toxinas son destruidos en el proceso de tostión, si se realiza un inadecuado uso de las buenas prácticas agrícolas (BPA) en el beneficio y las condiciones de almacenamiento son malas, se producirá toxinas en altos niveles, que permanecerán no solo en el grano verde, sino también en el tostado y, hasta en la bebida. En la Unión Europea se permite límites de contenido de OTA de hasta 5 partes por billón (ppb) para café tostado y 10 ppb para solubles, mientras en algunos países de Europa se admite de 4 a 20 ppb en el grano de café verde.

Una mala operación del proceso de secado respecto a la inocuidad, representa riesgos con efectos adversos que pueden ser irreversibles, proliferación de microorganismos y generación de componentes tóxicos, como un peligro que debe ser evitado, por lo cual es lógico definirlo como una etapa crítica que debe ser controlada y así, asegurar un producto sano para el consumo humano.

Aspectos productivos y operacionales

El secado del café depende de muchos factores, de los cuales uno de los más importantes lo constituyen las condiciones ambientales predominantes durante el proceso; pero, también, influyen la calidad del café a secar, la superficie del secador y los controles de proceso como el espesor de la capa de café y las prácticas aplicadas (Puerta-Quintero, 2006b).

Sostiene Puerta-Quintero (2008) que, es necesario conocer las épocas del secado del café y las condiciones climáticas, como la temperatura ambiente, el brillo solar y los días lluviosos predominantes en el lugar, con el fin de utilizar las tecnologías de secado más apropiadas, estimar el tiempo requerido para que el secado se complete y, planificar el manejo y almacenamiento del café pergamino seco. Igualmente, que es esencial saber que, en los secadores al sol con cubierta, se evita el rehumedecimiento del café; los secadores mecánicos deben disponer de combustión externa y chimeneas para el control de la contaminación del producto y del aire; no debe utilizarse superficies de secado de madera ni de metales que se oxiden; los secadores solares deben ser instalados en lugares ventilados y alejados de cualquier fuente de contaminación; aquellos con superficie de malla deben ser ubicados sobre áreas de cemento o piedras, ya que el contacto directo con el suelo no permite el secado rápido. Se muestra algunos equipamientos de secado solar en la Figura 32.



Figura 32
Secador tipo invernadero (Greenhouse) con estructura de polietileno, guadua y madera, techo de policarbonato, con bandejas de malla y ventanas móviles para controlar la corriente natural del aire, localizado en la finca Villa Loyola, municipio de Chachaguí (Nariño), Colombia

Tanto el secado solar como el mecánico deben ser realizados lo más pronto posible después del lavado. Para el secado al sol se debe colocar máximo 20 kg de café pergamino húmedo por cada metro cuadrado de área de secado (capas de 3 cm) y revolver el lecho cada tres a cuatro horas, durante los tres primeros días; después, al menos dos veces al día, hasta el secado final (Puerta-Quintero, 2008). Cuando la carga para secado es de 13 kg/(m² de secador) de pergamino húmedo (capa de 2 cm) y, al mismo tiempo el ambiente está seco y soleado, el secado toma de seis a ocho días y, el café solo permanece un día de riesgo a daños por mohos; para capas superiores a 4 cm en períodos lluviosos, se requiere de 16 a 34 días para lograr el secado y, los días críticos (riesgo de mohos) se incrementa a cuatro (Puerta-Quintero, 2006b). En la Tabla 4 se observa los resultados obtenidos por Puerta-Quintero (2006b), en su investigación referente al control de la humedad en el café.

Tabla 4

Relación del tiempo de secado del café pergamino según superficie de secador, espesor de la capa y condiciones ambientales

Fuente: Puerta-Quintero (2006b, p. 5)

Tipo de Secador	Capa de café cm	Cantidad café kg cph/m ² secador	Condiciones secado	Época	Duración secado (días)	aw 0,87		aw 0,77		Número de días críticos
						Humedad del grano %	Día	Humedad del grano %	Día	
Parabólico cemento	2	13	Sol	Soleada	6 a 8	23	6	18	7	1
Parabólico cemento	2	13	Sol	Muy lluviosa	16 a 23	23	10	18	12	2
Parabólico cemento	2	13	Sombra	Muy lluviosa	27 a 34	26	14	18	19	5
Carro madera	4	26	Sol	Lluviosa	16 a 20	24	10	18	14	4
Parabólico cemento	4	26	Sol	Lluviosa	22 a 34	24	14	18	18	4

* cph: café pergamino húmedo; aw: actividad del agua

Para la operación de secadores mecánicos, según Parra-Coronado et al. (2008a), cuando la temperatura del aire de secado es inferior a 50 °C, el tiempo del proceso incrementa en 17 h en la cámara de secado; es decir, si el tiempo de secado a 50 °C es de 23 h, entonces a 40 °C es de 40 h. Pero, si la temperatura del aire es de 40 °C, se obtiene una mayor uniformidad en el contenido de humedad final del grano. A medida que aumenta el caudal de aire y disminuye el espesor de la capa del grano, el tiempo de secado merma, el contenido de humedad final del grano es más uniforme, pero la eficiencia térmica global del secado disminuye (Figura 33), mientras que la capacidad dinámica de secado (kg de café pergamino seco/hora*m²) aumenta, a medida que aumenta el caudal de aire y el espesor de la capa de grano, lo cual es más notorio para espesores de capa superiores de 0,2 m (Figura 30). De acuerdo con las simulaciones realizadas, no es aconsejable operar secadores estáticos con espesores de capa inferiores a 0,2 m cuando se utiliza caudales de aire superiores a 20 m³/min .m², ya que bajo estas condiciones, la dinámica de secado y la eficiencia térmica son muy bajas (Parra-Coronado et al., 2008a).

Es claro que se debe realizar un control de la humedad en el grano, con el fin de evitar la generación de riesgos de inocuidad causados por microorganismos y sus toxinas generadas en el producto, considerando los valores higrométricos junto con las condiciones ambientales y de operación con que se impida el crecimiento microbiano y, el grano sea estable y seguro para el consumo posterior; además, se debe entender que el secado es un proceso que implica costos en trabajo, espacio, tiempo y, hasta monetario; por lo tanto, no es una etapa de la que se deba prescindir, pues si el grano se deja un tiempo con una humedad mayor al límite permisible, además del riesgo microbiológico, se afectará su calidad física y sensorial, mientras que si la humedad está por debajo del límite mínimo, implicará pérdidas a la



economía del productor, a causa del peso perdido y generará efectos negativos en las características del grano, como cristalización o colores muy pálidos, así que, es de gran relevancia tener un estricto control en la humedad del café.

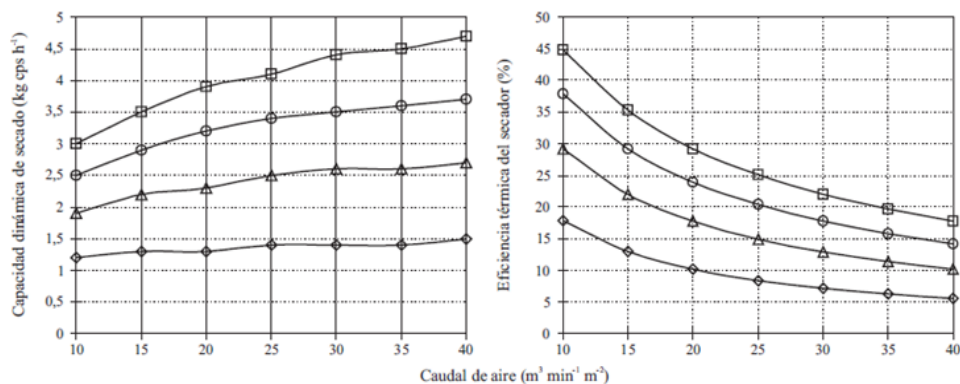


Figura 33

Diagramas de operación en función del caudal de aire y del espesor de la capa de grano para el café pergamino ubicado en cámaras del secador

Fuente: Parra-Coronado et al. (2008a)

Humedad de equilibrio y calor latente del café

Los granos de café tienen naturaleza higroscópica, ganan o pierden ciertas cantidades de agua, según las condiciones del aire donde están localizados y de la composición en sí del grano. Existe una condición de equilibrio que ocurre cuando la presión de vapor del aire es igual a la presión de la superficie del grano, donde ya no hay pérdida ni ganancia de humedad. El café recién lavado tiene un contenido de humedad superior al contenido de humedad de equilibrio correspondiente a las condiciones ambientales del aire; de esta forma, existe la tendencia natural a que los granos pierdan humedad y se sequen, aunque lentamente. Si estos mismos granos son colocados en un secador, donde la temperatura del aire está por encima de la temperatura ambiente, el contenido de humedad de equilibrio correspondiente será mucho menor y, la tasa de secado aumentará considerablemente (Trejos-Rodríguez et al., 1989).

Es fundamental conocer esta humedad de equilibrio y las curvas del proceso, para el establecimiento de modelos matemáticos que permitan mejorar el secado con el uso de la simulación de este proceso. Trejos-Rodríguez et al. (1989) han reportado las siguientes curvas de humedad de equilibrio (Figuras 34 y 35) y la ecuación correspondiente, a diferentes temperaturas y contenidos de humedad:

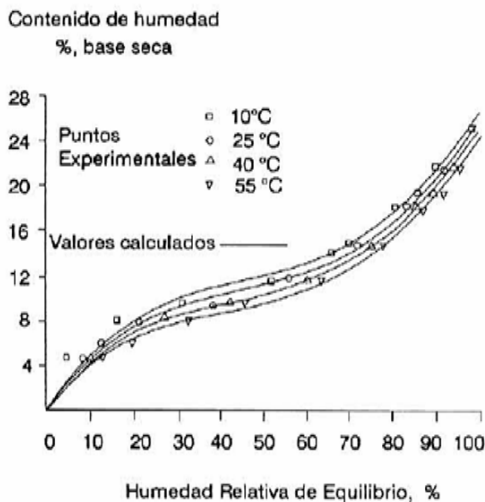


Figura 34
 Curvas de contenido de humedad de equilibrio del café pergamino, obtenidas de Cenicafé
 Fuente: Trejos-Rodríguez (1989)

Las ecuaciones para la humedad relativa de equilibrio obtenidas con análisis de regresión no lineal son las siguientes, de acuerdo con Trejos-Rodríguez et al. (1989):

Para café pergamino

$$M_e = (61,030848HR - 108,371410HR^2 + 74,46105HR^3)e^{(-0,037049HR+0,070114HR^2-0,035177HR^3)(T)} \quad (105)$$

Para café verde

$$M_e = (58,14112HR - 113,5835HR^2 + 87,45826HR^3)e^{(-0,0154638+0,0094153HR)(T)} \quad (106)$$

M_e : humedad de equilibrio del grano (%)
 T: temperatura del aire, °C
 HR: humedad relativa, decimal



Según Trejos-Rodríguez et al. (1989), el calor latente de vaporización es otra propiedad física de gran importancia para poder cuantificar la eficiencia térmica de los secadores, ya que consiste en la cantidad de energía necesaria para evaporar el agua contenida en los granos, lo cual permite conocer el consumo de combustible o energía para llevar a cabo el proceso de forma óptima. Estos autores reportan la ecuación correspondiente para el cálculo del calor latente de vaporización del agua contenida en el producto, como se muestra a continuación:

Café pergamino

$$\lambda = (2502,4 - 2,4295T)(1 + 1,44408e^{(-21,6011H)}) \quad (107)$$

Café verde

$$\lambda = (2502,4 - 2,4295T)(1 + 0,56462e^{(-15,821H)}) \quad (108)$$

λ : calor latente de vaporización del agua contenida en el producto (KJ/Kg)

H : contenido de humedad del grano, decimal, base seca

Todos estos datos específicos para el grano de café son necesarios para construir modelos matemáticos basados en los principios teóricos del secado y de la energía solar vistos en los capítulos anteriores, con los que ya se tendría la capacidad de efectuar diseños de equipos de secado para el café, por lo que en el próximo capítulo se describirá los análisis matemáticos fundamentados en la ingeniería del proceso de secado.

04

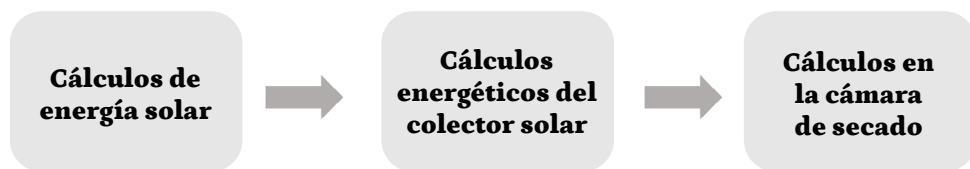
Análisis matemáticos para
el diseño de secadores
solares



La teoría vista anteriormente no será para nada en vano; ahora, es tiempo de aplicarla, ya que ella será la base para desarrollar un gran número de cálculos mediante las expresiones matemáticas correspondientes para generar modelos que definan y expliquen de forma matemática lo ocurrido en el secado. Será necesario realizar estimaciones de la *energía solar* que ingresa al sistema de *colección solar*; paralelamente, se deberá estimar el calor que podrá ser utilizado en el secado y, por último, se hará un análisis matemático en la cámara de secado, donde se calcula factores como la velocidad de secado, la temperatura aproximada en el grano, etc.

Sin embargo, para cada sistema de secado o tipo de colección solar se desarrolla una serie de cálculos diferentes; así que, en este caso se aplicará la teoría del proceso para construir modelamientos matemáticos para *colectores solares de placa plana*, *concentradores con colectores parabólicos* y, para el secado del grano en *una cámara vertical de bandejas*. Por lo tanto, observaremos variaciones para cada sistema; si se modifica cualquier factor que condicione la operación, por ejemplo, si se aumenta el flujo de aire o su velocidad lineal, se requerirá más calor, lo que disminuirá la temperatura del aire que entra a la cámara secante, pero aumentará la velocidad de secado; si se varía el ancho de la parábola del concentrador solar, el punto focal (donde se localizará el colector) también variará; si operamos en condiciones ambientales diferentes, es decir, al modificar aquellos factores del entorno, el proceso variará, lo que requerirá también alterar aquellas variables de diseño, como las dimensiones del equipo de secado. En otras palabras, veremos que, cualquier alteración en el sistema modificará todo el proceso y, para esto se requiere contar con los modelos para poder simular el proceso y estar en capacidad de emprender diseños de los equipamientos de secado.

Como se ha mencionado, nuestro fin es desarrollar modelos matemáticos de todo el sistema de secado, pero, para ello es imprescindible realizar cálculos para cada etapa por separado y así, combinarlos hasta generar un algoritmo matemático que consiste en una serie de cálculos en orden lógico, que permita simular la operación calculando cada etapa, desarrollados en tres grandes etapas:



Estos cálculos deben ser realizados para cada sistema de secado por separado. Empezaremos con el procedimiento para el colector de placa plana, estableciendo los modelos para la energía solar, el sistema de colección solar y, finalmente, el secado del grano. Dado que se parte de suposiciones teóricas del proceso, se hace varias aproximaciones para determinar los valores finales a la operación real. Este procedimiento se aplica de forma similar para cualquier sistema de secado solar.

Colector solar de placa plana Procedimiento de cálculos para la energía solar

Se calcula los siguientes factores para obtener el valor aproximado de la irradiancia solar global I_G :

- Declinación solar δ
- Ángulo horario W_h
- Altura solar h
- Irradiancia solar extraterrestre horizontal, I_0
- Ángulo de incidencia θ
- Coeficiente de transmisión total atmosférico, k_T
- Irradiancia solar difusa y directa, I_D y I_B , respectivamente
- Irradiancia solar para planos inclinados, $I_G(\alpha, \beta)$.

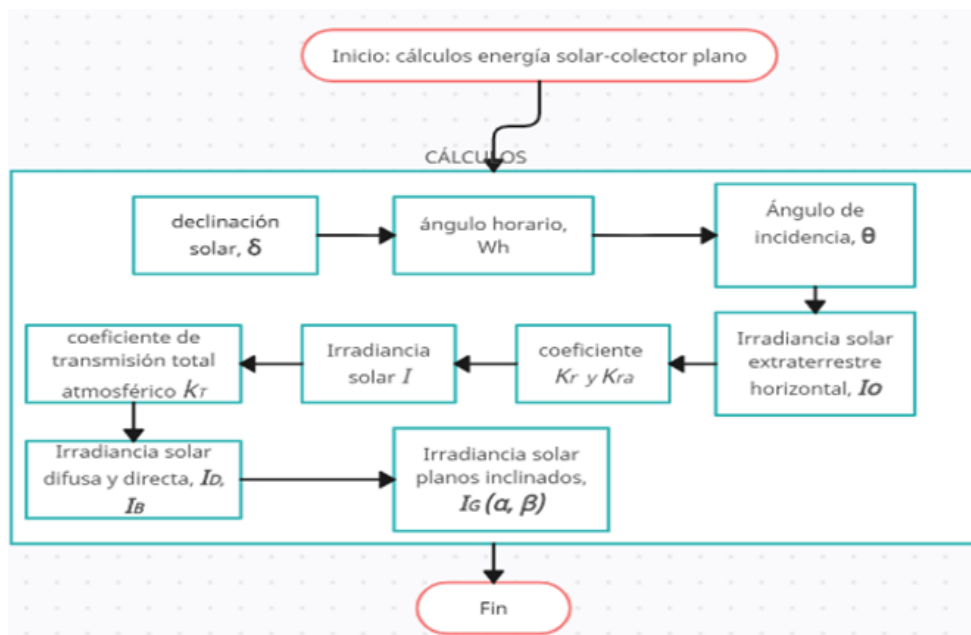


Figura 34
Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo de la energía en el colector solar plano



Procedimiento de cálculos en el colector solar plano

Se determina los siguientes factores, para establecer las condiciones teóricas en el colector solar; es decir, con el objeto de simular el proceso de calentamiento por intercambio de calor obtenido de la *irradiancia solar*; por lo tanto, se calcula:

- Coeficiente de transferencia de calor por convección del ambiente $h_{c\text{sur}}$
- Coeficiente de transferencia de calor global U_L
- Propiedades termofísicas a temperatura ambiental, $f(T_{\text{sur}})$
- Flujo másico del aire en la sección placa-aislante, $G_a \rightarrow f(\rho_a, T_{\text{sur}})$
- Capacidad calórica del colector C_{col}
- Temperatura de la placa T_p
- Números adimensionales R_a y P_r para la sección placa-aislante
- Coeficientes de transferencia de calor convectivo en las secciones placa-cubierta y placa-aislante, h_{c1} y h_{c2}
- Establecer el algoritmo de cálculo para los coeficientes de transferencia de calor convectivo h_c según las condiciones físicas
- Temperatura de la cubierta T_c con el balance de energía respectivo
- Temperatura del aislante T_{ais}
- Coeficientes de transferencia de calor por radiación h_r en cada sección física
- Nuevo coeficiente de transferencia de calor global, U_L''
- Factor de eficiencia F
- Factor de remoción de calor F_r
- Calor útil q_u
- Temperatura del aire calentado T_{fo}
- Temperatura media del aire, T_{fm}
- Eficiencia del colector, η .

Segunda aproximación con las condiciones simuladas en la primera:

- Propiedades termofísicas en cada sección
- Capacidad calórica en el colector C_{col}''
- Temperatura de la placa T_p'' , temperatura de la cubierta T_c'' , temperatura del aislante T_{ais}''
- Coeficientes de transferencia de calor por radiación h_r'' en cada sección
- Números adimensionales R_a'' y P_r''
- Coeficientes de transferencia de calor por convección con las nuevas condiciones, h_c'' para cada sección
- Nuevo coeficiente de transferencia de calor global U_L'''
- Factor de eficiencia F''
- Factor de remoción de calor F_r''
- Calor útil q_u''
- Temperatura del aire calentado, T_{fo}''
- Temperatura media del aire, T_{fm}''
- Eficiencia del colector η'' .

El mismo procedimiento se realiza hasta obtener las aproximaciones que se desee; entre más se haga, más precisión se obtendrá. En nuestro caso, se efectúa un total de cinco, usando en cada una las condiciones establecidas o simuladas en su aproximación predecesora. Las comillas que aparecen en cada variable indican la aproximación correspondiente.

Procedimiento de cálculos en la cámara de secado

- Presión de vapor de saturación del aire frío (entrada), $P_{sat} \rightarrow f(T_{ac})$
- Presión de vapor del aire frío, P_v
- Presión de vapor de saturación del aire caliente, $P_{sat} \rightarrow f(T_{ah})$
- Humedad relativa del aire caliente, H_R
- Contenido de humedad de equilibrio del grano, M_{eq}
- Tiempo de secado t
- Flujo másico del aire a través de las bandejas de secado, G_a
- Flujo de carga del grano, G_p
- Contenido de humedad removida del aire, ΔH
- Contenido de humedad inicial del aire caliente, H
- Calor específico del grano, C_{pg}
- Calor húmedo, C_s
- Calor latente del grano, λ_s
- Radio equivalente del grano, R_{eq}
- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el aire y el grano, h_c
- Temperatura de salida del aire, T_{af}
- Cambio de temperatura del aire a la entrada y a la salida de la cámara, ΔT_a
- Temperatura final del grano, T_{gf}

Para la segunda aproximación, en lugar de usar las temperaturas iniciales del grano y el aire, se usa las temperaturas promedio (\bar{T}_g, \bar{T}_a) basadas con los datos estimados en primera instancia; estas se requieren para seguir el mismo procedimiento desde el inicio, calculando dichas propiedades termofísicas ($P_{sat}, P_v, H_R, M_{eq}, H, C_{pg}, C_s$, etc.), hasta llegar a determinar la última aproximación de las temperaturas finales del grano y del aire.

- Tabulación y gráfica de datos del contenido de humedad del grano, $M(t)$
- Estimación de la velocidad de secado en período constante, R_c
- Gráfica de la velocidad de secado, $R(M,t)$.

Secador con concentrador solar parabólico

Se sigue el mismo procedimiento de cálculo utilizado para el colector solar plano; solo varía en la forma para calcular la irradiancia solar final y el valor de los coeficientes de transferencia de calor para un plano semicilíndrico; por lo tanto, los cálculos que se desarrolla son los siguientes:



Procedimiento de cálculos para la energía solar

Con el fin de obtener la *irradiancia solar* en plano inclinado, se calcula lo siguiente:

- Declinación solar δ
- Ángulo horario W_h
- Altura solar h
- Irradiancia solar extraterrestre horizontal, I_0
- Ángulo de incidencia θ
- Coeficiente de transmisión total atmosférico, k_T
- Irradiancia solar *difusa* y *directa*, I_D y I_B , respectivamente
- Propiedades físico-matemáticas de la parábola:
 - Modelamiento matemático
 - Distancia focal, ancho y altura, p , x e y
 - Longitud del arco formado por la parábola, S
 - Área superficial del concentrador
 - Ángulo formado por la línea recta desde el centro hasta la esquina de la parábola, β
- Irradiancia solar para el plano inclinado β , $I_G(\alpha, \beta)$
- Irradiancia solar concentrada al punto focal (al colector), I_{G2}

Procedimiento de cálculos en el colector solar semicilíndrico

Conlleva el mismo procedimiento al desarrollado para el **colector solar plano**; varía únicamente en la porción de irradiancia solar captada, al llegar concentrada al colector, por lo cual varían los coeficientes de transferencia de calor y, así, por lo tanto, varían las temperaturas estimadas; sin embargo, el proceso es el mismo, hasta llegar a una quinta aproximación de los factores térmicos.

El procedimiento de cálculos en la cámara de secado es el mismo referido en el anterior sistema (colector de placa plana), en donde variará el calor útil a causa de la energía que se ha concentrado al colector; así que, como la temperatura del aire será más alta, se modificará la capacidad de secado.

Procedimientos matemáticos de cada fase

El modelado matemático se ejecutará en una hoja de cálculo (*Excel*) que permita desarrollar *algoritmos* con procedimientos lógicos, para facilitar el ingreso de datos y su modificación por parte de cualquier usuario. En esta sección se generará varios algoritmos, ya que es una forma de aplicar las bases teóricas de los procesos del secado en una plataforma matemática (hoja de cálculo). Para *automatizar* los cálculos correspondientes, es necesario saber usar el software y entender la *lógica matemática*.

Colector solar de placa plana Cálculos para energía solar I_G

► Declinación solar δ

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left(360 \times \frac{284 + n}{365} \right)$$

El usuario tendrá la libertad de digitar el número de día.

► Ángulo horario W_h

$$wh = nh \times 15^\circ$$

Algoritmo para el cálculo de W_h , según las horas especificadas:

Si la hora es 12 del mediodía, W_h será 0, si está por debajo o por encima de las 12, W_h será negativo o positivo, respectivamente; entonces:

$$\text{Si } (H=12; W_h = 0; \text{ Si } (H < 12; W_h = (H - 12) * 15; W_h = (H + 12) * 15))$$

El usuario tendrá la libertad de digitar la hora del día H en que va a operar; la expresión $(H \pm 12)$ da el valor de nh (número de hora del día).

► Irradiancia solar extraterrestre horizontal, I_0

$$I_0 = I_{CS} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \left(\frac{2\pi n}{365} \right) \right) \cdot \cos \theta$$

► Ángulo de incidencia θ

$$\cos \theta = \text{sen} l \cdot \text{sen} \delta + \text{cos} l \cdot \text{cos} \delta \cdot \text{cos} wh$$

Digitar el valor de la Latitud L : esta puede ser consultada en datos geográficos de la región o localidad en la que se piense operar.

► Coeficiente de transmisión total atmosférico, k_T

$$k_T = \frac{I}{I_0}$$

$$\frac{I}{I_0} = K_r (T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})^{0,5}$$

$$K_r = K_{ra} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{0,5}$$

$$P = P_0 e^{\frac{-Mgh}{RT}}$$



El usuario deberá digitar los valores de temperaturas máxima y mínima promedio presentadas en la localidad, además del dato de altura sobre el nivel del mar (msnm) y si la zona es costa o interior, para determinar k_{ra} .

Se prosigue con el cálculo de *irradiancia solar extraterrestre horizontal*, I

➤ **Irradiancia solar difusa y directa, I_D y I_B , respectivamente**

$$\frac{I_D}{I} = 1 - 0,09k_T \quad \text{para } k_T \leq 0,22$$

$$\frac{I_D}{I} = 0,951 - 0,160k_T + 4,388k_T^2 - 16,638k_T^3 + 12,336k_T^4 \quad \text{para } 0,22 < k_T \leq 0,8$$

$$\frac{I_D}{I} = 0,165 \quad \text{para } k_T > 0,8$$

Con estas ecuaciones se calcula I_D , con lo que solo queda calcular I_B :

$$I_B = I - I_D$$

➤ **Irradiancia solar para planos inclinados, $I_G(\alpha, \beta)$**

El usuario debe digitar el ángulo al cual está inclinado el colector solar, β .

$$I(\beta) = I_G = I_B(\beta) + I_D(\beta) + I_R(\beta)$$

...donde,

$$I_B(\beta) = I_B(0) \cdot \cos\theta$$

$$I_D(\beta) = I_D(0) \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right)$$

$$I_R(\beta) = I(0) \cdot \rho \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right)$$

Cálculos en el colector solar plano

➤ **Coefficiente de transferencia de calor por convección del ambiente h_{csur}**

$$h_{csur} = 5,7 + 3,8v$$

...donde la principal y única variable es la velocidad promedio del aire que entra al colector.

➤ **Coefficiente de transferencia de calor global de las pérdidas U_L**

$$U_L = U_{L1} + U_{L2}$$

Es decir, las pérdidas por arriba y por abajo del colector.

Como primera aproximación, se determina este coeficiente con base en el valor de h_{csur} que solo depende de la velocidad del viento local y de la propiedad de conductividad térmica de la cubierta y del aislante, las únicas propiedades con las que se puede contar hasta ahora:

$$U_L' \approx \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{csur}} + \frac{L_C}{k_C}} \right)_1 + \left(\frac{1}{\frac{1}{h_{csur}} + \frac{L_a}{K_a}} \right)_2 \quad (109)$$

► **Propiedades termofísicas a temperatura ambiental, $f(T_{sur})$**

Mediante una metodología de regresión lineal y polinómica se puede obtener los modelos matemáticos para cada propiedad, tabulando los datos experimentales en una hoja de cálculo, para luego ser graficados y correlacionados matemáticamente, generando así la ecuación correspondiente a dicha propiedad.

Se determina estas propiedades en una primera aproximación, al tomar la temperatura ambiental como referencia:

- **Viscosidad del aire ambiental (m^2/s), según datos tabulados (Apéndices 14-16)**

$$\nu = 8 \times 10^{-11} T_{sur}^2 + 4 \times 10^{-8} T_{sur} - 2 \times 10^{-6} \quad (110)$$

$$R^2 = 0,9998$$

Viscosidad del aire en la sección placa-cubierta (Apéndices 14-16)

$$\nu = 8 \times 10^{-11} T_{fi}^2 + 4 \times 10^{-8} T_{fi} - 2 \times 10^{-6} \quad (111)$$

$$R^2 = 0,9998$$

Viscosidad del aire en la sección placa-aislante (Apéndices 14-16)

$$\nu = 8 \times 10^{-11} T_{fi}^2 + 4 \times 10^{-8} T_{fi} - 2 \times 10^{-6} \quad (112)$$

$$R^2 = 0,9998$$

- **Conductividad térmica del aire ambiental (W/mk), según datos tabulados (Apéndices 14-16)**

$$k = 0,0205 e^{0,001 T_{sur}} \quad (113)$$

$$R^2 = 0,9163$$



Conductividad térmica del aire sección placa-cubierta (W/mk) (Apéndices 14-16)

$$k = 0,0205e^{0,001T_{fi}} \quad (114)$$

$$R^2 = 0,9163$$

Conductividad térmica del aire sección placa-aislante (W/mk) (Apéndices 14-16)

$$k = 0,0205e^{0,001T_{fi}} \quad (115)$$

$$R^2 = 0,9163$$

• **Calor específico aire ambiental (J/kg.K), según datos tabulados (Apéndices 14-16)**

$$C_p = (28,11 + 0,001967T_{sur} + 0,000004802T_{sur}^2 - 0,00000001966T_{sur}^3) * \frac{1000}{28,97} \quad (116)$$

Calor específico aire sección placa-cubierta (J/kg.K) (Apéndices 14-16)

$$C_p = (28,11 + 0,001967T_{fi} + 0,000004802T_{fi}^2 - 0,00000001966T_{fi}^3) * \frac{1000}{28,97} \quad (117)$$

Calor específico aire sección placa-aislante (J/kg.K) (Apéndices 14-16)

$$C_p = (28,11 + 0,001967T_{fi} + 0,000004802T_{fi}^2 - 0,00000001966T_{fi}^3) * \frac{1000}{28,97} \quad (118)$$

• **Densidad aire ambiental (Kg/m³), según datos tabulados (Apéndices 14-16)**

$$\rho = 357,45T_{sur}^{-1,004} \quad (119)$$

$$R^2 = 1$$

Densidad aire sección placa-cubierta (Kg/m³) (Apéndices 14-16)

$$\rho = 357,45T_{fi}^{-1,004} \quad (120)$$

Densidad aire sección placa-aislante (Kg/m³) (Apéndices 14-16)

$$\rho = 357,45T_{fi}^{-1,004} \quad (121)$$

- **Difusividad térmica aire ambiental (m^2/s), según datos tabulados (Apéndices 14-16)**

$$\alpha = 2 \times 10^{-10} T_{sur}^2 - 8 \times 10^{-8} T_{sur} + 4 \times 10^{-5} \quad (122)$$

$$R^2 = 0,9926$$

Difusividad térmica aire sección placa-cubierta (m^2/s) (Apéndices 14-16)

$$\alpha = 2 \times 10^{-10} T_{fi}^2 - 8 \times 10^{-8} T_{fi} + 4 \times 10^{-5} \quad (123)$$

Difusividad térmica aire sección placa-aislante (m^2/s) (Apéndices 14-16)

$$\alpha = 2 \times 10^{-10} T_{fi}^2 - 8 \times 10^{-8} T_{fi} + 4 \times 10^{-5} \quad (124)$$

- **Coefficiente de expansión volumétrica del aire ($1/K$), según datos tabulados (Apéndices 14-16)**

$$\beta = 3\alpha_T \quad (125)$$

α_T : Dilatación térmica (0,00367 para el aire)

$$T_{sur} = T_{fi} (K)$$

- **Flujo másico del aire en la sección placa-aislante y placa-cubierta (Kg/s), ($\frac{Kg}{s}$), $G_a \rightarrow f(\rho_a, T_{fi}, v)$**

$$G_a = \rho_a v_a A \quad (126)$$

ρ_a : densidad del aire en la respectiva sección.

v_a : velocidad lineal del aire en la respectiva sección.

A: área trasversal de la sección.

► **Capacidad calórica del colector C_{col} ($J/K.s$)**

$$C_{col} = G_a (C_{pp} + \alpha C_{pc}) = G_{ap-a} C_{pp} + \alpha G_{ap-c} C_{pc} \quad (127)$$

G_{ap-a} : flujo másico del aire en la sección placa-aislante.

G_{ap-c} : flujo másico del aire en la sección placa-cubierta.

C_{pp} y C_{pc} : calores específicos de la placa y la cubierta respectivamente.

α : valor adimensional empírico.

Mediante regresión lineal de los datos de la Tabla 2 se obtuvo la siguiente relación, para una cubierta ($n=1$)



$$a_1 = 0,0705\varepsilon_p + 0,0836 \quad (128)$$

$$R^2 = 0,9988$$

Si el colector consta de más de una cubierta, los cálculos varían; entonces, se debe efectuar otro tipo de balance energético, pues se agrega una resistencia calórica por cada cubierta, resistencia a la conducción sobre la cubierta y resistencia a la convección en el espacio entre las dos cubiertas, por lo que el coeficiente de transferencia de calor de las pérdidas varía.

➤ **Temperatura de la placa T_p**

De la Ecuación (102) se despeja la temperatura de la placa y contando con los anteriores cálculos ya es posible determinarla:

$$T_p = \frac{\tau_c \alpha_p I_G - e^{-\frac{A_c U_L t}{(mC)_{col}}} (\tau_c \alpha_p I_G - U_L (T_{pi} - T_{sur}))}{U_L} + T_{sur} \quad (129)$$

➤ **Números dimensionales R_a y P_r para la sección placa-aislante**

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_p - T_{fi})L^3}{\alpha v} \quad (130)$$

$$Pr = \frac{v}{\alpha} \quad (131)$$

➤ **Coefficientes de transferencia de calor convectivo en las secciones placa-cubierta y placa-aislante, h_{c1} y h_{c2}**

Se utiliza las ecuaciones (83 a 95), según sean las condiciones estructurales del colector. Como primera aproximación h_{c1} y h_{c2} , se evalúa a la primera temperatura de la placa (T'_p) y a la ambiental (T_{sur}). h_{c1} se determina según los datos métricos de la abertura entre la placa y la cubierta, mientras que h_{c2} con las medidas espaciales entre la placa y el aislante, dichas medidas son las mostradas en la Figura 28 (dimensiones b y a). Se supone que el ángulo de inclinación del colector es igual en ambas secciones.

El ángulo crítico τ^* es calculado a partir de las siguientes relaciones matemáticas generadas con regresión lineal de la Tabla 1, como se ha graficado en la Figura 36:

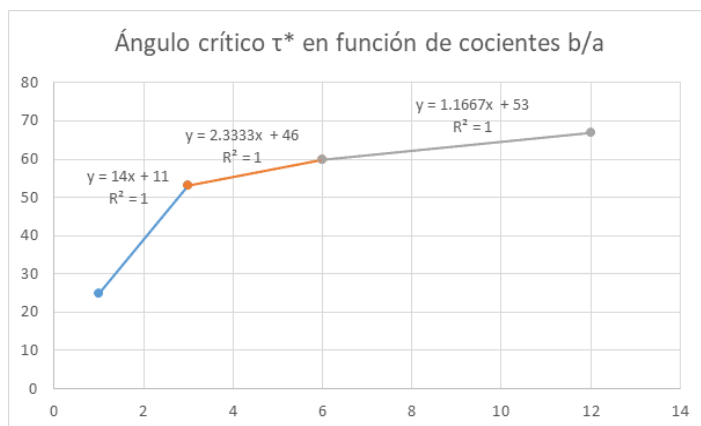


Figura 37
 Regresión matemática para el ángulo crítico en función de los coeficientes b/a de la Tabla 1
 Fuente: Bergman et al. (2011, p. 624)

Por lo tanto:

$$\tau^* = 14 \left(\frac{b}{a} \right) + 11 \quad 1 \leq \frac{b}{a} \leq 3 \quad (132)$$

$$\tau^* = 2,3333 \left(\frac{b}{a} \right) + 46 \quad 3 < \frac{b}{a} \leq 6 \quad (133)$$

$$\tau^* = 1,667 \left(\frac{b}{a} \right) + 53 \quad 6 < \frac{b}{a} \leq 12 \quad (134)$$

$$\tau^* = 70^\circ \quad \frac{b}{a} > 12 \quad (135)$$

Algoritmo para cálculo de τ^* según el valor de b/a , digitado en la hoja de cálculo:

Se realiza el cálculo de τ^* en una cadena de condiciones usando operadores lógicos; según sean los valores de b/a , se utiliza la ecuación respectiva ya vista; entonces, la condición de entrada será el rango de valores en que esté el b/a obtenido; por ejemplo, para la condición $1 \leq b/a \leq 3$ el valor debe estar entre 1 y 3, y la respuesta será la ecuación a usar. Si b/a es $1 \leq b/a \leq 3$, el resultado se obtiene de la ecuación (132); si $3 \leq b/a \leq 6$, el resultado se obtiene de la ecuación (133), así sucesivamente. Si no se cumple ninguna de las condiciones anteriores, que se obtenga un valor de 70. El algoritmo (abarca ángulo crítico y coeficientes de transferencia de calor) se desarrolla gráficamente como se muestra a continuación:

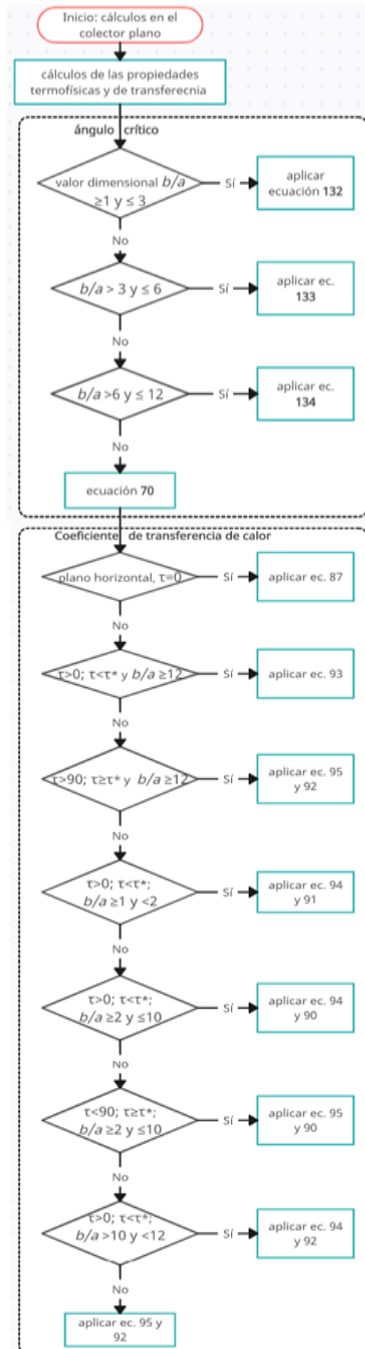


Figura 38
Diagrama de flujo para desarrollar el algoritmo de cálculo en el colector solar plano.

Y se escribe de la siguiente forma:

$SI (Y(b/a \geq 1; b/a \leq 3); (132); SI (Y(b/a > 3; b/a \leq 6); (133); SI(Y(\frac{b}{a} > 6; \frac{b}{a} \leq 12); (134); 70))))$

Los números en paréntesis ((132), (133), etc.) representan la ecuación específica que debe ser usada. Los símbolos SI, Y, <, >, ≤, ≥ son los operadores lógicos (SI: condicional, Y: conjunción); esto es tema de lógica matemática, de lo que se supone ya se tiene conocimiento, así que no será explicado aquí; lo que importa es cuál ecuación usar según las condiciones presentadas y, como ya se mencionó, el algoritmo es la aplicación de la base teórica.

➤ **Establecer el algoritmo de cálculo para los coeficientes de transferencia de calor convectivo h_c según las condiciones físicas**

Al contar con el valor del ángulo crítico se puede establecer las condiciones de inclinación para calcular los coeficientes de transferencia h de las ecuaciones correspondientes. Para el cálculo de cada coeficiente se plantea el siguiente algoritmo en una hoja de cálculo (EXCEL, por ejemplo):

combinado de estas fórmulas. Con este algoritmo se procede a determinar de forma automática el coeficiente de transferencia de calor por convección correspondiente a las condiciones físicas del colector (ángulo de inclinación y relación entre la altura y largo de la cavidad) especificadas por el usuario, para cada sección o cavidad.

Por lo tanto, el usuario deberá ingresar el ángulo de inclinación del colector (τ), el largo (b) y la altura (a) de la cavidad 1 (espacio entre la cubierta y la placa) y de la cavidad 2 (espacio entre la placa y el aislante).

► **Temperatura de la cubierta T_c con el balance de energía en la cubierta traslúcida**

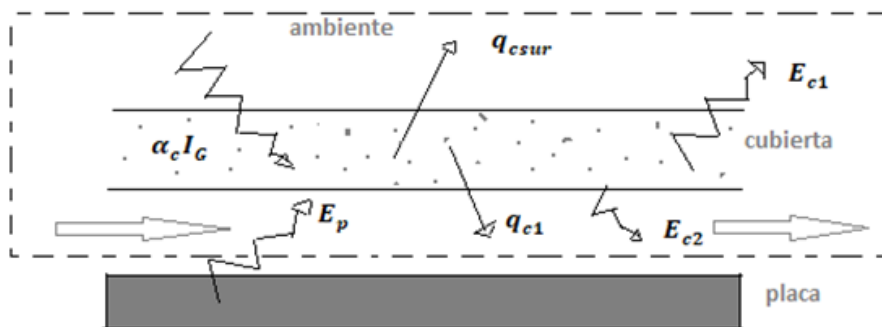


Figura 39
Esquema de los componentes del balance de energía para la cubierta traslúcida

Hay transferencia de energía por convección y también por radiación, al estar en un entorno fluido (aire). Del esquema gráfico (Figura 37) se puede obtener el siguiente balance:

$$\alpha_c I_G + E_p = q_{csur} + q_{c1} + E_{c2} + E_{c1} \quad (136)$$

...donde $\alpha_c I_G$ representa la porción de la energía solar por irradiación que ingresa a la cubierta traslúcida; E_p es la energía emitida por la placa hacia la cubierta en forma de radiación; q_{csur} es el calor que sale de la cubierta al ambiente y q_{c1} el que sale hacia abajo; E_{c1} es energía que emite la cubierta al ambiente y, E_{c2} la emitida hacia abajo como radiación.

Como primera aproximación, se desprecia la energía transferida por radiación: $E_p, E_{c2}, E_{c1} \sim 0$.

$$\alpha_c I_G = q_{csur} + q_{c1} = h_{csur}(T_c - T_{sur}) + h_{c1}(T_p - T_c) \quad (137)$$



$$\therefore T'_c = \frac{\alpha_c I_G - h'_{c1} T_p + h_{csur} T_{sur}}{h_{csur} - h'_{c1}} \quad (138)$$

- **Coefficientes de transferencia de calor por radiación h_r en la sección cubierta-ambiente y en la placa-cubierta: h_{rc1} , h_{rp1} y h_{rsur} .**

Con el valor de T'_c se puede hacer una primera estimación de los coeficientes h_r :

$$h'_{rc1} = \varepsilon_c \sigma (T_p'^2 + T_c'^2) (T_p' + T_c') \quad (139)$$

$$h'_{rp1} = \varepsilon_p \sigma (T_p'^2 + T_c'^2) (T_p' + T_c') \quad (140)$$

$$h'_{rsur} = \varepsilon_c \sigma (T_{sur}^2 + T_c'^2) (T_{sur} + T_c') \quad (141)$$

ε corresponde al coeficiente de emisividad (c: cubierta, p: placa).

- **Temperatura del aislante T_{ais}**

Balance de energía en la placa

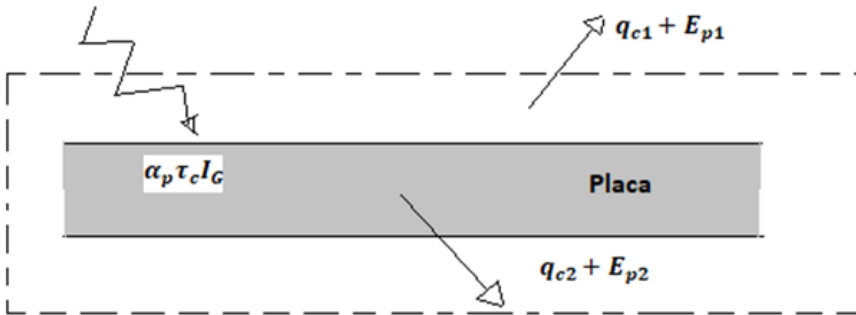


Figura 40
Esquema de los componentes del balance de energía para la cubierta traslúcida

Del esquema gráfico se obtiene el siguiente balance:

$$\alpha_p \tau_c I_G = q_{c1} + E_{p1} + q_{c2} + E_{p2} \quad (142)$$

$\alpha_p \tau_c I_G$ es la porción de energía solar por irradiación que ya ha atravesado la cubierta e ingresa a la placa; q_{c1} y q_{c2} es el calor que sale hacia arriba y abajo de la placa por convección; E_{p1} y E_{p2} es la irradiación emitida arriba y abajo.

$$\alpha_p \tau_c I_G = \frac{T_p - T_{sur}}{\frac{1}{h_{c1} + h_{rp1}} + \frac{L_c}{K_c} + \frac{1}{h_{csur} + h_{rc1}}} + \frac{T_p - T_{ais}}{\frac{1}{h_{c2} + h_{rp2}} + \frac{L_{ais}}{K_{ais}}} \quad (143)$$

$$\therefore T_{ais} = T_p - \left[\alpha_p \tau_c I_G - \frac{T_p - T_{sur}}{\frac{1}{h_{c1} + h_{rp1}} + \frac{L_c}{K_c} + \frac{1}{h_{csur} + h_{rc1}}} \right] \left[\frac{1}{h_{c2} + h_{rp2}} + \frac{L_{ais}}{K_{ais}} \right] \quad (144)$$

Como primera aproximación, se desprecia el valor del calor radiante desde la placa hacia el aislante: $E_{p2} \sim 0 \rightarrow h_{rp2} \sim 0$.

$$\rightarrow T'_{ais} = T_p - \left[\alpha_p \tau_c I_G - \frac{T_p - T_{sur}}{\frac{1}{h_{c1} + h_{rp1}} + \frac{L_c}{K_c} + \frac{1}{h_{csur} + h_{rc1}}} \right] \left[\frac{1}{h_{c2}} + \frac{L_{ais}}{K_{ais}} \right] \quad (145)$$

► **Coefficientes de transferencia de calor por radiación hr en la sección placa-aislante y aislante-ambiente: h_{rp2} , h_{rsur2} .**

Con el valor de T'_{ais} procedemos a hacer una primera estimación de los coeficientes h_r en torno al aislante:

$$h'_{rp2} = \varepsilon_p \sigma (T_p'^2 + T_{ais}'^2) (T_p' + T_{ais}') \quad (146)$$

$$h'_{rsur2} = \varepsilon_{ais} \sigma (T_{sur}'^2 + T_{ais}'^2) (T_{sur}' + T_{ais}') \quad (147)$$

$$E.C. (83): h_{rp-a} = \frac{\sigma (T_p'^2 + T_{ais}'^2) (T_p' + T_{ais}')}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{ais}} - 1} \quad (148)$$

► **Nuevo coeficiente de transferencia de calor global, U'_L**

Con los datos de primera aproximación de los coeficientes de transferencia h_r se procede a determinar una segunda aproximación del coeficiente de transferencia de calor por pérdidas, agregándolos a la ecuación:



$$U_L'' = \left[\frac{1}{\frac{1}{h_{c1} + h_{rp1}} + \frac{L_c}{K_c} + \frac{1}{h_{c\text{sur}1} + h_{r\text{sur}1}}} + \frac{1}{\frac{1}{h_{c2} + h_{rp2}} + \frac{L_{\text{ais}}}{K_{\text{ais}}} + \frac{1}{h_{c\text{sur}2} + h_{r\text{sur}2}}} \right] \quad (149)$$

► **Factor de eficiencia F**

Se presenta el caso de la Ecuación (81); es decir, placa de dos cubiertas, quedando así

$$F = \frac{1}{1 + \frac{U_L''}{h_{c2} + \frac{1}{\frac{1}{h_{c2}} + \frac{1}{h_{rp-a}}}}} \quad (150)$$

► **Factor de remoción de calor F_r**

Se utiliza la Ecuación (76); para la primera aproximación solo se usará U_L' .

► **Calor útil Q_u**

Se aplica la Ec. (75). En una 1ª aproximación, se toma a T_{fm} como T_{fo} y se usa a U_L'' .

► **Temperatura del aire calentado T_{fo}**

A partir de la Ecuación (72) se obtiene T_{fo} :

$$T_{fo} = \frac{Q_u}{A_c U} + T_{fi} = \frac{Q_u}{A_c (h'_{c2} + h'_{rp-a})} + T_{fi} \quad (151)$$

► **Temperatura media del aire, T_{fm}**

$$\bar{T}'_{fm} = \frac{T_{fi} + T'_{fo}}{2} \quad (152)$$

► **Eficiencia del colector, η**

$$\eta = \frac{Q_u}{I_G A_c} \quad (153)$$

Segunda aproximación con las condiciones simuladas en la primera:

► Propiedades termofísicas en cada sección

Se determina todas las propiedades de la primera aproximación con las mismas fórmulas, pero, evaluándolas a las nuevas temperaturas calculadas, como sigue:

- ✓ *Propiedades termofísicas para el aire ambiental:* se usa T_{fi} para todas, excepto para el coeficiente de expansión volumétrica:

$$\beta = \frac{1}{T'_{fm}} \quad (154)$$

- ✓ *Temperatura del aire entre la cavidad placa-cubierta:* se usa para todas la temperatura media de la placa y la cubierta:

$$\bar{T} = \frac{T''_p + T''_c}{2} \quad (155)$$

Para esta sección se determina las propiedades luego de calcular T''_p y T''_c ; por el momento no se utiliza para fines de cálculo.

- ✓ *Temperatura del aire entre la placa y el aislante:* se toma todas a la temperatura media del aire ya calculada, \bar{T}'_{fm} .

► Capacidad calórica en el colector C''_{col}

Se vuelve a usar la Ecuación (127), pero, para calcular G_a a esta vez usando la Ecuación (126) se evalúa la densidad del aire entre la placa y el aislante de la segunda aproximación: $G_a \rightarrow f(\rho''_a)$

Temperatura de la placa T''_p , temperatura de la cubierta

► T''_c , temperatura del aislante T''_{ais}

T''_p : se usa la Ecuación (129), pero, evaluando a U''_L y C''_{col}

T''_c : se evalúa a T''_p , a T'_c y los coeficientes de transferencia siguen siendo los mismos de la primera aproximación (h'_c, h'_r), quedando así:

$$T''_c = \frac{\alpha_c I_G - h'_{c1} T_p + h_{rp1} (T''_p - T'_c) + h_{csur} T_{sur} + h_{rc1} (T''_p - T'_c)}{h'_{csur} - h'_{c1} + h'_{rp2} + h'_{rsur1}} \quad (156)$$

$h_{rp1} \rightarrow f(T''_p, T'_c)$ y $h_{rc1} \rightarrow f(T''_p, T'_c)$
 $T''_{ais} = f(T''_p, h'_c, h'_r, T_{sur})$



► **Coefficientes de transferencia de calor por radiación h_r'' en cada sección**

Ecuaciones (139-141) y (145-147), con las siguientes condiciones:

$$h_r'' = f(T_p'', T_c'', T_{ais}'', T_{sur}'')$$

Es decir, estos coeficientes están en función de la segunda aproximación de las temperaturas

► **Números adimensionales R_a'' y P_r''**

R_a'' : Ecuación (130)

$$R_{a1}'' = f(T_p'', T_c'', \nu_{p-c}'', \alpha_{p-c}'', \beta'')$$

$$R_{a2}'' = f(T_p'', T_{fm}'', \nu_{p-a}'', \alpha_{p-a}'', \beta'')$$

P_r'' : Ecuación (131)

$$P_{r1}'' = f(\nu_{p-c}'', \alpha_{p-c}'')$$

$$P_{r2}'' = f(\nu_{p-a}'', \alpha_{p-a}'')$$

$\nu_{p-c}'', \alpha_{p-c}''$: Viscosidad y difusividad térmica del aire en la sección placa-cubierta

$\nu_{p-a}'', \alpha_{p-a}''$: Viscosidad y difusividad térmica del aire en la sección placa-aislante

► **Coefficientes de transferencia de calor por convección con las nuevas condiciones, h_c'' , para cada sección**

Se usa las mismas ecuaciones de la primera aproximación, variando las propiedades termodinámicas respectivas:

$$h_c'' = f(R_a'', P_r'', k'')$$

Cada propiedad está evaluada para cada sección.

► **Nuevo coeficiente de transferencia de calor global U_L'''**

Ecuación (149), evaluada a nuevas condiciones:

$$U_L''' = f(h_{c1}'', h_{rp1}'', h_{csur1}'', h_{rsur1}'', h_{c2}'', h_{rp2}'', h_{csur2}'', h_{rsur2}'', K_c'', K_{ais}'')$$

► **Factor de eficiencia F''**

Ecuación (150), evaluado a los nuevos coeficientes de transferencia de calor:

$$F'' = f(U_L''', h_{rp-a}'', h_{c2}'')$$

➤ **Factor de remoción de calor F_r''**

Ecuación (76), evaluado a las nuevas condiciones:

$$F_r'' = f(U_L''', C_{ppa}'', \rho_{pa}'')$$

C_{ppa}'', ρ_{pa}'' : Calor específico y densidad del aire en la sección placa-aislante.

➤ **Calor Útil Q_u''**

Ecuación (75):

$$Q_u'' = f(U_L''', T'_{fm}, F_r'', T_{sur})$$

➤ **Temperatura del aire calentado, T_{fo}''**

Ecuación (151):

$$T_{fo}'' = f(Q_u'', h''_{c2}, h''_{rp-a})$$

➤ **Temperatura media del aire, T_{fm}''**

$$T_{fm}'' = f(T_{fo}'')$$

➤ **Eficiencia del colector η''**

$$\eta'' = f(Q_u'')$$

Este mismo procedimiento se realiza hasta conseguir cinco aproximaciones en las propiedades termofísicas, en las temperaturas del aire en el colector y, en cada coeficiente de transferencia de calor. Seis aproximaciones en las temperaturas de los componentes sólidos del colector (placa, cubierta y aislante) y el coeficiente de transferencia de calor global.

Cada aproximación será precedida por condiciones determinadas en su estimación anterior, como se ha seguido en este proceso de cálculo en cuestión. El principal factor a determinar es la *temperatura media del aire* T_{fm} ; por lo tanto, a partir de T_{fm}'''' (quinta aproximadamente) se sigue trabajando en la cámara de secado.

Concentrador solar parabólico: principios geométricos Energía concentrada hacia el colector solar

Una vez determinada la *irradiancia solar* captada al plano parabólico de los espejos, I_{GB} , con el mismo procedimiento descrito, queda obtener la irradiancia solar concentrada



hacia el colector solar, I_{G2} , además del área del concentrador A_1 y del colector A_2 ; esta última ya es conocida; es decir, propuesta por el diseñador. Se procede como sigue:

➤ **Determinación del punto focal**

En este punto debe estar localizado el colector, ya que es la zona donde convergen o se concentran todos los rayos solares procedentes de la I_{G1} . Se mide en términos de altura desde el punto mínimo de la parábola formada. De la Ecuación (103) se obtiene que:

$$p = \frac{x^2}{4y} \quad y = \frac{x^2}{4p} \quad x = \sqrt{4py}$$

...donde p es el punto focal, x e y son el ancho y la altura de la parábola, así que se puede calcular p si se cuenta con las distancias x e y a su voluntad o, se puede dar el valor p y una de las dos distancias, con lo que ya es capaz de obtener la otra distancia. En la hoja de cálculo se redacta las tres relaciones, dándole al usuario la libertad de elegir qué distancia desea calcular, digitando una serie de palabras concretas según su preferencia; de acuerdo con esto, el algoritmo procede a calcular la distancia requerida. Si se prefiere calcular el foco, contando con los valores x e y , entonces se aplicará la expresión $x^2/4y$ y se obtendrá el valor p . Si se quiere calcular el ancho x , contando con y y p , entonces se aplicará la expresión $x = \sqrt{4py}$ y se obtendrá x ; de igual forma, para calcular la altura y . Los algoritmos de cálculo de estas variables dimensionales de la parábola, en el software EXCEL son:

- Valor p (foco: distancia focal)
SI (distancia que prefiere calcular="foco"; $\frac{x^2}{4y}$; valor de p)
- Valor x (ancho de la parábola)
SI (distancia que prefiere calcular="ancho"; $x = \sqrt{4py}$; valor de x)
- Valor y (altura de la parábola)
SI (distancia que prefiere calcular="altura"; $y = \frac{x^2}{4p}$; valor de y)

Por ejemplo, si deseamos determinar el punto focal, ingresando un valor de $x = 5$ y $y = 3$ en unidades de metros, tendremos lo siguiente:

$$p = \frac{5^2}{3y} = 2,083$$

Para tabular los datos, debemos establecer un rango de valores para x , digitar la ecuación para y , $y = x^2/4p$; como ya se tiene el valor de p , solo queda variar los valores de x y así se obtiene la Tabla 5:

Tabla 5

Tabla de datos para la distribución parabólica cuando $p=2,083$

x	$y (y = x^2/4p)$	X	Y
-5	3	1	0,12
-4	1,92	2	0,48
-3	1,08	3	1,08
-2	0,48	4	1,92
-1	0,12	5	3
0	0		

De la que obtenemos la gráfica para la distribución parabólica:

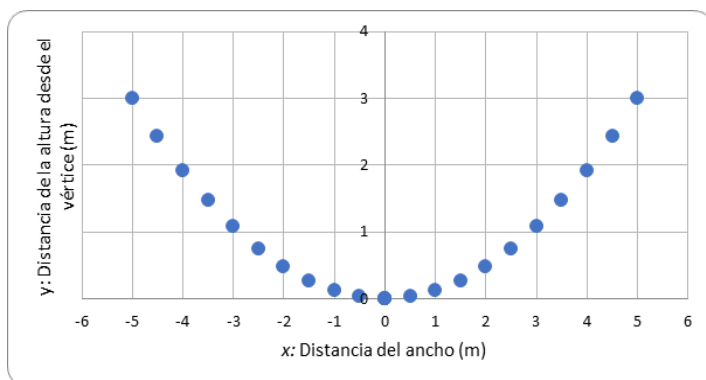


Figura 41

Gráfica para los datos de la Tabla 5

➤ **Cálculo del área del concentrador A_1**

○ **Longitud del arco formado por la parábola, S**

Para determinar el área de la superficie parabólica debemos contar con la longitud que forma el arco en esta sección (S), (véase la Figura 39); para obtener dicho valor se requiere de un procedimiento de *cálculo avanzado*, que consiste en transformar las componentes x y y de la parábola en valores variables o *diferenciales* a través del recorrido del arco con la teoría de *derivación*; esto produce una *ecuación diferencial* que será resuelta mediante Integración. Veamos:

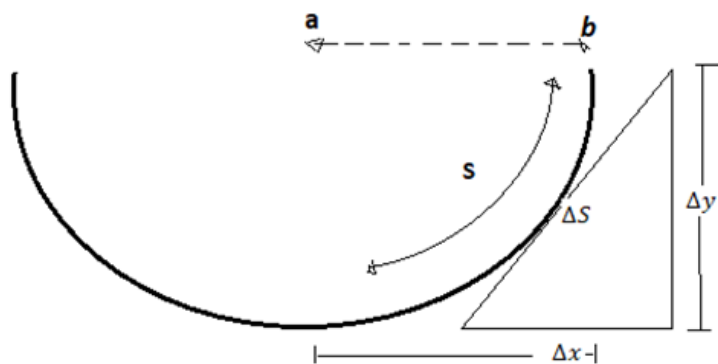


Figura 42

Elementos geométricos y diferenciales del arco formado en la parábola del concentrador

Nota: se observa que se fundamenta en la hipotenusa del triángulo rectángulo que toca en un punto del arco S, lo cual conlleva cálculos trigonométricos y diferenciales

Como se muestra en la Figura 40, todo el valor ΔS es la hipotenusa que se forma desde el punto inicial (a : mínimo de la parábola, $x, y = 0$) hasta el final (b) con los valores Δx y Δy , en un tramo lineal; entonces, se necesita el valor pero del tramo curvado (arco) y, para esto, se requiere calcular los puntos tangenciales en el arco S, lo que se hace diferenciando el valor lineal de la hipotenusa y sus componentes geométricos:

$$\Delta S = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2} \rightarrow dS = \sqrt{dx^2 + dy^2} \quad (157)$$

Aquí se obtiene la ecuación diferencial que expresa los puntos en x, y formados por las tangentes de las hipotenusas de S. Ahora, para obtener el valor total de S se debe sumar todos estos puntos tangenciales desde el punto inicial hasta el final (a, b), lo que se hace mediante *integración*. Entonces, haciendo algunos arreglos aritméticos, tenemos lo siguiente:

$$\int_a^b dS = \int_a^b \sqrt{\left(\frac{dx^2}{dx^2} + \frac{dy^2}{dx^2}\right) dx^2}$$

$$\rightarrow S = \int_a^b \left[1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right]^{1/2} dx$$

Pero $y = x^2/4p$, entonces reemplazando para y se obtiene que,

$$S = \int_a^b \left[1 + \left(\frac{d\left(\frac{x^2}{4p}\right)}{dx} \right)^2 \right]^{1/2} dx \quad (158)$$

En esta ecuación podemos encontrar la expresión $[d(x^2/4p)/dx]$, la cual es una derivada interna; por lo tanto, derivándola se obtiene,

$$S = \int_a^b \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2p}x\right)^2} dx \quad (159)$$

Para resolver esta integral, se utiliza el método de integración por sustitución de variable de la siguiente manera:

$$x = \frac{a}{b} \tan u = 2p \tan u$$

Derivando x con respecto a u , se obtiene:

$$\frac{dx}{du} = \frac{d(2p \tan u)}{du} = 2p \sec^2 u, \text{ despejando } dx \text{ se tiene,}$$

$dx = 2p \sec^2 u du$ reemplazando x y dx en la Ec. (159) se tiene,

$$S = \int_a^b \sqrt{1 + \left(\frac{1}{2p}(2p \tan u)\right)^2} 2p \sec^2 u du = 2p \int_a^b \sqrt{1 + \tan^2 u} \sec^2 u du \quad (160)$$

se sabe que $\sqrt{1 + \tan^2 u} = \sec u$

$$\rightarrow S = 2p \int \sec^3 u du = 2p \left(\frac{1}{2} \sec^2 u \tan u + \frac{1}{2} \ln(\tan u + \sec u) \right) + C \quad (161)$$

se sabe que $u = \arctan\left(\frac{x}{2p}\right)$



Sustituyendo la variable u por la anterior expresión, se tiene:

$$S = 2p \left(\frac{1}{2} \sec^2 \left(\arctan \left(\frac{x}{2p} \right) \right) \operatorname{sen}^2 \left(\arctan \left(\frac{x}{2p} \right) \right) + \frac{1}{2} \ln \left(\tan \left(\arctan \left(\frac{x}{2p} \right) \right) + \sec \left(\arctan \left(\frac{x}{2p} \right) \right) \right) \right) + C$$

$\sec(\arctan x) = \sqrt{1+x^2}$ $\operatorname{sen}(\arctan x) = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}}$ reemplazando se tiene,

$$S = 2p \left(\frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{x}{2p} \right)^2} \right)^2 \right) \frac{\frac{x}{2p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{x}{2p} \right)^2}} + \ln \left(\frac{x}{2p} + \sqrt{1 + \left(\frac{x}{2p} \right)^2} \right) + C \quad (162)$$

Realizando una serie de arreglos aritméticos se reduce la expresión a:

$$S = \frac{x}{4p} \sqrt{4p^2 + x^2} + p \ln \left(\frac{1}{2p} \left(x + \sqrt{4p^2 + x^2} \right) \right) + C \quad (163)$$

Como se puede notar, se ha obtenido la expresión en términos de una integral indefinida; por lo tanto, solo queda definir los límites inicial y final de la parábola en la coordenada x para llegar a un valor de S bien definido.

$$\therefore S = \frac{(b-a)}{4p} \sqrt{4p^2 + (b-a)^2} + p \ln \left(\frac{1}{2p} \left((b-a) + \sqrt{4p^2 + (b-a)^2} \right) \right) \quad (164)$$

Se tomará como $a = 0$ y $b = x$. Si se desea quitar una parte del arco desde el centro, entonces se aplica los límites $\Big|_a^b$. Por lo tanto, a =valor en x (ancho) en línea recta desde el centro que se quitaría; de esta forma se obtiene el arco medio; entonces solo bastaría multiplicar por 2 para tener la longitud completa o, tomar los límites de lado y lado; es decir, $a = -x$ y $b = x$.

Para los valores tratados en la Tabla 5, con $x = 5$ y $p = 2,083$, se tiene que $a = 0$, $b = 5$, reemplazando en la Ecuación (164) tenemos:

$$S = 2 \left(\frac{(5-0)}{4(2,083)} \sqrt{4(2,083)^2 + (5-0)^2} + (2,083) \ln \left(\frac{1}{2(2,083)} \left((5-0) + \sqrt{4(2,083)^2 + (5-0)^2} \right) \right) \right)$$

$$= 6,0217 * 2 = 12,0434 \text{ m}$$

Entonces, en término de metros, la longitud de arco medio es de 6,0217 m y el total será 12,0434 m. Ya con este dato se puede obtener el área superficial del concentrador parabólico.

○ **Área del concentrador**

$$A_1 = L \times \quad (165)$$

L : Largo del concentrador

Si se tiene un largo de 3 m por ejemplo, con el dato de S anterior (12,0434 m), tendremos un área de:

$$A_1 = 3 \text{ m} \times 12,0434 \text{ m} = 36,1302 \text{ m}^2$$

➤ **Área del colector, A_2**

Según el colector sea parabólico o rectangular (plano), como se muestra en las Figuras 41 y 42, se tiene las siguientes expresiones para el área:

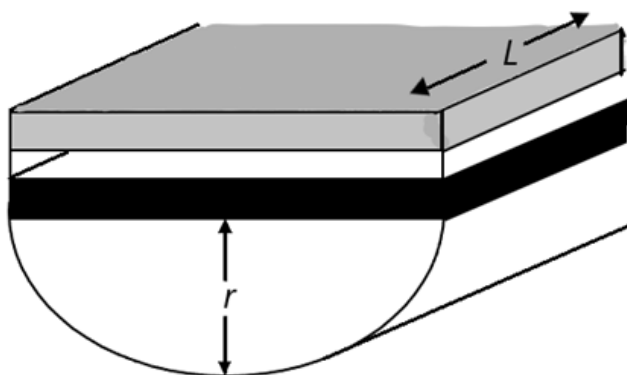


Figura 43
Componentes geométricos principales del colector solar de tipo cilíndrico, para el cálculo del área en la superficie arqueada

$$A_2 = 2\pi rL \quad (166)$$

Del ejemplo anterior, al tener un colector con un largo de 3 m y un radio de 0,5 m, se tendría un área superficial de:

$$A_2 = 2\pi(0,5 \text{ m}) * 3 \text{ m} = 9,425 \text{ m}^2$$

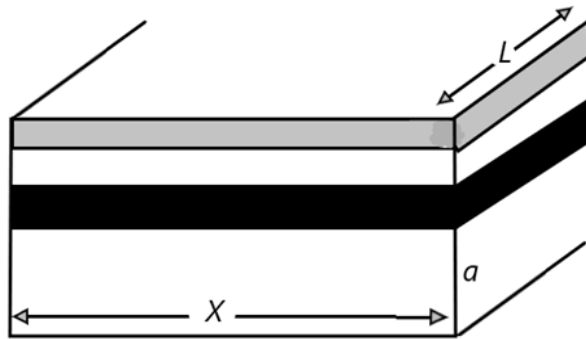


Figura 44
Componentes geométricos principales del colector solar de tipo plano o rectangular, para el cálculo del área en la superficie receptora de la radiación solar concentrada

$$A_2 = L(2a + X) \quad (167)$$

Para este caso, tomando como base los datos del colector del anterior ejemplo, un largo de $L = 3 \text{ m}$, una altura de $a = 0,5 \text{ m}$ y un ancho de $X = 1 \text{ m}$, se tendría un área superficial de:

$$A_2 = 3\text{m}(2(0,5\text{m}) + 1\text{m}) = 6 \text{ m}^2$$

➤ **Ángulo medio estimado, β**

Ángulo formado desde el centro (vértice) de la parábola hasta la esquina correspondiente, como se muestra en la Figura 43, el cual es necesario para estimar el valor de la irradiancia solar global recibida en plano inclinado sobre el concentrador; la inclinación se aproxima con base en el ángulo β :

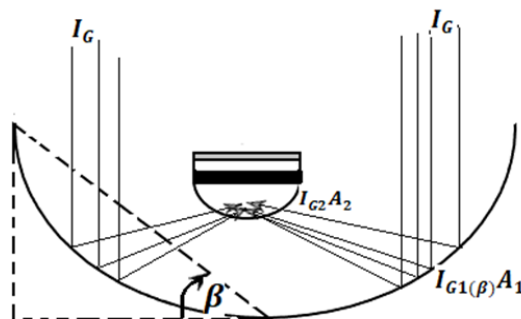


Figura 45
Esquema de la dirección de los rayos solares reflejados hacia el único punto focal, en donde también se aprecia el ángulo general formado desde el centro al final

$$\beta = \arcsen\left(\frac{y}{\sqrt{y^2 + x^2}}\right) \quad (168)$$

Como bien sabemos, x e y son la coordenada horizontal (ancho) y vertical (altura) del concentrador, respectivamente, desde el centro (desde $a = 0$).

► **Cantidad de energía solar recibida, I_G**

De la Ecuación (104) se tiene que, la irradiancia solar recibida por el colector es:

$$I_{G2} = \frac{I_{G1}A_1}{A_2} \quad (169)$$

Los cálculos desarrollados para el colector solar tienen exactamente el mismo procedimiento que la anterior estructura (colector de placa plana); solamente varía el valor I_G calculado que ingresa a la superficie del colector desde el I_G reflejado por el concentrador, referido como la principal fuente de energía; por ejemplo, si la irradiancia final que llega al plano inclinado es de $I_{G(\beta)} = 1000 \text{ W/m}^2$, con el dato de las dos áreas obtenidas en los anteriores supuestos, $A_1 = 36,1302 \text{ m}^2$ y $A_2 = 9,425 \text{ m}^2$, la irradiancia que llega al colector será de:

$$I_{G2} = \frac{1000 \text{ W/m}^2 * 36,1302 \text{ m}^2}{9,425 \text{ m}^2} = 3833,443 \text{ W/m}^2$$

El procedimiento general para los anteriores cálculos se muestra de forma gráfica a continuación:

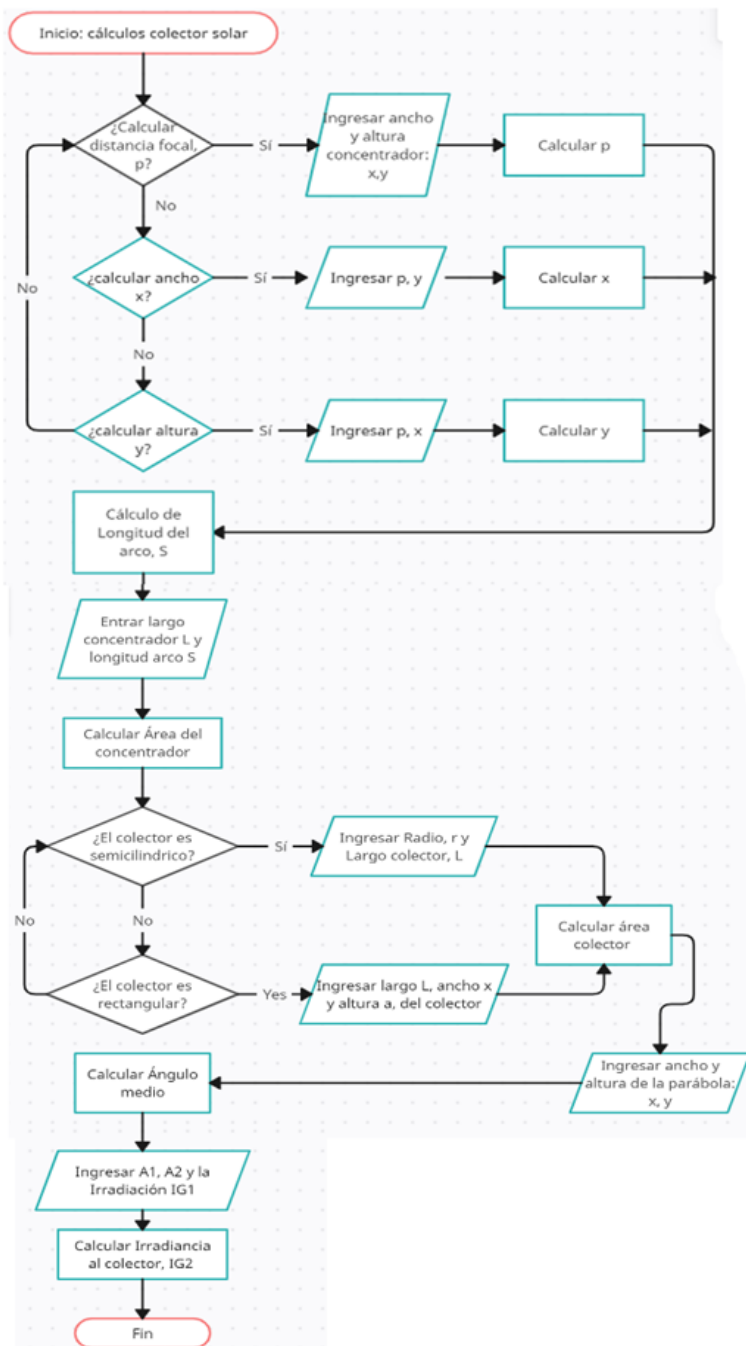


Figura 46
Diagrama de flujo para el desarrollo del algoritmo de cálculo en el sistema de colector con concentrador parabólico.

Cálculos en la cámara de secado

- **Presión de vapor de saturación del aire frío (entrada), $P_{sat} \rightarrow f(T_{ac})$**

Según datos termodinámicos (Cengel y Boles, 2012), se obtiene una regresión polinomial con el ajuste más adecuado (Apéndice 19):

$$\begin{aligned} \ln P_{vsat} &= -0,000T^2 + 0,0615T - 0,3389 & (170) \\ R^2 &= 0,9993 \end{aligned}$$

- **Presión de vapor del aire frío, P_{vc}**

De la Ecuación (1) se tiene que:

$$P_{vc} = H_R P_{vsat} \quad (171)$$

Estas dos relaciones son evaluadas a la temperatura de entrada del aire al colector.

- **Presión de vapor de saturación del aire caliente, $P_{sat} \rightarrow f(T_{ah})$**

Ecuación (170) evaluada a la temperatura media del aire calentado ($T_{fm}'''' = T_{ah}$)

- **Presión de vapor del aire caliente, P_{vh}**

$$P_{vh} = \frac{\frac{28,97H_i P}{18,02}}{1 + \frac{28,97H_i}{18,02}} \quad (172)$$

H_i : contenido inicial de humedad del aire

P : presión atmosférica

- **Humedad relativa del aire caliente, H_R**

Ecuación (1) a las condiciones de presión del aire caliente.

- **Contenido de humedad de equilibrio del grano, M_{eq}**

Determinadas con las ecuaciones (105) y (106), dependiendo de si es café pergamino o verde. Son evaluadas a la H_R y temperatura del aire caliente (T_{fm}'''' o T_{ah}).

- **Tiempo de secado t**

Para determinar el tiempo necesario para llegar a una cierta humedad M del grano, se integra la ecuación diferencial de secado en capa delgada desarrollada en investigaciones previas (Parra-Coronado et al., 2008b, p. 420):



$$\frac{\partial M}{\partial t} = -mq(M - M_{eq})(P_{vsat} - P_v)^n t^{(q-1)} \quad (173)$$

M : humedad del grano en cualquier instante de tiempo, % b.s.

M_{eq} : % b.s.

t : tiempo de secado, en horas (h)

m, n y q son parámetros determinados empíricamente de investigaciones previas (Parra-Coronado et al., 2008b, p. 420):

$$m = 0,0143$$

$$n = 0,87898$$

$$q = 1,06439$$

Las presiones son evaluadas para el aire caliente (a T_{fm}'''' o T_{ah}), ya mencionado en las anteriores expresiones.

Ordenamos las variables de la Ecuación (173) para luego integrar la ecuación diferencial y así obtener una expresión matemática en términos de tiempo o humedad:

$$\begin{aligned} \frac{dM}{M - M_{eq}} &= -mq(P_{vsat} - P_v)^n t^{(q-1)} dt \\ \rightarrow \int_{M_i}^M \frac{dM}{M - M_{eq}} &= -mq(P_{vsat} - P_v)^n \int_0^t t^{(q-1)} dt \\ \ln \left(\frac{M - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \right) &= \frac{-mq(P_{vsat} - P_v)^n t^q}{q} \\ \therefore t &= \sqrt[q]{\frac{\ln \left(\frac{M - M_{eq}}{M_i - M_{eq}} \right) q}{-mq(P_{vsat} - P_v)^n}} \quad (174) \end{aligned}$$

$$M = \left[(M_i - M_{eq}) e^{\frac{-mq(P_{vsat} - P_v)^n t^q}{q}} \right] + M_{eq} \quad (175)$$

Estas dos expresiones modelan matemáticamente el tiempo de secado o la humedad del grano en las condiciones establecidas, si fijamos un valor para M como la humedad final o, cualquier valor deseado. Ya teniendo la humedad inicial M_i del grano y determinadas las presiones y la humedad de equilibrio, tendremos la capacidad de calcular el tiempo en horas para la humedad M ; recíprocamente, si fijamos un valor para el tiempo como el tiempo final, con los anteriores factores constantes ya determinados, podremos obtener el valor de la humedad del grano en dicho tiempo.

Por ejemplo, suponiendo un valor de $M_i = 60\%$ b.s., una presión a $T_{ah} = 51,2^\circ C$, $P_{vsat} = 7,3 KPa$ y una $P_v = 2,47 KPa$, teniendo una humedad de equilibrio de $M_{eq} = 4,81\%$ b.s., podemos obtener lo siguiente en la Tabla 6 y la Figura 44:

Tabla 6
 Tabulación de datos para humedad
 vs. tiempo, aplicando la Ecuación (175)

t (h)	M (decimal)	t(h)	M
0	0,6	5	0,2737062
0,25	0,5800158	6	0,2343697
0,45	0,56323	7	0,2015726
1	0,5177868	9	0,1517471
2	0,4419776	11	0,1176986
3	0,3764209	15	0,0790606
4	0,320676	20	0,0591259

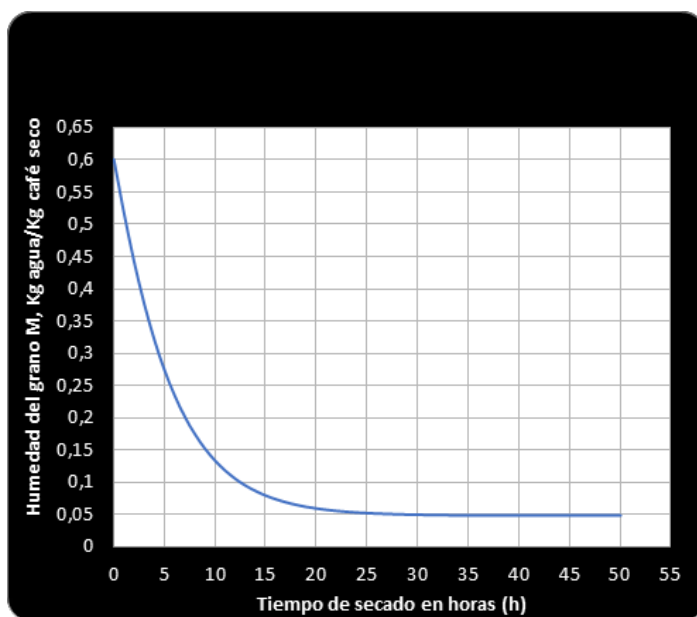


Figura 47
 Gráfica de la distribución de humedad del grano vs. tiempo, aplicando
 la Ecuación (175), según el modelo para capa delgada MSU (Michigan
 State University)



- **Flujo másico del aire a través de las bandejas de secado, G_a**

$$G_a = \rho_a v_a \quad (176)$$

ρ_a : densidad del aire a T_{ah} (o T_{fm}'''')

v_a : velocidad lineal del aire (m/s)

- **Flujo de carga del grano, G_p**

Masa de grano por área de secado y tiempo:

$$G_p = \frac{\Delta H G_a}{\Delta M} = \frac{\rho_p x}{t}$$

Así que,

$$G_p = \frac{\rho_p x}{t} \quad (177)$$

ρ_p : densidad del grano

x : grosor de la capa de secado

t : tiempo final de secado

- **Contenido de humedad removida del aire, ΔH**

$$\Delta H = \frac{G_p \Delta M}{G_a} \quad (178)$$

ΔM : humedad removida del grano

- **Contenido de humedad inicial del aire caliente, H**

Por conservación de materia, el contenido de humedad del aire dentro del colector solar se mantiene constante, puesto que no hay transferencia de masa en un intercambiador de calor como este; por lo tanto $H_i = H_f$.

$$H_i = \frac{18,02 P_{vc}}{28,97(P - P_{vc})} \quad (179)$$

Fuente: Treybal (2007)

- **Calor específico del grano, C_{pg}**

$$C_{pg} = 1,3556 + 5,7859M_{bs} \quad (180)$$

Fuente: Parra-Coronado et al. (2008b, p. 420; Parra et al., 2017, p. 30)

- **Calor húmedo, C_s**

Ecuación (5), evaluada para el promedio de la humedad H del aire en la cámara de secado (H_e, H_o) a la entrada y salida del proceso.

- **Calor latente del grano, λ_s**

Ecuaciones (107) y (108), evaluadas a la humedad y temperaturas iniciales del grano como una primera aproximación.

- **Radio equivalente del grano, r_{eq}**

En Parra et al. (2017, p. 29) se encuentra que:

$$\begin{aligned} r_{eq} &= 4,4 \text{ mm (pergamino, } M = (51 - 47\% \text{ b. h.))} \\ &= 3,85 \text{ mm (pergamino, } M = (42 - 10,5\% \text{ b. h.))} \\ &= 3,87 \text{ mm (Verde, } M = (51 - 47\% \text{ b. h.))} \\ &= 3,27 \text{ mm (Verde, } M = (25,6 - 10,5\% \text{ b. h.))} \end{aligned}$$

- **Coefficiente de transferencia de calor por convección entre el aire y el grano, h_c**

Se usará dos modelos de cálculo para así poder hacer una comparación entre ambos, con el fin de identificar el modelo más adecuado. Uno de los modelos se basa en el estudio de transferencia de calor enfocado al café y, el otro, es más generalizado, ya que procede de los principios de transferencia en el secado de los materiales de proceso para lechos empacados con circulación cruzada, usado para una gran gamma de granos.

Según investigaciones previas (Parra et al., 2017, p. 26) se tiene un modelamiento específico:

$$h_c = AC_{pa}G_a \left(\frac{2r_{eq}G_a}{C + DT} \right)^B \left[W/m^2K \right] \quad (181)$$

$$A = 0,2755$$

$$T = T_{fm}'''' (K)$$

$$B = -0,34$$

$$C_{pa}: \text{ calor específico del aire } \rightarrow f(T_{fm}''''')$$

$$C = 0,0617$$

$$D = 0,000165$$



El modelo general para el proceso es el siguiente, de acuerdo con Geankoplis (1998):

$$h_c = 0,151 \frac{G_t^{0,59}}{D_p^{0,41}} \quad (182)$$

$$G_t: \text{flujo total} = G_a + (G_a \times \bar{H}) \quad \left(\frac{Kg}{hm^2} \right)$$

$$D_p: \text{diámetro equivalente} = 2r_{eq} \quad (m)$$

A partir de ambos modelos se realiza los cálculos térmicos respectivos por separado.

• **Temperatura de salida del aire de la cámara de secado, T_{af}**

De los principios termodinámicos de evaporación para la transferencia de calor, concretamente por balance de entalpía del aire, se sabe que:

$$\begin{aligned} dq &= -G_a C_s AdT = haAdx(T - T_g) & (183) \\ &\rightarrow -\frac{hadx}{G_a C_s} = \frac{dT}{T_a - T_g} \end{aligned}$$

Fuente: Geankoplis (1998); Green y Perry (2008); Treybal (2007)

Integrando, se tiene que:

$$-\frac{hax}{G_a C_s} = \ln \left(\frac{T_{ai} - T_g}{T_{af} - T_g} \right) \quad (184)$$

$$\therefore T_{af} = (T_{ai} - T_g) e^{-\frac{hax}{G_a C_s}} + T_g \quad (185)$$

a : área específica, según datos de Parra-Coronado et al. (2008b), $a = 779,8 \text{ m}^2/\text{m}^3$, esta será usada para calcular el área superficial del lecho de granos.

x (m): espesor de la capa de secado en la bandeja

T_g : temperatura del grano

Con esta última ecuación modela la temperatura del aire que tiene contacto con el grano; sin embargo, en una cámara de secado hay una serie de bandejas dispuestas verticalmente una sobre la otra; por esta razón, se hace necesario establecer una relación para cada bandeja, puesto que las condiciones iniciales para las bandejas posteriores a la primera pueden variar mientras el aire atraviesa cada una, ya que va perdiendo temperatura y ganando humedad.

Las condiciones finales de cada bandeja (por ejemplo T_{af}) serán las iniciales para la que le sigue; además, como una primera aproximación, se tomará la temperatura del grano T_g como su valor inicial, el cual es fijado por el usuario; así que:

$$\begin{aligned}
 T_{af1} &= (T_{ai1} - T_{gi})e^{-\frac{h_{c1}ax_1}{G_a C_s}} + T_{gi} && \text{Bandeja 1} \\
 T_{af2} &= (T_{af1} - T_{gi})e^{-\frac{h_{c2}ax_2}{G_a C_s}} + T_{gi} && \text{Bandeja 2} \\
 T_{af3} &= (T_{af2} - T_{gi})e^{-\frac{h_{c3}ax_3}{G_a C_s}} + T_{gi} && \text{Bandeja 3} \\
 &&& \vdots \\
 T_{afn} &= (T_{afn-1} - T_{gi})e^{-\frac{h_{cn}ax_n}{G_a C_s}} + T_{gi} && \text{Bandeja n}
 \end{aligned} \tag{186}$$

- **Cambio de temperatura del aire a la entrada y a la salida de la cámara, ΔT_a**

$$-\Delta T_a = T_{af} - T_{ai} \tag{187}$$

$$\Delta T_a = T_{ai} - T_{af} \tag{188}$$

- **Temperatura final del grano, T_{gf}**

$$T_{gf} = T_{gi} + \Delta T_a \tag{189}$$

Segunda aproximación: todas las propiedades termofísicas son evaluadas a la temperatura promedio del aire entre la entrada y salida de la cámara

$(\bar{T}_a \rightarrow f(T'_{af}, T_{ai}))$: $\bar{T}_a = \frac{T'_{af} + T_{ai}}{2}$, donde $T_{ai} \rightarrow T'_{fm}$. Mientras que la temperatura de salida del aire T''_{af} se evalúa también al promedio de T_g ($\bar{T}_g \rightarrow f(T_{gi}, T'_{gf})$): $\bar{T}_g = \frac{T_{gi} + T'_{gf}}{2}$.

Se sigue exactamente el mismo procedimiento de cálculo al anterior, con la única diferencia de que se toma los nuevos valores determinados para cada característica aquí tratada. Hasta concebir con las aproximaciones deseadas, para nuestro análisis práctico se hará un total de siete. Luego se procede a usar estos últimos valores para los siguientes procesos:

- **Tabulación y gráfica de datos del contenido de humedad del grano, $M(t)$**

Se utiliza la ecuación (175) para determinar la humedad del grano en diferentes tiempos, tabulando los datos en la hoja de cálculo y graficándolos.

- **Gráfica de la velocidad de secado, $R(M, t)$**

A partir de la Ec. (28) se elabora la tabla de valores calculando el valor de R en función de los cambios de M y t (h) en cada intervalo. Se traza una gráfica R vs M y otra R vs t .

Por ejemplo, de acuerdo con los datos de humedad de la Tabla 6, suponiendo que se tiene un lecho empacado de granos con un área superficial de $9,74 \text{ m}^2$ y se espera una carga de sólido seco de 5 kg, se haría el siguiente cálculo para obtener la gráfica:



$$R_1 = \frac{5 \text{ kg café seco} (0,6 - 0,58) \frac{\text{kg agua}}{\text{kg café seco}}}{9,74 \text{ m}^2 (0,25 - 0) \text{ h}} = 0,04107 \text{ kg agua}/(\text{m}^2 \text{ h})$$

De esta forma se va realizando los cálculos para cada intervalo de tiempo y humedad; por ejemplo, el siguiente rango es de (0,45-0,25) h, hasta llegar al final del punto deseado de tiempo. Se debe tener en cuenta que, entre más cercanos o pequeños sean los intervalos, más precisa será la curva de secado. La gráfica correspondiente se muestra en la Figura 45.

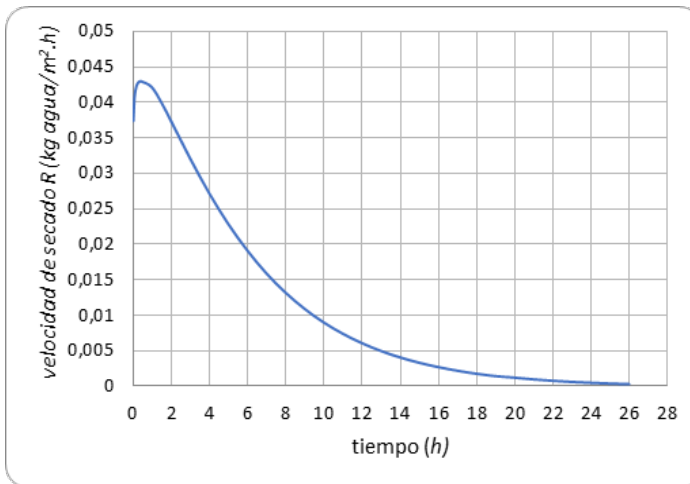


Figura 48
Gráfica de la velocidad de secado R (kg de agua evaporada/ (m² de área superficial de grano *h)) en función del tiempo (horas), según datos de humedad de la Tabla 6

- **Estimación de la velocidad de secado en período constante y decreciente, R**

Para el período constante, R_c , el método más sencillo es observando las gráficas de secado; el punto más alto o que tiende a permanecer en línea recta en ese período, para así encontrar la humedad donde empieza el período constante y también el contenido crítico de humedad (donde termina este segmento); luego se determina con la Ecuación (29), conociendo el valor del tiempo en estos puntos.

En el período decreciente, también es necesario observar las gráficas de secado para encontrar los valores descritos, para aplicarlos en la distribución lineal de este período, usando la Ecuación (32) y, para obtener la pendiente, la Ecuación (33):

$$R = \left(\frac{R_c - R_f}{M_c - M_f} \right) M + b$$

R_f y M_f : es el valor de R y M finales, dados en la tabla de valores

$M_c = X_c$: humedad crítica, observada en la gráfica

M : humedad del grano en cualquier instante de tiempo, digitado por el usuario.

Con base en la teoría de la regresión matemática lineal, se tiene:

$$b = R_f - \left(\frac{R_c - R_f}{M_c - M_f} \right) M_f$$

Para el secador con concentrador solar parabólico se sigue el mismo procedimiento, con la sola diferencia de que, al generar otros valores de radiación solar, también resultarán distintas temperaturas, propiedades termofísicas, coeficientes de transferencia, etc.; es decir, todo variará, pero el procedimiento matemático es el mismo.

Una vez presentadas todas las relaciones matemáticas, estamos en la capacidad de modelar todo el proceso de secado del café con energía solar térmica, simulando los procesos en la hoja de cálculo con las ecuaciones y algoritmos anteriormente establecidos para calcular cada variable que interviene en las etapas operacionales y así, establecer los diseños del equipamiento de acuerdo con ellas, lo cual se verá en el próximo capítulo.

05

Simulación del proceso
y diseños de secadores
solares para café

Para muchos productores, la única forma de actuar es la práctica operacional en su entorno productivo, regidos por sus sentidos y un poco de lógica empírica, algo infaliblemente efectivo e irremplazable; entonces, ¿cuál es la importancia de simular un proceso? Pues, aunque es un concepto teórico, entendamos que, además de basarse en datos hipotéticos y empíricos, es una forma de perfeccionar los procesos, dado que, si desarrollamos un diseño del sistema, en este caso de secado, sin haber estudiado los factores que lo rigen y afectan, tendremos mayor probabilidad de cometer errores o, que la simulación se realice con valores inadecuados, obteniendo un diseño de equipo menos efectivo de lo que se podría lograr si se hace con los fundamentos correctos. Por esta razón, las cadenas de producción más exitosas simulan sus operaciones antes de implementar un sistema, para así obtener mejores procesos productivos y ahorrar costos por posibles pérdidas a causa de un mal diseño del proceso.

Los fundamentos matemáticos ya vistos para el modelamiento del proceso de secado solar de café, ahora serán llevados a la práctica para desarrollar una hoja de cálculo para simular el proceso completo; por lo tanto, es necesario definir qué variables se va a estudiar, cuáles serán sujetas a variación y qué datos serán las respuestas esperadas según aquellas variables.

En este capítulo se presentará las hojas de cálculo que permiten organizar e introducir la información para determinar los valores numéricos del proceso, además de las propiedades físico-químicas requeridas. Se harán simulaciones para condiciones muy específicas con el fin de mostrar el debido procedimiento para obtener los valores numéricos requeridos para el diseño de los equipos de secado correspondientes.

Al realizar las simulaciones, tenemos la capacidad de hacer los diseños de los equipos, variando las condiciones hasta llegar a la mayor eficiencia del proceso, dependiendo de qué factor se quiere mejorar; por ejemplo, minimizar el tiempo de secado, maximizar el flujo de calor útil, maximizar la velocidad de secado, etc. Esto se logra con mayor efectividad haciendo un análisis estadístico en una serie de experimentos teóricos; por esto, en este capítulo no solo se hará la simulación, sino también un procedimiento experimental en la hoja de cálculo, con el fin de tener valores óptimos según las condiciones, pues en esto consiste el diseño de sistemas de proceso: en optimizar los factores de respuesta. Los diseños serán presentados de forma gráfica con el uso de un software, para que el lector se familiarice más con los resultados logrados de estos procedimientos teóricos y entienda la importancia de utilizar simulaciones para el diseño de equipos de secado del café.

Procedimiento experimental

Se desarrollará una simulación del proceso de secado en una hoja de cálculo operada con los algoritmos planteados y la lógica de los cálculos automáticos, para obtener diseños óptimos de los equipos de secado solar propuestos. Para esto se organiza los factores a estudiar según cada fase del sistema (*colección-concentración solar y cámara de secado*), clasificados según procedencia: *dimensionales y ambientales*.



Factores de estudio (de entrada)

Aquellos que deseamos estudiar variando sus valores, pues estos pueden ser modificados a voluntad y así, poder observar el efecto que causan en los resultados de ciertas variables de proceso.

Dimensionales

Los factores dimensionales corresponden a aquellos netamente estructurales, dimensiones físicas que constituyen el equipamiento de secado, como el largo, grosor, ángulo, etc.; estos serán estudiados de manera separada para cada fase del sistema, sin olvidar que todos los componentes del proceso complementan las fases.

Colector solar

- Altura entre la placa y el aislante, a_p
- Largo, L_g
- Ancho, A_{nc}
- Grosor del material absorbente, L_m
- Ángulo de inclinación, β

Concentrador solar parabólico 2D

- Distancia focal, F
- Altura de la parábola, y
- Ancho de la parábola, x

Cámara de secado

- Área de la bandeja, A_b
- Grosor de la capa de secado, x_c

Ambientales

En esta categoría se estudia las variables que proceden del ambiente o del entorno de trabajo, sin importar que sean medidas físico-estructurales, químicas, biológicas, termodinámicas, bioquímicas, etc.; por ejemplo, pueden ser aquellos factores climáticos como el grado de precipitaciones, humedad, nivel de insolación, velocidad del viento ambiental o dentro del sistema, presión atmosférica y de operación, temperatura, altitud, coordenadas geográficas, etc. En nuestro caso, solo estudiaremos algunas de ellas, las cuales, según los modelos de cálculo que se ha visto, son propicias para determinar el valor de otras variables; por ejemplo, a partir de la altura sobre el nivel del mar se puede calcular tanto la presión atmosférica como el grado de radiación solar que ingresa; así, los factores a estudiar son:

- Velocidad interna del aire, v_a
- Hora de operación, h_d
- Altitud sobre el nivel del mar, MSNM
- Zona (interior o costa), Zon.

Variables de respuesta

Después de establecer las condiciones del proceso, esto es, los factores de estudio o entrada, con los algoritmos y relaciones matemáticas se determina los valores de las variables de respuesta del proceso que sean de interés práctico. Las variables de respuesta más importantes son aquellas que corresponden a la eficiencia del proceso, como el tiempo de operación, el calor generado o el gastado, la carga de material que puede ser procesado, etc. Específicamente, se determinará las siguientes variables:

- Tiempo de secado, t
Téngase en cuenta que en esta variable se espera el menor valor posible; es decir, se debe minimizar, ya que el tiempo de proceso representa un costo operacional.
- Temperatura del aire, T_{fm}
Para esta variable se espera un valor máximo, ya que esto puede aumentar la eficiencia de secado en el grano al aumentar la capacidad para transferir calor.
- Temperatura del grano, T_g
El valor esperado en esta variable es relativo, puesto que tiene un efecto sobre la calidad del grano; si se considera este aspecto, entonces no es recomendable obtener un valor muy alto.
- Eficiencia térmica del colector, η
Lo ideal es maximizar el valor de esta variable, la cual depende de la forma del equipo de colección.
- Calor útil, Q_u
También se espera maximizar su valor y obtener el mayor calor posible para ser utilizado en el secado, el cual depende de las condiciones del sistema de colección.
- Carga de grano, L_s
Igualmente, se requiere el más alto valor posible para incrementar la eficiencia operacional de todo el sistema de secado.

Modelo experimental

El proceso debe ser simulado para cada factor que se desee modificar y analizar su efecto sobre alguna de las variables de respuesta, de acuerdo con el diseño experimental que se haya elegido. Los tratamientos que tendrá el diseño pueden ser obtenidos con un software estadístico (como se realizará aquí) o manualmente, basándose en la teoría experimental de la estadística, así que es necesario revisar y tener claros los conceptos de “Diseño de experimentos”.



La metodología del diseño de superficie de respuesta es crucial para refinar los modelos después de haber definido los factores importantes, utilizando diseños de cribado o diseños factoriales, sobretodo si se previene que hay curvatura en la superficie de respuesta. Una ecuación de superficie de respuesta se diferencia de la ecuación de un diseño factorial en la adición de los términos elevados al cuadrado que permiten el modelamiento de la curvatura en la respuesta, lo que la hace muy útil para comprender o mapear una región de una superficie de respuesta. Las ecuaciones de superficie de respuesta pueden identificar cómo los cambios en los factores experimentales afectan una variable de respuesta de interés, hallar los niveles de los factores que optimizan una respuesta y, seleccionar las condiciones operativas para cumplir con las especificaciones. Por lo tanto, este tipo de diseño experimental permite obtener las condiciones óptimas de un proceso (Gutiérrez Pulido & De La Vara Salazar, 2008).

Por lo anterior, se ha optado por un diseño de superficie de respuesta tipo *Box-Benkhen*, el cual permite reducir el número de corridas usando el mismo número de factores, aunque con la ventaja de tener más niveles de los factores y poder apreciar la posible curvatura en la respuesta. El diseño está compuesto de seis factores experimentales, seis variables de respuesta y tres niveles para cada factor, lo cual da 26 grados de libertad y 54 corridas o ensayos. Si se desea, se puede aplicar otro diseño, pero teniendo muy en cuenta el sistema de variables que se tiene. No será necesario replicar el diseño, ya que se trata de una simulación; es decir, se obtendrá únicamente datos teóricos, sin generar variabilidad entre experimentos. A continuación, se presenta los diseños experimentales para cada método de secado obtenidos con el programa estadístico *STATGRAPHICS Centurion XVII*:

Secador con Colector de Placa plana

- Factores experimentales del diseño:

$$L_g (m), x_c (m), h_d (h), a_p (m), \beta (^\circ), v_a \left(\frac{m}{s}\right)$$

- Variables de respuesta para el diseño:

$$t (h), T_{fm} (^\circ C), T_g (^\circ C), \eta, Q_u (W), L_s (kg \text{ cafè seco/und de bandeja})$$

Como se puede apreciar, si bien se cuenta con muchos factores experimentales, no es conveniente trabajar con todos, por el gran número de corridas; así que, se selecciona los más importantes, evaluando el efecto que tiene cada uno sobre algunas variables de respuesta. Además, se debe observar que sean netamente *factores de diseño*; o sea, que puedan ser ajustados por el diseñador; por ejemplo, no se ha tomado la altura sobre el nivel del mar, porque es un factor ambiental que no podría ser controlado, a menos que se cambie de localidad; igualmente, para la velocidad del aire ambiental, la zona (costa o interior), etc. A continuación, se presenta una serie de datos tabulados (Tabla 7) de los experimentos a realizar, según el diseño aquí seleccionado, incluyendo la combinación de valores o niveles experimentales para cada factor. Cabe aclarar que, los rangos de los niveles de los factores son elegidos por conveniencia, aunque

si se prefiere, es posible establecer otros valores o rangos de operación, considerando que se mantenga en los límites operables.

Tabla 7

Valores de los factores a utilizar para cada corrida (según el diseño experimental Box-Benkhen) para el diseño del secador solar de placa plana

$L_g(m)$	$x_c(m)$	$h_d(h)$	$a_p(m)$	$\beta(^{\circ})$	v_a	$t(h)$	$T_{fm}(^{\circ}C)$	$T_g(^{\circ}C)$	η	$Q_u(W)$	L_s
1,5	0,06	15	0,2	10	1,25						
1	0,04	12	0,3	40	1,25						
1,5	0,02	12	0,2	10	0,5						
2	0,06	12	0,3	25	1,25						
1	0,04	12	0,3	10	1,25						
2	0,04	12	03	10	1,25						
2	0,04	15	0,2	25	2						
1,5	0,06	12	0,2	40	0,5						
1,5	0,04	9	0,3	25	0,5						
1,5	0,04	15	0,1	25	0,5						
1,5	0,04	9	0,1	25	2						
1,5	0,02	9	0,2	10	1,25						
2	0,04	15	0,2	25	0,5						
1,5	0,06	12	0,2	10	0,5						
1,5	0,02	15	0,2	40	1,25						
2	0,06	12	0,1	25	1,25						
2	0,02	12	0,1	25	1,25						
1	0,04	12	0,1	40	1,25						
1,5	0,04	15	0,3	25	2						
1,5	0,04	15	0,1	25	2						
1,5	0,02	9	0,2	40	1,25						
1,5	0,02	15	0,2	10	1,25						
2	0,04	9	0,2	25	2						
1,5	0,02	12	0,2	10	2						
1,5	0,04	9	0,1	25	0,5						
1,5	0,04	9	0,3	25	2						
1,5	0,06	9	0,2	10	1,25						
1	0,02	12	0,1	25	1,25						
1	0,04	9	0,2	25	0,5						
2	0,02	12	0,3	25	1,25						
1	0,04	15	0,2	25	0,5						



1,5	0,02	12	0,2	40	2														
1	0,04	9	0,2	25	2														
1,5	0,06	15	0,2	40	1,25														
1,5	0,06	12	0,2	10	2														
1,5	0,02	12	0,2	40	0,5														
1	0,06	12	0,3	25	1,25														
1,5	0,06	12	0,2	40	2														
2	0,04	12	0,1	40	1,25														
2	0,04	9	0,2	25	0,5														
1,5	0,04	15	0,3	25	0,5														
1	0,02	12	0,3	25	1,25														
1	0,06	12	0,1	25	1,25														
1	0,04	12	0,1	10	1,25														
1,5	0,06	9	0,2	40	1,25														
2	0,04	12	0,1	10	1,25														
1	0,04	15	0,2	25	2														
2	0,04	12	0,3	40	1,25														
1,5	0,04	12	0,2	25	1,25														
1,5	0,04	12	0,2	25	1,25														
1,5	0,04	12	0,2	25	1,25														
1,5	0,04	12	0,2	25	1,25														
1,5	0,04	12	0,2	25	1,25														

Las celdas vacías corresponden a las variables de respuesta, ya que estas tablas solo son esquemas sobre cómo se realizará las simulaciones (cada fila es una simulación específica) con las combinaciones respectivas; los resultados serán presentados posteriormente.

Secador con concentrador parabólico

Factores experimentales del diseño:

$$L_g (m), x_c (m), h_d (h), Anc (m), x (m), y (m)$$

Las variables de respuesta son las mismas del sistema de secado anterior y los datos se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8
 Valores de los factores a utilizar para cada corrida (según el diseño experimental Box-Benkhen) para el diseño del concentrador solar parabólico

$L_g(m)$	$x_c(m)$	$h_d(h)$	Anc(m)	$x(m)$	$y(m)$	$t(h)$	$T_{fm}(^{\circ}C)$	$T_g(^{\circ}C)$	η	$Q_u(W)$	L_s
3	0,01	12	05	1,75	1,75						
3	0,035	12	0,5	0,5	1,75						
3	0,01	12	3	1,75	1,75						
3	0,035	12	3	0,5	1,75						
2	0,01	12	1,75	3	0,5						
2	0,01	9	1,75	0,5	1,75						
2	0,01	15	1,75	3	1,75						
1	0,01	12	0,5	1,75	1,75						
2	0,06	9	1,75	3	1,75						
2	0,06	9	1,75	0,5	1,75						
3	0,06	12	0,5	1,75	1,75						
2	0,06	12	1,75	3	0,5						
3	0,06	12	3	1,75	1,75						
2	0,01	12	1,75	0,5	0,5						
2	0,035	15	3	1,75	0,5						
1	0,035	9	1,75	1,75	0,5						
2	0,035	15	0,5	1,75	0,5						
2	0,035	15	3	1,75	3						
2	0,035	9	3	1,75	0,5						
2	0,035	9	0,5	1,75	3						
1	0,035	9	1,75	1,75	3						
2	0,06	12	1,75	3	3						
3	0,035	15	1,75	1,75	3						
1	0,035	12	0,5	0,5	1,75						
2	0,06	15	1,75	0,5	1,75						
1	0,035	12	3	0,5	1,75						
3	0,035	9	1,75	1,75	0,5						
3	0,035	15	1,75	1,75	0,5						
2	0,01	9	1,75	3	1,75						
3	0,035	12	0,5	3	1,75						
2	0,01	15	1,75	0,5	1,75						
3	0,035	12	3	3	1,75						
2	0,035	15	0,5	1,75	3						
1	0,035	12	0,5	3	1,75						



1	0,06	12	3	1,75	1,75						
2	0,01	12	1,75	3	3						
2	0,035	9	3	1,75	3						
2	0,06	12	1,75	0,5	0,5						
2	0,035	9	0,5	1,75	0,5						
2	0,06	12	1,75	0,5	3						
2	0,06	15	1,75	3	1,75						
3	0,035	9	1,75	1,75	3						
1	0,06	12	0,5	1,75	1,75						
1	0,035	15	1,75	1,75	0,5						
2	0,01	12	1,75	0,5	3						
1	0,035	15	1,75	1,75	3						
1	0,01	12	3	1,75	1,75						
1	0,035	12	3	3	1,75						
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75						
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75						
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75						
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75						
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75						
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75						
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75						

El resto de los factores de estudio que intervienen en el secado se mantendrán constantes, con los valores que se presenta en la Tabla 9, aunque si se desea, se puede establecer otros valores, siempre y cuando estén dentro de un rango lógico.

Tabla 7

Valores de los factores a utilizar para cada corrida (según el diseño experimental Box-Benkhen) para el diseño del secador solar de placa plana

Factor	Valor constante	
	Colector placa plana	Concentrador parabólico
a_p	-	0,3 m
β	-	0°
v_a	-	1,5 m/s
Anc	1 m	-
x	-	-
y	-	-
Grosor absorbente L_m	0,03 m	0,03 m

A_b	0,6m x 0,6m	0,6m x 0,6m
MSNM	1900 msnm	1900 msnm
Zon	Interior	Interior
T_{gi}	22 °C	22 °C
M_i	0,55 (55 %)	0,55 (55 %)
Tipo café	Pergamino	Pergamino
T_{amb}	27 °C	27 °C
v_{amb}	3 m/s	3 m/s
T_{ai}	27 °C	27 °C
H_R	60 %	60 %
Número de bandejas	4	4
Ancho a quitar desde el centro a la parábola	-	0 m
Conductividad cubierta K_C	0,8	0,8
Conductividad absorbente K_m	205	205
Conductividad aislante K_{ai}	0,2	0,2
Grosor de la cubierta L_C	0,0032 m	0,0032 m
Grosor aislante L_{ai}	0,04 m	0,04 m
Emisividad cubierta ϵ_c	0,9	0,9
Emisividad absorbente ϵ_m	0,04	0,04
Emisividad aislante ϵ_{ai}	0,91	0,91
Calor específico absorbente C_{pm}	880	880
Calor específico cubierta C_{pc}	800	800
Difusividad térmica absorbente α_m	0,95	0,95
Transmisividad cubierta τ_c	0,88	0,88
Contenido de humedad final del grano M_f	0,115 (11,5 %)	0,115 (11,5 %)
Altura placa-cubierta A_{cp}	0,1 m	0,1 m
Tiempo de exposición del captador a la irradiación	1 h	1 h
Número del día en el año	227	227
Latitud	1,6 ° (LN)	1,6 ° (LN)
T_{pi}	30 °C	30 °C
Temperatura máxima de la zona	27 °C	27 °C
Temperatura mínima de la zona	16 °C	16 °C



Para cada corrida experimental se digita en la hoja de cálculo (Excel), los valores correspondientes a cada simulación, obteniendo así 54 resultados para cada variable de respuesta, los cuales deberán ser analizados estadísticamente en el programa *STATGRAPHICS Centurion XVII*. Si no se cuenta con una plataforma o software de cálculo, se usa entonces cada ecuación presentada para calcular las variables del proceso respectivas; no obstante, sería un proceso tedioso, porque implica un gran número de cálculos por la gran cantidad de ecuaciones requeridas, aunque hay muchos datos que corresponden a propiedades físico-químicas que se puede buscar en tablas elaboradas a partir de correlaciones empíricas para modelar la propiedad en cuestión. En la sección de Apéndices se presentará las tablas termodinámicas que aquí se usa.

Ejecución de las simulaciones y sus resultados

Diseño de la hoja de cálculo para la simulación

Se crea una hoja de cálculo en el programa Excel para simular el proceso de secado específico para cada uno de los dos equipos aquí tratados, con la aplicación de los modelos matemáticos ya planteados y el uso de varios algoritmos, que permiten calcular de forma automática las variables de respuesta requeridas. A continuación, se presenta algunas imágenes de las hojas de cálculo.

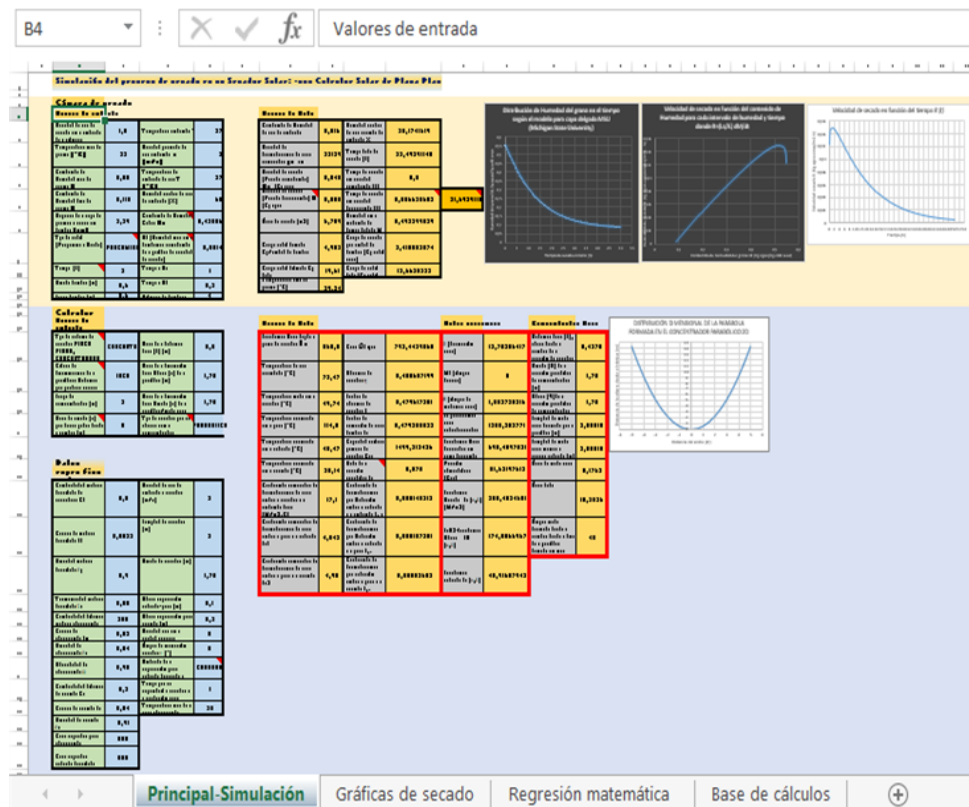


Figura 49
Esquema general de la plataforma principal de la simulación del proceso, en donde se digita los datos que condicionan el secado y, se muestra los datos de salida generados

La Figura 46 muestra el esquema completo de la hoja de cálculo principal en donde se ingresa los datos que condicionan el proceso y se obtiene los valores para las variables de respuesta. A la izquierda, en la parte de las tablas en verde y azul mate, se ha colocado aquellos componentes que serán modificados a preferencia del usuario; se ha dividido en las tres etapas del proceso: *cámara de secado*, *colector solar* y *datos ambientales*. En cada etapa se ingresará los datos que corresponden; además, algunas celdas admiten palabras; por ejemplo, en el tipo de sistema de secado se deberá poner PLACA PLANA o CONCENTRADOR. A la derecha, en las tablas de color gris y amarillo, se evidencia los valores de salida o respuesta; es decir, aquellos datos que resultan de los cálculos en la simulación respectiva. En el extremo derecho se puede observar algunas gráficas como la de velocidad de secado, de humedad y la distribución parabólica del concentrador solar.



En la Figura 47 se observa esquemas de la plataforma con la simulación para la sección de la cámara de secado, con el fin de mostrar que el proceso se simula con el establecimiento de los valores que lo condicionan y sus resultados. Esto se realiza para cada sección con el mismo fin; la idea es poder apreciar la aplicación de todos los fundamentos teóricos en el desarrollo de hojas de cálculo o plataformas de simulación de los procesos de secado con sistema de colección solar.

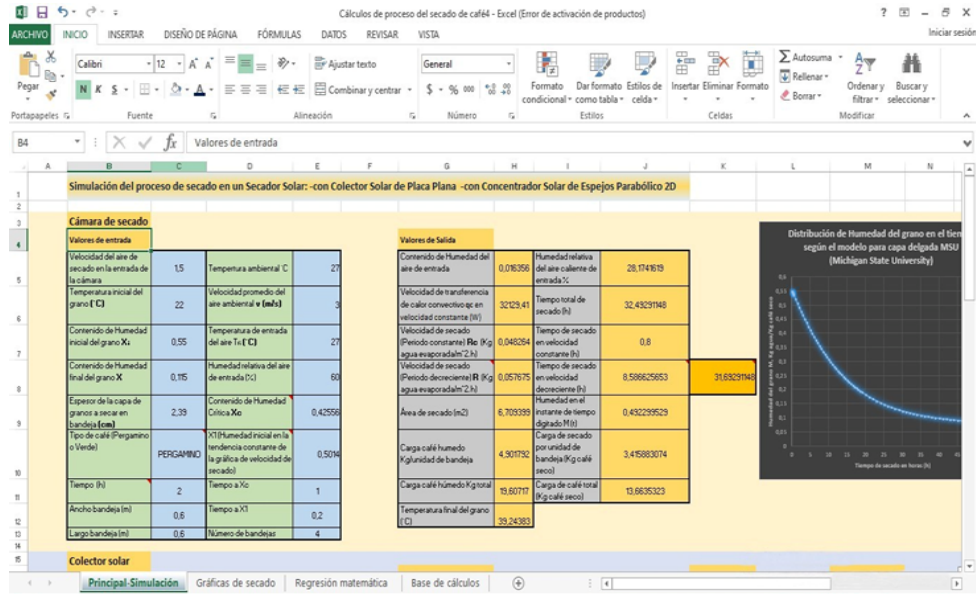


Figura 50
Plataforma principal de la simulación del proceso, en donde se digita los datos que condicionan el secado y se muestra los datos de salida generados. Corresponde a la sección de la cámara de secado

En la Figura 48 se puede apreciar los datos para la fase de colección solar: a la izquierda, las entradas (condiciones) y a la derecha, las salidas (valores resultantes), en donde se debe fijar primero, si es un sistema de *Placa plana* o *concentrador solar*. Como se muestra en las imágenes, se ha especificado que se trata de un concentrador y un colector parabólico (ver en la imagen las palabras **CONCENTRADOR** y **PARABÓLICO**); se desea calcular la distancia focal (FOCO) y se fija otros valores. En la primera se instaura valores dimensionales para el concentrador y en la segunda, se trata los datos específicos del colector; por ejemplo, los materiales, el valor de transmisividad de la cubierta traslúcida, grosores, emisividad, absorptividad, conductividad térmica, dimensiones del colector, ángulo de inclinación, si la entrada de aire estará cerrada o abierta, entre otros.

Excel spreadsheet showing input and output data for a solar collector simulation. The spreadsheet is titled "Simulación del proceso de secado en un Secador Solar: -con Colector Solar de Placa Plana -con Concentrador Solar de Espejos Parabólico 2D".

Valores de entrada				Valores de Salida				Datos loc
Tipo de sistema de secado: PLACA PLANA, CONCENTRADOR				Irradiancia Solar dirigida al plano del colector I _g	565,815357	Calor Útil Q _u (w)	793,4429865	δ (declina
Cálculo de dimensiones de la parábola: Distancia que prefriere calcular				Temperatura del aire calentado (°C)	72,4742939	Eficiencia del colector η	0,400657199	Wh (ángul
Largo del concentrador (m)				Temperatura media en el colector (°C)	49,7371469	Factor de eficiencia del colector F	0,479617381	θ (ángulo- incidencia
Valor de ancho (x) que desea quitar desde el centro (m)				Temperatura alcanzada en la placa (°C)	114,452426	Factor de remoción de calor dentro del colector F _r	0,479255023	Io (Irradia extraterre plano hori
Datos específicos al colector solar				Temperatura alcanzada en la cubierta (°C)	40,4689143	Capacidad calorífica general del colector C _{ool} (J/K.s)	1499,213436	irradiancia terrestre e horizontal
				Temperatura alcanzada en el aislante (°C)	38,1360573	Radio de la sección parabólica del colector	0,875	Presión at (Kpa)

Figura 51
 Plataforma principal de la simulación del proceso, en donde se digita los datos que condicionan al colector solar y se muestra datos de salida generado
 Nota: Corresponde a la sección de datos generales del colector

Excel spreadsheet showing specific input data for a solar collector simulation. The spreadsheet is titled "Simulación del proceso de secado en un Secador Solar: -con Colector Solar de Placa Plana -con Concentrador Solar de Espejos Parabólico 2D".

Datos específicos al colector solar				Valores de Salida			
Conductividad material traslúcido de cobertura K _t	0,8	Velocidad del aire de entrada al colector (m/s)	3	Temperatura alcanzada en el aislante (°C)	38,1360573	Radio de la sección parabólica del colector	0,875
Grosor del material traslúcido L _t	0,0032	Longitud del colector (m)	2	Coefficiente convectivo de transferencia de calor entre el colector y el ambiente h _{sur} (W/m ² .K)	17,1	Coefficiente de transferencia por radiación entre la cubierta y el ambiente h _{r-amb}	0,008145312
Emissividad material traslúcido ε ₁	0,9	Ancho del colector (m)	1,75	Coefficiente convectivo de transferencia de calor entre la placa y la cubierta h _{cl}	4,04175996	Coefficiente de transferencia por radiación entre la cubierta y la placa h _{r-c}	0,005187381
Transmisividad material traslúcido T _c	0,88	Altura separación cubierta-placa (m)	0,1	Coefficiente convectivo de transferencia de calor entre la placa y el aislante h _{c2}	4,98016319	Coefficiente de transferencia por radiación entre la placa y el aislante h _{r-p-ai}	0,00502683
Conductividad térmica material absorbente K _m	205	Altura separación placa aislante (m)	0,3				

Figura 52
 Plataforma principal de la simulación del proceso, en donde se digita los datos que condicionan al colector solar
 Nota: corresponde a la sección de datos específicos del colector



Los datos ambientales y de localización necesarios para determinar la energía solar que ingresan al sistema son representados de la misma manera. En la Figura 48 se expone los valores de salida o respuesta, aquellos que resultan de los cálculos para el colector y factores de la irradiación solar, como temperaturas de los componentes, calor generado, eficiencia, datos de locación, dimensiones del concentrador, entre otros. Todos son valores de respuesta, pero, para un estudio estadístico, con el fin de optimizar, se selecciona algunos pocos, los cuales ya se ha mencionado.

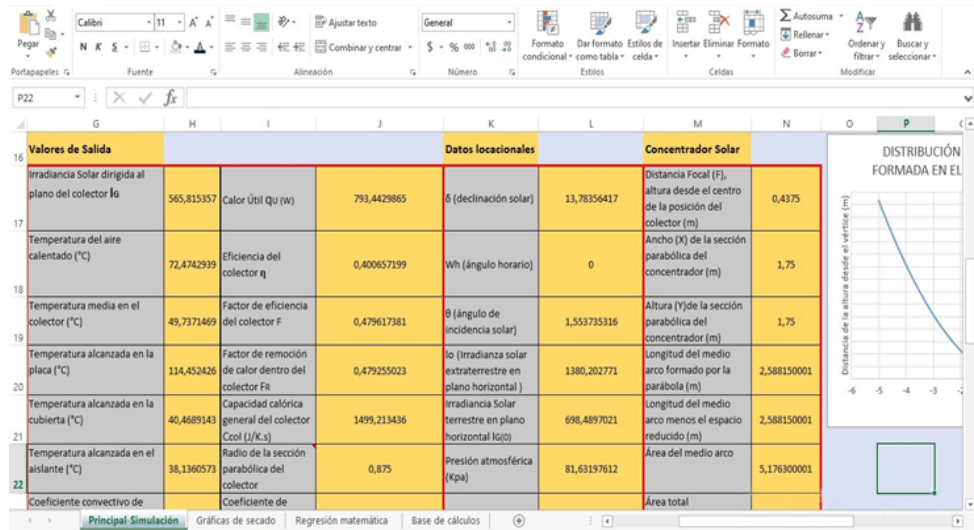


Figura 53

Plataforma principal de la simulación del proceso

Nota: corresponde a la sección de los valores de salida del colector solar

En las Figuras 49 y 50 podemos observar los datos que corresponden a los cálculos, detalle necesario para obtener los valores finales en la hoja principal. En la Figura 51 se presenta todo el conjunto de gráficas propuestas en el capítulo anterior, con las tablas de datos correspondientes, obtenidas de las ecuaciones ya vistas, como para distribución de humedad, velocidad de secado, temperatura en el grano y la parábola que forma el concentrador solar.

En la Figura 52 se aprecia la serie de regresiones matemáticas, obtenidas con la tabulación a partir de tablas termo-físicas para las propiedades, como viscosidad, conductividad térmica, etc., en función de la temperatura; estas regresiones son las ecuaciones que describen las condiciones del fluido (aire), las cuales son usadas en los cálculos base, de los que se muestra un esquema de la hoja de cálculo en la Figura 53. Se incluye los cálculos que describen todo el proceso de secado solar, determinando las variables de radiación solar, coeficientes de transferencia de calor, temperaturas, propiedades termo-físicas, calor generado, en fin, todos los parámetros descritos en los capítulos previos.

La serie de cálculos se ejecuta de la misma forma según el número de aproximaciones establecidas, de acuerdo con lo que se mencionó en el capítulo anterior. Como se ve en la Figura 53, hay siete aproximaciones (la séptima se aprecia en la columna de un color azul claro); a cada variable se aplica este método en la hoja de cálculo, excepto para los factores de radiación solar, ya que no lo requieren.

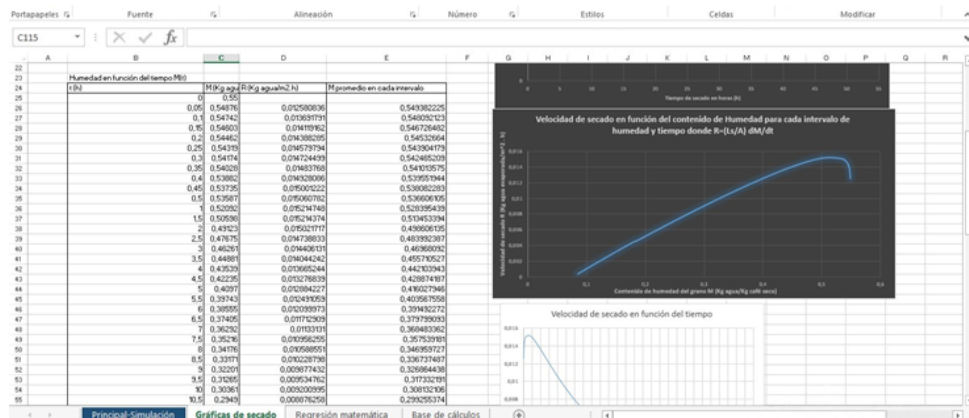


Figura 54
Hoja de cálculo para las gráficas del proceso de secado, mostrando también la tabla de datos de humedad

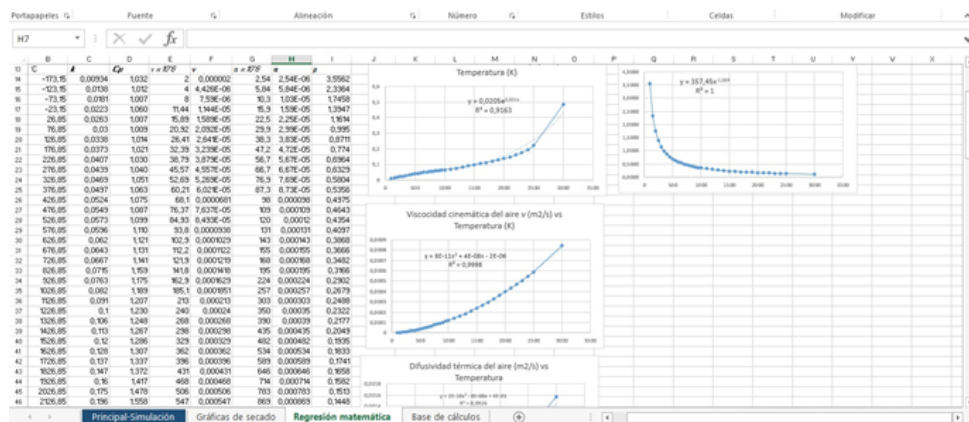


Figura 55
Hoja de cálculo correspondiente a los cálculos de las regresiones matemáticas de los elementos termodinámicos y de transferencia energética y música empíricos de los materiales
Nota: como los datos anteriores son necesarios para los cálculos posteriores, no deben ser modificados

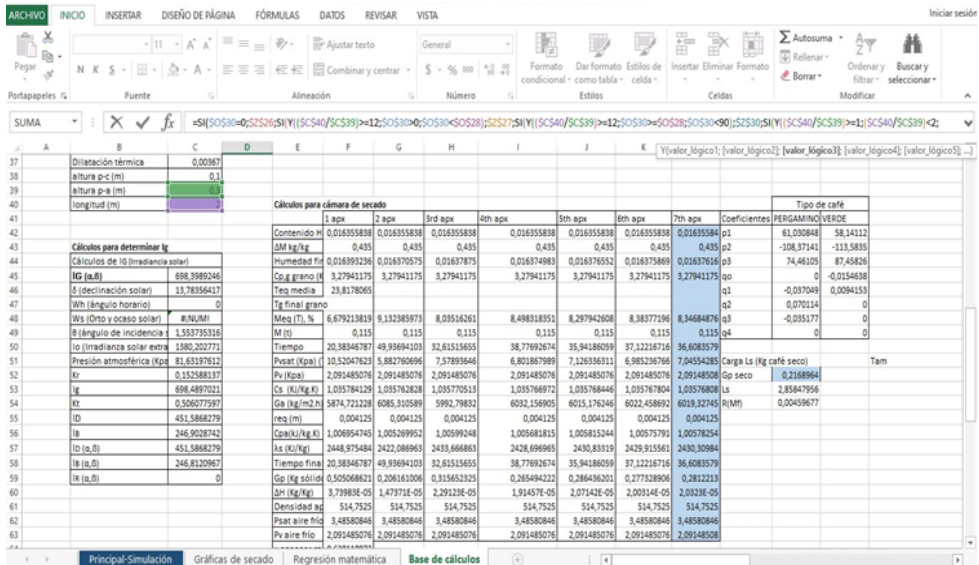


Figura 56
 Plataforma respectiva a los cálculos base de las propiedades de transferencia de calor y masa, de radiación solar y todos aquellos necesarios para predecir matemáticamente el proceso de secado
 Nota: esta sección no debe ser modificada

Simulaciones realizadas

Para presentar, a manera de ejemplo la simulación lograda con la hoja de cálculo, se mostrará algunos resultados obtenidos de la primera corrida experimental, con ciertas condiciones de operación establecidas al principio de este capítulo, tanto para el colector de placa plana como para el concentrador parabólico.

Colector con placa plana

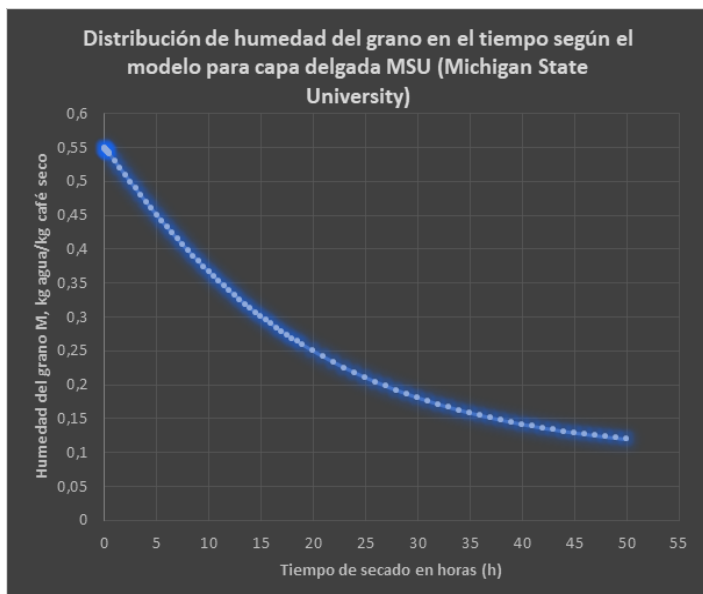


Figura 57

Gráfica de la distribución de la humedad del grano M en función del tiempo, usando el modelo para capa delgada MSU

Nota: corresponde a la primera corrida experimental del secador de placa plana

En esta imagen (Figura 54) se puede ver que la humedad decrece rápidamente con el tiempo, hasta un punto en que la pendiente de la curva se va atenuando; es decir, que va disminuyendo con menos intensidad a medida que se va acercando al punto de humedad de equilibrio (M_{eq}), pues es claro que la velocidad con que cae la humedad es proporcional a su distancia hasta M_{eq} ; esto es, depende del diferencial $M_{eq} - M$, como lo dicta la ecuación que modela la humedad. Como se comprueba en las Figuras 55 y 56, la velocidad de secado empieza ascendiendo rápidamente, pero en un corto lapso de tiempo (*menos de 2 horas*) y tiene un periodo de velocidad constante también corto, pero la etapa en la que la velocidad decrece es larga, la mayor parte del proceso de secado, disminuyendo hasta el punto en que llega a cero, donde la humedad en el grano es M_{eq} ; aquí ya no se puede seguir secando a la temperatura de operación establecida, pero si se trabaja con una mayor temperatura, entonces M_{eq} disminuye y así se podrá seguir secando con mayor velocidad.

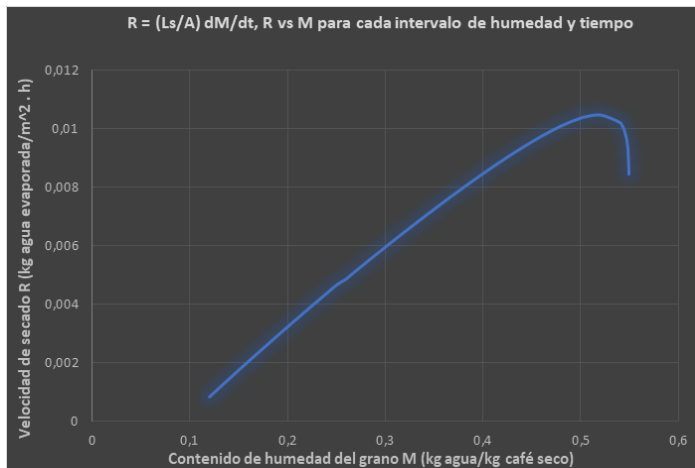


Figura 58
Distribución de la velocidad de secado R en función del contenido de humedad del grano M . R representa los kg de agua evaporada por unidad de área (m^2) y tiempo (h). Secador solar de placa plana

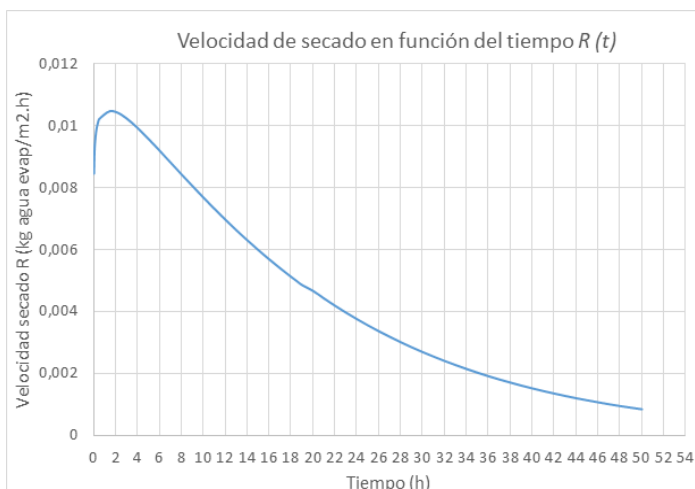


Figura 59
Distribución de la velocidad de secado R en función del tiempo. Secador solar de placa plana

Se presentan los valores obtenidos en esta simulación hasta lograr un valor de humedad del grano de 12 % b.s., como se describió al principio de este capítulo.

Variables de respuesta:

$$t(h) = 39, T_{fm} (\text{°C}) = 49, T_g (\text{°C}) = 40, \eta = 0,4, Q_u (W) = 292, L_s (\text{Kg Cafè seco/Und de bandeja}) = 8,6$$

Concentrador parabólico

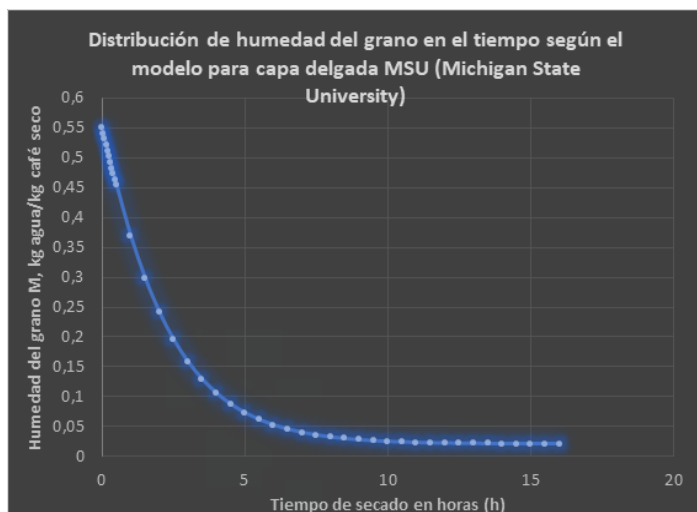


Figura 60

Gráfica de la distribución de la humedad del grano M en función del tiempo, usando el modelo para capa delgada MSU

Nota: corresponde a la primera corrida experimental del secador con concentrador solar parabólico

En este sistema de secado se obtiene una curva de humedad diferente. Como se ve en la Figura 57, hay una disminución de la humedad bastante marcada en un corto lapso de tiempo comparado con el anterior equipo, pues en casi once horas ya ha alcanzado el valor de M_{eq} , en donde ya se mantiene constante; es decir, que no sigue secando.

En las Figuras 58 y 59 se nota cómo va disminuyendo la velocidad de secado en la mayoría del tiempo del proceso, hasta que llega a un valor de cero en el punto que marca M_{eq} . Así se verifica la mayor eficiencia en tiempo que tiene este equipo de secado, comparado con el anterior. En la Figura 60 se presenta la forma parabólica como se distribuye el concentrador.



Figura 61
Distribución de la velocidad de secado R en función del contenido de humedad del grano M. R representa los kg de agua evaporada por unidad de área (m²) y tiempo (h). Secador con concentrador solar parabólico

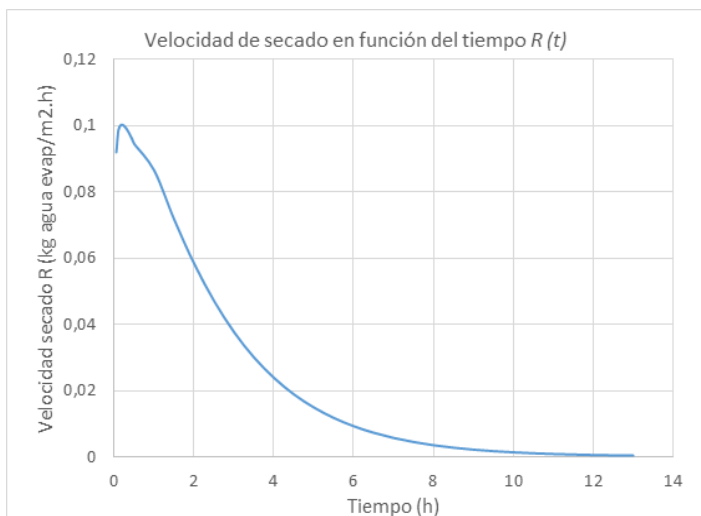


Figura 62
Distribución de la velocidad de secado R en función del tiempo. Secador con concentrador solar parabólico

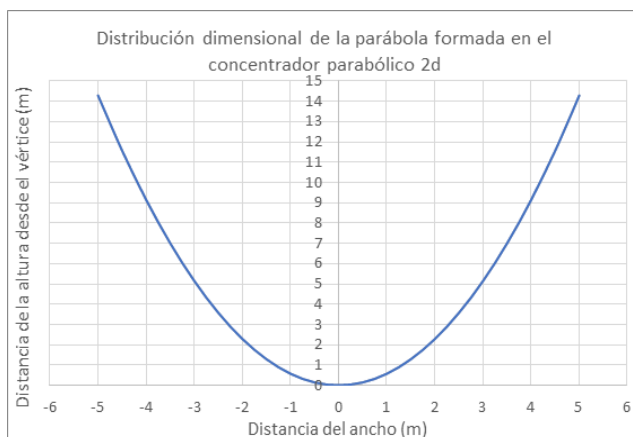


Figura 63

Distribución de la parábola generada para el concentrador solar en una vista unidimensional

Nota: se obtuvo mediante la regresión cuadrática-parabólica que corresponde a los datos digitados para el concentrador

Como ya se mencionó, estas gráficas provienen de una sola simulación, pues por cada corrida experimental se obtiene curvas diferentes, excepto en los puntos centrales del diseño experimental en los cuales se presenta las mismas condiciones. Debemos recordar que se hará un conjunto de simulaciones según el diseño experimental, para luego, mediante un análisis estadístico, obtener las condiciones de operación más óptimas para el diseño del equipo de secado. Realizando todas las corridas experimentales de esta serie de simulaciones, se obtiene los siguientes resultados con el diseño Box-Benkhen propuesto (Tabla 10 y Tabla 11):

Para colector de placa plana

Tabla 10

Resultados obtenidos de las corridas experimentales en el programa Statgraphics para el secador solar de placa plana con un diseño Box-Benkhen

$L_g(m)$	$x_c(m)$	$h_d(h)$	$\alpha_p(n)$	$\beta(^{\circ})$	v_a	$t(h)$	$T_{fm}(^{\circ}C)$	$T_g(^{\circ}C)$	η	$Q_u(W)$	L_S
1,5	0,06	15	0,2	10	1,25	38,68	48,18	39,56	0,394	292,05	8,575
1	0,04	12	0,3	40	1,25	22,03	58,73	46,39	0,382	259,12	5,717
1,5	0,02	12	0,2	10	0,5	24,95	55,72	43,64	0,399	417,26	2,858
2	0,06	12	0,3	25	1,25	23,29	57,73	45,97	0,381	526,37	8,575
1	0,04	12	0,3	10	1,25	25,76	55,53	44,26	0,398	277,40	5,717
2	0,04	12	0,3	10	1,25	25,32	55,87	44,48	0,398	554,81	5,717



2	0,04	15	0,2	25	2	35,31	49,52	40,07	0,377	369,39	5,717
1,5	0,06	12	0,2	40	0,5	2198	58,95	46,82	0,373	379,10	8,575
1,5	0,04	9	0,3	25	0,5	35,73	49,53	40,44	0,378	277,22	5,717
1,5	0,04	15	0,1	25	0,5	37,66	48,62	39,83	0,388	284,79	5,717
1,5	0,04	9	0,1	25	2	37,19	48,62	39,47	0,388	284,79	5,717
1,5	0,02	9	0,2	10	1,25	36,36	48,18	37,89	0,394	292,05	2,858
2	0,04	15	0,2	25	0,5	35,76	49,52	40,44	0,377	369,39	5,717
1,5	0,06	12	0,2	10	0,5	25,73	55,72	44,65	0,399	417,26	8,575
1,5	0,02	15	0,2	40	1,25	31,85	50,46	39,28	0,369	265,87	2,858
2	0,06	12	0,1	25	1,25	24,83	56,41	45,09	0,392	541,23	8,575
2	0,02	12	0,1	25	1,25	23,23	56,41	42,93	0,392	541,23	2,858
1	0,04	12	0,1	40	1,25	22,48	58,30	46,10	0,384	260,65	5,717
1,5	0,04	15	0,3	25	2	35,28	4953	40,07	0,378	277,22	5,717
1,5	0,04	15	0,1	25	2	37,19	48,62	39,47	0,388	284,79	5,717
1,5	0,02	9	0,2	40	1,25	31,85	50,46	39,28	0,369	265,87	2,858
1,5	0,02	15	0,2	10	1,25	36,36	48,18	37,89	0,394	292,05	2,858
2	0,04	9	0,2	25	2	35,31	49,52	40,07	0,377	369,39	5,717
1,5	0,02	12	0,2	10	2	23,44	55,72	41,73	0,399	417,26	2,858
1,5	0,04	9	0,1	25	0,5	37,66	48,62	39,83	0,388	284,79	5,717
1,5	0,04	9	0,3	25	2	35,28	49,53	40,07	0,378	277,22	5,717
1,5	0,06	9	0,2	10	1,25	38,68	48,18	39,56	0,394	292,05	8,575
1	0,02	12	0,1	25	1,25	22,67	56,90	43,23	0,391	269,88	2,858
1	0,04	9	0,2	25	0,5	36,35	49,23	40,24	0,385	188,64	5,717
2	0,02	12	0,3	25	1,25	21,77	57,73	43,74	0,381	526,37	2,858
1	0,04	15	0,2	25	0,5	36,35	49,23	40,24	0,385	188,64	5,717
1,5	0,02	12	0,2	40	2	19,97	58,95	43,64	0,373	379,10	2,858
1	0,04	9	0,2	25	2	35,89	49,23	39,88	0,385	188,64	5,717
1,5	0,06	15	0,2	40	1,25	33,93	50,46	41,09	0,369	265,87	8,575
1,5	0,06	12	0,2	10	2	25,67	55,72	44,57	0,399	417,26	8,575
1,5	0,02	12	0,2	40	0,5	21,30	58,95	45,73	0,373	379,10	2,858
1	0,06	12	0,3	25	1,25	23,89	57,20	45,61	0,390	269,13	8,575
1,5	0,06	12	0,2	40	2	21,93	58,95	46,73	0,373	379,10	8,575
2	0,04	12	0,1	40	1,25	23,80	57,13	45,32	0,388	526,42	5,717
2	0,04	9	0,2	25	0,5	35,76	49,52	40,44	0,377	369,39	5,717
1,5	0,04	15	0,3	25	0,5	35,73	49,53	40,44	0,378	277,22	5,717
1	0,02	12	0,3	25	1,25	22,34	57,20	43,42	0,390	269,13	2,858
1	0,06	12	0,1	25	1,25	24,24	56,90	45,41	0,391	269,88	8,575
1	0,04	12	0,1	10	1,25	25,98	55,37	44,15	0,398	277,30	5,717
1,5	0,06	9	0,2	40	1,25	33,93	50,46	41,09	0,369	265,87	8,575
2	0,04	12	0,1	10	1,25	25,05	56,09	44,63	0,394	549,32	5,717
1	0,04	15	0,2	25	2	35,89	49,23	39,88	0,385	188,64	5,717
2	0,04	12	0,3	40	1,25	21,19	59,55	46,93	0,368	498,78	5,717
1,5	0,04	12	0,2	25	1,25	23,54	57,36	45,47	0,384	397,96	5,717
1,5	0,04	12	0,2	25	1,25	23,54	57,36	45,47	0,384	397,96	5,717
1,5	0,04	12	0,2	25	1,25	23,54	57,36	45,47	0,384	397,96	5,717
1,5	0,04	12	0,2	25	1,25	23,54	57,36	45,47	0,384	397,96	5,717
1,5	0,04	12	0,2	25	1,25	23,54	57,36	45,47	0,384	397,96	5,717
1,5	0,04	12	0,2	25	1,25	23,54	57,36	45,47	0,384	397,96	5,717

Para colector con concentrador parabólico

Tabla 11
Resultados obtenidos de las corridas experimentales en el programa Statgraphics para el secador con concentrador solar parabólico con un diseño Box-Benkhen

$L_g(m)$	$x_c(m)$	$h_d(h)$	$Anc(m)$	$x(m)$	$y(m)$	$t(h)$	$T_{fm}(^{\circ}C)$	$T_g(^{\circ}C)$	η	$Q_u(W)$	L_s
3	0,01	12	0,5	1,75	1,75	3,75	98,33	58,909	0,416	1236,06	1,429
3	0,035	12	0,5	0,5	1,75	14,37	67,62	51,917	0,409	664,47	5,002
3	0,01	12	3	1,75	1,75	48,81	41,29	31,031	0,393	1166,09	1,429
3	0,035	12	3	0,5	1,75	93,08	35,64	30,911	0,383	622,28	5,002
2	0,01	12	1,75	3	0,5	19,00	56,92	38,500	0,405	1093,30	1,429
2	0,01	9	1,75	0,5	1,75	68,78	37,15	29,072	0,386	296,53	1,429
2	0,01	15	1,75	3	1,75	25,97	51,07	35,690	0,402	848,63	1,429
1	0,01	12	0,5	1,75	1,75	3,75	98,33	58,909	0,416	412,02	1,429
2	0,06	9	1,75	3	1,75	31,54	51,07	41,486	0,402	848,63	8,575
2	0,06	9	1,75	0,5	1,75	81,13	37,15	32,150	0,386	296,53	8,575
3	0,06	12	0,5	1,75	1,75	5,00	98,33	73,195	0,416	1236,06	8,575
2	0,06	12	1,75	3	0,5	23,43	56,92	45,407	0,405	1093,30	8,575
3	0,06	12	3	1,75	1,75	57,83	41,29	34,929	0,393	1166,09	8,575
2	0,01	12	1,75	0,5	0,5	86,40	34,88	28,007	0,381	215,58	1,429
2	0,035	15	3	1,75	0,5	89,57	36,00	31,152	0,384	437,32	5,002
1	0,035	9	1,75	1,75	0,5	57,82	41,12	34,506	0,392	223,52	5,002
2	0,035	15	0,5	1,75	0,5	13,29	69,55	53,191	0,409	466,70	5,002
2	0,035	15	3	1,75	3	63,78	39,83	33,660	0,391	680,99	5,002
2	0,035	9	3	1,75	0,5	89,57	36,00	31,152	0,384	437,32	5,002
2	0,035	9	0,5	1,75	3	6,33	90,26	66,861	0,415	723,02	5,002
1	0,035	9	1,75	1,75	3	38,42	47,35	38,586	0,399	347,67	5,002
2	0,06	12	1,75	3	3	17,14	63,81	50,029	0,408	1385,71	8,575
3	0,035	15	1,75	1,75	3	38,42	47,35	38,586	0,399	1043,02	5,002
1	0,035	12	0,5	0,5	1,75	14,37	67,62	51,917	0,409	221,49	5,002
2	0,06	15	1,75	0,5	1,75	81,13	37,15	32,150	0,386	296,53	8,575
1	0,035	12	3	0,5	1,75	93,08	35,64	30,911	0,383	207,43	5,002



3	0,035	9	1,75	1,75	0,5	57,82	41,12	34,506	0,392	670,57	5,002
3	0,035	15	1,75	1,75	0,5	57,82	41,12	34,506	0,392	670,57	5,002
2	0,01	9	1,75	3	1,75	25,97	51,07	35,690	0,402	848,63	1,429
3	0,035	12	0,5	3	1,75	1,97	131,49	94,205	0,420	1879,41	5,002
2	0,01	15	1,75	0,5	1,75	68,78	37,15	29,072	0,386	296,53	1,429
3	0,035	12	3	3	1,75	38,53	47,30	38,555	0,399	1782,80	5,002
2	0,035	15	0,5	1,75	3	6,33	90,26	66,861	0,415	723,02	5,002
1	0,035	12	0,5	3	1,75	1,97	131,49	94,205	0,420	626,47	5,002
1	0,06	12	3	1,75	1,75	57,83	41,29	34,929	0,393	388,70	8,575
2	0,01	12	1,75	3	3	13,67	63,81	41,836	0,408	1385,71	1,429
2	0,035	9	3	1,75	3	63,78	39,83	33,660	0,391	680,99	5,002
2	0,06	12	1,75	0,5	0,5	102,55	34,88	30,633	0,381	215,58	8,575
2	0,035	9	0,5	1,75	0,5	13,29	69,55	53,191	0,409	466,70	5,002
2	0,06	12	1,75	0,5	3	41,32	46,35	38,323	0,398	655,04	8,575
2	0,06	15	1,75	3	1,75	31,54	51,07	41,486	0,402	848,63	8,575
3	0,035	9	1,75	1,75	3	38,42	47,35	38,586	0,399	1043,02	5,002
1	0,06	12	0,5	1,75	1,75	5,00	98,33	73,195	0,416	412,02	8,575
1	0,035	15	1,75	1,75	0,5	57,82	41,12	34,506	0,392	223,52	5,002
2	0,01	12	1,75	0,5	3	34,45	46,35	33,436	0,398	655,04	1,429
1	0,035	15	1,75	1,75	3	38,42	47,35	38,586	0,399	347,67	5,002
1	0,01	12	3	1,75	1,75	48,81	41,29	31,031	0,393	388,70	1,429
1	0,035	12	3	3	1,75	38,53	47,30	38,555	0,399	594,27	5,002
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75	33,47	49,74	40,156	0,401	793,44	5,002
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75	33,47	49,74	40,156	0,401	793,44	5,002
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75	33,47	49,74	40,156	0,401	793,44	5,002
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75	33,47	49,74	40,156	0,401	793,44	5,002
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75	33,47	49,74	40,156	0,401	793,44	5,002
2	0,035	12	1,75	1,75	1,75	33,47	49,74	40,156	0,401	793,44	5,002

Estos datos serán tratados estadísticamente mediante un análisis de Superficie de Respuesta, para obtener los valores óptimos del conjunto de factores del proceso que maximicen o minimicen las variables de respuesta mediante una relación de compromiso.

Análisis estadístico de superficie de respuesta

A continuación, se mostrará los resultados de la aplicación del diseño experimental para cada equipo de secado analizado. Inicialmente, se presentará el análisis para una sola variable de respuesta, pero más adelante se mostrará los resultados para varias variables en conjunto.

Colector de Placa Plana

Variable de respuesta: Tiempo de secado

En este caso se busca optimizar el tiempo de secado; se varía los distintos factores experimentales con el objetivo de encontrar los niveles de dichos factores que permitan minimizar el tiempo de secado.

Efectos estimados para tiempo de secado ($t(h)$)

Aquí se estudia el efecto, en términos numéricos, que tienen los factores experimentales sobre el tiempo de secado (Tabla 12); así, se podrá ver cuáles son los factores que más influyen y, por tanto, elegir aquellos que tienen más importancia en estudios posteriores o en la práctica.

Tabla 12

Datos de los efectos estimados de cada factor de entrada, incluyendo efectos principales y sus interacciones, sobre el tiempo de secado (t) para un secador de placa plana

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.	Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
Promedio	23,539	0,19442		BD	-0,0255451	0,336744	1,0
A: L_g	-0,271175	0,19442	1,0	BE	-0,105536	0,238114	1,0
B: X_c	1,72621	0,19442	1,0	BF	0,679033	0,336744	1,0
C: H_d	0,0	0,19442	1,0	CC	24,5077	0,296981	1,2963
D: α_p	-1,19738	0,19442	1,0	CD	0,0	0,336744	1,0
E: β	-3,8105	0,19442	1,0	CE	0,0	0,336744	1,0
F: v_a	-0,552412	0,19442	1,0	CF	0,0	0,238114	1,0
AA	-0,271677	0,296981	1,2963	DD	1,01365	0,296981	1,2963
AB	-0,00021289	0,336744	1,0	DE	-0,781561	0,336744	1,0
AC	0,0	0,336744	1,0	DF	0,0101978	0,336744	1,0
AD	-0,499447	0,238114	1,0	EE	0,0847966	0,296981	1,2963
AE	0,46166	0,336744	1,0	EF	0,0480456	0,336744	1,0



AF	0,0031335	0,336744	1,0	FF	0,337452	0,296981	1,2963
BB	-1,2567	0,296981	1,2963				
BC	0,0	0,336744	1,0				

Cada factor se representa por una letra, como se especifica en la primera columna; por ejemplo, A corresponde al largo del colector (L_g); esta denotación la realiza automáticamente el software estadístico. También se muestra el error estándar de cada uno de estos efectos, el cual mide su error de muestreo. Note también que el factor de inflación de varianza (V.I.F.) más grande es igual a 1,2963. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían iguales a 1. Factores de 10 o más, normalmente son interpretados como indicativos de confusión seria entre los efectos.

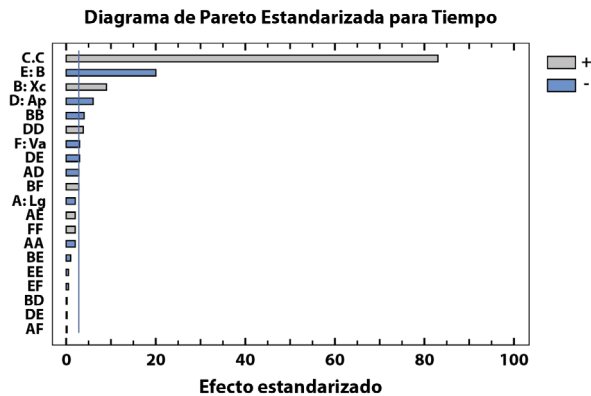


Figura 64
Diagrama de Pareto del efecto de cada factor sobre el tiempo de secado para el secador solar de placa plana

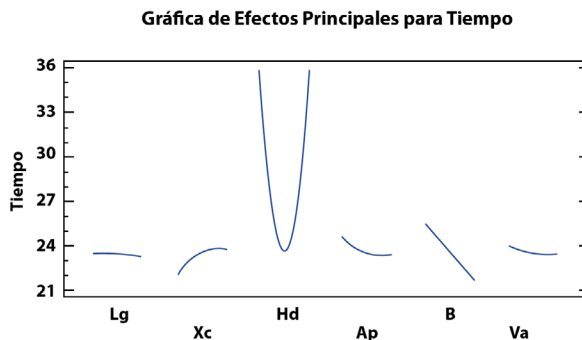


Figura 65
Efectos principales de cada factor sobre el tiempo de secado para el secador solar de placa plana

En la Figura 61 claramente se observa que, el factor que más efecto tiene sobre el tiempo de secado es el cuadrado de la hora de operación Hd , seguido en orden decreciente de efecto por el ángulo de inclinación del colector (β), grosor de la capa de secado (Xc), y así sucesivamente, como se aprecia en la imagen. La Figura 62 muestra que el efecto principal (Hd) tiene una relación cuadrática positiva; esto indica que hay una hora del día en la cual se obtiene un tiempo de secado mínimo y, valores inferiores o superiores a esta hora aumentan el tiempo de secado.

Análisis de varianza

Tabla 13

Resultados del análisis de varianza donde se aprecian los factores que tienen significancia estadística respecto al tiempo de secado. Secador solar de placa plana

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Lg	0,441215	1	0,441215	1,95	0,1749
B:Xc	17,8789	1	17,8789	78,83	0,0000
C:Hd	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
D:Ap	8,60233	1	8,60233	37,93	0,0000
E:B	87,1195	1	87,1195	384,14	0,0000
F:Va	1,83096	1	1,83096	8,07	0,0086
AA	0,189793	1	0,189793	0,84	0,3687
AB	9,06443E-8	1	9,06443E-8	0,00	0,9995
AC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AD	0,99779	1	0,99779	4,40	0,0458
AE	0,426259	1	0,426259	1,88	0,1821
AF	0,000019637	1	0,00001963	0,00	0,9926
	7		77		
BB	4,06107	1	4,06107	17,91	0,0003
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BD	0,00130511	1	0,00130511	0,01	0,9401
BE	0,0445517	1	0,0445517	0,20	0,6613
BF	0,922172	1	0,922172	4,07	0,0542
CC	1544,46	1	1544,46	6810,0	0,0000
				0	
CD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
DD	2,64209	1	2,64209	11,65	0,0021
DE	1,22167	1	1,22167	5,39	0,0284



DF	0,000207989	1	0,00020798	0,00	0,9761
			9		
EE	0,0184898	1	0,0184898	0,08	0,7775
EF	0,00461676	1	0,00461676	0,02	0,8876
FF	0,292819	1	0,292819	1,29	0,2662
Error total	5,89664	26	0,226794		
Total	2173,25	53			
(corr.)					

$R^2 = 99,7287\%$

R^2 ajustada por g.l. = 99,4469 %

Error estándar de estimación = 0,476229

Error medio absoluto = 0,256059

Estadístico Durbin-Watson (DW) = 2,02627 (P=0,5269)

La tabla ANOVA, como la que se muestra en la Tabla 13, divide la variabilidad del tiempo de secado en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces, prueba la significancia estadística de cada efecto, comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, nueve efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95,0 % (información dada por *STATGRAPHICS CENTURION XVII*)

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica 99,7 % de la variabilidad en el tiempo de secado. El estadístico R^2 ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99,4 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,476229. El error medio absoluto (MAE) de 0,26 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de DW prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presenta los datos en el archivo. Como el valor-P es mayor que 5,0 %, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0 % (*STATGRAPHICS CENTURION XVII*).

Coeficientes de regresión

Tabla 14

Valores de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de predicción del tiempo de secado. Secador solar de placa plana

Coeficiente	Estimado	Coeficiente	Estimado
Constante	221,341	BD	-6,38628
A:Lg	1,58355	BE	-0,175894
B:Xc	146,223	BF	22,6344
C:Hd	-32,6769	CC	1,36154

D:Ap	-12,0847	CD	0,0
E:B	-0,126134	CE	0,0
F:Va	-2,09679	CF	0,0
AA	-0,543354	DD	50,6823
AB	-0,0106445	DE	-0,26052
AC	0,0	DF	0,0679851
AD	-4,99447	EE	0,000188437
AE	0,0307773	EF	0,00213536
AF	0,00417801	FF	0,299957
BB	-1570,88		
BC	0,0		

Esta tabla (Tabla 14) despliega la *ecuación de regresión* que se ha ajustado a los datos; en cada fila se muestra el valor numérico de los coeficientes de cada factor. La ecuación del modelo ajustado es:

$$\begin{aligned}
 t = & 221,341 + 1,58355L_g + 146,223X_c - 32,6769H_d - 12,0847a_p - 0,126134\beta \\
 & - 2,09679v_a - 0,543354L_g^2 - 0,0106445L_gX_c - 4,99447L_ga_p \\
 & + 0,0307773L_g\beta + 0,00417801L_gv_a - 1570,88X_c^2 - 6,38628X_c a_p \\
 & - 0,175894X_c\beta + 22,6344X_c v_a + 1,36154H_d^2 + 50,6823a_p^2 \\
 & - 0,26052a_p\beta + 0,067985a_p v_a + 0,000188437\beta^2 + 0,00213536\beta v_a \\
 & + 0,299957v_a^2
 \end{aligned}$$

Tomando en cuenta únicamente los nueve factores principales, aquellos que tienen significancia estadística o mayor efecto en el tiempo de secado, se tendría la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned}
 t = & 146,223X_c - 2,09679v_a - 0,126134\beta - 12,0847a_p - 4,99447L_ga_p \\
 & - 1570,88X_c^2 + 1,36154H_d^2 + 50,6823a_p^2 - 0,26052a_p\beta
 \end{aligned}$$

...en donde los valores de las variables están especificados en sus unidades originales.

Con el propósito de dar una visualización más comprensible y gráfica, se realizará algunos diseños de los equipos de secado de placa plana y con concentrador solar, usando el programa de diseño 3D y dibujo técnico *SketchUp Desktop de Google LLC.*, con base en los valores de las dimensiones principales obtenidas en los resultados de *optimización* para las variables de respuesta dados por el software estadístico (*StatGraphics*).

No se presentará en este texto todos los resultados generados en el proceso de optimización, ya que sería una acción redundante; solo los esquemas con las principales variables, teniendo en cuenta que, para el productor común, uno de los



factores más importantes es la reducción del tiempo de secado. El usuario puede generar diseños de las variables de respuesta y las combinaciones que más prefiera; basta con simular el proceso aplicando los fundamentos matemáticos y científicos para obtener los resultados que puedan ser tratados estadísticamente, si es que se desea optimizar; es por esto que en los bocetos de los equipos se mostrará solo las variables estructurales o dimensionales.

Optimización de respuesta

Meta: minimizar el tiempo de secado

Valor óptimo = 19,1334 horas

Tabla 15

Valores estimados de los factores que hacen que se optimice el tiempo de secado hacia su mínimo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador solar de placa plana

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	2,0	2,0
Xc	0,02	0,06	0,0200004
Hd	9,0	15,0	12,0251
Ap	0,1	0,3	0,295439
B	10,0	40,0	39,5443
Va	0,5	2,0	1,98944

La Tabla 15 muestra la combinación de los niveles de los factores que minimiza el tiempo de secado sobre la región indicada, la cual está definida por los límites bajo y alto para cada factor.

Para la gráfica de superficie de respuesta, en todos los casos se toma los factores Xc y Lg, ya que son muy importantes para el diseño del equipo. Xc es el segundo que mayor efecto tiene, sabiendo que el primero es Hd; sin embargo, este es un factor climático o ambiental; el enfoque de este trabajo es hacia factores estructurales; aunque Lg tiene un efecto menor, es un factor de productividad que aquí interesa mucho.

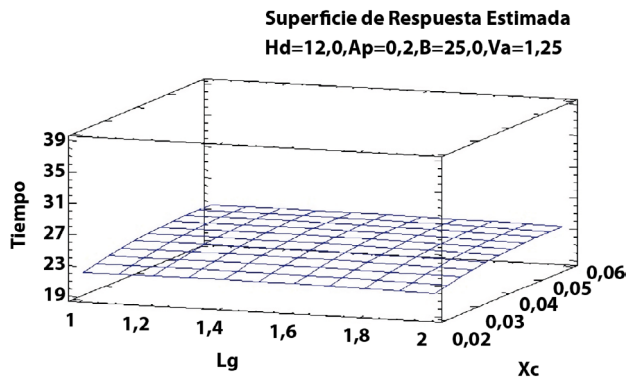


Figura 66
 Gráfica de superficie de respuesta obtenida al variar L_g y X_c respecto al tiempo t , mientras se mantienen fijos H_d , A_p , B y V_a . Secador solar de placa plana

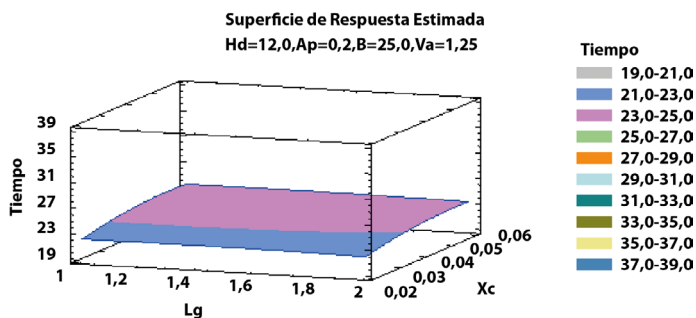


Figura 67
 Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, respecto al tiempo t . Secador solar de placa plana

Como se puede observar en las Figuras 63 y 64, no hay una región donde se encuentre el valor mínimo u óptimo de tiempo (≈ 19 horas), ya que varían dos variables: L_g y X_c ; la primera no tiene un efecto significativo, lo cual aplanó la curva; además, se está trabajando con valores fijos de los otros factores, pero no en aquellos que optimizan el tiempo, sino con valores medios.



Diseño 1.1 – Esquema gráfico del secador de placa plana

Variable de respuesta a optimizar: Tiempo de secado (t), al valor mínimo.
El diseño se basa en los datos de la Tabla 15 y se muestra en las Figuras 65, 66, 67 y 68.

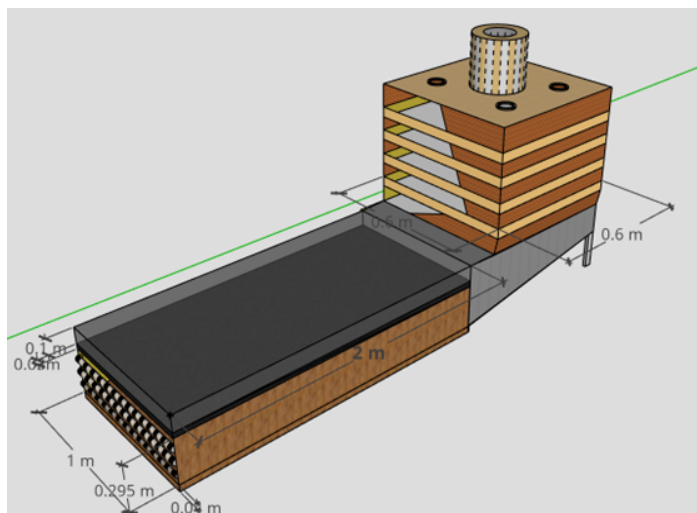


Figura 68
Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para el tiempo de secado t
Nota: los datos concretos están en la Tabla 15. Vista 3D

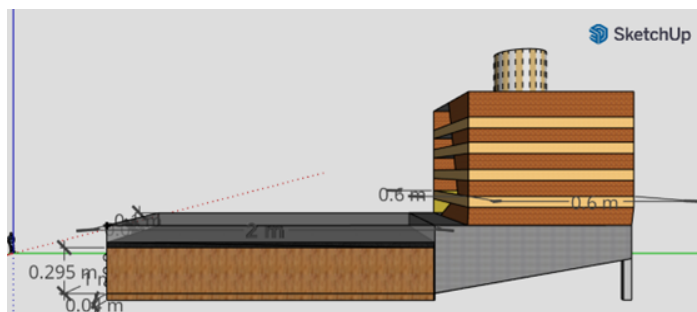


Figura 69
Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para el tiempo de secado t
Nota: los datos concretos están en la Tabla 15. Vista lateral izquierda

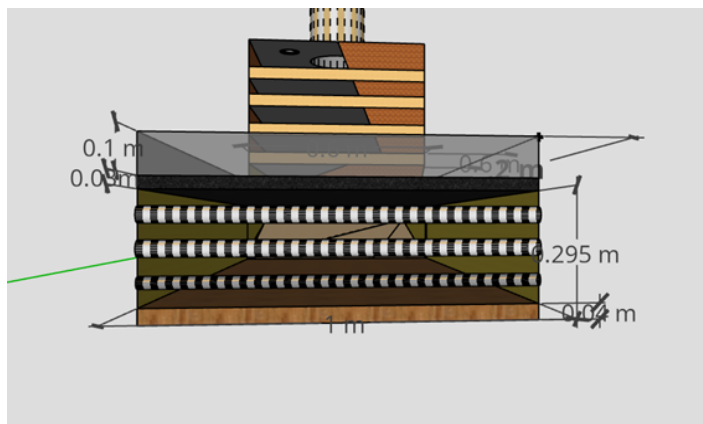


Figura 70
Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para el tiempo de secado t
Nota: los datos concretos están en la Tabla 15. Vista frontal

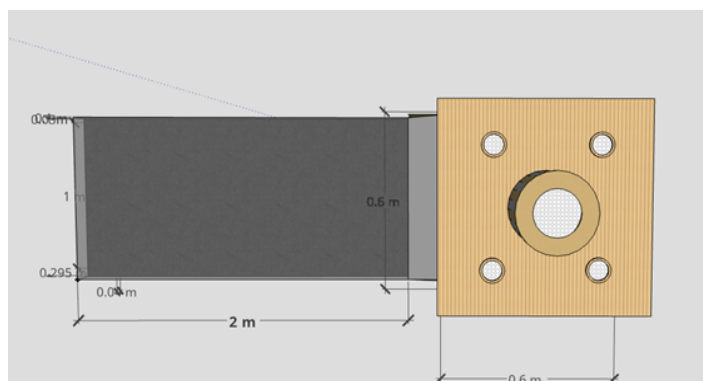


Figura 71
Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para el tiempo de secado
Nota: los datos concretos están en la Tabla 15. Vista superior

Hay detalles de diseño que son encargados al diseñador, según sus conocimientos teóricos o prácticos, como la entrada para el paso de aire en el colector. En estos esquemas se observa una ventana con estructuras cilíndricas dispuestas horizontalmente, con el fin de inducir corrientes de aire, en donde al reducir el área de entrada, aumenta la velocidad lineal. En el escape de aire-vapor en la parte superior de la cámara de secado se ha integrado una salida cilíndrica central y, cuatro



menores a los lados. Pero hay muchos más métodos estructurales; por ejemplo, sería recomendable que en la entrada se disponga de un sistema de ventana manipulable, que permita cerrar y abrir el paso, con láminas rectangulares individuales que puedan girar respecto al eje horizontal; así se controlaría dicha área; además, debería ser de un material aislante para reducir las pérdidas de calor. También se podría agregar en la entrada una malla anti-plagas para cuando se mantenga abierta. Para controlar mejor el proceso y hacerlo más efectivo se puede integrar a la salida del colector un dispositivo de ventilación; el escape puede tener una geometría cónica; esto aumentaría la velocidad del aire humedecido a la salida.

Variable de Respuesta: Temperatura media del aire en el colector $T_{fm} (^{\circ}\text{C})$

Efectos estimados

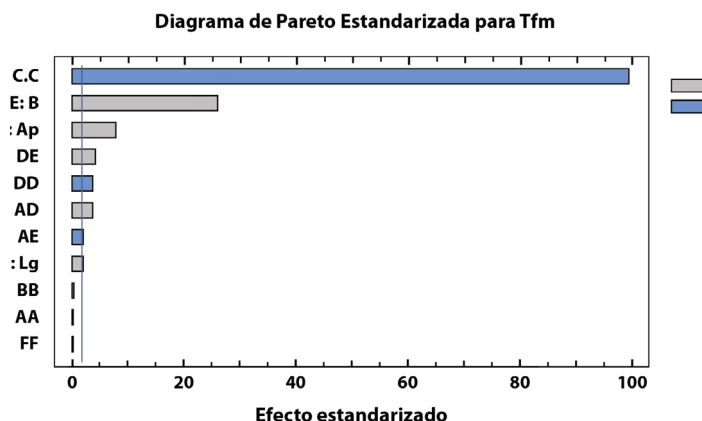


Figura 72

Diagrama de Pareto del efecto de cada factor sobre la temperatura media del aire T_{fm} . Secador solar de placa plana

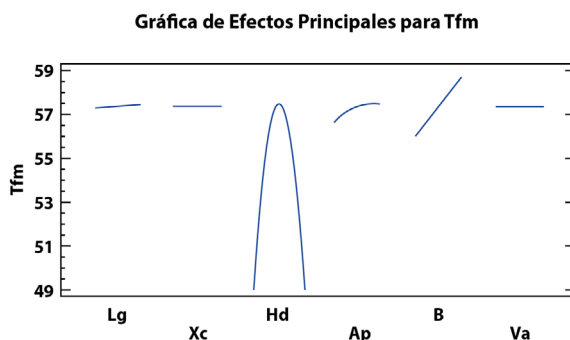


Figura 73
Efectos principales de cada factor sobre la temperatura media del aire Tfm. Secador solar de placa plana

El factor que más influye en la temperatura media del aire es la hora de operación; igual para el caso del tiempo de secado, pero con un efecto cuadrático negativo, como se ve en la parábola formada en la Figura 70; esto significa que, a esa hora la temperatura del aire es máxima, pero antes o después, la temperatura disminuye. Se puede apreciar el grado de importancia de los efectos principales, los cuales son seis en la Figura 69 y, su distribución, en la Figura 70.

Análisis de Varianza

Tabla 16
Resultados del análisis de varianza donde se aprecian los factores que tienen significancia estadística respecto a Tfm. Secador solar de placa plana

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Lg	0,154518	1	0,154518	2,30	0,1414
B:Xc	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
C:Hd	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
D:Ap	3,89665	1	3,89665	58,02	0,0000
E:B	45,1756	1	45,1756	672,63	0,0000
F:Va	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AA	0,00209477	1	0,00209477	0,03	0,8612
AB	0,0	1	0,0	0,00	1,0000



AC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AD	0,832614	1	0,832614	12,40	0,0016
AE	0,253585	1	0,253585	3,78	0,0629
AF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BB	0,00497358	1	0,00497358	0,07	0,7877
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CC	659,395	1	659,395	9817,82	0,0000
CD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
DD	0,848914	1	0,848914	12,64	0,0015
DE	1,05745	1	1,05745	15,74	0,0005
DF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
EE	0,000884311	1	0,00088431	0,01	0,9095
EF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
FF	0,00129784	1	0,00129784	0,02	0,8905
Error total	1,74624	26	0,067163		
Total (corr.)	894,978	53			

$R^2 = 99,8049 \%$

R^2 (ajustada por g.l.) = 99,6023 %

Error estándar de estimación = 0,259158

Error absoluto medio = 0,142353

Estadístico Durbin-Watson = 2,17732 (P=0,7280)

En este caso, como se muestra en la Tabla 16, seis efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0 %.

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica 99,8 % de la variabilidad en Tfm. El estadístico R^2 ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 99,6023 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,259158. El MAE de 0,142353 es el valor promedio de los residuos. El estadístico DW prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que son presentados los datos en el archivo. Dado que el valor-P es mayor a 5,0 %, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 5,0 %.

Coeficientes de Regresión

Tabla 17

Valores de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de predicción T_{fm} . Secador solar de placa plana

Coeficiente	Estimado	Coeficiente	Estimado
Constante	-73,4979	BD	0,0
A:Lg	-0,329785	BE	0,0
B:Xc	4,39792	BF	0,0
C:Hd	21,3513	CC	-0,889637
D:Ap	2,6178	CD	0,0
E:B	0,0806577	CE	0,0
F:Va	-0,0499242	CF	0,0
AA	0,0570835	DD	-28,7286
AB	0,0	DE	0,242379
AC	0,0	DF	0,0
AD	4,56238	EE	-0,00004121
AE	-0,0237386	EF	0,0
AF	0,0	FF	0,0199697
BB	-54,974		
BC	0,0		

La ecuación del modelo ajustado con los datos de la Tabla 17 es:

$$\begin{aligned}
 T_{fm} = & -73,4979 - 0,329785L_g + 4,39792X_c + 21,3513H_d + 2,6178a_p \\
 & + 0,0806577\beta - 0,0499242v_a + 0,0570835L_g^2 + 4,56238L_ga_p \\
 & - 0,0237386L_g\beta - 54,974X_c^2 - 0,889637H_d^2 - 28,7286a_p^2 \\
 & + 0,242379a_p\beta - 0,00004121\beta^2 + 0,0199697v_a^2
 \end{aligned}$$

Ecuación con los efectos principales significativos:

$$\begin{aligned}
 T_{fm} = & -73,4979 + 2,6178a_p + 0,0806577\beta + 4,56238L_ga_p + 0,242379a_p\beta \\
 & - 0,889637H_d^2 - 28,7286a_p^2
 \end{aligned}$$

Optimización de la respuesta

Meta: maximizar T_{fm}

Valor óptimo = 59,3536

Los datos se tabulan en la Tabla 18 y la superficie de respuesta se grafica en la Figura 71.



Tabla 18

Valores estimados de los factores que hacen que se optimice T_{fm} hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador solar de placa plana

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	2,0	1,99997
Xc	0,02	0,06	0,0405322
Hd	9,0	15,0	11,9997
Ap	0,1	0,3	0,299998
B	10,0	40,0	40,0
Va	0,5	2,0	2,0

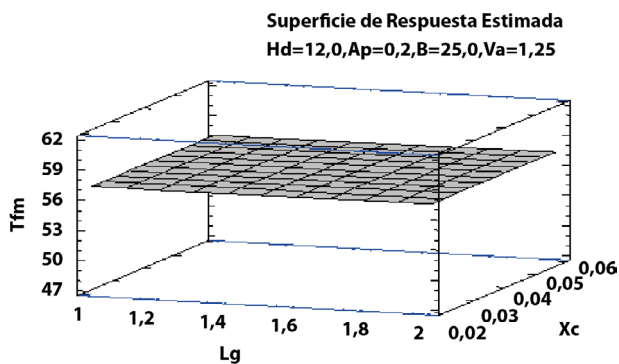


Figura 74

Gráfica de superficie de respuesta obtenida al variar L_g y X_c respecto a T_{fm} , mientras se mantienen fijos H_d , A_p , B y V_a . Secador solar de placa plana

Variable: temperatura final del grano $T_{fg} (^{\circ}\text{C})$ Análisis de efectos

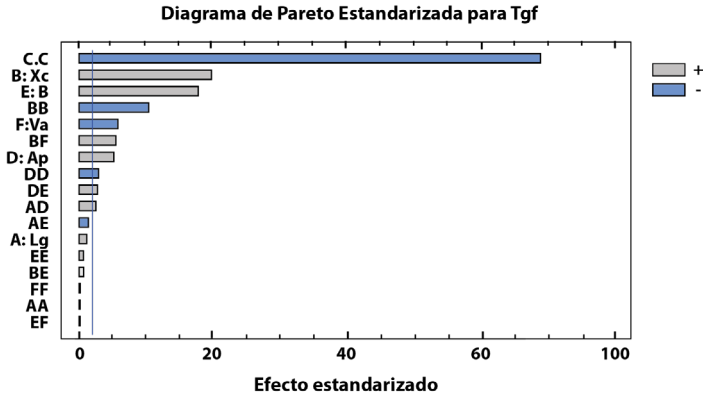


Figura 75

Diagrama de Pareto de la proporción del efecto que tiene cada factor sobre la temperatura final del grano T_{fg} . Secador solar de placa plana

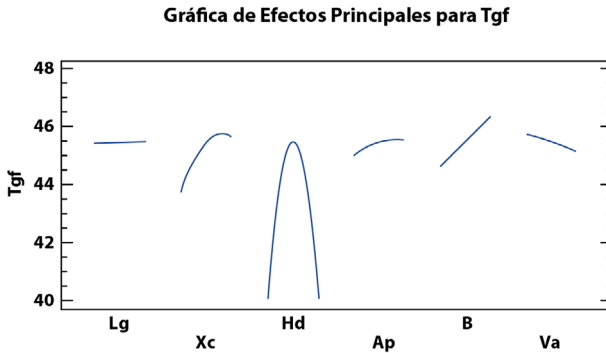


Figura 76

Efectos principales de cada factor sobre temperatura final del grano T_{fg} . Secador solar de placa plana

Se puede observar que aquí también, el factor más importante es el cuadrado del valor de la hora de operación, formando una parábola negativa, seguida por el grosor de capa y el ángulo de inclinación (Figura 72). La distribución gráfica promedio de los efectos principales se muestra en la Figura 73.



Análisis de Varianza

Tabla 19

Resultados del análisis de varianza donde se aprecia los factores que tienen significancia estadística respecto a Tfg. S ecador solar de placa plana

Fuente	Suma Cuadrados	de GI	Cuadrado Medio	Razón- F	Valor- P
A:Lg	0,0680987	1	0,0680987	1,12	0,3000
B:Xc	23,4791	1	23,4791	385,61	0,0000
C:Hd	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
D:Ap	1,68384	1	1,68384	27,65	0,0000
E:B	19,1212	1	19,1212	314,04	0,0000
F:Va	2,10726	1	2,10726	34,61	0,0000
AA	0,00416546	1	0,00416546	0,07	0,7957
AB	4,75664E-7	1	4,75664E-7	0,00	0,9978
AC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AD	0,354637	1	0,354637	5,82	0,0232
AE	0,112163	1	0,112163	1,84	0,1864
AF	0,00000591408	1	0,00000591408	0,00	0,9922
BB	6,62662	1	6,62662	108,83	0,0000
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BD	0,00105154	1	0,00105154	0,02	0,8965
BE	0,0230254	1	0,0230254	0,38	0,5439
BF	1,83651	1	1,83651	30,16	0,0000
CC	285,018	1	285,018	4681,04	0,0000
CD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
DD	0,49984	1	0,49984	8,21	0,0081
DE	0,468026	1	0,468026	7,69	0,0101
DF	0,0000601114	1	0,0000601114	0,00	0,9752
EE	0,0287557	1	0,0287557	0,47	0,4980
EF	0,00402674	1	0,00402674	0,07	0,7991
FF	0,00816979	1	0,00816979	0,13	0,7171
Error total	1,58308	26	0,0608878		
Total (corr.)	401,864	53			

$R^2 = 99,6061 \%$

R^2 ajustada por g.l. = 99,197 %

Error estándar de estimación = 0,246755

Error absoluto medio = 0,13586

Estadístico Durbin-Watson = 2,00874 (P=0,5020)

En este caso, como se presenta en la Tabla 19, diez efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0 %.

Coeficientes de regresión

Tabla 20

Valores de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de predicción de Tfg. Secador solar de placa plana

Coefficiente	Estimado	Coefficiente	Estimado
Constante	-43,8202	BD	5,73241
A:Lg	0,149092	BE	0,126451
B:Xc	165,714	BF	31,9419
C:Hd	14,0374	CC	-0,584893
F:Va	-1,4869	CF	0,0
AA	-0,080496	DD	-22,0444
AB	0,024384	DE	0,16125
AC	0,0	DF	-0,0365487
AD	2,97757	EE	0,000234997
AE	-0,0157877	EF	-0,00199425
AF	-	FF	-0,0501032
	0,00229281		
BB	-2006,64		
BC	0,0		

La ecuación del modelo ajustado según datos de la Tabla 20 es:

$$\begin{aligned}
 T_{fg} = & -43,8202 + 0,149092L_g + 165,714X_c + 14,0374H_d + 2,78533a_p \\
 & + 0,0366226\beta - 1,4869v_a - 0,080496L_g^2 + 0,024384L_gX_c \\
 & + 2,97757L_ga_p - 0,0157877L_g\beta - 0,00229281L_gv_a - 2006,64X_c^2 \\
 & + 5,73241X_ca_p + 0,126451X_c\beta + 31,9419X_cv_a - 0,584893H_d^2 \\
 & - 22,0444a_p^2 + 0,16125a_p\beta - 0,0365487a_pv_a + 0,000234997\beta^2 \\
 & - 0,00199425\beta v_a - 0,0501032v_a^2
 \end{aligned}$$



Optimización de respuesta

Meta: maximizar Tgf

Valor óptimo = 47,031.

Los datos se tabulan en la Tabla 21 y la superficie de respuesta se grafica en la Figura 74.

Tabla 21

Valores estimados de los factores que hacen que se optimice Tfg hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador solar de placa plana

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	2,0	1,31669
Xc	0,02	0,06	0,0596564
Hd	9,0	15,0	12,0113
Ap	0,1	0,3	0,293415
B	10,0	40,0	40,0
Va	0,5	2,0	1,99953

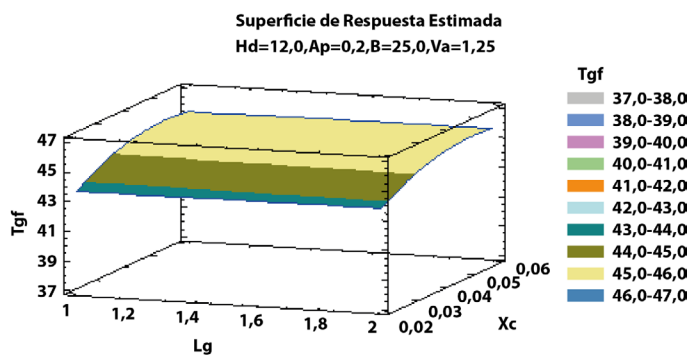


Figura 77

Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, respecto a Tfg. Secador solar de placa plana

Variable: eficiencia térmica del colector η Análisis de efectos

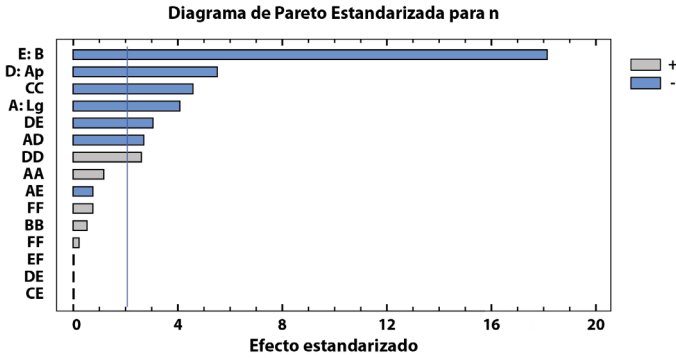


Figura 78
Diagrama de Pareto del efecto de cada factor sobre el coeficiente de eficiencia η del colector. Secador solar de placa plana

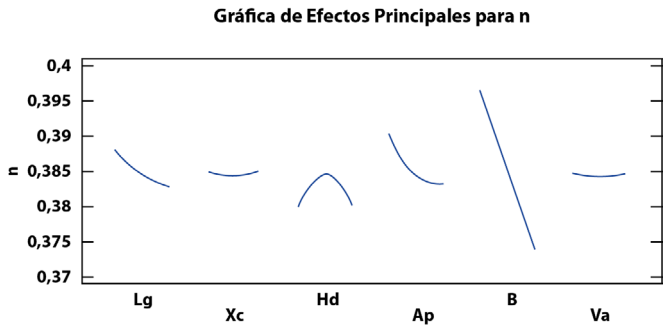


Figura 79
Efectos principales de cada factor sobre el factor η . Secador solar de placa plana



El factor más influyente sobre el factor n es el ángulo de inclinación del colector, con efecto negativo y una pendiente bien marcada (Figura 76), seguido por la abertura α_p y el cuadrado negativo de la hora del día (Figura 75).

Análisis de varianza

Tabla 22

Resultados del análisis de varianza donde se aprecian los factores que tienen significancia estadística respecto a n . Secador solar de placa plana

Fuente	Suma Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Lg	0,000158365	1	0,000158365	16,89	0,0004
B:Xc	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
C:Hd	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
D:Ap	0,000290403	1	0,000290403	30,97	0,0000
E:B	0,00309822	1	0,00309822	330,36	0,0000
F:Va	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AA	0,0000135505	1	0,0000135505	1,44	0,2402
AB	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AD	0,0000710048	1	0,0000710048	7,57	0,0107
AE	0,00000574758	1	0,00000574758	0,61	0,4408
AF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BB	0,0000029168	1	0,0000029168	0,31	0,5818
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CC	0,000197297	1	0,000197297	21,04	0,0001
CD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
DD	0,0000651854	1	0,0000651854	6,95	0,0139
DE	0,0000891807	1	0,0000891807	9,51	0,0048
DF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
EE	0,00000567802	1	0,00000567802	0,61	0,4435
EF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
FF	6,26168E-7	1	6,26168E-7	0,07	0,7981

Error total	0,000243837	26	0,0000093783
			6
Total (corr.)	0,00443402	53	

Según la Tabla 22 se obtienen los siguientes datos:

$$R^2 = 94,5008 \%$$

$$R^2 \text{ (ajustada por g.l.)} = 88,79 \%$$

$$\text{Error estándar de estimación} = 0,00306241$$

$$\text{Error absoluto medio} = 0,0016259$$

$$\text{Estadístico Durbin-Watson} = 2,24711 \text{ (P=0,8044)}$$

Coeficientes de regresión

Tabla 23

Valores numéricos de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de predicción de n . Secador solar de placa plana

Coeficiente	Estimado	Coeficiente	Estimado
Constante	0,345112	BD	0,0
A:Lg	-0,00765913	BE	0,0
B:Xc	-0,106504	BF	0,0
C:Hd	0,0116792	CC	-0,000486632
D:Ap	-0,0166376	CD	0,0
E:B	-0,000307871	CE	0,0
F:Va	-0,00109659	CF	0,0
AA	0,00459114	DD	0,251743
AB	0,0	DE	-0,00222587
AC	0,0	DF	0,0
AD	-0,0421322	EE	0,00000330217
AE	-0,000113015	EF	0,0
AF	0,0	FF	0,000438637
BB	1,3313		
BC	0,0		

La Ecuación del modelo ajustado (Tabla 23) es:



$$\eta = 0,345112 - 0,00765913L_g - 0,106504X_c + 0,0116792H_d - 0,0166376a_p - 0,000307871\beta - 0,00109659v_a + 0,00459114L_g^2 - 0,0421322L_g a_p - 0,000113015L_g \beta + 1,3313X_c^2 - 0,000486632H_d^2 + 0,251743a_p^2 - 0,00222587a_p \beta + 0,00000330217\beta^2 + 0,000438637v_a^2$$

Optimización de respuesta

Meta: maximizar n

Valor óptimo = 0,404549

En la Tabla 24 y la Figura 77 se muestran los datos de optimización.

Tabla 24

Valores estimados de los factores que hacen que se optimice n hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador solar de placa plana

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
L _g	1,0	2,0	1,00009
X _c	0,02	0,06	0,0599908
H _d	9,0	15,0	11,993
A _p	0,1	0,3	0,299985
B	10,0	40,0	10,0008
V _a	0,5	2,0	0,500001

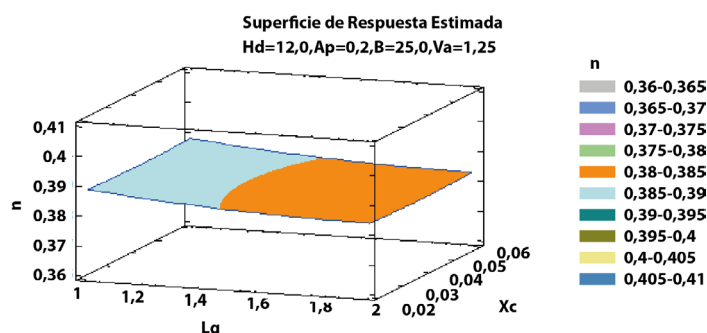


Figura 80

Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, respecto a n. Secador solar de placa plana

Variable: Calor útil $Q_u(W)$ Análisis de efectos

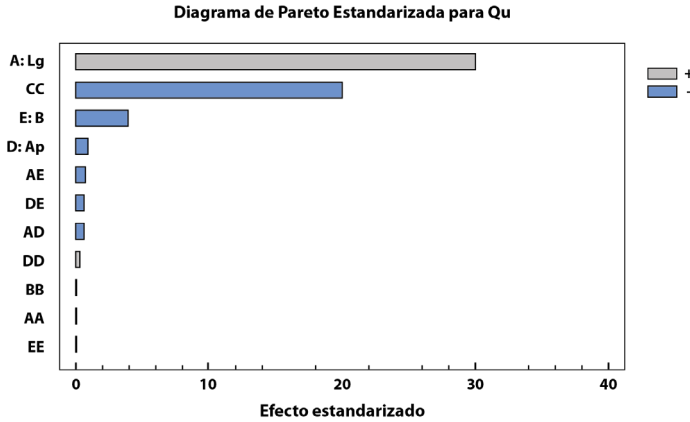


Figura 81
Diagrama de Pareto del efecto de cada factor sobre el calor útil Q_u del colector. Secador solar de placa plana

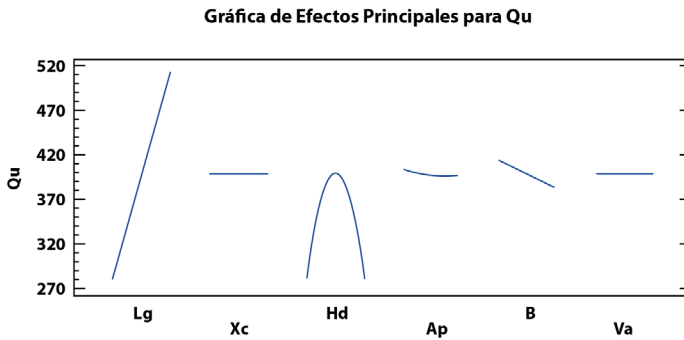


Figura 82
Efectos principales de cada factor sobre el factor Q_u . Secador solar de placa plana

Para el calor útil, como se muestra en las Figuras 78 y 79, el factor que más influye es el largo del colector con una pendiente positiva bien marcada, seguido por el cuadrado negativo de la hora y, en menor proporción, el ángulo de inclinación; solamente estos tres factores tienen un efecto estadísticamente significativo.



Análisis de varianza

Tabla 25

Resultados del análisis de varianza donde se aprecian los factores que tienen significancia estadística respecto a Qu. Secador solar de placa plana

Fuente	Suma de Cuadrados	de GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Lg	334897,	1	334897,	913,32	0,0000
B:Xc	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
C:Hd	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
D:Ap	301,571	1	301,571	0,82	0,3728
E:B	5741,03	1	5741,03	15,66	0,0005
F:Va	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AA	2,3393	1	2,3393	0,01	0,9369
AB	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AE	241,866	1	241,866	0,66	0,4241
AF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BB	5,79924	1	5,79924	0,02	0,9009
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CC	146440,0	1	146440,0	399,37	0,0000
CD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
DD	62,6176	1	62,6176	0,17	0,6828
DE	151,041	1	151,041	0,41	0,5266
DF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
EE	1,87741	1	1,87741	0,01	0,9435
EF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
FF	0,101872	1	0,101872	0,00	0,9868
Error total	9533,68	26	366,68		
Total (corr.)	543152,0	53			

Según la Tabla 25 se presentan los siguientes datos:

$R^2 = 98,2448 \%$

R^2 ajustada por g.l. = 96,422 %

Error estándar de estimación = 19,1489

Error absoluto medio = 9,14508

Estadístico Durbin-Watson = 2,06212 (P=0,5774)

Coeficientes de regresión

Tabla 26

Valores de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de predicción de Q_u . Secador solar de placa plana

Coeficiente	Estimado	Coeficiente	Estimado
Constante	-1877,31	BD	0,0
A:Lg	261,098	BE	0,0
B:Xc	-150,175	BF	0,0
C:Hd	318,187	CC	-13,2578
D:Ap	30,0643	CD	0,0
E:B	0,742891	CE	0,0
F:Va	0,44231	CF	0,0
AA	1,90759	DD	246,735
AB	0,0	DE	-2,89675
AC	0,0	DF	0,0
AD	-61,1916	EE	-0,0018988
AE	-0,73313	EF	0,0
AF	0,0	FF	-0,176924
BB	1877,19		
BC	0,0		

La ecuación del modelo ajustado (ver Tabla 26) es:

$$\begin{aligned}
 Q_u = & -1877,31 + 261,098L_g - 150,175X_c + 318,187H_d + 30,0643a_p + 0,742891\beta \\
 & + 0,44231v_a + 1877,19L_g^2 - 61,1916L_g a_p - 0,73313L_g \beta \\
 & + 1877,19X_c^2 - 13,2578H_d^2 + 246,735a_p^2 - 2,89675a_p \beta \\
 & - 0,0018988\beta^2 - 0,176924v_a^2
 \end{aligned}$$

Optimización de respuesta

Meta: maximizar Q_u

Valor óptimo = 542,575

Los datos de optimización se presentan en la Tabla 27 y la Figura 80.



Tabla 27

Valores estimados de los factores que hacen que se optimice Q_u hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador solar de placa plana

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	2,0	2,0
Xc	0,02	0,06	0,06
Hd	9,0	15,0	11,9926
Ap	0,1	0,3	0,1
B	10,0	40,0	10,0001
Va	0,5	2,0	1,21726

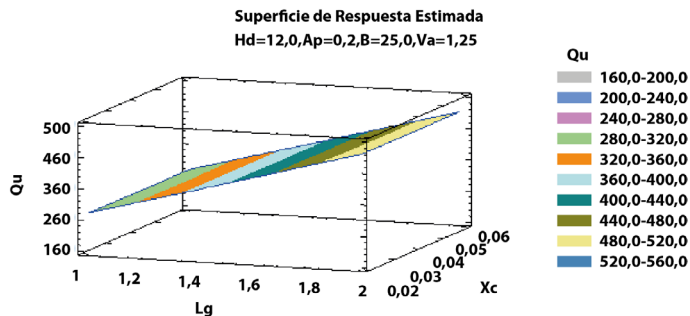


Figura 83

Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, respecto a Q_u . Secador solar de placa plana

Variable: Carga (kg) de café seco por unidad de bandeja L_s Análisis de Efectos

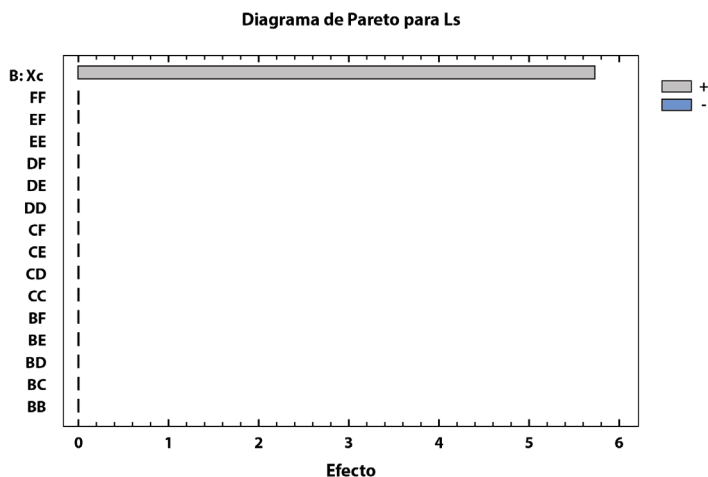


Figura 84
Diagrama de Pareto del efecto de cada factor sobre la carga de café seco por unidad de bandeja L_s . Secador solar de placa plana

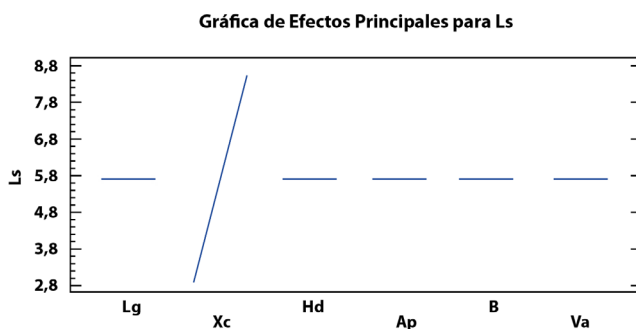


Figura 85
Efectos principales de cada factor sobre el factor L_s . Secador solar de placa plana



Es muy claro que, para la carga de café seco, el único factor influyente es el grosor de la capa de grano, como se muestra en la Figura 81, y es que, la relación matemática para L_s vista en las anteriores secciones también prescribe una proporcionalidad directa, como muestra la Figura 82. En el análisis de regresión (Tabla 28) se observa que, los coeficientes de los demás factores y sus interacciones, es cero.

Coeficientes de regresión

Tabla 28

Valores de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de predicción de L_s . Secador solar de placa plana

Coeficiente	Estimado	Coeficiente	Estimado
Constante	0,0	BD	0,0
A:Lg	0,0	BE	0,0
B:Xc	142,924	BF	0,0
C:Hd	0,0	CC	0,0
D:Ap	0,0	CD	0,0
E:B	0,0	CE	0,0
F:Va	0,0	CF	0,0
AA	0,0	DD	0,0
AB	0,0	DE	0,0
AC	0,0	DF	0,0
AD	0,0	EE	0,0
AE	0,0	EF	0,0
AF	0,0	FF	0,0
BB	0,0	BD	0,0
BC	0,0	BE	0,0

La ecuación del modelo ajustado es:

$$L_s = 142,924X_c$$

Optimización de respuesta

Meta: maximizar L_s

Valor óptimo = 8,57544, es el máximo posible para el valor de X_c fijado como su nivel alto (0,06 m) en el diseño experimental

Los datos de optimización se muestran en la Tabla 29 y la Figura 83.

Tabla 29

Valores estimados de los factores que hacen que se optimice L_s hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador solar de placa plana

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
L_g	1,0	2,0	1,5
X_c	0,02	0,06	0,06
H_d	9,0	15,0	15,0
A_p	0,1	0,3	0,2
B	10,0	40,0	10,0
V_a	0,5	2,0	1,25

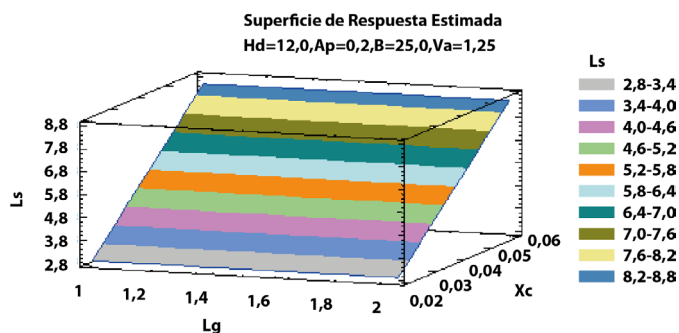


Figura 86

Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, respecto a L_s . Secador solar de placa plana

Análisis de respuesta múltiple:

$t, T_{fm}, T_{gf}, \eta, Q_U, L_S$

Para realizar una optimización de múltiples variables se usa la *Función de Deseabilidad*, la cual va en un rango numérico de 0 a 1; este concepto permite dar una solución para combinar las respuestas de múltiples factores en una función, indicando el grado en el que la respuesta se optimiza de acuerdo con su especificación (minimizar, maximizar o permanecer en un intervalo); es decir,



da una combinación que obtiene cuantitativamente el valor de respuesta más deseable. 0 indica una respuesta totalmente inaceptable; 0 - 0,3 inaceptable; 0,3 - 0,4 límite de aceptación; 0,4 - 0,63 aceptable pero mediocre; 0,63 - 0,8 aceptable y bueno; 0,8 - 1 aceptable y excelente; un valor de 1 da indica una respuesta óptima ideal. La deseabilidad puede ser *individual*, en donde se optimiza una respuesta y, *compuesta*, donde se optimiza más de una respuesta; esta es la que se utilizará aquí y, para obtener el valor de la respuesta *compuesta* se determina la *media geométrica* de las deseabilidades individuales de cada respuesta; puede ser total o ponderada, pues en la primera todas las respuestas tienen el mismo nivel de importancia y en la segunda es diferente en ellas.

Nuestro objetivo es maximizar el valor de *deseabilidad*, la cual es calculada en el software *STATGRAPHICS*, seleccionando un conjunto de respuestas a optimizar; se empezará con todas y luego se tendrá otras combinaciones.

Optimización de deseabilidad

Valor óptimo = 0,834808

En la Tabla 30 se aprecia la combinación de niveles para cada factor, que optimiza las variables de respuesta. Usando el modelo matemático se obtiene la predicción de los valores para cada una de las variables de respuesta al trabajar con los factores en sus niveles óptimos y son presentados en la Tabla 31, según el número más alto de la función de deseabilidad en la región indicada (rango de niveles especificado).

Tabla 30

Valores de los factores que hacen que se optimice las variables de respuesta *t*, *Tfm*, *Tfg*, *n*, *Qu*, *Ls*, usando el valor más alto posible de la función de Deseabilidad. Secador solar de placa plana

<i>Factor</i>	<i>Nivel Bajo</i>	<i>Nivel Alto</i>	<i>Valor Óptimo</i>
Lg	1,0	2,0	1,98815
Xc	0,02	0,06	0,06
Hd	9,0	15,0	11,9799
Ap	0,1	0,3	0,132563
B	10,0	40,0	10,0021
Va	0,5	2,0	1,61676

Tabla 31
Valores obtenidos (predicción del modelo) de las variables de respuesta, usando los valores óptimos de los factores de la Tabla 30. Secador solar de placa plana

Respuesta	Valor Óptimo
Tiempo	25,8895
T _{fm}	55,9134
T _{gf}	44,7982
N	0,399049
Q _u	537,463
L _s	8,57544

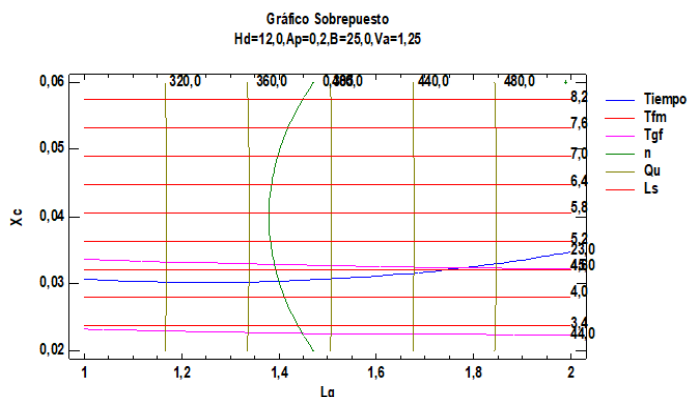


Figura 87
Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores L_g y X_c y las variables de respuesta correspondientes. El punto donde se cruzan las líneas representa la optimización de la deseabilidad. Secador de placa plana

En este gráfico (Figura 84) varían solamente los factores L_g y X_C, por la razón que ya se ha discutido anteriormente; aquí, mientras se mantienen fijos los otros factores, se obtiene los valores de las respuestas. Véase los puntos de cruce de las líneas; en estos se optimiza la deseabilidad.

Diseño 1.2 – Esquema gráfico

Variables a optimizar: $t, T_{fm}, T_{gf}, \eta, Q_u, L_s$

El diseño se muestra en las Figuras 85, 86 y 87.

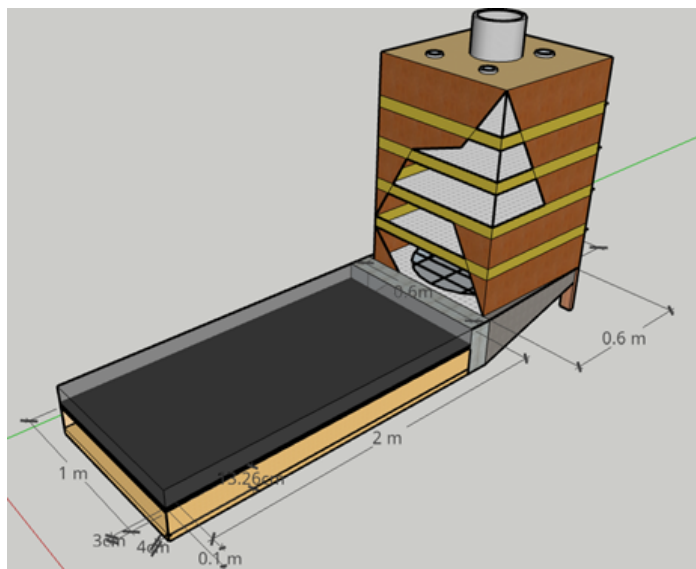


Figura 88
 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} , n , Q_u y L_s
 Nota: los datos concretos están en la Tabla 30 y la Tabla 31. Vista 3D.

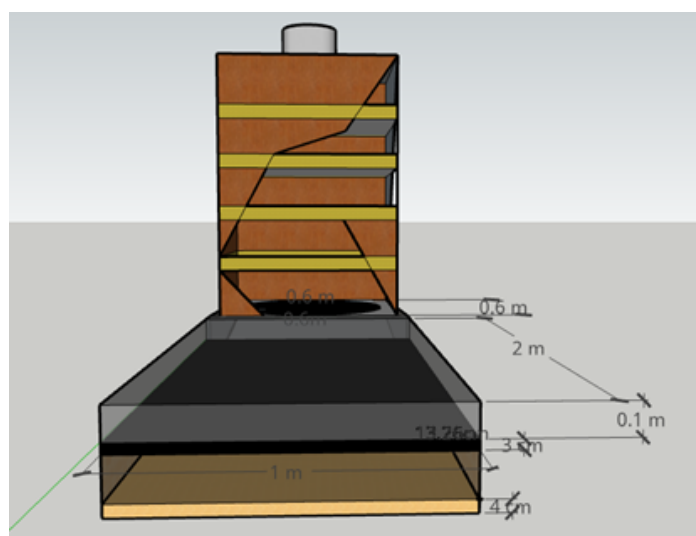


Figura 89
 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} , n , Q_u y L_s
 Nota: los datos concretos están en la Tabla 30 y la Tabla 31. Vista frontal.

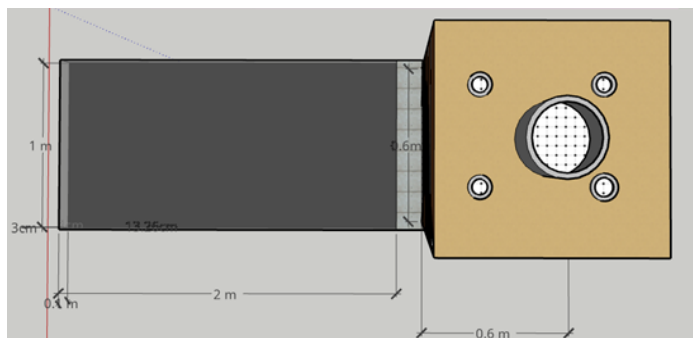


Figura 90
 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} , n , Q_u y L_s
 Nota: los datos concretos están en la Tabla 30 y la Tabla 31. Vista superior.

Análisis para respuesta múltiple:

t, T_{fm}, T_{gf}, Q_u

En este caso se optimizará solo las variables 'Tiempo de secado', 'Temperatura media del aire', 'Temperatura final del grano' y 'Calor útil'. Se buscará minimizar el tiempo y maximizar las otras variables de respuesta.

Optimización de deseabilidad

Valor óptimo = 0,931704

Los datos de optimización de la deseabilidad se presentan en las Tablas 32 y 33 y en la Figura 88.

Tabla 32
 Valores numéricos de los factores que hacen que se optimicen las variables de respuesta t , T_{fm} , T_{gf} , Q_u ; usando el valor más alto posible de la función de deseabilidad. Secador solar de placa plana

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	2,0	1,99997
Xc	0,02	0,06	0,0435268
Hd	9,0	15,0	11,9966
Ap	0,1	0,3	0,3
B	10,0	40,0	39,9987
Va	0,5	2,0	1,22268



Tabla 33
Valores obtenidos (predicción del modelo) de las variables de respuesta tratadas, aplicando los valores óptimos de los factores de la Tabla 32. Secador solar de placa plana

Respuesta	Óptimo
Tiempo	21,0315
T _{fm}	59,3416
T _{gf}	46,9304
Q _u	486,706

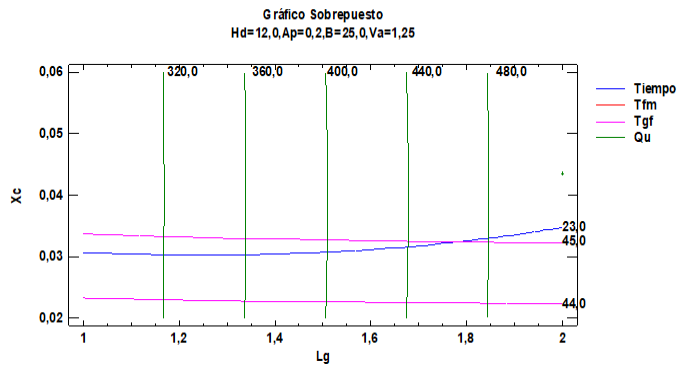


Figura 91
Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores Lg y Xc y las variables de respuesta t, t_{fm}, t_{gf} y Q_u. El punto donde se cruzan las líneas representa la optimización de la Deseabilidad. Secador de placa plana

Diseño 1.3 – Esquema gráfico

Variables a optimizar: t, T_{fm}, T_{gf}, Q_U

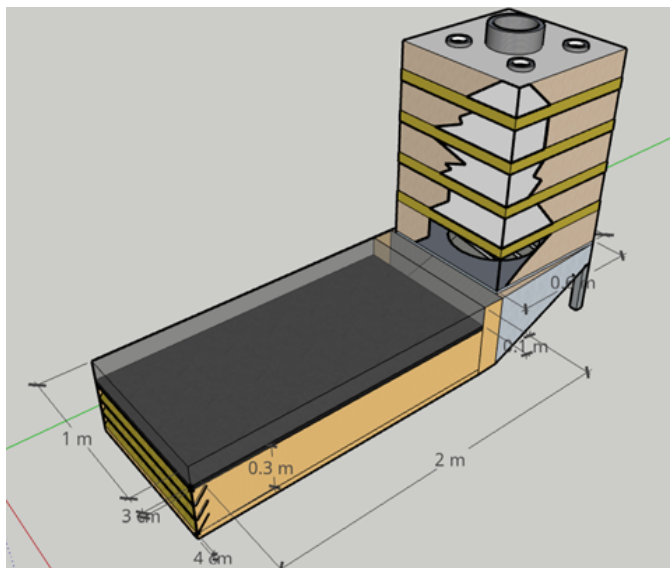


Figura 92
Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} y Q_u
Nota: los datos concretos están en las Tablas 32 y 33. Vista 3D.

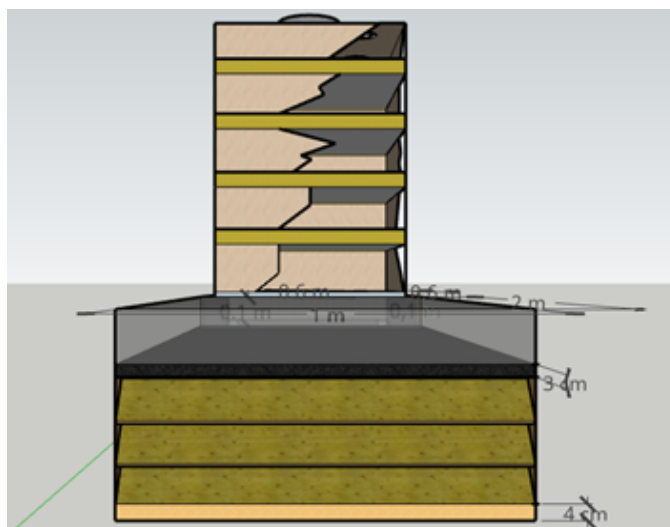


Figura 93
Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} y Q_u
Nota: los datos concretos están en las Tablas 32 y 33. Vista frontal.

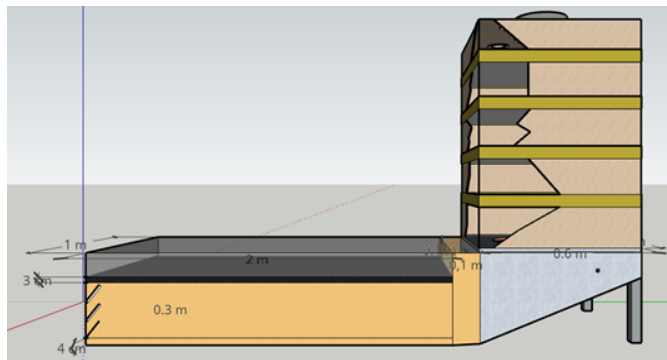


Figura 94
Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} y Q_u
Nota: los datos concretos están en las Tablas 32 y 33. Vista lateral izquierda.

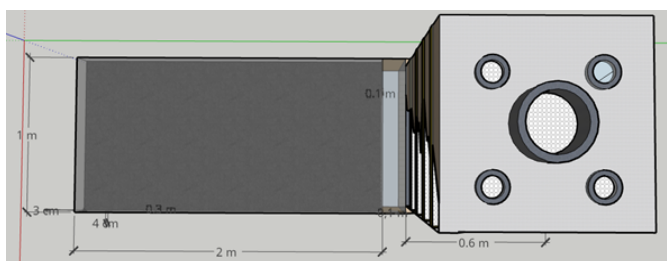


Figura 95
Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} y Q_u
Nota: los datos concretos están en las Tablas 32 y 33. Vista superior.

En este diseño, mostrado en las Figuras 89, 90, 91 y 92, se ha optado por poner en la entrada del colector, un sistema de láminas horizontales (de material aislante) que, como se puede ver, están en diagonal, pues giran respecto al eje horizontal; así, ya se podrá controlar el área de entrada al paso de aire.

Análisis de respuesta múltiple: t , L_S

Únicamente el tiempo de secado y la carga de café seco serán optimizadas; la primera minimizada y la segunda maximizada.

Optimización de deseabilidad

Valor óptimo = 0,960958

Los datos que optimizan la deseabilidad se muestran en las Tablas 34 y 35 y en la Figura 93.

Tabla 34

Valores numéricos de los factores que hacen que se optimice las variables de respuesta t y Ls; usando el valor más alto posible de la función de deseabilidad. Secador solar de placa plana

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	2,0	1,0
Xc	0,02	0,06	0,0598691
Hd	9,0	15,0	11,9989
Ap	0,1	0,3	0,28344
B	10,0	40,0	40,0
Va	0,5	2,0	0,966268

Tabla 35

Valores obtenidos de las variables de respuesta evaluadas, aplicando los valores óptimos de los factores de la Tabla 34. Secador solar de placa plana

Respuesta	Óptimo
Tiempo	21,346
Ls	8,55673

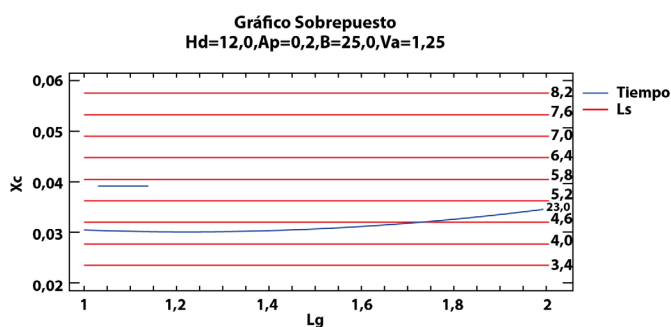


Figura 96

Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores Lg y Xc y las variables de respuesta t y Ls. El punto donde se cruzan las líneas representa la optimización de la Deseabilidad. Secador de placa plana



De esta forma podemos realizar un análisis a todas las combinaciones de respuestas según nuestra preferencia. A veces, hay mayor interés en optimizar unas más que otras; entonces, la optimización multivariable con la *función de deseabilidad* deberá enfocarse exclusivamente a aquellas. Obsérvese que la *deseabilidad* incrementa, a medida que vamos excluyendo algunas variables de respuesta; por ejemplo, para todas las respuestas (son seis) se tiene un valor de 0,834808; para las cuatro analizadas se tiene 0,931704 y, para solo dos, la *deseabilidad* queda en 0,960958; esto se debe a que, entre mayor sea el conjunto de respuestas, más restringida estará la región para optimizar la *función de deseabilidad*, a causa del incremento de las condiciones (optimizaciones buscadas); por esto, primero debemos seleccionar aquellas variables de mayor interés que se quiere mejorar y, para esto debemos tener claro el efecto que tiene cada factor sobre la variable de respuesta a mejorar.

Podemos desear reducir costos, aumentar el rendimiento de los procesos, incrementar los ingresos o productividad, etc.; por ejemplo, el tiempo de secado es un factor de gran efecto en el rendimiento, mientras que la carga de secado influye en la productividad.

Colector con concentrador parabólico 2d

Ahora se analizará el sistema de secado con concentrador solar; veremos que se alcanza mejores niveles de optimización, valores reducidos en el tiempo de secado, altos valores de las temperaturas y el calor útil.

Variable de respuesta: tiempo de secado (t) Análisis de efectos estimados

Tabla 36

Datos de los efectos estimados de cada factor de entrada (incluyendo efectos las interacciones), con respecto al tiempo de secado (t). Secador con concentrador

Efecto	Estimado	Error Estd.	V.I.F.
Promedio	33,4726	2,31839	
A: Lg	1,58333E-8	2,31839	1,0
B: Xc	7,27402	2,31839	1,0
C: Hd	0,0	2,31839	1,0
D: Ancho	57,812	2,31839	1,0
E: X	-42,5179	2,31839	1,0
F: Y	-22,3283	2,31839	1,0
AA	1,06506	3,5414	1,2963

AB	2,5E-9	4,01557	1,0
AC	0,0	4,01557	1,0
AD	2,125E-8	2,83944	1,0
AE	-3,5E-8	4,01557	1,0
AF	-5,E-9	4,01557	1,0
BB	-1,61817	3,5414	1,2963
BC	0,0	4,01557	1,0
BD	3,88575	4,01557	1,0
BE	-3,58651	2,83944	1,0
BF	-2,56115	4,01557	1,0
CC	23,7229	3,5414	1,2963
CD	0,0	4,01557	1,0
CE	0,0	4,01557	1,0
CF	0,0	2,83944	1,0
DD	-8,69379	3,5414	1,2963
DE	-21,073	4,01557	1,0
DF	-9,41133	4,01557	1,0
EE	14,6557	3,5414	1,2963
EF	25,3928	4,01557	1,0
FF	4,50838	3,5414	1,2963

Como se muestra en la Tabla 36, el V.I.F. más grande, es igual a 1,2963. Para un diseño perfectamente ortogonal, todos los factores serían igual a 1. Factores de 10 o más, normalmente son interpretados como indicativos de confusión seria entre los efectos.

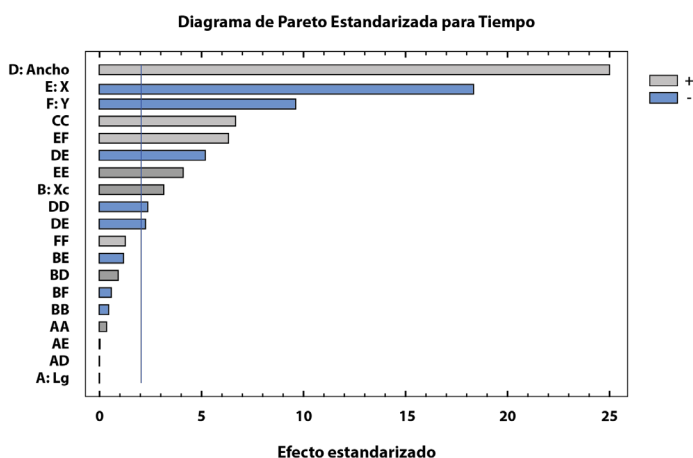


Figura 97
Diagrama de Pareto del efecto de los factores sobre el tiempo de secado. Secador con concentrador solar

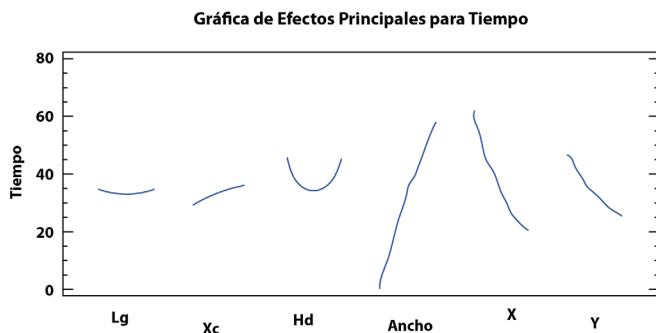


Figura 98
Efectos principales de cada factor sobre el tiempo de secado *t*.
Secador con concentrador solar

Los factores que mayor influencia tienen sobre el tiempo de secado, como se muestra en las Figuras 94 y 95, son aquellos dimensionales, el ancho del colector parabólico, las medidas horizontal y vertical (X e Y) del concentrador, seguidas por el cuadrado de la hora operativa del día.

Análisis de Varianza

Tabla 37
Análisis de varianza para el tiempo de secado.
Secador con concentrador solar

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Lg	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
B:Xc	317,468	1	317,468	9,84	0,0042
C:Hd	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
D:Ancho	20053,4	1	20053,4	621,82	0,0000
E:X	10846,6	1	10846,6	336,33	0,0000
F:Y	2991,32	1	2991,32	92,76	0,0000
AA	2,91693	1	2,91693	0,09	0,7660
AB	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000

AE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BB	6,73318	1	6,73318	0,21	0,6515
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BD	30,1982	1	30,1982	0,94	0,3421
BE	51,4522	1	51,4522	1,60	0,2178
BF	13,119	1	13,119	0,41	0,5292
CC	1447,14	1	1447,14	44,87	0,0000
CD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
DD	194,354	1	194,354	6,03	0,0211
DE	888,142	1	888,142	27,54	0,0000
DF	177,146	1	177,146	5,49	0,0270
EE	552,313	1	552,313	17,13	0,0003
EF	1289,59	1	1289,59	39,99	0,0000
FF	52,2654	1	52,2654	1,62	0,2143
Error total	838,489	26	32,2496		
Total (corr.)	40547,3	53			

R^2 ajustada por g.l. = 95,7846 %

Error estándar de la estimación = 5,67887

Error absoluto medio = 3,14341

Estadístico Durbin-Watson = 2,39066 (P=0,9136)

En este caso, según los datos presentados en la Tabla 37, diez efectos tienen un valor-P menor que 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0 %.

El estadístico R^2 indica que el modelo, así ajustado, explica 97,9 % de la variabilidad en tiempo de secado. El estadístico R^2 ajustado, que es más adecuado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 95,7846 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 5,67887. El MAE de 3,14341 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de DW prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que son presentados los datos en el archivo. Puesto que el valor-P es mayor a 5,0 %, no hay indicación de autocorrelación serial en los residuos, con un nivel de significancia del 5,0 %.



Coeficientes de regresión

Tabla 38
Coeficientes de regresión para cada efecto respecto al tiempo de secado. Secador solar de placa plana

Coeficiente	Estimado	Coeficiente	Estimado
Constante	226,687	BD	62,1721
A:L _g	-2,13013	BE	-57,3842
B:X _c	299,431	BF	-40,9785
C:H _d	-31,6306	CC	1,31794
D:Ancho	47,757	CD	0,0
E:X	-33,8321	CE	0,0
F:Y	-21,4961	CF	0,0
AA	0,532532	DD	-2,78201
AB	5,00006E-8	DE	-6,74336
AC	0,0	DF	-3,01162
AD	8,50031E-9	EE	4,68981
AE	-1,4E-8	EF	8,12569
AF	-1,99992E-9	FF	1,44268
BB	-1294,53		
BC	0,0		

La ecuación para el modelo ajustado (Tabla 38) es:

$$\begin{aligned}
t = & 226,687 - 2,13013L_g + 299,431X_c - 31,6306H_d + 47,757\text{Ancho} - 33,8321X \\
& - 21,4961Y + 0,532532L_g^2 + (5,00006E - 8)L_gX_c \\
& + (8,50031E - 9)(L_g * \text{Ancho}) - (1,4E - 8)L_gX - (1,99992E - 9)L_gY \\
& - 1294,53X_c^2 + 62,1721(X_c * \text{Ancho}) - 57,3842X_cX - 40,9785X_cY \\
& + 1,31794H_d^2 - 2,78201\text{Ancho}^2 - 6,74336(\text{Ancho} * X) \\
& - 3,01162(\text{Ancho} * Y) + 4,68981X^2 + 8,12569XY + 1,44268Y^2
\end{aligned}$$

Tomando solo los efectos con significancia estadística, se tendría el siguiente modelo reducido:

$$\begin{aligned}
t = & 226,687 + 299,431X_c + 47,757\text{Ancho} - 33,8321X - 21,4961Y + 1,31794H_d^2 \\
& - 2,78201\text{Ancho}^2 - 6,74336(\text{Ancho} * X) - 3,01162(\text{Ancho} * Y) \\
& + 4,68981X^2 + 8,12569XY
\end{aligned}$$

Optimización de respuesta

Meta: minimizar tiempo

Valor óptimo = -6,94461, es el valor que ha podido optimizar el software en el análisis de superficie de respuesta, pero ha dado un valor negativo ya que no se ha establecido un límite inferior para el tiempo, lo que es imposible en la realidad; sin embargo, es tomado porque esto implica el menor tiempo posible y, en la práctica, realmente daría un valor positivo. En la Tabla 39 se presentan los datos que optimian la respuesta.

Tabla 39

Valores estimados de los factores que hacen que se optimice t hacia su mínimo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador con concentrador solar

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	3,0	2,63564
Xc	0,01	0,06	0,0346553
Hd	9,0	15,0	12,1076
Ancho	0,5	3,0	0,5
X	0,5	3,0	3,0
Y	0,5	3,0	0,500018

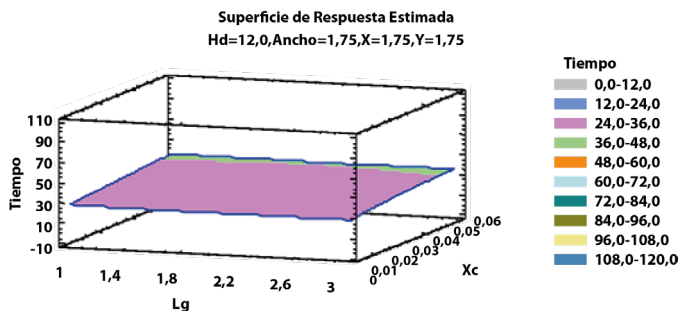


Figura 99

Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, tomando L_g y X_c respecto a t . Secador con concentrador solar

Para esta gráfica (Figura 96) se ha tomado, igual que en el anterior equipo de secado, el Largo L_g y X_c como variables, mientras se ha fijado las demás en: $H_d=12h$, $Ancho=1,75m$, $X=1,75m$ y $Y=1,75m$



Diseño 2.1 – Esquema gráfico

Variable a optimizar: Tiempo

El diseño se muestra en las Figuras 97, 98, 99 y 100.

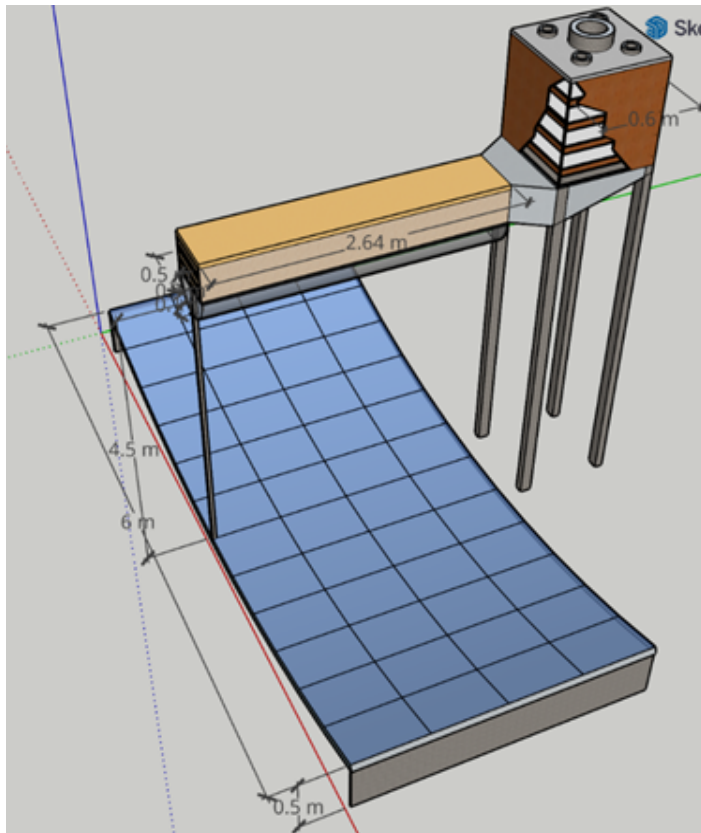


Figura 100

Representación gráfica del diseño del equipo de secado con concentrador solar optimizado para el tiempo de secado t
Nota: los datos concretos están en la Tabla 39. Vista 3D.

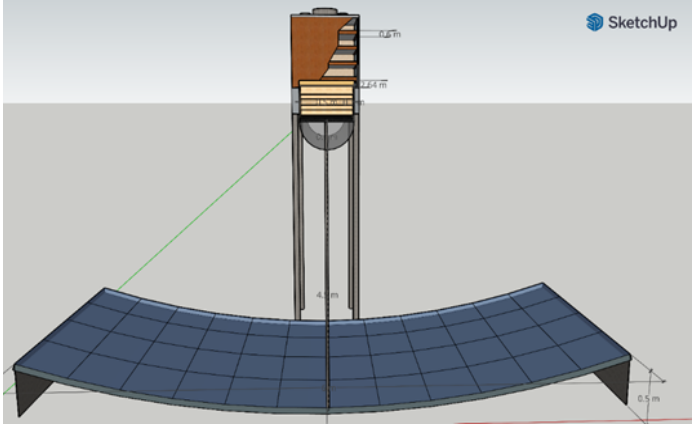


Figura 101

Representación gráfica del diseño del equipo de secado con concentrador solar optimizado para el tiempo de secado t

Nota: los datos concretos están en la Tabla 39. Vista frontal.

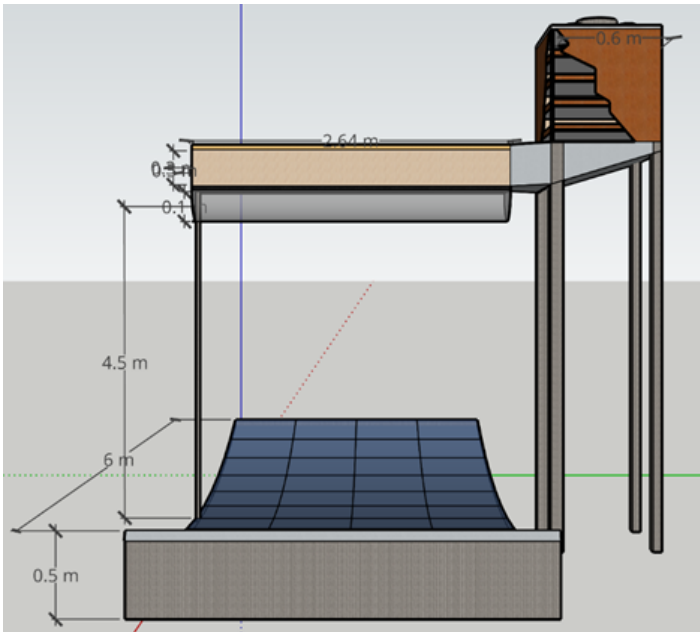


Figura 102

Representación gráfica del diseño del equipo de secado con concentrador solar optimizado para el tiempo de secado t

Nota: los datos concretos están en la Tabla 39.

Vista lateral izquierda.

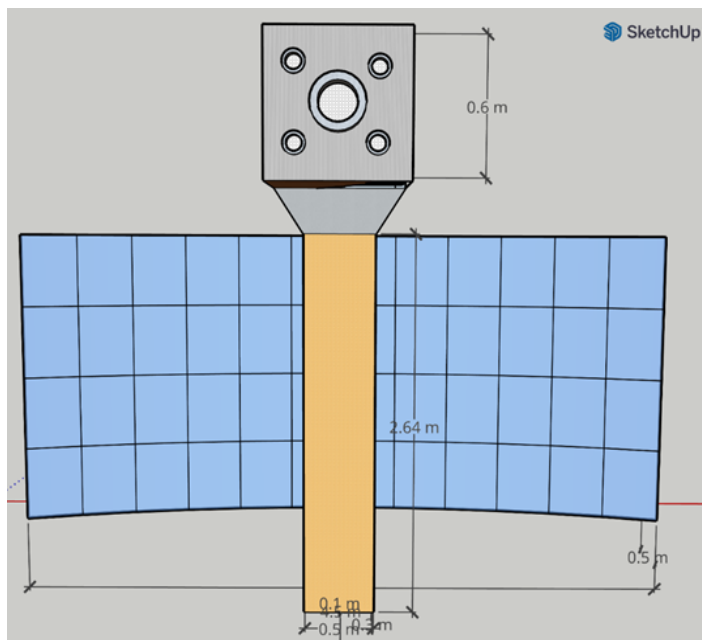


Figura 103

Representación gráfica del diseño del equipo de secado con concentrador solar optimizado para el tiempo de secado t

Nota: los datos concretos están en la Tabla 39. Vista superior.

Aquí ya se puede ver el concentrador que se ha integrado al sistema en la parte inferior (de color azul). Obsérvese que, la proporción en el ancho o área entre el concentrador (parte inferior) y el colector es bastante grande; la parte inferior del colector que es parabólica (definida como media circunferencia), es el área de recepción de la irradiación solar, mientras que la región superior rectangular (amarillo) es la porción absorbente de calor. La altura a la que se encuentra el colector (distancia focal) es grande, debido a la gran proporción entre el eje X e Y en la parábola; es decir, que el concentrador es bastante ancho pero con poca altura.

Variable: temperatura media del aire en el colector T_{fm} (°C)

Análisis de efectos

Para la temperatura del aire, también el efecto principal es el ancho del colector, con una forma lineal negativa, seguido por la dimensión horizontal (X), el cuadrado positivo del Ancho, el producto de X y el Ancho; así, sucesivamente, como se observa en las Figuras 101 y 102. Es lógico que el efecto principal ancho del colector tenga una pendiente negativa, ya que en la Ecuación (169) se observa que la energía que entra

al colector es inversamente proporcional a su área superficial y, T_{fm} depende de esta energía; así que, entre mayor sea el área, menor será la temperatura del aire y, por esta razón, el tiempo de secado aumentará.

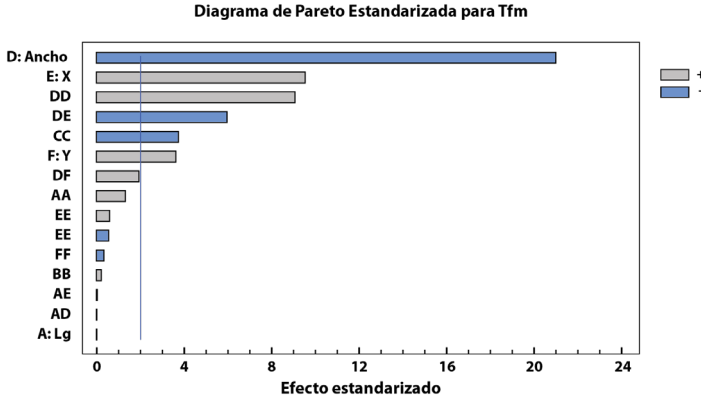


Figura 104
Diagrama de Pareto del efecto que tiene factor sobre Tfm. Secador con concentrador solar

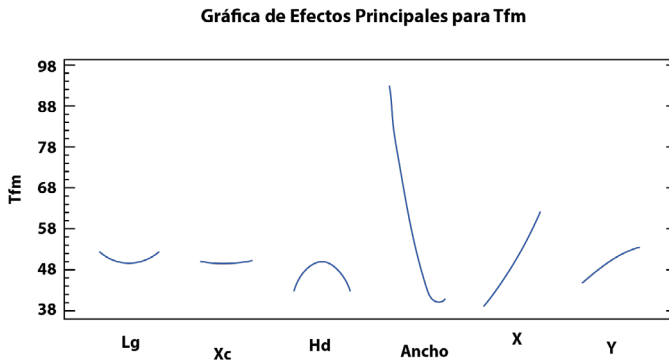


Figura 105
Efectos principales de cada factor sobre Tfm. Secador con concentrador solar



Análisis de varianza

Tabla 40

*Análisis de varianza para la temperatura media del aire de secado
Tfm. Secador con concentrador solar*

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Lg	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
B: Xc	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
C: Hd	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
D: Ancho	16455,5	1	16455,5	437,00	0,0000
E: X	3401,95	1	3401,95	90,34	0,0000
F: Y	510,411	1	510,411	13,55	0,0011
AA	63,4493	1	63,4493	1,68	0,2057
AB	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BB	1,87575	1	1,87575	0,05	0,8251
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CC	530,823	1	530,823	14,10	0,0009
CC	530,823	1	530,823	14,10	0,0009
CD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
DD	3029,22	1	3029,22	80,44	0,0000
DE	1362,75	1	1362,75	36,19	0,0000
DF	142,401	1	142,401	3,78	0,0627
EE	13,0991	1	13,0991	0,35	0,5604
EF	10,4941	1	10,4941	0,28	0,6020

FF	6,61622	1	6,61622	0,18	0,6785
Error total	979,056	26	37,656		
Total (corr.)	28848,9	53			

$R^2 = 96,6063 \%$

R^2 ajustada por g.l. = 93,082 %

Error estándar de estimación = 6,13645

Error absoluto medio = 3,40427

Estadístico Durbin-Watson = 2,44245 (P=0,9423)

En este caso, como muestra la Tabla 40, seis efectos tienen un valor-P menor a 0,05, indicando que son significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95,0%.

Coeficientes de regresión

Tabla 41

Coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de regresión respecto a Tfm. Secador con concentrador solar

Coeficiente	Estimado	Coeficiente	Estimado
Constante	-42,7177	BD	0,0
A: Lg	-9,93474	BE	0,0
B: Xc	-47,8287	BF	0,0
C: Hd	19,1569	CC	-0,798206
D: Ancho	-40,046	CD	0,0
E: X	22,8973	CE	0,0
F: Y	11,4939	CF	0,0
AA	2,48368	DD	10,9832
AB	0,0	DE	-8,35301
AC	0,0	DF	-2,70017
AD	-4,99977E-10	EE	0,722243
AE	1,00004E-9	EF	-0,733005
AF	0,0	FF	-0,513296
BB	683,267		
BC	0,0		



La ecuación del modelo ajustado (Tabla 41) es:

$$\begin{aligned}
 T_{fm} = & -42,7177 - 9,93474L_g - 47,8287X_c + 19,1569H_d - 40,046Ancho \\
 & + 22,8973X + 11,4939Y + 2,48368L_g^2 \\
 & - (4,99977E - 10)(Ancho * L_g) + (1,00004E - 9)L_gX + 683,267X_c^2 \\
 & - 0,798206H_d^2 + 10,9832Ancho^2 - 8,35301(Ancho * X) \\
 & - 2,70017(Ancho * Y) + 0,722243X^2 - 0,733005XY - 0,513296Y^2
 \end{aligned}$$

Ecuación reducida con efectos significativos:

$$\begin{aligned}
 T_{fm} = & -42,7177 - 40,046Ancho + 22,8973X + 11,4939Y + 10,9832Ancho^2 \\
 & - 8,35301(Ancho * X) - 0,798206H_d^2
 \end{aligned}$$

Optimización de respuesta

Meta: maximizar T_{fm}

Valor óptimo = 128,321°C

En la Tabla 42 se indican los datos de optimización.

Tabla 42

Valores estimados de los factores que hacen que se optimice T_{fm} hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador con concentrador solar

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	3,0	2,93273
Xc	0,01	0,06	0,0207294
Hd	9,0	15,0	11,9346
Ancho	0,5	3,0	0,5
X	0,5	3,0	2,99964
Y	0,5	3,0	2,99585

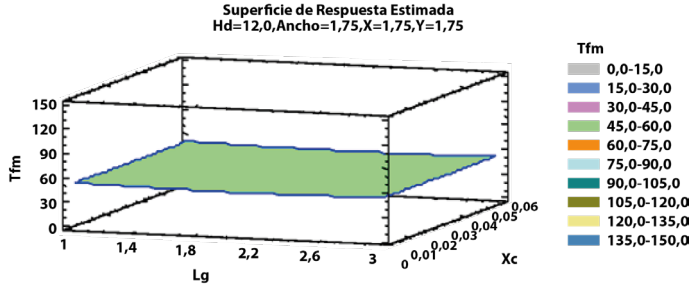


Figura 106
Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, respecto a T_{fm} . Secador con concentrador solar

En este caso, como muestra la Figura 103, se puede ver una gráfica de superficie de respuesta casi plana, ya que la temperatura del aire depende de los factores L_g y X_c , los cuales no tienen un efecto significativo en esta variable de respuesta. El grosor de la capa de secado no tiene implicaciones en T_{fm} , ya que esta última solo depende de las condiciones en el colector y el concentrador solar; estos dos ya preceden a lo que sucederá en la cámara de secado. Se observa una muy ligera curvatura, a causa del pequeño efecto del cuadrado de L_g , aunque no significativo.

Variable: Temperatura final del grano T_{fg} (°C)

Esta variable, que hace parte de la cámara de secado, está precedida por los factores incidentes en el sistema de colección y concentración solar.

Análisis de efectos

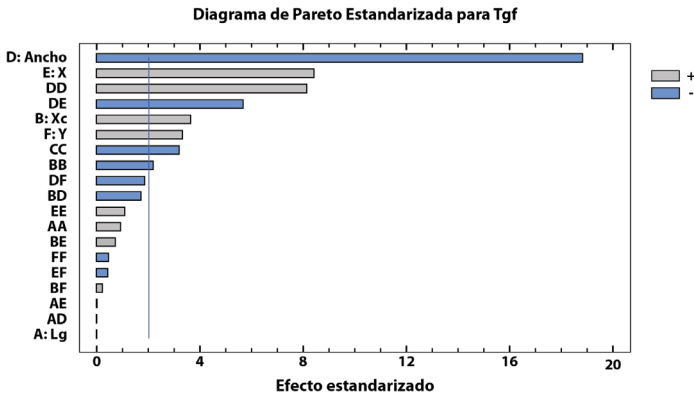


Figura 107
Diagrama de Pareto del efecto que tiene cada factor sobre T_{gf} . Secador con concentrador solar

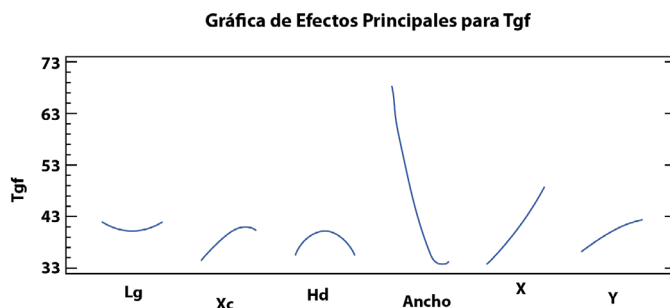


Figura 108
Efectos principales de cada factor sobre Tgf. Secador con concentrador solar

Como se puede ver, el factor grosor de capa X_c tiene un efecto significativo en la variable de respuesta, pues la temperatura del grano también está presente en esta cámara; así que, además de los factores contenidos en las etapas que le anteceden, será afectada por los que solo estén en ella. En esta variable también sigue siendo el ancho del colector, el efecto principal en una relación negativa, seguido de la dimensión horizontal (véanse las Figuras 104 y 105).

Análisis de varianza

Tabla 43
Análisis de varianza para Tgf. Secador con concentrador solar

Fuente	Suma Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:Lg	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
B:Xc	245,324	1	245,324	13,32	0,0012
C:Hd	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
D:Ancho	6536,73	1	6536,73	354,78	0,0000
E:X	1307,53	1	1307,53	70,97	0,0000
F:Y	202,729	1	202,729	11,00	0,0027
AA	16,3669	1	16,3669	0,89	0,3546
AB	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000

AD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BB	82,5495	1	82,5495	4,48	0,0440
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BD	53,9558	1	53,9558	2,93	0,0989
BE	10,6011	1	10,6011	0,58	0,4550
BF	1,57278	1	1,57278	0,09	0,7725
CC	187,671	1	187,671	10,19	0,0037
CD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
DD	1229,18	1	1229,18	66,71	0,0000
DE	600,126	1	600,126	32,57	0,0000
DF	62,2946	1	62,2946	3,38	0,0774
EE	24,6566	1	24,6566	1,34	0,2579
EF	3,33124	1	3,33124	0,18	0,6742
FF	3,69868	1	3,69868	0,20	0,6578
Error total	479,037	26	18,4245		
Total (corr.)	11999,4	53			

Como se puede observar en la Tabla 43, hay ocho efectos que tienen un valor-P menor al 5 % ($<0,05$); es decir, que son significativos estadísticamente, presentados en las filas sombreadas de color.

Coefficientes de regresión

Tabla 44

Coefficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de regresión con respecto a Tgf. Secador con concentrador solar

Coefficiente	Estimado	Coefficiente	Estimado
Constante	-27,5191	BD	-83,1044
A: Lg	-5,04575	BE	26,0474
B: Xc	520,197	BF	14,1886



C: Hd	11,3907	CC	-0,474612
D: Ancho	-21,9554	CD	0,0
E: X	11,9483	CE	0,0
F: Y	7,01982	CF	0,0
AA	1,26144	DD	6,99632
AB	0,0	DE	-5,54314
AC	0,0	DF	-1,78591
AD	-5,00041E-10	EE	0,990899
AE	9,99986E-10	EF	-0,412989
AF	0,0	FF	-0,383784
BB	-4532,73		
BC	0,0		

La ecuación del modelo ajustado (Tabla 44) es:

$$\begin{aligned}
 T_{gf} = & -27,5191 - 5,04575L_g + 520,197X_c + 11,3907H_d - 21,9554Ancho \\
 & + 11,9483X + 7,01982Y + 1,26144L_g^2 \\
 & - (5,00041E - 10)(L_g * Ancho) + (9,99986E - 10)L_gX - 4532,73X_c^2 \\
 & - 83,1044(X_c * Ancho) + 26,0474X_cX + 14,1886X_cY - 0,474612H_d^2 \\
 & + 6,99632Ancho^2 - 5,54314(Ancho * X) - 1,78591(Ancho * Y) \\
 & + 0,990899X^2 - 0,412989XY - 0,383784Y^2
 \end{aligned}$$

Optimización de respuesta

Meta: mantener T_{gf} en 55,0 °C. Para esta variable no se busca un máximo ni un mínimo, sino hacer que permanezca en un valor específico que, en este caso, es 55 °C, puesto que el grano, después de que sobrepasa los 50 °C tiende a cristalizar. Se ha aumentado 5 °C ya que en la realidad la temperatura lograda será menor a la estimada por el modelo, debido a las fluctuaciones internas y a los factores ambientales.

Valor óptimo = 55,0

En la Tabla 45 se tabulan los datos que optiian la respuesta.

Como se muestra en la Figura 106, la suave curvatura está determinada por el factor grosor de capa X_c, ya que este sí tiene un efecto significativo en la temperatura T_{gf}, mientras que el largo L_g, al no tener efecto significativo, aplana la curva.

Variable: Eficiencia térmica η
Análisis de Efectos

Tabla 45

Valores estimados de los factores que hacen que se optimice Tgf hacia 55 °C, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador con concentrador solar

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	3,0	2,14
Xc	0,01	0,06	0,0355769
Hd	9,0	15,0	12,1811
Ancho	0,5	3,0	1,11301
X	0,5	3,0	2,0715
Y	0,5	3,0	1,85389

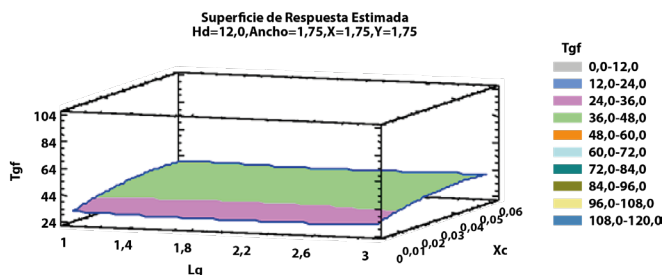


Figura 109

Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, respecto a Tgf. Secador con concentrador solar

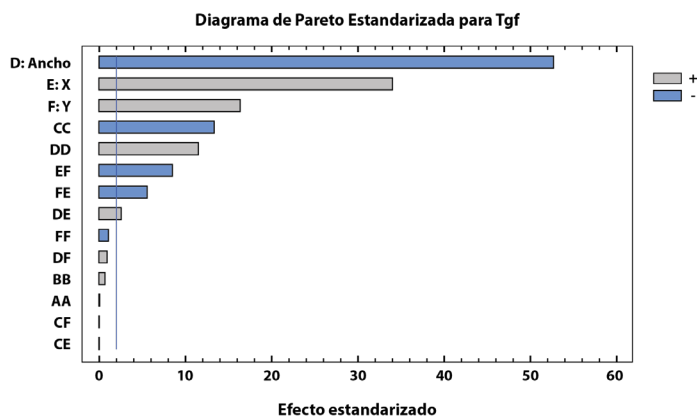


Figura 110

Diagrama de Pareto del efecto que tiene cada factor en n. Secador con concentrador solar

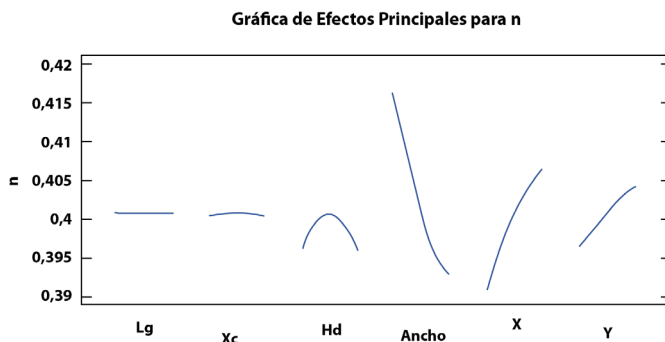


Figura 111
Efectos principales de cada factor sobre η . Secador con concentrador solar

Si se observan las Figuras 107 y 108, esta variable solo depende de las condiciones presentadas en el colector y el concentrador solar, así que no habrá un efecto significativo del grosor de capa X_c y tampoco del largo L_g , pues para este sistema la eficiencia está determinada por el espacio vertical en las aberturas, por los componentes materiales y factores implicados en la energía que ingresa.

Análisis de varianza

Tabla 46
Análisis de varianza respecto a η . Secador con concentrador solar

Fuente	Suma de Cuadrados	de G l	Cuadrado Medio	Razón -F	Valor-P
A:Lg	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
B:Xc	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
C:Hd	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
D:Ancho	0,00348338	1	0,00348338	2774,07	0,0000
E:X	0,00144793	1	0,00144793	1153,09	0,0000
F:Y	0,000338635	1	0,000338635	269,68	0,0000
AA	2,71551E-8	1	2,71551E-8	0,02	0,8842
AB	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000

AE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
AF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BB	0,00000100623	1	0,000001006 23	0,80	0,3789
BC	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
BF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CC	0,000225471	1	0,000225471	179,56	0,0000
CD	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CE	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
CF	0,0	1	0,0	0,00	1,0000
DD	0,000167594	1	0,000167594	133,47	0,0000
DE	0,00000944133	1	0,000009441 33	7,52	0,0109
DF	0,0000014102	1	0,000001410 2	1,12	0,2990
EE	0,0000366294	1	0,000036629 4	29,17	0,0000
EF	0,00009526	1	0,00009526	75,86	0,0000
FF	0,00000179561	1	0,000001795 61	1,43	0,2426
Error total	0,000032648	2 6	0,000001255 69		
Total (corr.)	0,00608965	5 3			

$R^2 = 99,4639 \%$

R^2 ajustada por g.l. = 98,9071 %

Error estándar de la estimación = 0,00112058

Error absoluto medio = 0,000548129

Estadístico Durbin-Watson = 2,33253 (P=0,8706)



Coefficientes de regresión

Tabla 47
Coefficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de regresión con respecto a n. Secador con concentrador solar

Coefficiente	Estimado	Coefficiente	Estimado
Constante	0,325243	BD	0,0
A: Lg	0,000205527	BE	0,0
B: Xc	0,0350308	BF	0,0
C: Hd	0,0124852	CC	-0,000520218
D: Ancho	-0,0203668	CD	0,0
E: X	0,013089	CE	0,0
F: Y	0,00733553	CF	0,0
AA	- 0,0000513817	DD	0,00258341
AB	0,0	DE	0,000695267
AC	0,0	DF	0,000268705
AD	0,0	EE	-0,00120775
AE	0,0	EF	-0,00220846
AF	0,0	FF	-0,000267405
BB	-0,50044		
BC	0,0		

La Ecuación del modelo ajustado (Tabla 47) es:

$$\begin{aligned} \eta = & 0,325243 + 0,000205527L_g + 0,0350308X_c + 0,0124852H_d \\ & - 0,0203668Ancho + 0,013089X + 0,00733553Y \\ & - 0,0000513817L_g^2 - 0,50044X_c^2 - 0,000520218H_d^2 \\ & + 0,00258341Ancho^2 + 0,000695267(Ancho * X) \\ & + 0,000268705(Ancho * Y) - 0,00120775X^2 - 0,00220846XY \\ & - 0,000267405Y^2 \end{aligned}$$

Véase la Tabla 46 para tomar en cuenta si se prefiere solo los efectos significativos en la ecuación.

Optimización de respuesta

Meta: maximizar n

Valor óptimo = 0,421542

Los datos que optimizan la respuesta (n) se presentan en la Tabla 48.

Tabla 48

Valores estimados de los factores que hacen que se optimice n hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador con concentrador solar

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	3,0	1,97192
Xc	0,01	0,06	0,0351609
Hd	9,0	15,0	11,9978
Ancho	0,5	3,0	0,5
X	0,5	3,0	2,99962
Y	0,5	3,0	1,60241

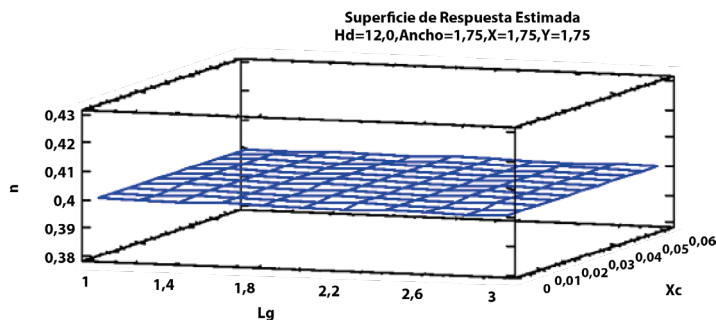


Figura 112

Gráfica de superficie de respuesta obtenida de los resultados, variando L_g y X_c respecto a n mientras se mantienen fijos Hd, Ancho, X y Y. Secador con concentrador solar

En la Figura 109 se observa que no hay curvatura; es aplanada por los factores L_g y X_c , que no tienen efecto significativo en la eficiencia del colector, como ya se ha discutido.



Variable: carga (kg) de café seco por unidad de bandeja L_s

Análisis de efectos

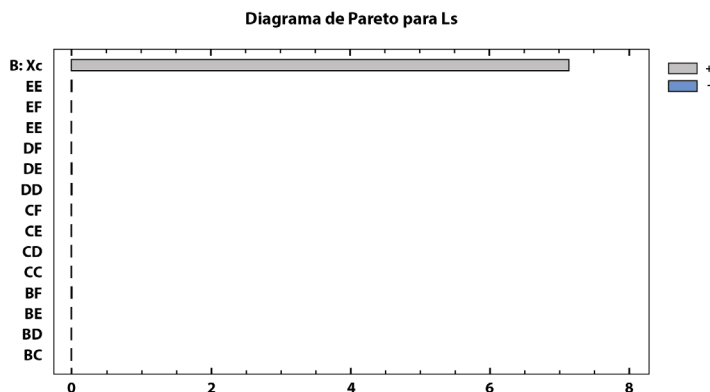


Figura 113

Diagrama de Pareto del efecto que tiene cada factor en L_s . Secador con concentrador solar

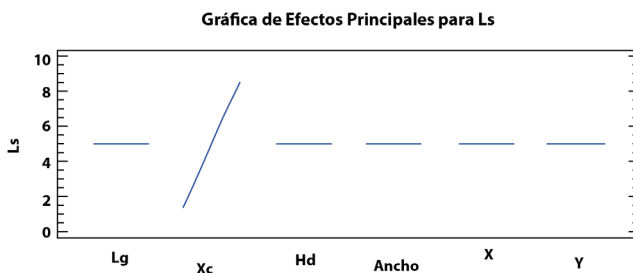


Figura 114

Efectos principales de cada factor sobre L_s . Secador con concentrador solar

En el sistema de secado anterior ya se discutió la razón por la que solo el factor grosor de capa X_C afecta a la carga de café seco L_s (Véase la Figura 110), por su proporcionalidad directa y única. L_s únicamente depende de las propiedades de la capa de secado, pero no significa que la productividad es la misma que en el sistema de secado anterior, puesto que el tiempo de proceso se reduce en gran proporción y así permite secar varios lotes de grano en el mismo periodo, lo que significa mayor carga de secado en un tiempo determinado, que se traduce en un incremento productivo.

Coeficientes de Regresión

Tabla 49

Valores numéricos de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática aproximada con respecto a L_s . Secador con concentrador solar

Cocficiente	Estimado
Constante	0,0
B: X_c	142,924

La ecuación del modelo ajustado (Tabla 49) es:

$$L_s = 142,924X_c$$

Optimización de respuesta

Meta: maximizar L_s

Valor óptimo = 8,57544

La Tabla 50 indica los datos que optimizan la respuesta (L_s).

Tabla 50

Valores estimados de los factores que hacen que se optimice L_s hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador con concentrador solar

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
L_g	1,0	3,0	2,0
X_c	0,01	0,06	0,06
H_d	9,0	15,0	9,0
Ancho	0,5	3,0	1,75
X	0,5	3,0	3,0
Y	0,5	3,0	1,75

No es necesario presentar una gráfica de superficie de respuesta, al saber que la única variable que afecta la respuesta es el grosor de capa en una relación lineal positiva, así que, es suficiente con ver la Figura 111 para apreciar visualmente dicha relación.

Análisis multirrespuesta

Conjunto de variables de respuesta a optimizar: t, T_{fm}, T_{gf}, η

Optimización de deseabilidad

Valor óptimo = 0,984789



Tabla 51

Valores numéricos de los factores que hacen que se optimicen las variables de respuesta t , T_{fm} , T_{gf} y n ; usando el valor más alto posible de la función de deseabilidad. Secador con concentrador solar

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	3,0	2,80455
Xc	0,01	0,06	0,06
Hd	9,0	15,0	11,9651
Ancho	0,5	3,0	0,507176
X	0,5	3,0	2,98044
Y	0,5	3,0	3,0

Tabla 52

Valores obtenidos de las variables de respuesta evaluadas, aplicando los valores óptimos de los factores de la Tabla 51. Secador con concentrador solar

Respuesta	Óptimo
Tiempo	3,38464
T _{fm}	127,234
T _{gf}	94,0664
N	0,420557

Aquí (Tabla 52) se puede ver que el grano alcanzaría una temperatura muy alta, claro que en la práctica real sería menor; pero, si se quiere reducir, bastaría con acondicionar el aire con ventilación, puesto que, como se indica en la Ecuación (25), la temperatura de salida del fluido en el intercambio de calor (el colector), tiene una relación inversa a su flujo másico; así que, con solo aumentar la velocidad del aire en la entrada del colector, su temperatura decrecerá; o, si se aumenta dicha velocidad en la entrada de la cámara, el contacto con el grano será menor y, por tanto, disminuirá la transferencia de calor, decayendo la temperatura del grano pero aumentando la transferencia de masa (evaporación).

Otra opción es operar en una hora más alejada del mediodía para disminuir la energía ingresada. Si en el producto no es crucial que su temperatura sea alta o que esta fluctúe, no se requiere hacer este tipo de control. Al tener un conocimiento básico de los procesos implicados en el secado, es más fácil hacer un control operativo.

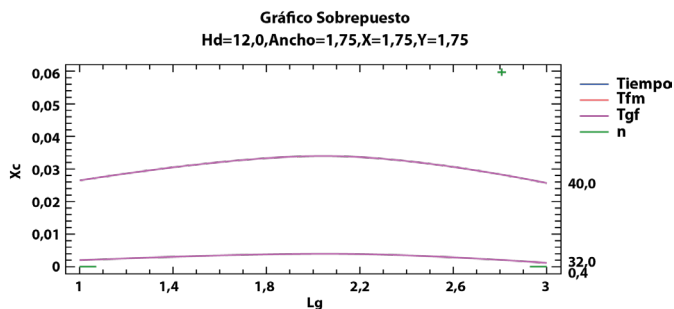


Figura 115
Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores L_g y X_c y las variables de respuesta t , T_{fm} , T_{gf} y n . El punto donde se cruzan las líneas representa la optimización de la deseabilidad. Secador con concentrador solar

Observemos (Figura 112) que solo hay una variación notable para la temperatura del grano al variar los factores X_c y f_s , ya que, en las otras respuestas no tienen un efecto significativo, como ya se ha discutido.

Análisis multirespuesta: t, L_s, T_{gf}

Optimización de deseabilidad

Valor óptimo = 0,947123

Tabla 53
Valores numéricos de los factores que hacen que se optimicen las variables de respuesta t , L_s y T_{gf} ; usando el valor más alto posible de la función de deseabilidad. Secador con concentrador solar

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
L_g	1,0	3,0	2,61242
X_c	0,01	0,06	0,06
Hd	9,0	15,0	11,8022
Ancho	0,5	3,0	1,34755
X	0,5	3,0	2,31754
Y	0,5	3,0	2,23231



Tabla 54

Valores obtenidos de las variables de respuesta evaluadas, aplicando los valores óptimos de los factores de la Tabla 53. Secador con concentrador solar

Respuesta	Óptimo
Tiempo	17,0963
Tgf	55,0
Ls	8,57544

Como podemos ver, el valor de deseabilidad para este caso es menor que el anterior, a pesar de que aquí se ha integrado menos variables de respuesta; la razón es por la especificación al valor esperado en la temperatura del grano, que se le ha fijado (55 °C), como se muestra en la Tabla 54, lo que representa una restricción a la región de optimización (véase la Figura 113).

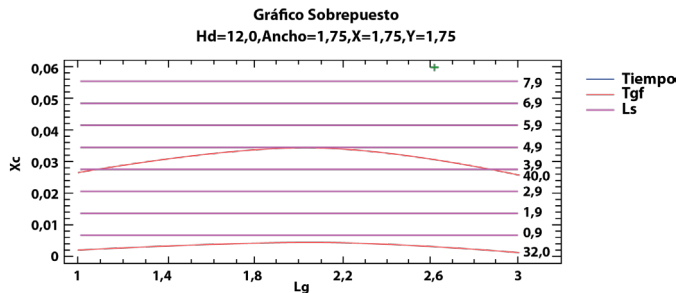


Figura 116

Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores L_g y X_c y las variables de respuesta t , L_s y T_{gf} . El punto donde se cruzan las líneas representa la optimización de la deseabilidad. Secador con concentrador solar

Análisis multirespuesta: t, T_{fm}, T_{gf}, L_s

Optimización de deseabilidad

Valor óptimo = 0,687117

Tabla 55

Valores numéricos de los factores que hacen que se optimice las variables de respuesta t, Tfm, Ls y Tgf; usando el valor más alto posible de la función de deseabilidad. Secador con concentrador solar

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	3,0	1,8057
Xc	0,01	0,06	0,0599585
Hd	9,0	15,0	11,4912
Ancho	0,5	3,0	0,5
X	0,5	3,0	1,29224
Y	0,5	3,0	2,06347

Tabla 56

Valores obtenidos de las variables de respuesta evaluadas, aplicando los valores óptimos de los factores de la Tabla 55. Secador con concentrador solar

Respuesta	Óptimo
Tiempo	4,06649
Tfm	86,6769
Tgf	66,0731
Ls	8,56951

El valor de deseabilidad ha disminuido, aunque está en el rango de aceptación, debido a que la especificación de mantener la temperatura del grano (55 °C) se ha desviado de su límite a 66 °C, aunque en la práctica real podría ser menor. Aquí se hace evidente que, cuando un valor se sale de su rango específico, la función de deseabilidad disminuye (ver Figura 114).

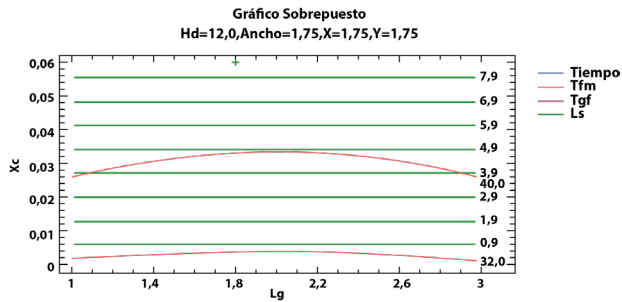


Figura 117

Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores L_g y X_c y las variables de respuesta t , T_{fm} , L_s y T_{gf} . El punto donde se cruzan las líneas representa la optimización de la Deseabilidad. Secador con concentrador solar

Diseño 2.2 – Esquema gráfico secador con concentrador solar

Variables a optimizar: t , T_{fm} , T_{gf} , L_s

Los diseños se muestran gráficamente en sus distintas vistas en las Figuras 115, 116, 117 y 118.

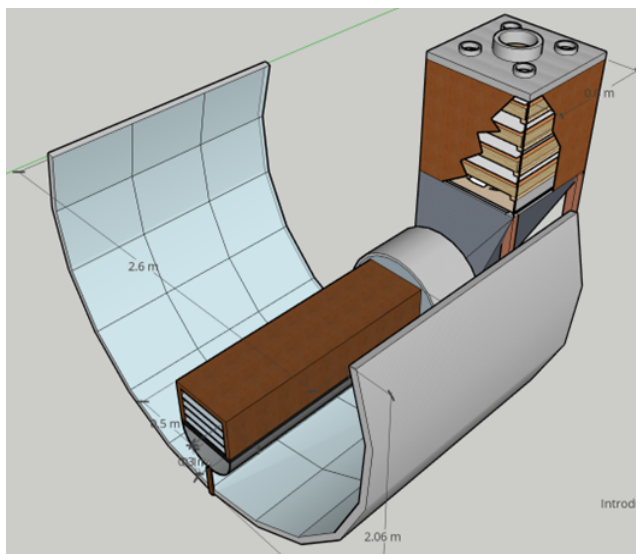


Figura 118

Representación gráfica del diseño del equipo de secado con concentrador solar optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} y L_s . Nota: los datos concretos están en las Tabla 55 y 56. Vista 3D.

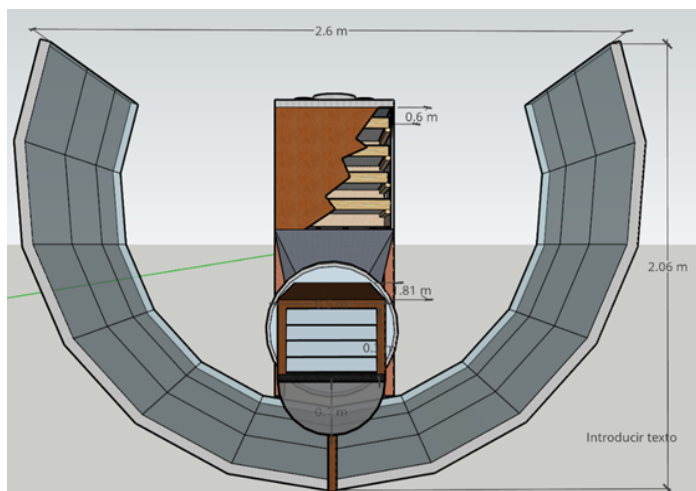


Figura 119

Representación gráfica del diseño del equipo de secado

con concentrador solar optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} y L_s

Nota: los datos concretos están en las Tabla 55 y 56. Vista frontal.

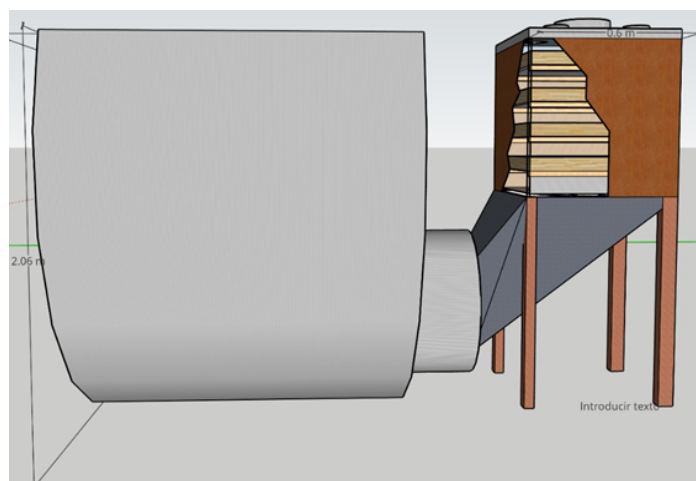


Figura 120

Representación gráfica del diseño del equipo de secado con concentrador solar

optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} y L_s

Nota: los datos concretos están en las Tabla 55 y 56. Vista lateral izquierda.

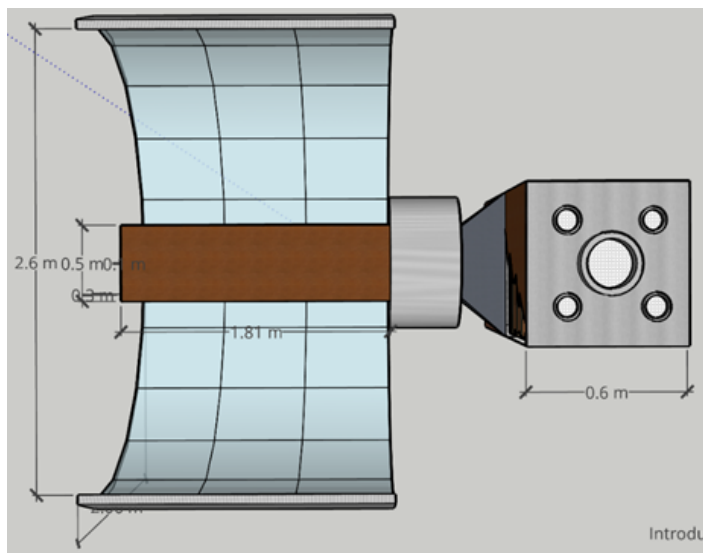


Figura 121

Representación gráfica del diseño del equipo de secado con concentrador solar optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} y L_s

Nota: los datos concretos están en las Tabla 55 y 56. Vista superior.

Análisis multirespuesta: t , T_{gf}

Optimización de deseabilidad

Valor óptimo = 1,0

Tabla 57

Valores numéricos de los factores que hacen que se optimice las variables de respuesta t y T_{gf} ; usando el valor más alto posible de la función de deseabilidad. Secador con concentrador solar

Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Lg	1,0	3,0	1,00608
Xc	0,01	0,06	0,0239842
Hd	9,0	15,0	12,0028
Ancho	0,5	3,0	0,500058
X	0,5	3,0	0,645528
Y	0,5	3,0	2,15766

Tabla 58

Valores obtenidos de las variables de respuesta tratadas, aplicando los valores óptimos de los factores de la Tabla 57. Secador con concentrador solar

Respuesta	Óptimo
Tiempo	9,0
T _{gf}	55,0

Se ha obtenido un valor de deseabilidad de 1; esto indica que la optimización es la ideal para las dos variables de respuesta (t y T_{gf}), tabulados sus valores en la Tabla 58. Aclárese que solo se optimiza aquellas dos, mientras que las otras pueden estar en rangos no óptimos.

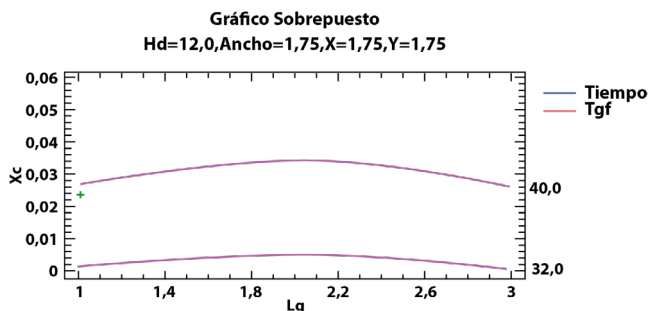


Figura 122

Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores L_g y X_c y las variables de respuesta t y T_{gf} . El punto donde se cruzan las líneas representa la optimización de la deseabilidad. Secador con concentrador solar

La variable L_g tampoco tiene efecto significativo; así que, en esta gráfica (Figura 119) se observa una dependencia notable en las dos variables t y T_g solo del grosor X_c .

Análisis General y Comentarios Finales

Para obtener la mayor velocidad de secado del café en el *secador de placa plana* se debe operar en horas de medio día, alrededor de las 12 p. m., ya que el factor Hora (Hd) es el que mayor efecto tiene sobre las principales variables de respuesta. El ángulo rotante requiere un valor máximo de 40° y su aumento o disminución a partir de dicho valor afecta negativamente el tiempo de secado. Se debe tratar de maximizar la capa de secado (X_c) y es recomendable operar a valores máximos de velocidad del aire interno (V_a) y el largo del colector (L_g) para aumentar la productividad.



Para lograr mayor velocidad de secado en el *secador con concentrador parabólico* se debe tener el mínimo valor de ancho del colector solar y el concentrador debe diseñarse con los máximos valores de ancho parabólico (x) y, en menor medida, la altura (y), operar al medio día, maximizar el valor de la capa de grano (X_c) y el largo del colector o concentrador (L_g). Sin embargo, estas condiciones generan altas temperaturas, por lo que se requiere controlar las anteriores variables según su efecto o aumentar el flujo de aire interno.

Es notoria la diferencia en la eficiencia de secado entre los dos sistemas de secado solar estudiados; al adaptar un concentrador solar al colector se aumenta en gran medida la velocidad de secado, reduciendo en gran medida el tiempo, pues mientras que en el secador de placa plana se necesita alrededor de 20 horas para llegar a la humedad final requerida, con el concentrador se requiere, sin tener en cuenta el control térmico del grano, alrededor de tres a cuatro horas. Incluso, al controlar la temperatura del grano de café (55 °C) se reduce bastante el tiempo de secado.

Aunque existen programas de simulación de procesos de secado, estos son genéricos y no especializados como los algoritmos aquí presentados y es claro que, los programas diseñados para un producto específico arrojan resultados más precisos y confiables. No obstante, aunque los algoritmos de simulación y los diseños estudiados fueron específicos para el secado de café, los mismos pueden ser utilizados, realizando adaptaciones correspondientes, para otros productos, con los mismos fundamentos de cálculo.

La investigación y aplicación de alternativas energéticas que no contaminen el ambiente y que puedan ser usadas en la operación de equipos para la producción alimentaria, debe ser una prioridad en la época actual. En este texto se ha mostrado el diseño de equipos que funcionan con energía solar de una forma eficiente y que pueden contribuir a la disminución de los impactos ambientales ocasionados por el uso de combustibles fósiles en las áreas rurales. Específicamente, se ha presentado alternativas de secadores solares que pueden llegar a ser utilizados en el beneficio del café, producto de gran importancia económica y social en países como Colombia, Brasil, El Salvador, Honduras, Guatemala, Panamá, Etiopía, Sudáfrica, Ruanda.

Referencias

Abella, M. A. (2001). *Sistemas fotovoltaicos. Introducción al diseño y dimensionado de instalaciones de energía solar fotovoltaica*. S.A.P.T. Publicaciones Técnicas.

Aga, R. (2019). *La energía: un bien esencial y universal*. <https://www.noviasalcedo.es/la-energia-un-bien-esencial-y-universal/>

Ahorro Energético. (s.f.). *Cocinas solares: las cocinas solares, ventajas y desventajas*. <http://electroprofesor.blogspot.com/2013/11/cocinas-solares.html>

Alaiz, E. (1981). *Energía Solar. Cálculo y diseño de instalaciones*. Universidad Politécnica de Madrid.

Alibaba.com. (2023). *Escoria secador rotatorio*. <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Slag-Rotary-dryer-clay-drying-machine-60256860270.html>

Ávila, A. E., Mendoza, J. M. y Beltrán, J. F. (2010). *Evaluación energética de un colector solar de placa plana de doble cubierta*. *Ingeniería y Desarrollo*, (27), 93-112.

Ayyaswamy, P. S., & Catton, I. (1973). *The boundary-layer regime for natural convection in differentially heated tilted rectangular cavity*. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 95(4), 543-545. <https://doi.org/10.1115/1.3450107>

Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7th ed.). En L. Ratts, S. Dumas, & T. Kulesa (Eds.). John Wiley and Sons, Inc.



Catton, I. (1978). Natural convection in enclosures. In International Heat Transfer Conference Digital Library. Begel House Inc.

Cengel, Y. y Boles, M. A. (2012). Termodinámica (7.a ed.). McGraw Hill Companies Inc.

Chang, R. & Goldsby, K. A. (2017). Química (12.a ed.). McGraw-Hill.

Changzhou Yibu Drying Equipment Co., Ltd. (2022). Máquina del secado por aspersión. <https://spanish.spray-dryingmachine.com/sale-13335716-milk-spray-drying-machine-laboratory-spray-dryer-spray-dryer-industrial-spray-dryer-machine.html>

Diario de Ciencias Aplicadas. (2023). Túneles de secado / Cintas para secado. <http://www.diariodeciencias.com.ar/tuneles-de-secado-cintas-para-secado/>

Direct Industry. (s.f.). Secador de tambor. <https://www.directindustry.es/prod/general-kinematics/product-222617-2271450.html>

Duffi, J. A., & Beckman, W. A. (1991). Solar Engineering of Thermal processes (2nd ed.). John Wiley and Sons, Inc.

Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (2013). Solar engineering of thermal processes. In Design Studies (4th ed., Vol. 3, Issue 3). John Wiley & Sons, Inc. [https://doi.org/10.1016/0142-694x\(82\)90016-3](https://doi.org/10.1016/0142-694x(82)90016-3)

Fauroux, L. E., & Jagër, M. (2013). Diseño y análisis de colectores solares planos. http://www.edutecne.utn.edu.ar/coini_2013/trabajos/COA05_TC.pdf

Focus Technology Co., Ltd. (2023). Bandeja de acero inoxidable horno secador de chips de manzana. https://es.made-in-china.com/co_unackdry/product_Stainless-Steel-Tray-Dryer-Oven-for-Apple-Chips_eeunyeisg.html

Geankoplis, C. J. (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias (3.a ed.). CECSA. Compañía Editorial Continental S.A. de C.V.

Globe, S. & Dropkin, D. (1959). Natural-convection heat transfer in liquids confined by horizontal plates and heated from below. ASME Journal of Heat and Mass Transfer, 81(1), 24-28. <https://doi.org/10.1115/1.4008124>

Green, D. W. & Perry, R. H. (2008). Perry's Chemical Engineers' Handbook (8th ed.). McGraw Hill.

Gutiérrez Pulido, H., & De La Vara Salazar, R. (2008). Análisis y Diseño de Experimentos (2a ed.). México D. F.: McGraw Hill.

Hollands, K. G., Unny, T. E., Raithby, G. D., & Konicek, L. (1976). Free convection heat

transfer across inclined air layers. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 98(2), 189-193. <https://doi.org/10.1115/1.3450517>

Ibarra, B. A. y Rojas, F. J. (2012). Diseño y construcción de un prototipo de colector solar parabólico giratorio de mediana temperatura [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana. Ecuador]. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4443>

Ibrahim, M., Sopian, K., Daud, R. W., Alghoul, M. A., Sulaiman, M. Y., Yahya, M. & Zaharim, A. (2009). Solar chemical pump drying system for tropical region. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 5(5), 404-413.

MacGregor, R. K. & Emery, A. F. (1969). Free convection through vertical plane layers - Moderate and high prandtl number fluids. *ASME Journal of Heat and Mass Transfer*, 91(3), 391-401. <https://doi.org/10.1115/1.3580194>

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2007). Operaciones unitarias en Ingeniería Química (7.a ed.). Interamericana Editores S.A. McGraw Hill Companies Inc.

Meizoso, M. C. (2012). Distribución de la irradiación solar global, directa y difusa, en la ciudad de A Coruña [Tesis Doctoral, Universidade da Coruña]. <https://core.ac.uk/download/pdf/61910626.pdf>

Montero, I. (2005). Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos [Tesis Doctoral, Universidad de Extremadura]. <https://biblioteca.unex.es/tesis/8477237115.pdf>

Morillo, A. S. (2012). Estudio y caracterización de sistemas solares térmicos semiesféricos de nueva generación. Universidad Complutense de Madrid.

Parra-Coronado, A., Roa-Mejía, G. y Oliveros-Tascón, C. E. (2008a). SECAFÉ Parte II: Recomendaciones para el manejo eficiente de los secadores mecánicos de café pergamino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12(4), 428-434. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000400014>

Parra-Coronado, A., Roa-Mejía, G. y Oliveros-Tascón, C. E. (2008b). SECAFÉ Parte I: modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12(4), 415-427. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662008000400013>

Parra, A., Roa, G., Oliveros, C. E. y Sanz, J. R. (2017). Optimización operacional en secadores mecánicos para café pergamino. *Cenicafé*. <https://www.cenicafe.org/es/publications/librosecado.pdf>

Puerta-Quintero, G. I. (2006a). Buenas prácticas agrícolas para el café. *Avances Técnicos Cenicafé*, (349).

Puerta Q., G. I. (2006b). La humedad controlada del grano preserva la calidad del



café. *Avances Técnicos Cenicafé*, (352).

Puerta-Quintero, G. I. (2008). Riesgos para la calidad y la inocuidad del café en el secado. *Avances Técnicos Cenicafé*, (371).

Rey Pastor, J., Santaló, L. A., & Balanzat, M. (1955). *Geometría Analítica* (4a ed.). Buenos Aires: KAPELUSZ.

Ricciulli, I. (2021). Docente de Uniguajira investiga sobre el aprovechamiento de la biomasa mediante concentradores solares. <https://www.uniguajira.edu.co/portal-de-noticia/item/2437-docente-de-uniguajira-investiga-sobre-el-aprovechamiento-de-la-biomasa-mediante-concentradores-solares>

Roche, L., Hernández, J. y García, A. (2017). Diseño conceptual de secador solar a escala piloto para algas marinas. *Tecnología Química*, 37(2), 186. <https://doi.org/10.1590/2224-6185.2017.2>.

Rodríguez, M. (2016). Análisis de modelos de un captador solar plano en régimen transitorio [Tesis de Maestría, Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/handle/11441/55972>

TecnoEdu. Tecnología Educativa S.A. (s.f.). Estufas de secado al vacío. <https://tecnoedu.com/Laboratorio/ESECV.php>

Tiwari, G. N. (2002). *Solar energy. Fundamentals, design, modelling, and applications*. Alpha Science International Ltd., New Delhi, India.

Tiwari, A. (2016). A review on solar drying of agricultural produce. *Journal of Food Processing and Technology*, 7. <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000623>

Trejos-Rodríguez, R., Roa-Mejía, G. y Oliveros-Tascón, C. E. (1989). Humedad de equilibrio y calor latente de vaporización del café pergamino y del café verde. *Cenicafé*, 40(1), 5-15.

Treybal, R. (2007). *Operaciones de transferencia de masa* (2.a ed.). McGraw Hill Companies Inc. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

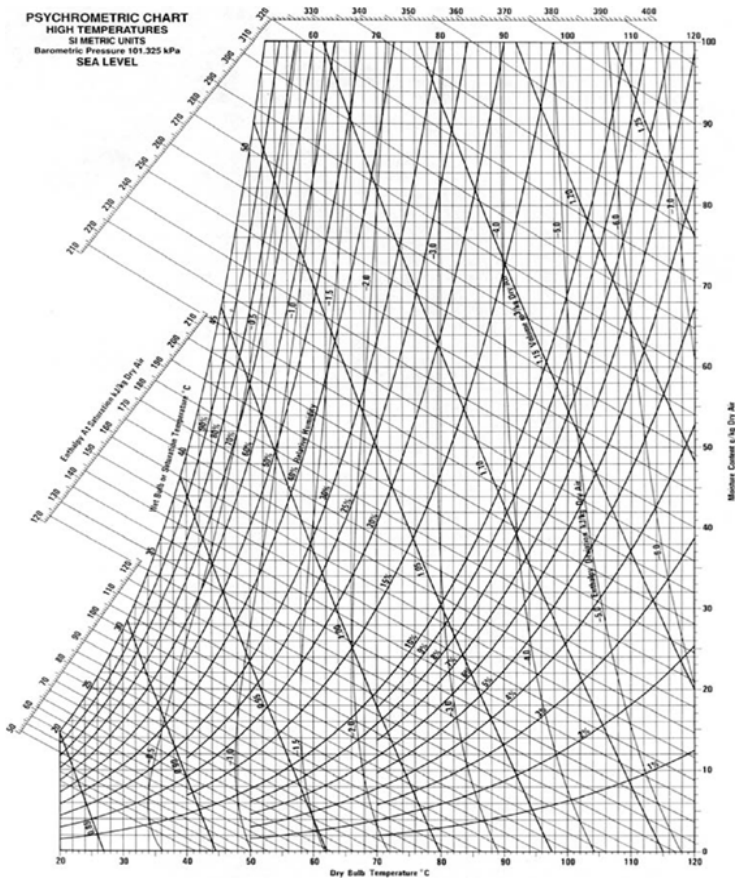
Yahya, M., Sopian, K., Wan Daud, W., Othman, M., & Yatim, B. (2008). Performance of a solar assisted dehumidification system for *Centella Asiatica* L. *Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Power Systems*, 23-25.

Weiss, W., & Buchinger, J. (2016). Solar Drying. AEE INTEC. Arbeitsgemeinschaft ERNEUERBARE ENERGY.

Ápéndices

Apéndice 1

Carta Psicrométrica de Grosvenor para el sistema Aire-Agua a presión atmosférica estándar (101,325 KPa), unidades del S.I.

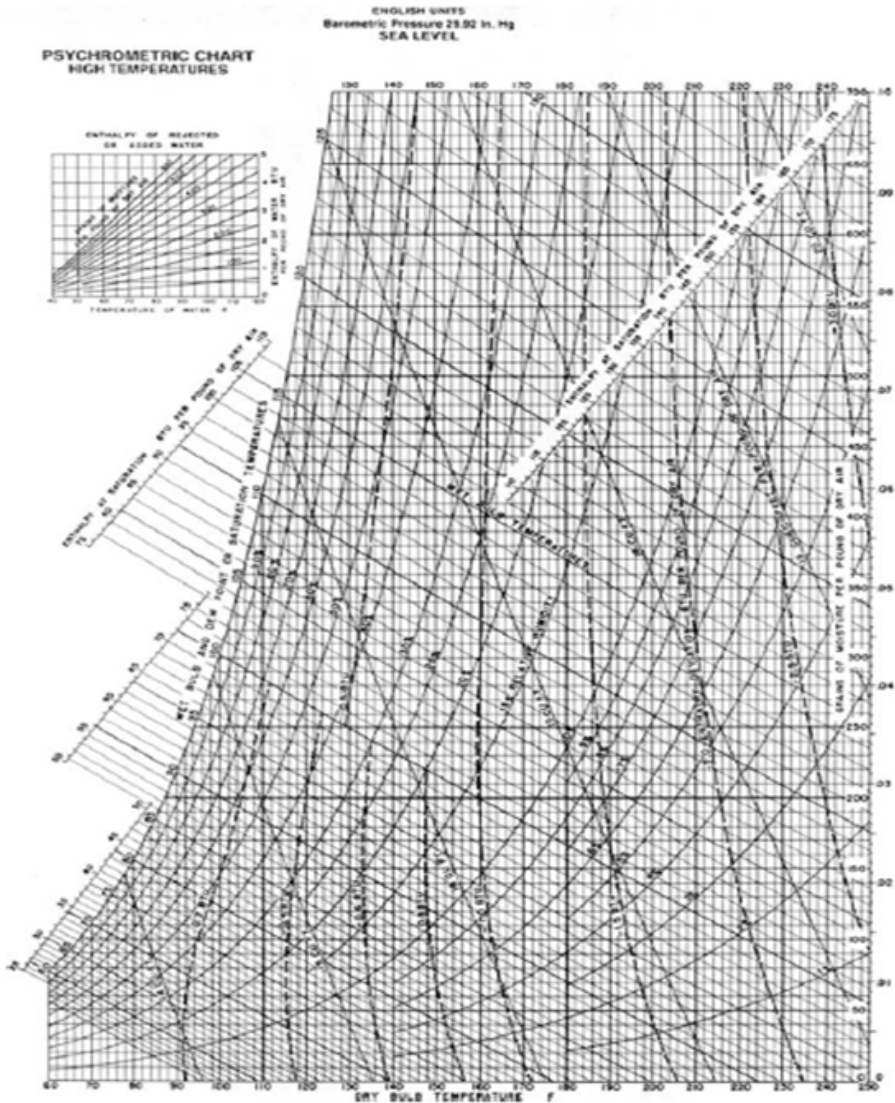


Fuente: Green y Perry (2008)



Apéndice 2

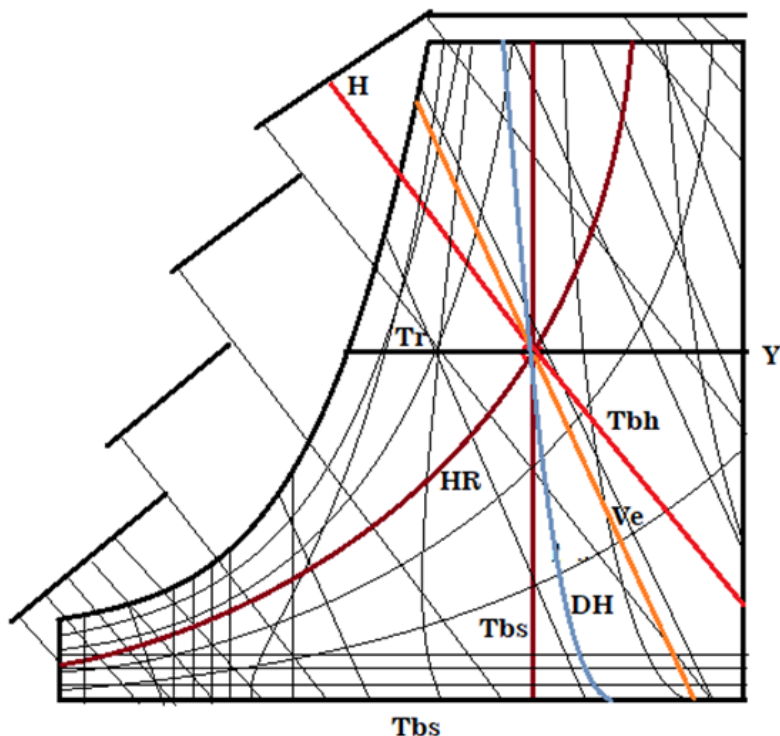
Carta Psicrométrica de Grosvenor a alta temperatura para el sistema aire-agua a presión atmosférica estándar (29,92 inHg), unidades en el sistema inglés BTU



Fuente: Green y Perry (2008)

Apéndice 3

Esquema gráfico de la metodología para usar la carta psicrométrica de Grosvenor



H: Entalpía

Tbs: Temperatura de bulbo seco

Tbh: Temperatura de bulbo húmedo

HR: Humedad relativa

Ve: Volumen específico

Y: Contenido de humedad del aire

DH: Desviación de la Entalpía (factor de corrección)

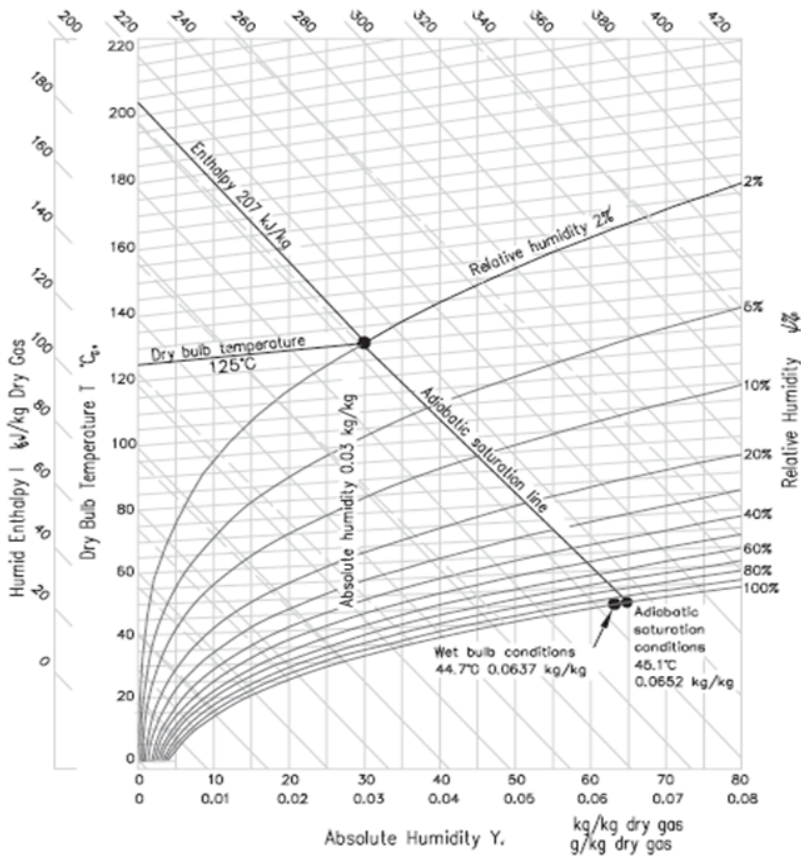
Tr: Temperatura de punto de rocío

La línea diagonal (roja) marca la entalpía y la temperatura de bulbo húmedo; sin embargo, los dos no son valores idénticos en la misma línea; hay una pequeña desviación de H en ella; entonces, basta con agregarle el valor que marque la línea DH que, como se observa, son valores negativos. Teniendo dos valores, se puede determinar los demás, siguiendo las líneas que pasan por el punto o coordenada.



Apéndice 4

Carta Psicrométrica de Mollier para el sistema aire-agua a presión atmosférica estándar (101,325KPa), unidades del S.I.



Dry bulb temperatura: Temperatura de bulbo seco

Enthalpy: Entalpía

Relative humidity: Humedad relativa

Absolute humidity: Humedad absoluta

Humid Enthalpy: Entalpía húmeda (calor húmedo)

Adiabatic saturation line: línea de saturación adiabática

Adiabatic saturation conditions: condiciones de saturación adiabática

Wet bulb conditions: condiciones de bulbo húmedo (números de la fila encima de la Humedad absoluta)

Fuente: Green y Perry (2008)

Apéndice 5

Conductividades térmicas de algunos materiales de construcción y aislantes

$$k = BTU/(h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F \cdot ft)$$

Material	Apparent density ρ , lb/ft ³ at room temperature	t , °C	k	Material	Apparent density ρ , lb/ft ³ at room temperature	t , °C	k
Aerogel, silica, opacified	8.5	120	0.013	Cotton wool	5	30	0.024
Asbestos-cement boards	120	200	.025	Cork board	10	30	.025
Asbestos sheets	55.5	30	.43	Cork (regranulated)	8.1	30	.026
Asbestos slate	112	0	.087	(ground)	9.4	30	.025
Asbestos	112	60	.114	Diatomaceous earth powder, coarse	20.0	38	.036
	29.3	-200	.043	(Note 2)	20.0	871	.082
	29.3	0	.090	fine (Note 2)	17.2	204	.040
	36	0	.087	ice	17.2	871	.074
	36	100	.111	molded pipe covering (Note 2)	26.0	204	.051
	36	200	.120	4 vol. calcined earth and 1 vol. cement, poured and fired (Note 2)	26.0	871	.088
	36	400	.120		61.8	204	.16
	43.5	-200	.090		61.8	871	.23
	43.5	0	.135	Dolomite	167	50	1.0
Aluminum foil (7 air spaces per 2.5 in.)	0.2	38	.025	Ebonite			0.10
		177	.038	Enamel, silicate	38		0.5-0.75
Asbes, wood		0-100	.041	Felt, wool	20.6	30	0.03
Asphalt	132	20	.43	Fiber insulating board	14.8	21	.028
Boiler scale (Note 1)				Fiber, red	80.5	20	.27
Bricks:				(with binder, baked)		20-97	.097
Alumina (92-99% Al ₂ O ₃ by wt.) fused		427	1.8	Gas carbon		0-100	2.0
Alumina (64-65% Al ₂ O ₃ by wt.)		1315	2.7	Glass			0.2-0.73
(See also Bricks, fire clay)	115	800	0.62	Borosilicate type	139	30-75	0.63
	115	1100	.63	Window glass			0.3-0.61
Building brick work		20	.4	Soda glass			0.3-0.44
Carbon		96.7	3.0	Granite			1.0-2.3
Chrome brick (32% Cr ₂ O ₃ by wt.)	200	200	.67	Graphite, longitudinal		20	95
	200	650	.85	powdered, through 100 mesh	30	40	0.104
	200	1315	1.0	Gypsum (molded and dry)	78	20	.25
Diatomaceous earth, natural, across strata (Note 2)	27.7	204	0.051	Ice	17	30	.021
	27.7	871	.077	Infusorial earth, see diatomaceous earth	37.5	0	1.3
Diatomaceous earth, natural, parallel to strata (Note 2)	27.7	204	.081	Kapok	0.88	20	0.020
	27.7	871	.106	Lampblack	10	40	.038
Diatomaceous earth, molded and fired (Note 2)	38	204	.14	Lava		49	.49
	38	871	.18	Leather, sole	62.4		.092
Diatomaceous earth and clay, molded and fired (Note 2)	42.3	204	.14	Limestone (15.3 vol. % H ₂ O)	103	24	.54
	42.3	871	.19	Linen		30	.05
Diatomaceous earth, high burn, large pores (Note 3)	37	200	.13	Magnesia (powdered)	49.7	47	.35
	37	1000	.34	Magnesia (light carbonate)	13	21	0.034
Fire clay (Missouri)		200	.58	Magnesium oxide (compressed)	49.9	20	.32
		600	.85	Marble			1.2-1.7
		1000	.95	Mica (perpendicular to planes)		50	0.25
		1400	1.02	Mill shavings			0.033-0.05
Kaolin insulating brick (Note 3)	27	500	0.15	Mineral wool	9.4	30	0.0225
	27	1150	.26	Paper	19.7	30	.024
Kaolin insulating firebrick (Note 4)	19	200	.050	Paraffin wax		0	.14
	19	760	.113	Petroleum coke		100	3.4
Magnesite (86.8% MgO, 6.3% Fe ₂ O ₃ , 3% CaO, 2.6% SiO ₂ by wt.)	158	204	2.2	Portland cement, see concrete		500	2.9
	158	650	1.6	Porcelain		200	0.88
	158	1200	1.1	Portland cement, see concrete		90	.17
Silicon carbide brick, recrystallized (Note 3)	129	600	10.7	Pumice stone		21-66	.14
	129	800	9.2	Pyroxilin plastics			0.05
	129	1000	8.0	Rubber (hard)	74.8	0	.087
	129	1200	7.0	(para)		21	.109
	129	1400	6.3	(soft)		21	0.075-0.092
Calcium carbonate, natural	162	30	1.3	Sand (dry)	94.6	20	0.19
White marble				Sandstone	140	40	1.06
Chalk	96	40	0.4	Scale (Note 1)	12	21	0.03
Calcium sulfate (4H ₂ O), artificial	84.6	40	.22	Silk	6.3		.026
plaster (artificial)	132	75	.43	varnished		38	.096
(building)	77.9	25	.25	Slag, blast furnace		24-127	.064
Cambric (varnished)		38	.091	Slag wool	12	30	.022
Carbon, gas		0-100	2.0	Slate		94	.86
Carbon stock	94	-184	0.55	Snow	34.7	0	.27
		0	3.6	Sulfur (monoclinic)		100	0.09-0.097
Cardboard, corrugated			0.057	(rhombic)		21	0.16
				Wall board, insulating type	14.8	21	.028
				Wall board, stiff paste board	43	30	.04
				Wood shavings	8.8	30	.034

Material	Apparent density ρ , lb/ft ³ at room temperature	t , °C	k	Material	Apparent density ρ , lb/ft ³ at room temperature	t , °C	k
Celluloid	87.3	30	.12	Wood (across grain):			
Charcoal flakes	11.9	80	.043	Balsa	7-8	30	0.025-0.03
	15	80	.051	Oak	51.5	15	0.12
Clinker (granular)		0-700	.27	Maple	44.7	50	.11
Coke, petroleum		100	3.4	Pine, white	34.0	15	.087
		500	2.9	Teak	40.0	15	.10
Coke, petroleum (20-100 mesh)	62	400	0.55	White fir	28.1	60	.062
Coke (powdered)		0-100	.11	Wood (parallel to grain):			
Concrete (cinder)			.20	Pine	34.4	21	.20
(stone)			.54	Wool, animal	6.9	30	.021
(1:4 dry)			.44				

Fuente: Green y Perry (2008)



Apéndice 6

Tabulación de datos de conductividad térmica a distintas temperaturas

$$k = W/m.K$$

Substance	Temperature, K														
	10	20	40	60	80	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200	1400
Alumina	7	32	121	174	160	125	55	36	26	20	16	10	8	7	6
Aluminum	38,000	13,500	2,300	850	380	300	237	273	240	237	232	220	93	99	105
Antimony	470	230	110	80	60	48	32	26	22	20					
Beryllium oxide	47	196	810	1,400	1,650	1,490	480	272	196	146	111	70	47	33	25
Bismuth	240	100	45	31	24	22	18	16	14	12					
Boron	165	305	400	327	230	170	45	25	15	12					
Cadmium	900	250	150	120	110	110	105	104	101	99					
Chromium	400	570	450	250	180	128	111	90	57	85	81	71	65	62	61
Cobalt	250	450	380	250	190	160	120	100	85	70					
Constantan	4	9	16	18	19	20	23	25	27	30					
Copper	19,000	10,700	2,100	850	570	483	413	398	392	388	383	371	357	342	
Gallium	2,200	640	250	200	170	140	100	85							
Gold	2,800	1,500	520	380	350	345	327	315	312	309	304	292	278	262	
Graphite†	27	108	135	81	54	39	15	10	7	5	4	3	3	2	2
Graphite‡	81	420	1,630	2,980	4,290	4,980	3,250	2,000	1,460	1,140	930	680	530	440	370
Hastelloy	1	3	4	5	6	7	9	10	11	13					
Inconel	2	4	8	10	11	11	14	15							
Iridium	1,300	1,900	750	360	230	172	147	145	143	140					
Iron	710	1,000	560	270	170	132	94	80	69	61	55	43	33	28	31
Lead	175	57	43	42	41	40	37	35	34	33	31	19	22	24	26
Magnesium	1,200	1,300	620	290	190	160	159	156	153	151	149	146	84	98	112
Magnesium oxide	1,100	3,100	2,200	950	460	260	75	48	36	27	21	13	10	8	7
Manganese	2	2	4	5	5	6	7	8	9	9					
Manganin	2	4	9	11	13	13	17	22	28	34	40				
Mercury	54	40	35	33	33	32	32	8	10	11	12	13	14		
Molybdenum	150	280	350	250	210	179	143	138	134	130	126	118	112	105	100
Nickel	2,600	1,700	570	290	200	158	106	91	80	72	66	67	72	76	80
Nylon	0.04	0.10	0.17	0.20	0.23	0.25	0.28	0.30							
Palladium	1,200	610	160	100	88	80	78	78	78	80					
Platinum	1,200	490	130	92	82	79	75	73	72	72	72	73	78	78	81
PTFE§	0.94	1.43	1.94	2.1	2.15	2.16	2.20	2.25	2.3	2.5					
Pyrex	0.12	0.20	0.33	0.42	0.51	0.57	0.88	1.1	1.6	2.1					
Quartz	1,200	480	82	40	30										
Rhodium	2,900	3,900	1,000	370	250	190	160	150	145	140					
Rubber			0.13	0.15	0.16	0.17	0.20	0.22	0.24	0.25					
Selenium (αα)	140	57	25	15	10	8	6	4	3	2					
Silica								1.34	1.52	1.70					
Silver	16,500	5,200	1,100	630	500	430	425	424	420	413	405	389	374	358	62
Tantalum	108	146	88	68	62	59	58	57	58	58	59	59	60	61	
Tellurium	300	93	29	17	13	11	6	4	3	3					
Tin		320	130	101	90	84	72	67	62	60					
Titanium	14	28	39	37	33	31	26	21	20	20	19				
Tungsten			880	330	310	280	190	180	170	150	140				
Uranium				20	22	23	26	28	30	32					
Zinc				150	135	130	123	120	116	110	110				
Zirconium	100	110	59	42	38	34	25	23	22	21	21				

Especialmente a bajas temperaturas k a menudo puede ser reducida notoriamente incluso por pequeñas trazas de impurezas. Así que esta tabla de especies de alta pureza, debería ser usada con cuidado para materiales comerciales.

Fuente: Green y Perry (2008)

Apéndice 7

Conductividad térmica de aleaciones de Cromo

$$k = BTU/(h. ft. °R)$$

American Iron and Steel Institute Type No.	k at 212 °F	k at 932 °F
301, 302, 302B, 303, 304, 316†	9.4	12.4
308	8.8	12.5
309, 310	8.0	10.8
321, 347	9.3	12.8
403, 406, 410, 414, 416†	14.4	16.6
430, 430F†	15.1	15.2
442	12.5	14.2
501, 502†	21.2	19.5

Fuente: Green y Perry (2008)

Apéndice 8

Conductividad térmica de algunas aleaciones a altas temperaturas

$$k = BTU/(h. ft. °R)$$

°R	Thermal conductivity, Btu/(ft)(hr)(°R)					
	Kovar	Advance	Monel	Hastelloy A	Inconel	Nichrome V
500	7.8		9.0	5.6	6.0	5.5
600	8.3	11.4	10.2	6.2	6.5	6.1
700	8.6	12.6	11.2	6.8	7.0	6.7
800	8.7	13.9	12.3	7.3	7.6	7.3
900	8.7	15.1	13.4	7.8	8.1	7.8
1000	8.9	16.4	14.4	8.4	8.6	8.4
1100	9.2	17.6	15.4	9.0	9.1	9.0
1200	9.5	18.8	16.5	9.5	9.7	9.5
1300	9.8	20.0	17.6	10.1	10.2	10.1
1400	10.2	21.2	18.7	10.7	10.8	10.7
1500	10.5	22.5	19.8	11.3	11.3	11.3
1600	10.8	23.8	20.8	11.8	11.8	11.9
1700	11.1	25.0	21.9	12.3	12.4	12.4
1800	11.3	26.2	23.0	12.9	13.0	13.0
1900	11.5	27.4	24.0	13.4	13.6	13.5
2000	11.8	28.7	25.1	14.0	14.0	14.1
2100	12.1	30.0	26.1	14.6	14.5	14.7
2200	12.3		27.2	15.1	15.0	15.3

Fuente: Green y Perry (2008)



Apéndice 9

Conductividad térmica de algunos materiales para refrigeración y aislantes de construcción

$$k = BTU/(h.ft.^{\circ}R)$$

Material	Apparent density, lb/cu ft room temp.	k
Soft flexible materials in sheet form:		
Chemically treated wood fiber	2.2	0.023
Eel grass between paper	3.4–4.6	0.021–0.022
Felted cattle hair	11–13	0.022
Flax fibers between paper	4.9	.023
Hair and asbestos fibers, felted	7.8	.023
Insulating hair, and jute	6.1–6.3	0.022–0.023
Jute and asbestos fibers, felted	10.0	0.031
Loose materials:		
Cork, regranulated, fine particles	8–9	.025
Charcoal, 6 mesh	15.2	.031
Diatomaceous earth, powdered	10.6	.026
Glass wool, curled	4–10	.024
Gypsum in powdered form	26–34	0.043–0.05
Mineral wool, fibrous	6	0.0217
	10	.0225
	14	.0233
	18	.0242
Sawdust	12	.034
Wood shavings, from planer	8.8	.034
Semiflexible materials in sheet form:		
Flax fiber	13.0	.026
Semirigid materials in board form:		
Corkboard	7.0	.0225
	10.6	.025
Mineral wool, block, with binder	16.7	.031
Stiff fibrous materials in sheet form:		
Wood pulp	16.2–16.9	.028
Sugar-cane fiber	13.2–14.8	.028
Cellular gypsum	8	.029
	12	.037
	18	.049
	24	.064
	30	.083

Fuente: Green y Perry (2008)

Apéndice 10

Conductividad térmica de algunos materiales para refrigeración y aislantes de construcción

$$k = BTU/(h. ft. °R)$$

Material	For temperatures, °F up to	Mean temperatures, °F										
		100	200	300	400	500	600	800	1000	1500	2000	
Laminated asbestos felt (approx. 40 laminations per in)	700	0.033	0.037	0.040	0.044	0.048						
Laminated asbestos felt (approx. 20 laminations per in)	500	.045	.050	.055	.060	.065						
Corrugated asbestos (4 plies per in)	300	.050	.058	.069								
85% magnesia (density, 13 lb/ft ³)	600	.034	.036	.038	.040							
Diatomaceous earth, asbestos and bonding material	1600	.045	.047	.049	.050	.053	0.055	0.060	0.065			
Diatomaceous earth brick	1600	.054	.056	.058	.060	.063	.065	.069	.073			
Diatomaceous earth brick	2000	.127	.130	.133	.137	.140	.143	.150	.158	0.176		
Diatomaceous earth brick	2500	.128	.131	.135	.139	.143	.148	.155	.163	.183	0.203	
Diatomaceous earth powder (density, 18 lb/ft ³)		.039	.042	.044	.048	.051	.054	.061	.068			
Rock wool		.030	.034	.039	.044	.050	.057					

Fuente: Green y Perry (2008)

Apéndice 11

Conductividad térmica de algunos materiales para refrigeración y aislantes de construcción

$$k = BTU/(h. ft. °R)$$

Material	Weight, lb/cu ft	Temperatures, °F						
		32	100	200	300	400	600	800
Asbestos	36.0	0.087	0.097	0.110	0.117	0.121	0.125	0.130
Burned infusorial earth for pipe coverings	12.5	.043	.046	.052	.057	.062	.073	.085
Insulating composition (loose)	25.0	.040	.046	.050	.053	.055		
Cotton	5.0	.032	.035	.039				
Silk hair	9.1	.026	.030	.034				
Silk	6.3	.025	.028	.034				
Wool	8.5	.022	.027	.033				
Pulverized cork	10.0	.021	.026	.032				
Infusorial earth (loose)	22.0	.035	.039	.045	.047	.050	.053	

Fuente: Green y Perry (2008)



Apéndice 12

Conductividad térmica de algunos materiales para refrigeración y aislantes de construcción

$$k = \text{BTU}/(\text{h. ft. } ^\circ\text{R})$$

Material	Weight, lb/cu ft	Temperatures, °F				
		32	-50	-100	-200	-300
Asbestos	44.0	0.135	0.132	0.130	0.125	0.100
Asbestos	29.0	.0894	.0860	.0820	.0720	.0545
Cotton	5.0	.0325	.0302	.0276	.0235	.0198
Silk	6.3	.0290	.0256	.0235	.0196	.0155

Fuente: Green y Perry (2008)

Apéndice 13

Conductividad térmica de algunos materiales para refrigeración y aislantes de construcción

$$\alpha = \text{m}^2/\text{s}$$

Element	Temperature, K									
	20	40	60	80	100	200	400	600	800	1000
Aluminum	0.50	0.012	0.0014	4.4 - 4	2.3 - 4	1.1 - 4	9.4 - 5	8.4 - 5	7.4 - 5	6.6 - 5
Beryllium					0.0036	1.5 - 4	4.0 - 5	2.6 - 5	2.1 - 5	1.7 - 5
Chromium	0.038	0.0037	5.9 - 4	2.0 - 4	1.2 - 4	4.1 - 5	2.6 - 5	2.0 - 5	1.7 - 5	1.4 - 5
Copper	0.16	0.0040	6.9 - 4	3.1 - 4	2.2 - 4	1.3 - 4	1.1 - 4	1.0 - 4	9.0 - 5	9.0 - 5
Gold	0.005	4.5 - 4	2.3 - 4	1.8 - 4	1.5 - 4	1.3 - 4	1.2 - 4	1.2 - 4	1.1 - 4	9.8 - 5
Iridium	0.046				8.4 - 5	5.6 - 5	4.8 - 5	4.4 - 5	4.1 - 5	3.5 - 5
Iron	0.043	3.2 - 3	4.9 - 4	1.6 - 4	8.2 - 5	3.1 - 5	1.8 - 5	1.3 - 5	1.1 - 5	1.0 - 5
Lead	9.3 - 5	3.9 - 5	3.3 - 5	3.1 - 5	2.9 - 5	2.6 - 5	2.3 - 5	2.0 - 5	1.3 - 5	1.5 - 5
Molybdenum	0.0095	0.0014	4.0 - 4	2.0 - 4	1.3 - 4	6.3 - 5	5.1 - 5	4.5 - 5	4.2 - 5	3.8 - 5
Nickel	0.033	0.0017	3.1 - 4	1.3 - 4	8.0 - 5	3.1 - 5	1.9 - 5	1.3 - 5	1.4 - 5	1.5 - 5
Platinum	0.0029	1.6 - 4	6.3 - 5	4.3 - 5	3.6 - 5	2.7 - 5	2.5 - 5	2.5 - 5	2.5 - 5	2.5 - 5
Silver	0.031	0.0013	4.5 - 4	2.8 - 4	2.3 - 4	1.8 - 4	1.7 - 4	1.6 - 4	1.5 - 4	1.4 - 4
Zinc	0.0046	3.1 - 4	1.0 - 4	7.0 - 5	5.5 - 5	4.7 - 5	3.9 - 5	3.4 - 5	1.8 - 5	2.2 - 5

Fuente: Green y Perry (2008)

Apéndice 14
Propiedades termofísicas de ciertas sustancias sólidas no metálicas

Material	Density, kg/m ³	Emissivity	Specific heat, kJ/(kg·K)	Thermal conductivity, W/(m·K)	Thermal diffusivity, m ² /s × 10 ⁶
Alumina	3975		0.765	36	11.9
Asphalt	2110		0.920	0.06	0.03
Bakelite	1300		1.465	1.4	0.74
Beryllia	3000	0.82	1.030	270	88
Brick	1925	0.93	0.835	0.72	0.45
Brick, fireclay	2640	0.93	0.960	1.0	0.39
Carbon, amorphous	1950	0.86	0.724	1.6	1.13
Clay	1460	0.91	0.880	1.3	1.01
Coal	1350	0.80	1.26	0.26	0.15
Cotton	80		1.30	0.06	0.58
Diamond	3500		0.509	2300	1290
Granite	2630		0.775	2.79	1.37
Hardboard	1000		1.38	0.15	0.11
Magnesite	3025	0.38	1.13	4.0	1.2
Magnesia	3635	0.72	0.943	48	14
Oak	770	0.90	2.38	0.18	0.10
Paper	930	0.83	1.34	0.011	0.01
Pine	525	0.84	2.75	0.12	0.54
Plaster board	800	0.91		0.17	
Plywood	540		1.22	0.12	0.18
Pyrex	2250	0.92	0.835	1.4	0.74
Rubber	1150	0.92	2.00	0.2	0.09
Rubber, foam	70	0.90		0.03	
Salt		0.34	0.854	7.1	
Sandstone	2150	0.59	0.745	2.9	1.8
Silica		0.79	0.743	1.3	
Sapphire	3975	0.48	0.765	46	15
Silicon carbide	3160	0.86	0.675	110	230
Soil	2050	0.38	1.84	0.52	0.14
Teflon	2200	0.92	0.35	0.26	0.34
Thoria	4160	0.28	0.71	14	4.7
Urethane foam	70		1.05	0.03	0.36
Vermiculite	120		0.84	0.06	0.60

Fuente: Green y Perry (2008)



Apéndice 15

Propiedades termofísicas del aire seco a presión atmosférica

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
-150	2.867	0.9825	8.636	3.013	11.71	4.157	0.7246
-100	2.039	0.9656	11.9	5.835	15.82	8.034	0.7263
-90	1.927	0.9753	12.49	6.482	16.62	8.842	0.733
-80	1.828	0.9835	13.07	7.153	17.42	9.692	0.7381
-70	1.738	0.9901	13.64	7.85	18.22	10.59	0.7414
-60	1.656	0.9952	14.2	8.572	19.01	11.53	0.7433
-50	1.582	0.999	14.74	9.317	19.79	12.52	0.744
-40	1.514	1.002	15.27	10.08	20.57	13.56	0.7436
-30	1.452	1.004	15.79	10.88	21.34	14.65	0.7425
-20	1.394	1.005	16.3	11.69	22.11	15.78	0.7408
-10	1.341	1.006	16.8	12.52	22.88	16.96	0.7387
0	1.292	1.006	17.29	13.38	23.64	18.17	0.7362
5	1.269	1.006	17.54	13.82	24.01	18.8	0.735
10	1.247	1.006	17.78	14.26	24.39	19.44	0.7336
15	1.225	1.007	18.02	14.71	24.76	20.08	0.7323
20	1.204	1.007	18.25	15.16	25.14	20.74	0.7309
25	1.184	1.007	18.49	15.61	25.51	21.4	0.7296
30	1.164	1.007	18.72	16.08	25.88	22.08	0.7282
35	1.146	1.007	18.95	16.54	26.25	22.76	0.7268
40	1.117	1.007	19.18	17.02	26.62	23.45	0.7255
45	1.11	1.007	19.41	17.49	26.99	24.16	0.7241
50	1.092	1.007	19.63	17.97	27.35	24.87	0.7228
55	1.076	1.007	19.86	18.46	27.72	25.59	0.7215
60	1.06	1.007	20.08	18.95	28.08	26.31	0.7202
65	1.044	1.007	20.3	19.45	28.45	27.05	0.719
70	1.029	1.007	20.52	19.95	28.81	27.79	0.7177
75	1.014	1.008	20.74	20.45	29.17	28.55	0.7166
80	0.9996	1.008	20.96	20.97	29.53	29.31	0.7154
85	0.9857	1.008	21.17	21.48	29.88	30.07	0.7143
90	0.9721	1.008	21.39	22	30.24	30.85	0.7132
95	0.9589	1.009	21.6	22.52	30.6	31.63	0.7121
100	0.946	1.009	21.81	23.05	30.95	32.42	0.7111
110	0.9213	1.01	22.23	24.12	31.65	34.02	0.7092
120	0.8979	1.011	22.64	25.21	32.35	35.64	0.7073
130	0.8756	1.012	23.05	26.32	33.05	37.3	0.7057
140	0.8544	1.013	23.45	27.44	33.74	38.98	0.7041
150	0.8343	1.014	23.85	28.59	34.43	40.68	0.7027
160	0.815	1.016	24.24	29.74	35.11	42.4	0.7014
170	0.7966	1.017	24.63	30.92	35.79	44.15	0.7003
180	0.779	1.019	25.01	32.11	36.46	45.92	0.6992
190	0.7622	1.021	25.39	33.32	37.13	47.71	0.6983
200	0.7461	1.023	25.77	34.54	37.79	49.53	0.6974
210	0.7306	1.025	26.14	35.78	38.45	51.36	0.6967
220	0.7158	1.027	26.51	37.04	39.1	53.21	0.696
230	0.7016	1.029	26.88	38.31	39.75	55.08	0.6955
240	0.6879	1.031	27.24	39.6	40.4	56.97	0.695
250	0.6748	1.033	27.6	40.9	41.04	58.88	0.6946
260	0.6621	1.035	27.95	42.22	41.67	60.81	0.6942
270	0.6499	1.037	28.3	43.55	42.31	62.75	0.694
280	0.6382	1.04	28.65	44.9	42.93	64.72	0.6938
290	0.6269	1.042	29	46.26	43.56	66.69	0.6936
300	0.6159	1.044	29.34	47.64	44.18	68.69	0.6935

T (°C)	ρ (kg/m ³)	C_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
310	0.6054	1.047	29.68	49.03	44.79	70.7	0.6934
320	0.5951	1.049	30.01	50.43	45.4	72.73	0.6934
330	0.5853	1.051	30.35	51.85	46.01	74.77	0.6935
340	0.5757	1.054	30.68	53.29	46.61	76.83	0.6936
350	0.5665	1.056	31.01	54.73	47.21	78.9	0.6937
360	0.5576	1.059	31.33	56.19	47.81	80.99	0.6938
370	0.5489	1.061	31.65	57.67	48.4	83.09	0.694
380	0.5405	1.064	31.97	59.16	48.99	85.21	0.6943
390	0.5323	1.066	32.29	60.66	49.57	87.34	0.6945
400	0.5244	1.069	32.61	62.18	50.15	89.49	0.6948
410	0.5167	1.071	32.92	63.71	50.72	91.65	0.6951
420	0.5093	1.073	33.23	65.25	51.29	93.83	0.6954
430	0.502	1.076	33.54	66.8	51.86	96.02	0.6957
440	0.495	1.078	33.84	68.37	52.42	98.22	0.6961
450	0.4882	1.081	34.15	69.95	52.98	100.4	0.6965
460	0.4815	1.083	34.45	71.54	53.54	102.7	0.6969
470	0.475	1.085	34.75	73.15	54.09	104.9	0.6973
480	0.4687	1.088	35.04	74.77	54.64	107.2	0.6977
490	0.4626	1.09	35.34	76.4	55.18	109.4	0.6982
500	0.4566	1.093	35.63	78.04	55.72	111.7	0.6986
550	0.4289	1.104	37.07	86.44	58.37	123.3	0.7011
600	0.4043	1.115	38.46	95.12	60.93	135.2	0.7037
650	0.3824	1.125	39.81	104.1	63.41	147.4	0.7064
700	0.3628	1.135	41.11	113.3	65.81	159.8	0.7092
750	0.345	1.145	42.39	122.8	68.12	172.5	0.7121
800	0.329	1.153	43.62	132.6	70.37	185.5	0.7149
850	0.3143	1.162	44.83	142.6	72.54	198.7	0.7178
900	0.3009	1.169	46	152.9	74.65	212.2	0.7206
950	0.2886	1.177	47.15	163.4	76.7	225.8	0.7233
1000	0.2773	1.184	48.26	174.1	78.68	239.8	0.726
1100	0.2571	1.196	50.42	196.1	82.48	268.2	0.7312
1200	0.2396	1.207	52.48	219	86.09	297.6	0.736
1400	0.211	1.226	56.35	267.1	92.81	358.8	0.7444
1600	0.1885	1.241	59.92	317.9	99.08	423.6	0.7506
1800	0.1703	1.253	63.22	371.3	105.1	492.5	0.7539
2000	0.1553	1.264	66.3	426.9	111.1	566.2	0.7539



Apéndice 16 Propiedades termodinámicas del aire

Temperature K	Pressure MPa	Density mol/dm ³	Volume dm ³ /mol	Int. energy kJ/mol	Enthalpy kJ/mol	Entropy kJ/(mol·K)	C _v kJ/(mol·K)	C _p kJ/(mol·K)	Sound speed m/s	Joule- Thomson K/MPa	Therm. cond. mW/(m·K)	Viscosity μPa·s
Saturated Properties												
59.75	0.005265	33.067	0.030242	-1.0619	-1.0617	-0.01536	0.034011	0.035064	1030.3	-0.40785	171.43	376.64
60	0.005546	33.031	0.030275	-1.0481	-1.0480	-0.01513	0.033955	0.035062	1028.3	-0.40743	171.02	371.92
61	0.005797	32.888	0.030406	-0.99308	-0.99287	-0.01422	0.033731	0.035060	1020.3	-0.40565	169.40	353.83
62	0.006270	32.745	0.030539	-0.93803	-0.93778	-0.01333	0.033512	0.035062	1012.2	-0.40375	167.78	336.91
63	0.006994	32.601	0.030674	-0.88298	-0.88267	-0.01245	0.033298	0.035069	1004.0	-0.40173	166.16	321.09
64	0.012000	32.457	0.030810	-0.82792	-0.82755	-0.01158	0.033089	0.035081	995.77	-0.39958	164.53	306.27
65	0.014320	32.312	0.030949	-0.77286	-0.77241	-0.01073	0.032884	0.035098	987.48	-0.39729	162.91	292.39
66	0.016988	32.166	0.031089	-0.71777	-0.71725	-0.00989	0.032683	0.035120	979.13	-0.39485	161.28	279.38
67	0.020042	32.020	0.031231	-0.66267	-0.66205	-0.00906	0.032486	0.035148	970.72	-0.39227	159.65	267.17
68	0.023520	31.873	0.031375	-0.60755	-0.60681	-0.00824	0.032294	0.035181	962.24	-0.38952	158.01	255.71
69	0.027461	31.725	0.031521	-0.55239	-0.55152	-0.00744	0.032105	0.035220	953.70	-0.38660	156.37	244.94
70	0.031908	31.576	0.031669	-0.49720	-0.49619	-0.00664	0.031920	0.035266	945.10	-0.38352	154.73	234.81
71	0.036905	31.427	0.031820	-0.44196	-0.44079	-0.00586	0.031739	0.035317	936.43	-0.38024	153.09	225.28
72	0.042488	31.277	0.031972	-0.38669	-0.38533	-0.00508	0.031562	0.035376	927.70	-0.37677	151.44	216.31
73	0.048733	31.126	0.032127	-0.33135	-0.32979	-0.00432	0.031388	0.035441	918.90	-0.37310	149.79	207.85
74	0.055659	30.974	0.032285	-0.27597	-0.27417	-0.00357	0.031217	0.035514	910.04	-0.36922	148.14	199.88
75	0.063326	30.821	0.032445	-0.22051	-0.21846	-0.00282	0.031050	0.035594	901.11	-0.36511	146.49	192.35
76	0.071796	30.668	0.032608	-0.16499	-0.16285	-0.00209	0.030886	0.035682	892.11	-0.36076	144.83	185.23
77	0.081091	30.513	0.032773	-0.10939	-0.10673	-0.00136	0.030725	0.035779	883.05	-0.35616	143.16	178.51
78	0.091294	30.357	0.032941	-0.05371	-0.05070	-0.00064	0.030568	0.035884	873.91	-0.35130	141.50	172.14
79	0.10245	30.200	0.033112	0.002063	0.005456	6.86E-05	0.030413	0.035998	864.71	-0.34616	139.83	166.11
80	0.11462	30.042	0.033287	0.057934	0.061749	0.000772	0.030262	0.036122	855.44	-0.34074	138.15	160.39
81	0.12785	29.883	0.033464	0.11391	0.11819	0.001467	0.030113	0.036256	846.09	-0.33500	136.48	154.96
82	0.14221	29.722	0.033641	0.17000	0.17478	0.002156	0.029968	0.036390	836.67	-0.32894	134.80	149.80
83	0.15775	29.560	0.033829	0.22621	0.23155	0.002838	0.029826	0.036536	827.18	-0.32254	133.11	144.90
84	0.17453	29.397	0.034017	0.28255	0.28849	0.003513	0.029686	0.036693	817.61	-0.31577	131.42	140.23
85	0.19262	29.232	0.034209	0.33903	0.34592	0.004181	0.029550	0.036862	807.96	-0.30862	129.78	135.78
86	0.21207	29.066	0.034404	0.39566	0.40296	0.004844	0.029417	0.037034	798.24	-0.30107	128.11	131.54
87	0.23295	28.898	0.034604	0.45245	0.46051	0.005501	0.029286	0.037200	788.44	-0.29308	126.44	127.50
88	0.25531	28.729	0.034808	0.50940	0.51829	0.006153	0.029158	0.037371	778.56	-0.28464	124.76	123.63
89	0.27922	28.558	0.035017	0.56653	0.57631	0.006799	0.029033	0.037547	768.59	-0.27572	123.07	119.93
90	0.30475	28.385	0.035230	0.62386	0.63459	0.007440	0.028911	0.037720	758.55	-0.26628	121.38	116.38
91	0.33196	28.210	0.035449	0.68138	0.69315	0.008077	0.028792	0.037898	748.42	-0.25629	119.69	112.98
92	0.36091	28.033	0.035672	0.73912	0.75199	0.008708	0.028676	0.038086	738.20	-0.24573	118.00	109.72
93	0.39166	27.854	0.035901	0.79709	0.81115	0.009336	0.028563	0.038284	727.90	-0.23455	116.30	106.59
94	0.42429	27.673	0.036137	0.85529	0.87062	0.009960	0.028453	0.038492	717.51	-0.22270	114.61	103.58
95	0.45886	27.489	0.036378	0.91375	0.93044	0.010579	0.028346	0.038703	707.03	-0.21016	112.91	100.68
96	0.49543	27.304	0.036625	0.97248	0.99063	0.011195	0.028241	0.038928	696.46	-0.19686	111.21	97.879
97	0.53408	27.115	0.036880	1.0315	1.0512	0.011808	0.028140	0.039169	685.80	-0.18275	109.51	95.179
98	0.57486	26.924	0.037142	1.0908	1.1122	0.012418	0.028042	0.039425	675.05	-0.16779	107.81	92.571
99	0.61786	26.730	0.037411	1.1505	1.1736	0.013025	0.027948	0.039691	664.20	-0.15189	106.11	90.048
100	0.66313	26.533	0.037688	1.2104	1.2354	0.013630	0.027856	0.039967	653.26	-0.13501	104.41	87.605
101	0.71074	26.333	0.037975	1.2708	1.2978	0.014232	0.027768	0.040252	642.22	-0.11705	102.71	85.236
102	0.76077	26.130	0.038270	1.3315	1.3606	0.014833	0.027684	0.040546	631.08	-0.09794	101.01	82.937
103	0.81329	25.923	0.038575	1.3926	1.4240	0.015431	0.027603	0.040840	619.84	-0.07758	99.316	80.703
104	0.86836	25.713	0.038891	1.4542	1.4880	0.016029	0.027525	0.041142	608.50	-0.05588	97.623	78.529
105	0.92606	25.499	0.039217	1.5162	1.5525	0.016625	0.027452	0.041453	597.06	-0.03271	95.933	76.412
106	0.98645	25.281	0.039556	1.5787	1.6177	0.017221	0.027383	0.041775	585.51	-0.00795	94.247	74.347
107	1.0496	25.058	0.039908	1.6417	1.6838	0.017816	0.027317	0.042107	573.85	0.018543	92.565	72.331
108	1.1156	24.831	0.040273	1.7053	1.7520	0.018411	0.027256	0.042450	562.09	0.046927	90.888	70.361
109	1.1845	24.598	0.040653	1.7695	1.8176	0.019006	0.027200	0.042803	550.21	0.077386	89.216	68.432
110	1.2564	24.361	0.041050	1.8343	1.8838	0.019602	0.027149	0.043165	538.21	0.11012	87.551	66.542
111	1.3314	24.118	0.041464	1.8997	1.9519	0.020200	0.027103	0.043534	526.10	0.14538	85.893	64.688
112	1.4095	23.868	0.041896	1.9659	2.0230	0.020799	0.027062	0.043909	513.86	0.18342	84.242	62.867
113	1.4908	23.613	0.042350	2.0329	2.0969	0.021400	0.027028	0.044291	501.48	0.22456	82.599	61.075
114	1.5753	23.350	0.042826	2.1007	2.1682	0.022004	0.027000	0.044689	488.97	0.26917	80.965	59.311



Apéndice 17
Número de Prandtl del aire

Temperature, K	Pressure, bar											
	1	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
80	mix	2.31	2.32	2.35	2.37	2.40	2.42	2.45	2.48	2.51	2.54	2.57
90	0.796	1.76	1.77	1.78	1.79	1.81	1.82	1.83	1.85	1.87	1.89	1.91
100	0.786	0.872	1.54	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.54	1.54	1.55
120	0.773	0.813	0.89	1.44	1.65	1.54	1.48	1.43	1.40	1.38	1.36	1.34
140	0.763	0.782	0.82	0.94	1.20	1.59	2.14	2.43	2.07	1.78	1.62	1.52
160	0.754	0.765	0.78	0.84	0.92	1.03	1.13	1.25	1.37	1.65	1.83	1.72
180	0.745	0.754	0.763	0.792	0.830	0.876	0.932	1.00	1.07	1.14	1.20	1.25
200	0.738	0.743	0.749	0.766	0.788	0.812	0.841	0.87	0.90	0.95	0.97	1.00
240	0.724	0.727	0.729	0.737	0.746	0.756	0.767	0.78	0.80	0.81	0.81	0.82
280	0.710	0.711	0.713	0.717	0.721	0.726	0.731	0.737	0.742	0.75	0.75	0.76
300	0.705	0.707	0.708	0.712	0.715	0.717	0.721	0.725	0.728	0.732	0.737	0.742
350	0.699	0.699	0.699	0.701	0.703	0.705	0.707	0.709	0.711	0.712	0.714	0.716
400	0.694	0.694	0.694	0.695	0.696	0.697	0.698	0.699	0.700	0.701	0.703	0.704
450	0.691	0.691	0.691	0.691	0.692	0.692	0.693	0.693	0.694	0.695	0.695	0.696
500	0.689	0.689	0.689	0.689	0.689	0.690	0.690	0.690	0.690	0.691	0.691	0.691
600	0.690	0.690	0.690	0.689	0.689	0.689	0.689	0.689	0.689	0.690	0.690	0.690
700	0.696	0.696	0.695	0.695	0.695	0.695	0.695	0.695	0.695	0.695	0.695	0.695
800	0.705	0.704	0.704	0.704	0.704	0.703	0.703	0.703	0.703	0.702	0.702	0.702
900	0.709	0.709	0.708	0.708	0.708	0.708	0.708	0.708	0.708	0.708	0.708	0.708
1000	0.711	0.711	0.711	0.711	0.711	0.710	0.710	0.710	0.710	0.709	0.709	0.709

Fuente: Green y Perry (2008)

Apéndice 18

Tabla de temperaturas para el agua saturada. En adición, el volúmen específico y la energía interna

Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2



Temp., T °C	Pres. sat., P_{sat} kPa	Volumen específico, m^3/kg		Energía interna, kJ/kg		
		Líqu. sat., v_f	Vapor sat., v_g	Líqu. sat., u_f	Evap., u_{fg}	Vapor sat., u_g
205	1724.3	0.001164	0.11508	872.86	1723.5	2596.4
210	1907.7	0.001173	0.10429	895.38	1702.9	2598.3
215	2105.9	0.001181	0.094680	918.02	1681.9	2599.9
220	2319.6	0.001190	0.086094	940.79	1660.5	2601.3
225	2549.7	0.001199	0.078405	963.70	1638.6	2602.3
230	2797.1	0.001209	0.071505	986.76	1616.1	2602.9
235	3062.6	0.001219	0.065300	1010.0	1593.2	2603.2
240	3347.0	0.001229	0.059707	1033.4	1569.8	2603.1
245	3651.2	0.001240	0.054656	1056.9	1545.7	2602.7
250	3976.2	0.001252	0.050085	1080.7	1521.1	2601.8
255	4322.9	0.001263	0.045941	1104.7	1495.8	2600.5
260	4692.3	0.001276	0.042175	1128.8	1469.9	2598.7
265	5085.3	0.001289	0.038748	1153.3	1443.2	2596.5
270	5503.0	0.001303	0.035622	1177.9	1415.7	2593.7
275	5946.4	0.001317	0.032767	1202.9	1387.4	2590.3
280	6416.6	0.001333	0.030153	1228.2	1358.2	2586.4
285	6914.6	0.001349	0.027756	1253.7	1328.1	2581.8
290	7441.8	0.001366	0.025554	1279.7	1296.9	2576.5
295	7999.0	0.001384	0.023528	1306.0	1264.5	2570.5
300	8587.9	0.001404	0.021659	1332.7	1230.9	2563.6
305	9209.4	0.001425	0.019932	1360.0	1195.9	2555.8
310	9865.0	0.001447	0.018333	1387.7	1159.3	2547.1
315	10,556	0.001472	0.016849	1416.1	1121.1	2537.2
320	11,284	0.001499	0.015470	1445.1	1080.9	2526.0
325	12,051	0.001528	0.014183	1475.0	1038.5	2513.4
330	12,858	0.001560	0.012979	1505.7	993.5	2499.2
335	13,707	0.001597	0.011848	1537.5	945.5	2483.0
340	14,601	0.001638	0.010783	1570.7	893.8	2464.5
345	15,541	0.001685	0.009772	1605.5	837.7	2443.2
350	16,529	0.001741	0.008806	1642.4	775.9	2418.3
355	17,570	0.001808	0.007872	1682.2	706.4	2388.6
360	18,666	0.001895	0.006950	1726.2	625.7	2351.9
365	19,822	0.002015	0.006009	1777.2	526.4	2303.6
370	21,044	0.002217	0.004953	1844.5	385.6	2230.1
373.95	22,064	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7

Fuente: Cengel y Boles (2012)

Apéndice 19

Tabla de presiones para el agua saturada.

En adición de la Entalpía y Entropía

Pres., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat, h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
1.0	6.97	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837



Pres., P kPa	Temp. sat., T_{sat} °C	Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líqu. sat., h_f	Evap., h_{fg}	Vapor sat., h_g	Líqu. sat., s_f	Evap., s_{fg}	Vapor sat., s_g
800	170.41	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Fuente: Cengel y Boles (2012)

Apéndice 20
Propiedades de la atmósfera según la altitud

Altitud, m	Temperatura, °C	Presión, kPa	Gravedad g, m/s ²	Velocidad del sonido, m/s	Densidad, kg/m ³	Viscosidad μ , kg/m · s	Conductividad térmica, W/m · K
0	15.00	101.33	9.807	340.3	1.225	1.789×10^{-5}	0.0253
200	13.70	98.95	9.806	339.5	1.202	1.783×10^{-5}	0.0252
400	12.40	96.61	9.805	338.8	1.179	1.777×10^{-5}	0.0252
600	11.10	94.32	9.805	338.0	1.156	1.771×10^{-5}	0.0251
800	9.80	92.08	9.804	337.2	1.134	1.764×10^{-5}	0.0250
1000	8.50	89.88	9.804	336.4	1.112	1.758×10^{-5}	0.0249
1200	7.20	87.72	9.803	335.7	1.090	1.752×10^{-5}	0.0248
1400	5.90	85.60	9.802	334.9	1.069	1.745×10^{-5}	0.0247
1600	4.60	83.53	9.802	334.1	1.048	1.739×10^{-5}	0.0245
1800	3.30	81.49	9.801	333.3	1.027	1.732×10^{-5}	0.0244
2000	2.00	79.50	9.800	332.5	1.007	1.726×10^{-5}	0.0243
2200	0.70	77.55	9.800	331.7	0.987	1.720×10^{-5}	0.0242
2400	-0.59	75.63	9.799	331.0	0.967	1.713×10^{-5}	0.0241
2600	-1.89	73.76	9.799	330.2	0.947	1.707×10^{-5}	0.0240
2800	-3.19	71.92	9.798	329.4	0.928	1.700×10^{-5}	0.0239
3000	-4.49	70.12	9.797	328.6	0.909	1.694×10^{-5}	0.0238
3200	-5.79	68.36	9.797	327.8	0.891	1.687×10^{-5}	0.0237
3400	-7.09	66.63	9.796	327.0	0.872	1.681×10^{-5}	0.0236
3600	-8.39	64.94	9.796	326.2	0.854	1.674×10^{-5}	0.0235
3800	-9.69	63.28	9.795	325.4	0.837	1.668×10^{-5}	0.0234
4000	-10.98	61.66	9.794	324.6	0.819	1.661×10^{-5}	0.0233
4200	-12.3	60.07	9.794	323.8	0.802	1.655×10^{-5}	0.0232
4400	-13.6	58.52	9.793	323.0	0.785	1.648×10^{-5}	0.0231
4600	-14.9	57.00	9.793	322.2	0.769	1.642×10^{-5}	0.0230
4800	-16.2	55.51	9.792	321.4	0.752	1.635×10^{-5}	0.0229
5000	-17.5	54.05	9.791	320.5	0.736	1.628×10^{-5}	0.0228
5200	-18.8	52.62	9.791	319.7	0.721	1.622×10^{-5}	0.0227
5400	-20.1	51.23	9.790	318.9	0.705	1.615×10^{-5}	0.0226
5600	-21.4	49.86	9.789	318.1	0.690	1.608×10^{-5}	0.0224
5800	-22.7	48.52	9.785	317.3	0.675	1.602×10^{-5}	0.0223
6000	-24.0	47.22	9.788	316.5	0.660	1.595×10^{-5}	0.0222
6200	-25.3	45.94	9.788	315.6	0.646	1.588×10^{-5}	0.0221
6400	-26.6	44.69	9.787	314.8	0.631	1.582×10^{-5}	0.0220
6600	-27.9	43.47	9.786	314.0	0.617	1.575×10^{-5}	0.0219
6800	-29.2	42.27	9.785	313.1	0.604	1.568×10^{-5}	0.0218
7000	-30.5	41.11	9.785	312.3	0.590	1.561×10^{-5}	0.0217
8000	-36.9	35.65	9.782	308.1	0.526	1.527×10^{-5}	0.0212
9000	-43.4	30.80	9.779	303.8	0.467	1.493×10^{-5}	0.0206
10,000	-49.9	26.50	9.776	299.5	0.414	1.458×10^{-5}	0.0201
12,000	-56.5	19.40	9.770	295.1	0.312	1.422×10^{-5}	0.0195
14,000	-56.5	14.17	9.764	295.1	0.228	1.422×10^{-5}	0.0195
16,000	-56.5	10.53	9.758	295.1	0.166	1.422×10^{-5}	0.0195
18,000	-56.5	7.57	9.751	295.1	0.122	1.422×10^{-5}	0.0195

Fuente: Cengel y Boles (2012)



Apéndice 21
Propiedades de gas ideal del aire

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200	1800	2003.3	1310	1487.2	3.994	3.6684
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120	2100	2377.7	2559	1775.3	2.356	3.8605
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Pr: Presión relativa (cantidad adimensional)

Vr: Volumen específico relativo (cantidad adimensional).

Fuente: Cengel y Boles (2012)



Índice de Tablas

Tabla 1	Ángulo crítico para cavidades rectangulares
Tabla 2	Constantes a_i para estimar $(mC)_{col}$
Tabla 3	Hongos encontrados en el café, los valores mínimos de actividad de agua para su crecimiento y producción de toxinas
Tabla 4	Relación del tiempo de secado del café pergamino según superficie de secador, espesor de la capa y condiciones ambientales
Tabla 5	Tabla de datos para la distribución parabólica cuando $p=2,083$
Tabla 6	Tabulación de datos para humedad vs. Tiempo, aplicando la Ecuación (171)
Tabla 7	Valores de los factores a utilizar para cada corrida (según el diseño experimental Box-Benkhen) para el diseño del secador solar de placa plana
Tabla 8	Valores de los factores a utilizar para cada corrida (según el diseño experimental Box-Benkhen) para el diseño del concentrador solar parabólico
Tabla 9	Valores de los factores que se mantendrán fijos para la operación del secado según el tipo de secador
Tabla 10	Resultados obtenidos de las corridas experimentales en el programa Statgraphics para el secador solar de placa plana con un diseño Box-Benkhen
Tabla 11	Resultados obtenidos de las corridas experimentales en el programa Statgraphics para el secador con concentrador solar parabólico con un diseño Box-Benkhen
Tabla 12	Datos de los efectos estimados de cada factor de entrada, incluyendo efectos principales y sus interacciones, sobre el tiempo de secado (t) para un secador de placa plana

Tabla 13	Resultados del análisis de varianza donde se aprecian los factores que tienen significancia estadística respecto al tiempo de secado. Secador solar de placa plana
Tabla 14	Valores de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de predicción del tiempo de secado. Secador solar de placa plana
Tabla 15	Valores estimados de los factores que hacen que se optimice el tiempo de secado hacia su mínimo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador solar de placa plana
Tabla 16	Resultados del análisis de varianza donde se aprecian los factores que tienen significancia estadística respecto a Tfm. Secador solar de placa plana
Tabla 17	Valores de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de predicción Tfm. Secador solar de placa plana
Tabla 18	Valores estimados de los factores que hacen que se optimice Tfm hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador solar de placa plana
Tabla 19	Resultados del análisis de varianza donde se aprecia los factores que tienen significancia estadística respecto a Tfg. Secador solar de placa plana
Tabla 20	Valores de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de predicción de Tfg. Secador solar de placa plana
Tabla 21	Valores estimados de los factores que hacen que se optimice hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador solar de placa plana
Tabla 22	Resultados del análisis de varianza donde se aprecian los factores que tienen significancia estadística respecto a n. Secador solar de placa plana
Tabla 23	Valores numéricos de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de predicción de n. Secador solar de placa plana
Tabla 24	Valores estimados de los factores que hacen que se optimice n hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador solar de placa plana
Tabla 25	Resultados del análisis de varianza donde se aprecian los factores que tienen significancia estadística respecto a Qu. Secador solar de placa plana
Tabla 26	Valores de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de predicción de Qu. Secador solar de placa plana
Tabla 27	Valores estimados de los factores que hacen que se optimice Qu hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador solar de placa plana
Tabla 28	Valores de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de predicción de Ls. Secador solar de



	placa plana
Tabla 29	Valores estimados de los factores que hacen que se optimice L_s hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador solar de placa plana
Tabla 30	Valores de los factores que hacen que se optimice las variables de respuesta t , T_{fm} , T_{fg} , n , Q_u , L_s , usando el valor más alto posible de la función de Deseabilidad. Secador solar de placa plana
Tabla 31	Valores obtenidos (predicción del modelo) de las variables de respuesta, usando los valores óptimos de los factores de la Tabla 30. Secador solar de placa plana
Tabla 32	Valores numéricos de los factores que hacen que se optimicen las variables de respuesta t , T_{fm} , T_{gf} , Q_u ; usando el valor más alto posible de la función de deseabilidad. Secador solar de placa plana
Tabla 33	Valores obtenidos (predicción del modelo) de las variables de respuesta tratadas, aplicando los valores óptimos de los factores de la Tabla 32. Secador solar de placa plana
Tabla 34	Valores numéricos de los factores que hacen que se optimice las variables de respuesta t y L_s ; usando el valor más alto posible de la función de deseabilidad. Secador solar de placa plana
Tabla 35	Valores obtenidos de las variables de respuesta evaluadas, aplicando los valores óptimos de los factores de la Tabla 34. Secador solar de placa plana
Tabla 36	Datos de los efectos estimados de cada factor de entrada (incluyendo efectos las interacciones), con respecto al tiempo de secado (t). Secador con concentrador
Tabla 37	Análisis de varianza para el tiempo de secado. Secador con concentrador solar
Tabla 38	Coeficientes de regresión para cada efecto respecto al tiempo de secado. Secador solar de placa plana
Tabla 39	Valores estimados de los factores que hacen que se optimice t hacia su mínimo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador con concentrador solar
Tabla 40	Análisis de varianza para la temperatura media del aire de secado T_{fm} . Secador con concentrador solar
Tabla 41	Coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de regresión respecto a T_{fm} . Secador con concentrador solar
Tabla 42	Valores estimados de los factores que hacen que se optimice T_{fm} hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador con concentrador solar
Tabla 43	Análisis de varianza para T_{gf} . Secador con concentrador solar
Tabla 44	Coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de regresión con respecto a T_{gf} . Secador con concentrador solar
Tabla 45	Valores estimados de los factores que hacen que se optimice T_{gf} hacia $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador con concentrador solar

Tabla 46	Análisis de varianza respecto a n. Secador con concentrador solar
Tabla 47	Coefficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática de regresión con respecto a n. Secador con concentrador solar
Tabla 48	Valores estimados de los factores que hacen que se optimice n hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador con concentrador solar
Tabla 49	Valores numéricos de los coeficientes de regresión para cada efecto, usados para la ecuación matemática aproximada con respecto a Ls. Secador con concentrador solar
Tabla 50	Valores estimados de los factores que hacen que se optimice Ls hacia su máximo posible, obtenido con el análisis de superficie de respuesta. Secador con concentrador solar
Tabla 51	Valores numéricos de los factores que hacen que se optimicen las variables de respuesta t, T _{fm} , T _{gf} y n; usando el valor más alto posible de la función de deseabilidad. Secador con concentrador solar
Tabla 52	Valores obtenidos de las variables de respuesta evaluadas, aplicando los valores óptimos de los factores de la Tabla 51. Secador con concentrador solar
Tabla 53	Valores numéricos de los factores que hacen que se optimicen las variables de respuesta t, Ls y T _{gf} ; usando el valor más alto posible de la función de deseabilidad. Secador con concentrador solar
Tabla 54	Valores obtenidos de las variables de respuesta evaluadas, aplicando los valores óptimos de los factores de la Tabla 53. Secador con concentrador solar
Tabla 55	Valores numéricos de los factores que hacen que se optimice las variables de respuesta t, T _{fm} , Ls y T _{gf} ; usando el valor más alto posible de la función de deseabilidad. Secador con concentrador solar
Tabla 56	Valores obtenidos de las variables de respuesta evaluadas, aplicando los valores óptimos de los factores de la Tabla 55. Secador con concentrador solar
Tabla 57	Valores numéricos de los factores que hacen que se optimice las variables de respuesta t y T _{gf} ; usando el valor más alto posible de la función de deseabilidad. Secador con concentrador solar
Tabla 58	Valores obtenidos de las variables de respuesta tratadas, aplicando los valores óptimos de los factores de la Tabla 57. Secador con concentrador solar



Índice de Figuras

- Figura 1 Secador de bandejas o anaqueles con recirculación de aire calentado paralelo a la superficie de secado
- Figura 2 Secador de bandejas por lotes
- Figura 3 Secador indirecto al vacío con anaqueles
- Figura 4 Secadores continuos de túnel: a) de carretillas con flujo de aire a contracorriente, b) secador de banda transportadora con circulación cruzada
- Figura 5 Secador continuo de túnel con banda transportadora
- Figura 6 Esquema de un secador rotatorio con calentamiento directo
- Figura 7 Secador rotatorio industrial
- Figura 8 Secador de tambor rotatorio
- Figura 9 Secador de tambor rotatorio
- Figura 10 Diagrama de flujo para un sistema de secado por aspersion
- Figura 11 Secador por aspersion con sistema de centrifugacion
- Figura 12 Diagrama del balance general de masa y energia en el secado
- Figura 13 Curva típica del contenido de humedad libre (eje Y) vs. el tiempo de secado (eje X)
- Figura 14 Curva típica de la velocidad de secado R (eje Y) vs. el contenido de humedad libre (eje X)
- Figura 15 Secador solar directo
- Figura 16 Secadero solar indirecto
- Figura 17 Secadero solar mixto de flujo cruzado
- Figura 18 Colector solar de placa plana
- Figura 19 Distribucion de los rayos incidentes sobre una geometria parabólica
- Figura 20 Concentrador solar parabólico: a) 2D, b) 3D (doble curvatura)

- Figura 21 Sistema de Secado Solar-Generador de calor químico
- Figura 22 Sistema de secado solar con un sistema de deshumidificación
- Figura 23 Deshumidificador con sistema de captación solar térmico-eléctrico, usado en la finca Villa Loyola al sur de Colombia (Chachagüí Nariño)
- Figura 24 Esquema de los principales componentes energéticos del colector, donde IG: Irradiancia global; q: calor transferido (conducción y convección); E: Radiación emitida; qu: Calor útil; T: IG transmitida; abs: energía absorbida por la placa absorbente
- Figura 25 Sistema de recolección de energía solar con ductos inferiores para el paso de aire
- Figura 26 Sistema de recolección de energía solar simple, de una cubierta con paso de aire superior
- Figura 27 Sistema de recolección de energía solar con doble cubierta
- Figura 28 Convección libre con flujo interno en una cavidad rectangular
- Figura 29 Esquema de la distribución de energía en la parábola formada hacia el punto focal
- Figura 30 Café pergamino secado en patio y al sol, en la finca La Molienda del municipio de Colón Génova (Nariño), Colombia
- Figura 31 Café pergamino tipo Honey (amarillo ámbar) y café cereza de proceso seco o natural (al fondo) secados en bandejas al sol
- Figura 32 Secador tipo invernadero (Greenhouse) con estructura de polietileno, guadua y madera, techo de policarbonato, con bandejas de malla y ventanas móviles para controlar la corriente natural del aire, localizado en la finca Villa Loyola, municipio de Chachagüí (Nariño), Colombia
- Figura 33 Diagramas de operación en función del caudal de aire y del espesor de la capa de grano para el café pergamino ubicado en cámaras del secador
- Figura 34 Curvas de contenido de humedad de equilibrio del café pergamino, obtenidas de Cenicafé
- Figura 35 Curvas de contenido de humedad de equilibrio del café verde, obtenidas de Cenicafé
- Figura 36 Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo de la energía en el colector solar plano
- Figura 37 Regresión matemática para el ángulo crítico en función de los coeficientes b/a de la Tabla 1
- Figura 38 Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo de la energía en el colector solar plano
- Figura 39 Esquema de los componentes del balance de energía para la cubierta traslúcida
- Figura 40 Esquema de los componentes del balance de energía para la placa absorbente
- Figura 41 Gráfica para los datos de la Tabla 5
- Figura 42 Elementos geométricos y diferenciales del arco formado en la parábola del concentrador
- Figura 43 Componentes geométricos principales del colector solar de tipo



- Figura 44 Cilíndrico, para el cálculo del área en la superficie arqueada
Componentes geométricos principales del colector solar de tipo plano o rectangular, para el cálculo del área en la superficie receptora de la radiación solar concentrada
- Figura 45 Diagrama de flujo para el desarrollo del algoritmo de cálculo en el sistema de colector con concentrador parabólico.
- Figura 46 Esquema de la dirección de los rayos solares reflejados hacia el único punto focal, en donde también se aprecia el ángulo general formado desde el centro al final
- Figura 47 Gráfica de la distribución de humedad del grano vs. tiempo, aplicando la Ecuación (170), según el modelo para capa delgada MSU (Michigan State University)
- Figura 48 Gráfica de la velocidad de secado R (kg de agua evaporada/ (m²de área superficial de grano *h)) en función del tiempo (horas), según datos de humedad de la Tabla 6
- Figura 49 Esquema general de la plataforma principal de la simulación del proceso, en donde se digita los datos que condicionan el secado y, se muestra los datos de salida generados
- Figura 50 Plataforma principal de la simulación del proceso, en donde se digita los datos que condicionan el secado y se muestra los datos de salida generados. Corresponde a la sección de la cámara de secado
- Figura 51 Plataforma principal de la simulación del proceso, en donde se digita los datos que condicionan al colector solar y se muestra datos de salida generado
- Figura 52 Plataforma principal de la simulación del proceso, en donde se digita los datos que condicionan al colector solar
- Figura 53 Plataforma principal de la simulación del proceso
- Figura 54 Hoja de cálculo para las gráficas del proceso de secado, mostrando también la tabla de datos de humedad
- Figura 55 Hoja de cálculo correspondiente a los cálculos de las regresiones matemáticas de los elementos termodinámicos y de transferencia energética y másica empíricos de los materiales
- Figura 56 Plataforma respectiva a los cálculos base de las propiedades de transferencia de calor y masa, de radiación solar y todos aquellos necesarios para predecir matemáticamente el proceso de secado
- Figura 57 Gráfica de la distribución de la humedad del grano M en función del tiempo, usando el modelo para capa delgada MSU
- Figura 58 Distribución de la velocidad de secado R en función del contenido de humedad del grano M. R representa los kg de agua evaporada por unidad de área (m²) y tiempo (h). Secador solar de placa plana
- Figura 59 Distribución de la velocidad de secado R en función del tiempo. Secador solar de placa plana
- Figura 60 Gráfica de la distribución de la humedad del grano M en función del tiempo, usando el modelo para capa delgada MSU
- Figura 61 Distribución de la velocidad de secado R en función del contenido de humedad del grano M. R representa los kg de agua

- evaporada por unidad de área (m^2) y tiempo (h). Secador con concentrador solar parabólico
- Figura 62 Distribución de la velocidad de secado R en función del tiempo. Secador con concentrador solar parabólico
- Figura 63 Distribución de la parábola generada para el concentrador solar en una vista unidimensional
- Figura 64 Diagrama de Pareto del efecto de cada factor sobre el tiempo de secado para el secador solar de placa plana
- Figura 65 Efectos principales de cada factor sobre el tiempo de secado para el secador solar de placa plana
- Figura 66 Gráfica de superficie de respuesta obtenida al variar L_g y X_c respecto al tiempo t, mientras se mantienen fijos H_d , A_p , B y V_a . Secador solar de placa plana
- Figura 67 Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, respecto al tiempo t. Secador solar de placa plana
- Figura 68 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para el tiempo de secado t
- Figura 69 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para el tiempo de secado t
- Figura 70 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para el tiempo de secado t
- Figura 71 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para el tiempo de secado
- Figura 72 Diagrama de Pareto del efecto de cada factor sobre la temperatura media del aire T_{fm} . Secador solar de placa plana
- Figura 73 Efectos principales de cada factor sobre la temperatura media del aire T_{fm} . Secador solar de placa plana
- Figura 74 Gráfica de superficie de respuesta obtenida al variar L_g y X_c respecto a T_{fm} , mientras se mantienen fijos H_d , A_p , B y V_a . Secador solar de placa plana
- Figura 75 Diagrama de Pareto de la proporción del efecto que tiene cada factor sobre la temperatura final del grano T_{fg} . Secador solar de placa plana
- Figura 76 Efectos principales de cada factor sobre temperatura final del grano T_{fg} . Secador solar de placa plana
- Figura 77 Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, respecto a T_{fg} . Secador solar de placa plana
- Figura 78 Diagrama de Pareto del efecto de cada factor sobre el coeficiente de eficiencia n del colector. Secador solar de placa plana
- Figura 79 Efectos principales de cada factor sobre el factor n. Secador solar de placa plana
- Figura 80 Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, respecto a n. Secador solar de placa plana
- Figura 81 Diagrama de Pareto del efecto de cada factor sobre el calor útil Q_u



- del colector. Secador solar de placa plana
- Figura 82 Efectos principales de cada factor sobre el factor Q_u . Secador solar de placa plana
- Figura 83 Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, respecto a Q_u . Secador solar de placa plana
- Figura 84 Diagrama de Pareto del efecto de cada factor sobre la carga de café seco por unidad de bandeja L_s . Secador solar de placa plana
- Figura 85 Efectos principales de cada factor sobre el factor L_s . Secador solar de placa plana
- Figura 86 Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, respecto a L_s . Secador solar de placa plana
- Figura 87 Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores L_g y X_c y las variables de respuesta correspondientes. El punto donde se cruzan las líneas representa la optimización de la deseabilidad. Secador de placa plana
- Figura 88 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} , n , Q_u y L_s
- Figura 89 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} , n , Q_u y L_s
- Figura 90 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} , n , Q_u y L_s
- Figura 91 Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores L_g y X_c y las variables de respuesta t , t_{fm} , t_{gf} y Q_u . El punto donde se cruzan las líneas representa la optimización de la Deseabilidad. Secador de placa plana
- Figura 92 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} y Q_u
- Figura 93 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} y Q_u
- Figura 94 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} y Q_u
- Figura 95 Representación gráfica del diseño del equipo de secado de placa plana optimizado para las variables t , T_{fm} , T_{gf} y Q_u
- Figura 96 Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores L_g y X_c y las variables de respuesta t y L_s . El punto donde se cruzan las líneas representa la optimización de la Deseabilidad. Secador de placa plana
- Figura 97 Diagrama de Pareto del efecto de los factores sobre el tiempo de secado. Secador con concentrador solar
- Figura 98 Efectos principales de cada factor sobre el tiempo de secado t . Secador con concentrador solar
- Figura 99 Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas mediante áreas por color, tomando L_g y X_c respecto a t . Secador con concentrador solar
- Figura 100 Representación gráfica del diseño del equipo de secado con

- Figura 101 concentrador solar optimizado para el tiempo de secado t
Representación gráfica del diseño del equipo de secado con
concentrador solar optimizado para el tiempo de secado t
- Figura 102 Representación gráfica del diseño del equipo de secado con
concentrador solar optimizado para el tiempo de secado t
- Figura 103 Representación gráfica del diseño del equipo de secado con
concentrador solar optimizado para el tiempo de secado t
- Figura 104 Diagrama de Pareto del efecto que tiene factor sobre Tfm. Secador
con concentrador solar
- Figura 105 Efectos principales de cada factor sobre Tfm. Secador con
concentrador solar
- Figura 106 Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas
mediante áreas por color, respecto a Tfm. Secador con concentrador
solar
- Figura 107 Diagrama de Pareto del efecto que tiene cada factor sobre Tgf.
Secador con concentrador solar
- Figura 108 Efectos principales de cada factor sobre Tgf. Secador con
concentrador solar
- Figura 109 Gráfica de superficie de respuesta representando las respuestas
mediante áreas por color, respecto a Tgf. Secador con concentrador
solar
- Figura 110 Diagrama de Pareto del efecto que tiene cada factor en n. Secador
con concentrador solar
- Figura 111 Efectos principales de cada factor sobre n. Secador con
concentrador solar
- Figura 112 Gráfica de superficie de respuesta obtenida de los resultados,
variando Lg y Xc respecto a n mientras se mantienen fijos Hd,
Ancho, X y Y. Secador con concentrador solar
- Figura 113 Diagrama de Pareto del efecto que tiene cada factor en Ls. Secador
con concentrador solar
- Figura 114 Efectos principales de cada factor sobre Ls. Secador con
concentrador solar
- Figura 115 Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los
factores Lg y Xc y las variables de respuesta t, Tfm, Tgf y n.
El punto donde se cruzan las líneas representa la optimización de la
deseabilidad. Secador con concentrador solar
- Figura 116 Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores
Lg y Xc y las variables de respuesta t, Ls y Tgf. El punto donde
se cruzan las líneas representa la optimización de la deseabilidad.
Secador con concentrador solar
- Figura 117 Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores
Lg y Xc y las variables de respuesta t, Tfm, Ls y Tgf. El punto donde
se cruzan las líneas representa la optimización de la Deseabilidad.
Secador con concentrador solar
- Figura 118 Representación gráfica del diseño del equipo de secado con
concentrador solar optimizado para las variables t, T_fm, T_gf y L_S



- Figura 119 Representación gráfica del diseño del equipo de secado con concentrador solar optimizado para las variables t, T_{fm}, T_{gf} y L_S
- Figura 120 Representación gráfica del diseño del equipo de secado con concentrador solar optimizado para las variables t, T_{fm}, T_{gf} y L_S
- Figura 121 Representación gráfica del diseño del equipo de secado con concentrador solar optimizado para las variables t, T_{fm}, T_{gf} y L_S
- Figura 122 Gráfico sobrepuesto en donde se representa valores para los factores L_g y X_c y las variables de respuesta t y T_{gf} . El punto donde se cruzan las líneas representa la optimización de la deseabilidad. Secador con concentrador solar

Índice de Apéndices

Apéndice 1	Carta Psicrométrica de Grosvenor para el sistema Aire-Agua a presión atmosférica estándar (101,325 KPa), unidades del SI
Apéndice 2	Carta Psicrométrica de Grosvenor a alta temperatura para el sistema aire-agua a presión atmosférica estándar (29,92 inHg), unidades en el sistema inglés BTU
Apéndice 3	Esquema gráfico de la metodología para usar la carta psicrométrica de Grosvenor
Apéndice 4	Carta Psicrométrica de Mollier para el sistema aire-agua a presión atmosférica estándar (101,325KPa), unidades del S.I.
Apéndice 5	Conductividades térmicas de algunos materiales de construcción y aislantes
Apéndice 6	Tabulación de datos de conductividad térmica a distintas temperaturas
Apéndice 7	Conductividad térmica de aleaciones de cromo
Apéndice 8	Conductividad térmica de algunas aleaciones a altas temperaturas
Apéndice 9	Conductividad térmica de algunos materiales para refrigeración y aislantes de construcción
Apéndice 10	Conductividad térmica de aislantes a altas temperaturas
Apéndice 11	Conductividad térmica de materiales aislantes a temperaturas moderadas
Apéndice 12	Conductividad térmica de aislantes a bajas temperaturas
Apéndice 13	Difusividades térmicas de elementos seleccionados
Apéndice 14	Propiedades termofísicas de ciertas sustancias sólidas no metálicas
Apéndice 15	Propiedades termofísicas del aire seco a presión atmosférica
Apéndice 16	Propiedades termodinámicas del aire
Apéndice 17	Número de Prandtl del aire
Apéndice 18	Tabla de temperaturas para el agua saturada. En adición, el volumen específico y la energía interna
Apéndice 19	Tabla de presiones para el agua saturada. En adición de la Entalpía y Entropía
Apéndice 20	Propiedades de la atmósfera según la altitud
Apéndice 21	Propiedades de gas ideal del aire



Acerca de los autores

Sergio Luis Burbano Muñoz

Nació en Santiago de Cali y creció en Colón Nariño. Es estudiante de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad de Nariño y Técnico en Agroindustria Alimentaria, además de otros estudios como Catación de Café, Tostión y Comercialización de Cafés Especiales, Evaluación de Calidad del Café, Buenas Prácticas Agrícolas para la Producción de Cafés Especiales y Administración de Empresas Cafeteras. Su familia es productora de café especial, esto le ha impulsado investigar en los procesos del café, pues su Tesis se basa en la Tecnología de energía solar del café. Su pasatiempo es la guitarra y dibujar.

Oswaldo Osorio Mora

INGENIERO AGROINDUSTRIAL UGC. Alta especialización en tecnología de alimentos IATA, España. Especialista en Docencia universitaria, UDENAR. Doctor en Ingeniería de Alimentos, UPV, España. Docente investigador Titular departamento de procesos Industriales, facultad Ingeniería Agroindustrial, Universidad de Nariño. Áreas de experticia: fisiología y manejo postcosecha, tecnología de procesamiento de Fruver, formulación y evaluación de proyectos, ingeniería de procesos.. Cargos ocupados: docente, investigador, director de grupo de investigación A en Minciencias, coordinador del programa de doctorado en ciencias Agrarias (UDENAR), Investigador, coordinador y director de diversos proyectos del SGR. Decano de la facultad de Ingeniería Agroindustrial UDENAR.

Oscar Arango Bedoya

Ingeniero Agroindustrial, Máster en Ingeniería Ambiental y Doctor en Ciencia de los Alimentos. Investigador categoría Senior en Minciencias. Profesor Asociado de la Facultad de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad de Nariño, donde se desempeña principalmente en las áreas de Procesos Agroindustriales y Control y Evaluación de Calidad. Cofundador del grupo de investigación Tecnologías Emergentes en Agroindustria y miembro del Grupo de Investigación en Sensores Ópticos de la Universidad Autónoma de Barcelona. Ha estado a cargo de la cátedra de secado y deshidratación en el Doctorado en Ciencias Agrarias de la Universidad de Nariño.

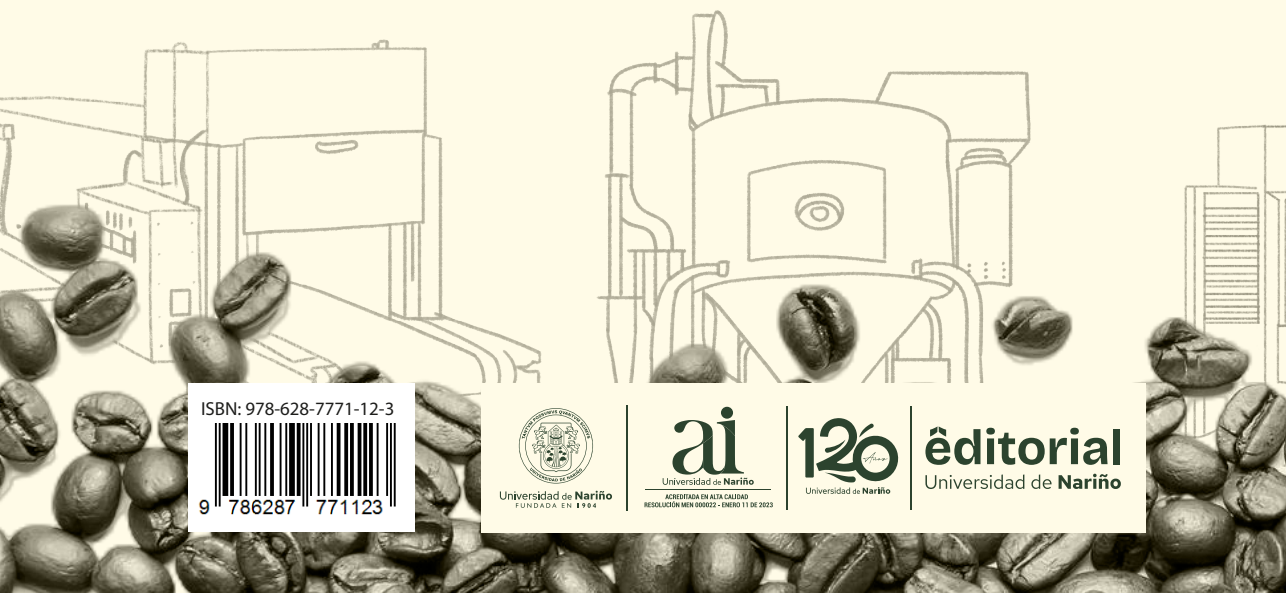
èditorial

Universidad de **Nariño**

Fecha de publicación: 2024
San Juan de Pasto Nariño-Colombia

El propósito de este libro es presentar los fundamentos a considerar para el desarrollo de equipos de secado solar aplicados al café, aunque los mismos son aplicables al diseño de secadores para otros productos agroalimentarios. El libro presenta en primer lugar los principios fundamentales del secado, como un proceso general enfocado al café; luego se aborda los análisis matemáticos para el diseño de secadores solares, y, finalmente, se muestra la aplicación de las temáticas anteriores en el diseño de secadores solares, incluyendo modelamientos matemáticos y bosquejos gráficos. Se da a conocer varios métodos de secado con energía solar, pero se hace énfasis en dos de ellos, debido a su mayor eficiencia y una tecnología más amigable con el ambiente. El primero es un equipo de secado con un método que implica recolectar la radiación solar mediante placas planas de absorción, mientras que el segundo es un equipo de secado que contiene un sistema de espejos parabólicos que permiten concentrar los rayos hacia un punto de recolección, con lo cual, ambos sistemas tienen la capacidad de calentar el aire de secado.

El catador de café Oscar Navia, al referirse al sistema tradicional de secado de café comentó que: “hay un subdesarrollo tecnológico, se requiere un gran espacio para secar y ocurren bastantes problemas al exponer el grano al ambiente como polvos e insectos junto con climas fluctuantes y el secado mecánico traspasa las temperaturas límites en que el café conserva su calidad”. La información de este libro propicia avances tecnológicos y muestra que hay métodos alternativos para el secado del café usando equipos que funcionan con energía solar, por lo tanto, se invita a los investigadores de esta área y a la comunidad cafetera a trabajar en el desarrollo e implementación de estas opciones.



ISBN: 978-628-7771-12-3



9 786287 771123



Universidad de Nariño
FUNDADA EN 1984



Universidad de Nariño
ACREDITADA EN ALTA CALIDAD
RESOLUCIÓN MEN 000022-ENERO 11 DE 2023



Universidad de Nariño

editorial
Universidad de Nariño