



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE LA MIXTECA

**“CONSTRUCCIÓN DE UN SECADOR DE CHAROLAS GIRATORIO
Y SU VALORACIÓN CON AJO (*Allium sativum L.*)”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO EN ALIMENTOS**

PRESENTA:

ALEYDA PÉREZ HERRERA

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. RAÚL SALAS CORONADO

HUAJUAPAN DE LEÓN, OAX. ABRIL DEL 2006

La construcción del equipo se realizó en el taller de Metal-Mecánica en la Universidad Tecnológica de la Mixteca, y la valoración en el Laboratorio de Agroindustrias de la misma Universidad.

A mis padres María Magdalena y Mario,
quienes son mi inspiración y mi motivo principal
para ser cada día mejor.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Mario Pérez Jiménez y María Magdalena Herrera Enríquez por su apoyo y amor incondicional en toda mi vida y por el ejemplo que han sido para mí.

A mis hermanas Mayra y Jazbeth Pérez Herrera por su cariño y compañía, esperando ser un ejemplo para ellas.

Al Dr. Raúl Salas Coronado por su apoyo en la elaboración de esta tesis, guiándome durante todo el proceso.

Al Ing. Christian Manuel Arvea Reyes por su apoyo en la construcción del equipo y por su gran amistad brindada en los últimos semestres de mi carrera.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca por formarme moral y académicamente.

A la Dra. Rosa Isela Guzmán Jerónimo por su apoyo en la realización de una parte importante de este trabajo.

A todos mis maestros que durante toda la carrera me ofrecieron sus conocimientos y su amistad.

A la memoria de mi abuelita Ruth Enríquez Jiménez por todos los momentos que pasé a su lado.

A Roberto Pérez Hernández por su gran apoyo al inicio de mi carrera y en el transcurso de ella, por sus consejos y compañía.

A mis amigos Lorena, Carlos, Luis, Mario, por su gran amistad durante muchos años y por todo el cariño que me han brindado.

A Jeanette, Berenice, Melina, Pedro y Fernando por ser mis compañeros de grupo durante toda mi carrera.

A todos aquellos de directa e indirectamente me apoyaron durante toda mi carrera y en la realización de este trabajo.

RESUMEN

La deshidratación, es un medio de conservación de los alimentos, donde el agua retirada durante este proceso puede ser eliminada de los alimentos por simples condiciones ambientales (solares) o por procesos controlados de deshidratación (secadores) en los que se someten a técnicas que emplean diferentes medios para evaporar el agua.

En el presente estudio se construyó un secador de charolas giratorio el cual opera de forma automática, teniendo un control de temperatura y velocidad de aire dentro de la cámara de secado, permitiendo con esto tener condiciones constantes durante todo el proceso, con el objetivo de obtener un producto final de calidad organoléptica buena.

Posteriormente se deshidrató ajo debido a que es un alimento ampliamente producido en el estado de Oaxaca, y al que se le atribuyen propiedades antimicrobianas y consumirlo puede ayudar a prevenir diversas enfermedades (Fenwick y col., 1985; Dorant y col., 1993; Huang y col., 1994), con su deshidratación, se obtuvieron curvas de secado empleando cuatro condiciones de operación M1 (50°C y 1.2 m/s), M2 (50°C y 0.9 m/s), M3 (40°C y 1.2 m/s) y M4 (40°C y 0.9 m/s) llegando a eliminar hasta un 97% del agua total que contiene el ajo (64 g de agua/100 g de muestra). Con esto se determinó el tiempo de secado para cada condición manejada, obteniéndose un tiempo de 5 h para M1, 6.5 h para M2 y 10 h para M3 y M4.

Para evaluar la apariencia final de cada muestra se determinó la diferencia de color de las muestras con respecto a una muestra de ajo fresco. Para esto se determinaron los parámetros L (luminosidad), a (intensidad del color amarillo), b (intensidad del color rojo), δE (diferencia de color de las muestras deshidratadas con respecto a la muestra de referencia), δC (intensidad de color de las muestras deshidratadas con respecto a la muestra de referencia) y el ángulo del Tono (grado de “tostado” o “dorado” de las muestras), mediante un espectrofotómetro de UV/visible. Las muestras deshidratadas mostraron un ligero color verde-amarillo y no mostraron diferencia significativa entre ellas en todos los parámetros determinados, excepto en el ángulo del Tono, donde la muestra M3 se ve más afectada por las condiciones de operación adquiriendo un color “tostado” con respecto a la muestra de ajo fresco.

ÍNDICE GENERAL

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANÁLISIS DE FUNDAMENTOS	3
2.1 Factores que intervienen en el proceso de secado	3
2.1.1 Aire como agente secante	3
2.1.2 Temperatura en el proceso de secado	3
2.1.3 El agua en los alimentos	4
2.1.3.1 Contenido de humedad	4
2.1.3.2 Actividad acuosa en los alimentos	5
2.1.4 Contenido de humedad del aire seco	6
2.2 Clasificación de los secadores	6
2.3 Tipos de secadores	8
2.3.1 Secador de túnel	8
2.3.2 Secador rotatorio	9
2.3.3 Secador de tambor	9
2.3.4 Secador por aspersión	11
2.3.5 Secador de lechos fluidizados	12
2.3.6 Secador de charolas	13
2.4 Curvas de secado	14
2.4.1 Descripción de las curvas de secado	16
2.5 Importancia del ajo	18
2.6 El color como indicador de calidad	20
3. HIPÓTESIS	22
4. OBJETIVOS	23
4.1 Objetivo general	23
4.2 Objetivos específicos	23
5. MATERIALES Y MÉTODOS	24
5.1 Materiales	24
5.2 Metodología para la construcción del secador	25

5.2.1 Definición del problema	25
5.2.2 Establecimiento de las especificaciones para la construcción	26
5.2.3 Construcción del secador	28
5.3 Metodología para la valoración del secador	40
5.3.1 Determinación de la humedad de ajo fresco	40
5.3.2 Determinación de humedad de equilibrio	41
5.3.3 Obtención de las curvas de secado	41
5.3.4 Determinación de la Actividad acuosa	43
5.3.5 Determinación de color en ajo fresco y seco	43
6. RESULTADOS Y DISCUSIONES	47
6.1 Funcionamiento del equipo	47
6.2 Determinación de la humedad en ajo fresco	48
6.3 Determinación de humedad de equilibrio	48
6.4 Obtención de las curvas de secado	49
6.5 Determinación de Actividad acuosa	52
6.6 Determinación de color en ajo fresco y seco	54
7. CONCLUSIONES	57
8. PERSPECTIVAS	58
9. REFERENCIAS	58
APÉNDICE A. Figuras y Fotografías correspondientes a la metodología	64
APÉNDICE B. Resultados de los datos triestímulos	71
APÉNDICE C. Construcción del Sistema electrónico de control de temperatura y velocidad del aire	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
1. Diagrama esquemático de un secador de túnel a contracorriente	9
2. Diagrama esquemático de un secador rotatorio con calentamiento directo	10
3. Diagrama esquemático de un secador de tambor con alimentación por remojo	11
4. Diagrama esquemático de un secador por aspersión con flujo horizontal paralelo	12
5. Diagrama esquemático de un secador de lecho fluidizado continuo	13
6. Secador de charolas o de bandejas	14
7. Ajo (<i>Allium sativum L.</i>)	19
8. Pasos que integran la metodología para la construcción del equipo	25
9. Vista frontal del secador	32
10. Vista lateral izquierda del secador	33
11. Vista lateral derecha del secador	34
12. Vista superior del secador	35
13. Vista inferior de la cámara de secado	36
14. Vista frontal del área de suministros	37
15. Vista inferior del área de suministros	38
16. Vista lateral, superior y frontal de una charola	39
17. Vista lateral y frontal del carrusel	39
18. Medidas sobre la lámina de aluminio del cubo interno y externo	64
19. Medidas y dobleces para la construcción del área de suministros	68
20. Medidas y dobleces para la construcción del monitor	69
21. Diagrama general para la caracterización del secador	40
22. Diagrama de cromaticidad CIE	55

ÍNDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía	Página
1. Construcción de los cubos interno y externo del secador	65
2. Unión de la parte posterior del cubo	65
3. Ubicación del poliestireno expandido entre los dos cubos	65
4. Vista inferior de la cámara de secado mostrando el ángulo de aluminio.	66
5. Empaque colocado en la puerta del secador	66
6. Bisagra colocada en la puerta del secador	66
7. Llave de mariposa empleada para cerrar y abrir la puerta del secador	67
8. Carrusel de acero inoxidable que sostendrá las charolas	67
9. Ubicación del carrusel dentro de la cámara de secado	67
10. Charola de acero inoxidable	68
11. Área de suministro desarmada	68
12. Ubicación de las resistencias en el área de suministros	69
13. Ubicación del ventilador en la parte inferior del área de suministros	69
14. Parte frontal del monitor	70
15. Preparación de las charolas con ajo	70
16. Vista frontal del secador de charolas giratorio construido	47
17. Vista interna de la cámara de secado	48

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
1. Características generales de operación de los secadores directos e indirectos	8
2. Datos triestímulos para la muestra M1 (50 °C-1.2 m/s).	71
3. Datos triestímulos para la muestra M2 (40 °C-0.9 m/s).	72
4. Datos triestímulos para la muestra M3 (50 °C-1.2 m/s).	73
5. Datos triestímulos para la muestra M4 (40 °C-0.9 m/s).	74
6. Datos triestímulos para la muestra de ajo fresco	75
7. Fracciones de x' , y' y z' de acuerdo al sistema CIE	54
8. Resultados de L, a, b, δE , δC y ángulo del Tono obtenidos para las diferentes muestras	56

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica	Página
1. Contenido de humedad en función del tiempo	15
2. Velocidad de secado en función del contenido de humedad	15
3. Velocidad de secado en función del tiempo	16
4. Curva de pérdida de humedad en función del tiempo para M1, M2, M3, M4	50
5. Velocidad de secado en función de la humedad libre para M1, M2, M3, M4	51
6. Velocidad de secado en función del tiempo para M1, M2, M3, M4	52
7. Contenido de agua en función de la humedad relativa para M1, M2, M3 y M4	53

LISTA DE ABREVIATURAS

A_w	Actividad acuosa
a	Área (m^2)
A	Área superficial del producto expuesta al secado (m^2)
Q	Calor (W)
δE	Cambio de color de las muestras deshidratadas con respecto al ajo fresco
C_p	Capacidad calorífica (J/kg °C)
X_{bh}	Contenido de humedad en base húmeda (kg agua/kg ss + kg agua)
X_{bs}	Contenido de humedad en base seca (kg agua/kg ss)
ρ_a	Densidad (kg/m^3)
\dot{m}	Flujo másico de aire (kg/s)
L^*	Grado de luminosidad
X^*	Humedad de equilibrio (kg de agua/kg ss)
X_1	Humedad libre (kg de agua libre/kg ss)
HR	Humedad relativa (%)
X	Humedad total del ajo (%)
a^*	Intensidad de color amarillo
b^*	Intensidad de color rojo
δC	Intensidad del color
X_p	Pérdida de humedad (%)
L_s	Peso de sólido seco usado (kg)
W_t	Peso del ajo a diferentes tiempos
S_s	Peso del sólido seco
W_f	Peso final del ajo
W_i	Peso inicial del ajo
ss	Sólido seco
T	Temperatura (°C)
R	Velocidad de secado (kg de agua/h m^2)
v	Velocidad lineal del aire (m/s)

1. INTRODUCCIÓN

Las técnicas de deshidratación probablemente son los métodos más antiguos y más importantes practicados por los humanos para la preservación de los alimentos. El primer secador del que se tiene conocimiento apareció en el siglo XVIII y era utilizado para secar frutas y vegetales (Van Arsdel y col., 1963). De ahí en adelante, los secadores industriales estuvieron estrechamente relacionados con las guerras, por ejemplo, vegetales secos fueron enviados de Canadá a África del Sur durante la guerra Bóer (1899-1902) y alrededor de 4500 toneladas de vegetales secos fueron transportados de Estados Unidos a Europa durante la Primera Guerra Mundial (1914-1918) (Vega y col., 2001).

El secado de sólidos se refiere generalmente a la separación de un líquido de un sólido por evaporación (Perry y col., 1992) y tiene, como consecuencia la reducción en peso y volumen, minimizando los costos de empaque, almacenamiento y transporte, permitiendo la estabilidad en el producto (Mujumdar, 1995). Esta operación tiene la ventaja de ser utilizada como una técnica de preservación, ya que los microorganismos que provocan la descomposición de los alimentos no pueden crecer y multiplicarse en ausencia de agua, además, muchas de las enzimas que causan los cambios químicos en alimentos y otros materiales biológicos no pueden funcionar sin agua (Moreno, 1985). Los microorganismos dejan de ser activos cuando el contenido de humedad se reduce por debajo del 10% en su peso, sin embargo, generalmente es necesario reducir este contenido de humedad por debajo del 5% en peso en los alimentos, para preservar su sabor y valor nutritivo (Geankoplis, 1998).

En la industria alimentaria el secado es una operación unitaria la cual puede llevarse a cabo mediante secadores directos e indirectos, continuos o discontinuos, esto dependerá de las cantidades de producto que se quiera deshidratar. Uno de los equipos más empleados para la deshidratación de frutas y hortalizas a nivel planta piloto con calentamiento directo y modo de funcionamiento discontinuo, es el secador de charolas estático también llamado secador de anaqueles, de gabinete o de compartimientos, el aire utilizado es arrojado por un

ventilador y calentado mediante resistencias eléctricas, vapor de agua o mediante un gas inerte. Generalmente los secadores de charolas tienen la desventaja de no secar el producto uniformemente, y para lograr esto se requiere de velocidades de aire elevadas, o bien, las charolas se necesitan sacar y voltear durante el proceso para lograr un secado uniforme (Singh y col., 1998). Lo anterior puede eliminarse añadiendo un movimiento mecánico a las charolas para eliminar la operación de voltearlas durante el proceso de secado.

El presente trabajo propone la construcción un secador de charolas giratorio con el motivo de disminuir las desventajas que tiene el secador de charolas estático, implementando para esto, un sistema que controla la temperatura y velocidad de flujo de aire a la que se desee trabajar dentro de la cámara de secado y un sistema de rotación de charolas, de esta forma se elimina el trabajo manual durante el proceso de secado con la obtención de productos deshidratados de buena calidad. Para comprobar el buen funcionamiento del equipo se realizaron curvas de secado a cuatro condiciones de operación diferentes M1 (50°C y 1.2 m/s), M2 (50°C y 0.9 m/s), M3 (40°C y 1.2 m/s) y M4 (40°C y 0.9 m/s) y para determinar la calidad final del producto, se montó una técnica con las muestras en solución, utilizando un espectrofotómetro de UV/visible, la cual arroja valores sobre las variaciones en el color de las muestras deshidratadas con respecto a una muestra de ajo fresco.

2. ANÁLISIS DE FUNDAMENTOS

La selección de un secador adecuado para la elaboración de productos alimenticios implica considerar aspectos como: definir el tipo de material que se desee deshidratar, capacidad de producción para determinar si se necesita un deshidratador continuo o discontinuo, conocer el contenido de humedad inicial del alimento, las características organolépticas y nutritivas que hacen atractivo el producto, entre otros (Perry y col., 1992). Sin embargo, existen aspectos que intervienen en el proceso de secado y es de suma importancia conocer la relación que tienen éstos con respecto a esta operación unitaria.

2.1 Factores que intervienen en el proceso de secado

2.1.1 Aire como agente secante. Los productos alimenticios pueden ser secados con aire, vapor sobrecalentado, en vacío, con gas inerte y con la aplicación directa de calor. Generalmente se utiliza aire como medio deshidratador debido a su abundancia, su conveniencia y a que puede ser regulado sobre el calentamiento del alimento (Fellows y col., 1994). El aire caliente causa la transferencia de calor que hace posible la deshidratación del alimento, además, conduce el aire húmedo a la salida del secador y la velocidad de secado aumenta a medida que incrementa la velocidad de aire que fluye sobre el alimento (Foust, 1990).

2.1.2 Temperatura en el proceso de secado. La temperatura de secado está estrechamente relacionada con la humedad relativa del aire, ya que influye en la calidad organoléptica del producto final, por ejemplo, si la temperatura del aire de secado es alta y su humedad relativa es baja, existe peligro de que la humedad que será eliminada de la superficie de los alimentos se elimine más rápido de lo que el agua puede difundirse del interior húmedo del alimento al exterior y se forme un endurecimiento o costra en la superficie del material. Esta capa impermeable o límite, retarda la libre difusión de la

humedad y puede ser evitada controlando la humedad relativa del aire circulante y la temperatura del mismo (Ress y col., 1991).

2.1.3 El agua en los alimentos. El agua es un contribuyente importante a las propiedades organolépticas de los alimentos. La pérdida de agua en los alimentos ricos en ella, o la ganancia de agua en alimentos en que es escasa, reduce su calidad organoléptica y por tanto, su aceptabilidad. Por otra parte, la presencia de agua a ciertas concentraciones en los alimentos, facilita su deterioro por acción de los microorganismos y las enzimas. Por lo tanto, retirando agua de los alimentos o haciéndola menos disponible se puede extender la vida útil de los mismos (Brennan y col., 1998).

Al considerar la influencia del contenido en agua en la estabilidad de los alimentos, no es el contenido total en agua lo importante, sino la cantidad de agua disponible para el crecimiento microbiano y la actividad química, para esto, es importante saber que una parte del contenido en agua de los alimentos se halla fuertemente ligada a puntos específicos de los componentes sólidos, esta agua es llamada “agua ligada” y otra cantidad adicional se halla menos firmemente ligada, se volatiliza fácilmente, se pierde en el calentamiento, se congela primero y es la única disponible para el crecimiento de los microorganismos o para intervenir en las transformaciones hidrolíticas, químicas, enzimáticas, etc., esta agua es llamada “agua libre” (Brennan y col., 1998; Badui, 1993).

2.1.3.1 Contenido de humedad. Se refiere a toda el agua en forma global presente en el alimento (Badui, 1993). Puede expresarse en base seca o húmeda. El contenido de humedad en base húmeda es el contenido de agua en relación con la masa total húmeda del sólido y se expresa de acuerdo a la Ecuación 1.

$$X_{bh} = \frac{\text{Kg de agua}}{\text{Kg de ss} + \text{Kg de agua}} \quad \text{Ec. (1)}$$

El contenido de humedad en base seca, es el contenido de agua con relación a la masa totalmente seca del sólido y se expresa de acuerdo a la Ecuación 2.

$$X_{bs} = \frac{\text{Kg de agua}}{\text{Kg de ss}} \quad \text{Ec. (2)}$$

2.1.3.2 Actividad acuosa en los alimentos. Del agua contenida en un alimento dependen las propiedades reológicas y de textura de éste, pero también es responsable en gran medida de las reacciones químicas, enzimáticas y microbiológicas, las cuales son las tres principales causas del deterioro de un producto. Para medir el agua que es capaz de propiciar las reacciones anteriores, se acuñó el término de actividad acuosa, que se viene empleando desde 1953 (Scout, 1953; Scott, 1957) el cual, representa el grado de interacción del agua con los demás constituyentes. Por definición, la actividad del agua (A_w) es la humedad relativa de equilibrio dividida entre 100 (Singh, 1998), como muestra la Ecuación 3.

$$A_w = \frac{HR}{100} \quad \text{Ec. (3)}$$

La A_w tiene una gran influencia en el crecimiento de los microorganismos; los que más agua requieren son las bacterias (>0.91), después las levaduras (>0.88) y finalmente los hongos (>0.80) (Verrips y col., 1981; Leistner y col., 1976). Según esto, muchos métodos de conservación de alimentos se basan precisamente en la reducción y el control de la A_w , como es el caso de los productos deshidratados y concentrados (Badui, 1993).

La humedad relativa puede ser calculada mediante la ecuación 3 y se puede asociar al contenido de humedad del alimento para determinar las condiciones de equilibrio en un proceso de secado, ya que si un sólido húmedo se pone en contacto con una corriente de aire con humedad y temperatura constantes, llegará un momento en que el sólido llegue a

un equilibrio con la humedad relativa, y en este caso, el sólido ya no perderá ni ganará humedad de su entorno (Geankoplis, 1998).

2.1.4 Contenido de humedad del aire seco. El contenido de humedad en el aire seco o humedad relativa es una variable importante en el secado de materiales con determinada humedad. Las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire seco y vapor de agua revisten gran interés en la etapa de post-cosecha de productos agrícolas, por el efecto que tiene la humedad del aire atmosférico sobre el contenido de humedad de los productos. El conocimiento de las condiciones de humedad y temperatura del aire es de gran importancia en muchos otros aspectos de la actividad humana, ya que la pérdida de peso depende de la humedad del aire en la cámara de almacenamiento; si la humedad del aire es baja, la pérdida de peso del alimento es elevada. Por definición, existe aire seco cuando se ha extraído todo el vapor de agua. El aire normalmente tiene vapor de agua asociado, lo que da origen al que se denomina aire húmedo, que es una mezcla binaria de aire seco y vapor de agua. La cantidad de vapor presente en la mezcla puede variar entre cero y un valor correspondiente al estado de saturación. Esto último corresponde a la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede soportar a una temperatura determinada (ASAE, 1980).

2.2 Clasificación de los secadores

En la industria alimentaria el secado puede realizarse en diversos equipos y la selección de uno de ellos dependerá del tipo y naturaleza del alimento, así como la capacidad de producción que se desee deshidratar, entre otros aspectos. Dentro de los secadores industriales podemos encontrar la siguiente clasificación:

Secadores industriales:

- **Secadores directos:** La transferencia de calor para el secado se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con los gases calientes del secado. También son llamados secadores por convección. Este tipo de equipos también pueden operar de forma continua o discontinua (Perry y col., 1992).
- **Secadores indirectos.** El calor se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. También son llamados secadores por conducción o de contacto. De igual forma que el secador directo, puede operar de forma continua o discontinua (Perry y col., 1992).
- **Secadores infrarrojos y secadores de calor dieléctrico.** Este tipo de equipo depende principalmente de la generación, transmisión y absorción de rayos infrarrojos y de la colocación de los sólidos dentro de un campo dieléctrico de alta frecuencia (Perry y col., 1992).

La Tabla 1, muestra las características generales de los dos tipos de secadores más utilizados en la industria alimentaria (Perry y col., 1992).

Tabla 1. Características generales de operación de los secadores directos e indirectos.

Secadores directos	Secadores indirectos
El contacto directo entre los gases calientes y los sólidos se aprovecha para calentar estos últimos y separar el vapor.	El calor se transfiere al material húmedo por conducción a través de una pared de retención de sólidos, casi siempre de índole metálica.
Las temperaturas de secado pueden ser hasta de 1000 K, que es la temperatura limitante para casi todos los materiales estructurales de uso común.	Las temperaturas de superficie pueden variar desde niveles inferiores al de congelación, en el caso de secadores de este tipo, hasta mayores de 800 K para secadores indirectos calentados por medio de productos de combustión.
El equipo de recuperación del polvo puede ser muy grande y costoso cuando se trata de secar partículas muy pequeñas.	La recuperación de polvos y materiales finamente pulverizados se maneja de un modo más satisfactorio en los secadores indirectos que en los directos.
Para secar a temperaturas bajas y cuando las humedades atmosféricas son excesivamente elevadas, se requiere deshumidificar el aire de secado.	Los secadores indirectos que utilizan fluidos de condensación como medio de calentamiento son en general económicos, desde el punto de vista del consumo de calor.
La velocidad de secado depende de la temperatura, velocidad de flujo y humedad relativa del aire.	La velocidad de secado depende del contacto que se establezca entre el material mojado y la superficie caliente.

2.3 Tipos de secadores

2.3.1 Secador de túnel. Estos secadores, Figura 1, se utilizan para secar frutas y hortalizas de forma semicontinua, en instalaciones de gran capacidad de producción y consisten en túneles que pueden tener hasta unos 24 m de longitud. El producto húmedo se extiende en capas uniformes sobre charolas, las cuales se apilan en carretillas dejando espacios entre las bandejas para que pase el aire de secado. Las carretillas cargadas se introducen de una en una, a intervalos adecuados en el túnel. A medida que se introduce

una carretilla por el “extremo húmedo” del túnel se retira otra de producto seco por el “extremo seco”. El aire se mueve mediante ventiladores, que lo hacen fluir horizontalmente entre las bandejas, aunque también se produce cierto flujo a través de las mismas. Normalmente se emplean velocidades de aire de entre 2.5 a 6.0 m/s (Brennan y col., 1998).

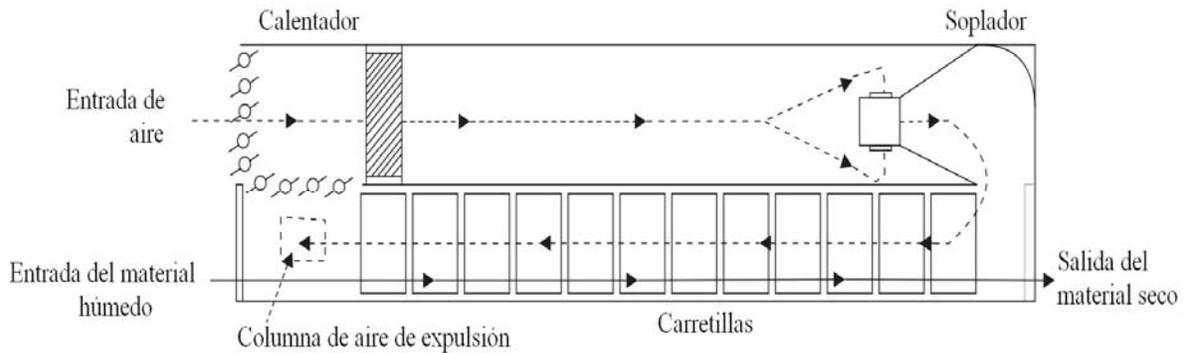


Figura 1. Diagrama esquemático de un secador de túnel a contracorriente.

2.3.2 Secador rotatorio. Consiste en un cilindro que gira y, por lo común, tienen una leve inclinación en relación con la horizontal. La longitud del cilindro varía de 4 a más de 10 veces su diámetro, que oscila entre 0.3 hasta más de 3 m. Los sólidos, por lo general granos de café y semillas que se introducen por un extremo del cilindro se desplazan a lo largo de él, debido a la rotación, el efecto de la carga y la pendiente del cilindro, y se descargan por el otro extremo como producto terminado. Los gases que circulan por el cilindro pueden reducir o aumentar la velocidad de movimiento de los sólidos, según la circulación del gas, ya sea a contracorriente o siga una corriente paralela con la circulación de los sólidos. Los equipos rotatorios, Figura 2, se aplican al procesamiento de sólidos con sistemas por lotes o continuos, que tienen un flujo relativamente libre, y el producto que descargan es granular (Perry y col., 1992).

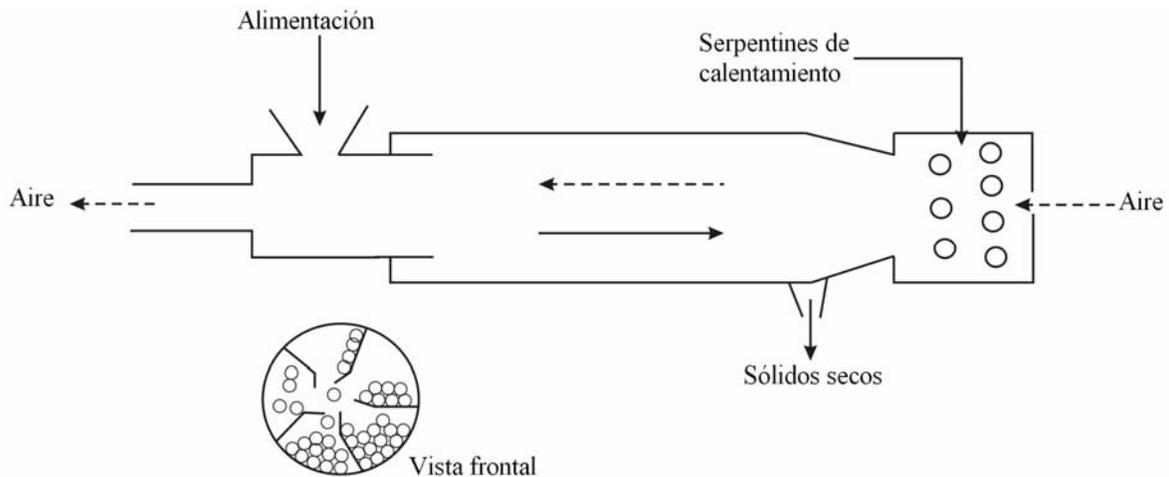


Figura 2. Diagrama esquemático de un secador rotatorio con calentamiento directo.

2.3.3 Secador de tambor. Los materiales fluidos y semifluidos, como soluciones, lodos, pastas y suspensiones como leche, sopas, alimentos infantiles, purés de papa, entre otros, pueden secarse en estos equipos. En este tipo de secadores, un tambor metálico giratorio, calentado internamente con vapor se sumerge en un tanque que contiene la sustancia por secar; una película delgada de la sustancia se retiene sobre la superficie del tambor. El espesor de la película se regula mediante un cuchillo repartidor; al ir girando el tambor, la humedad se evapora en el aire que lo rodea mediante el calor transferido a través del metal del tambor. El material seco se desprende continuamente de la superficie del tambor mediante un cuchillo. Para un secador de este tipo el factor que controla al proceso de secado es la transferencia de calor. El líquido o solución se calienta inicialmente hasta su punto de ebullición; entonces se desprende la humedad por ebullición a temperatura constante. Con frecuencia, los vapores se recogen en una campana con ventilación construida directamente sobre el secador (Treybal, 2001).

Las ventajas del secado en tambores, Figura 3, son sus velocidades de secado altas y su economía en el uso del calor. La limitación principal que tiene éste método es que solo puede aplicarse a alimentos líquidos, o en forma de papilla, capaces de resistir temperaturas relativamente altas (90°C) durante tiempos cortos de 2 a 30 s (Brennan y col., 1998).

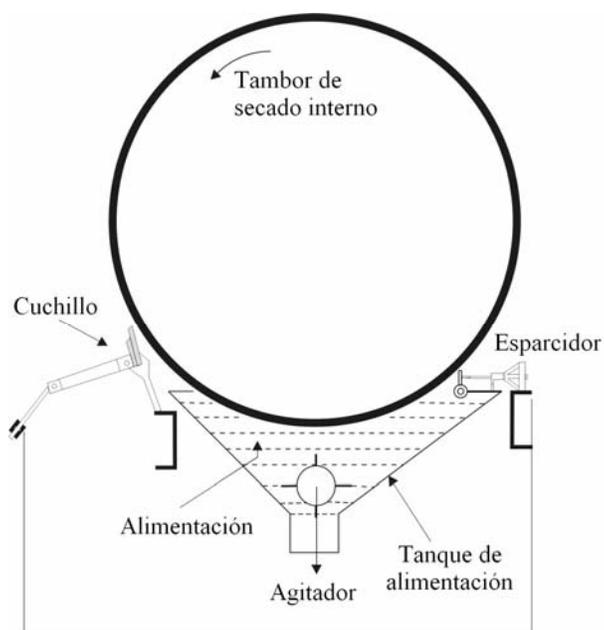


Figura 3. Diagrama esquemático de un secador de tambor con alimentación por remojo.

2.3.4 Secador por aspersión. Este tipo de secadores, Figura 4, se usa ampliamente en la industria alimentaria para secar soluciones y papillas. El producto se rocía en una corriente de gas caliente para obtener una lluvia de gotas finas. El agua se evapora de dichas gotas con rapidez y se obtienen partículas secas de sólido que se separa 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. Las principales características de este tipo de secado son unos tiempos de secado muy cortos de 1 a 20 s. Las gotas suelen tener diámetros del orden de 10 a 200 μm y por tanto, ofrecen al aire un área superficial por unidad de volumen muy grande, lo que da como resultado un proceso de secado muy rápido (Brennan y col., 1998). Es necesario asegurarse de que las gotas o partículas húmedas no choquen ni se adhieran a las superficies sólidas antes de que se hayan secado. Por consiguiente, se emplean cámaras bastante grandes. Los sólidos secos salen por el fondo de la cámara a través de un transportador de tornillo y los gases de escape fluyen hacia un separador de ciclón para filtrar las partículas muy finas. Las partículas que se obtienen son muy ligeras y bastante porosas (Geankoplis, 1998).

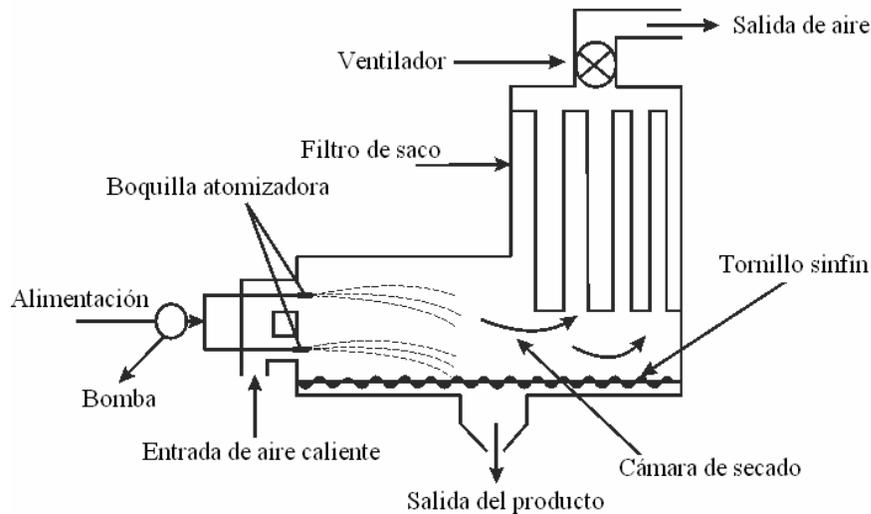


Figura 4. Diagrama esquemático de un secador por aspersión con flujo horizontal paralelo.

2.3.5 Secador de lechos fluidizados. En este tipo de secadores, el aire caliente es forzado a través de un lecho de sólidos, de forma que éstos se mantengan suspendidos en el aire. El aire caliente actúa como medio de fluidización y de secado. Estos secadores pueden operar de forma continua o discontinua, en la Figura 5 se muestra una unidad simple de funcionamiento continuo. La rejilla que soporta al lecho puede ser una simple placa perforada y algunas unidades poseen bases vibratorias para facilitar el desplazamiento del producto. En el conducto de salida del aire, se incorporan separadores de aire para recoger los sólidos finos. Estos secadores pueden operar a presión superior o inferior a la atmósfera. El secado en lechos fluidizados se ha aplicado industrialmente o a escala experimental a diversos productos como guisantes, judías, zanahorias, cebollas, gránulos de papa, cubos de carne, harina, cacao, café, sal y azúcar (Brennan y col., 1998).

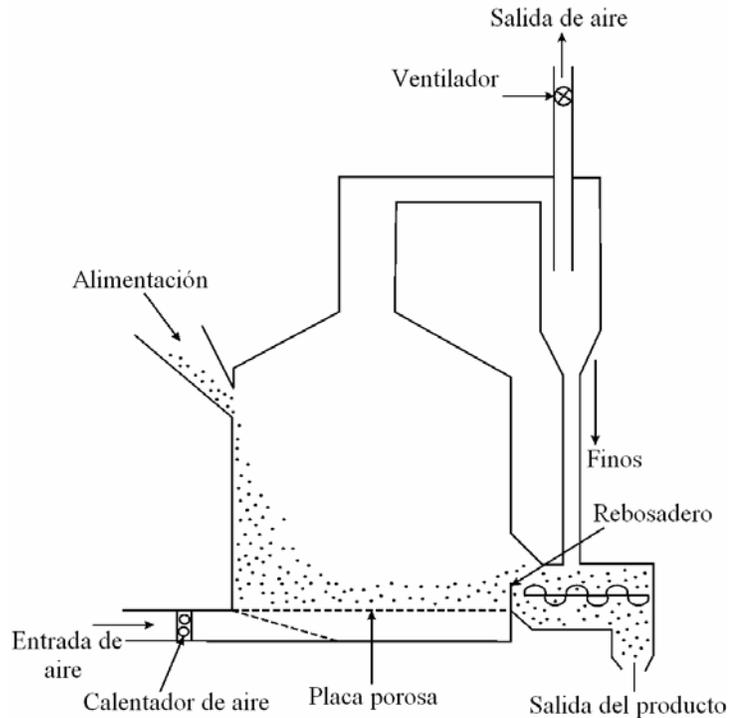


Figura 5. Diagrama esquemático de un secador de lecho fluidizado continuo.

2.3.6 Secador de charolas. También es llamado secador de anaqueles, de gabinete o de compartimientos. El funcionamiento de los secadores de bandejas depende del mantenimiento de una temperatura constante y una velocidad de aire uniforme sobre todo el material que se está secando. Conviene tener una circulación de aire con velocidad de 1 a 10 m/s para mejorar el coeficiente de transmisión de calor en la superficie y con el propósito de eliminar bolsas de aire estancado. La corriente de aire adecuada para este tipo de secadores depende de que el ventilador tenga una capacidad suficiente, del diseño de la red de ductos para modificar cambios repentinos de dirección y de desviadores correctamente ubicados. La corriente de aire no uniforme es uno de los problemas más graves que se presentan en el funcionamiento de los secadores de bandejas (Geankoplis, 1998). Es el secador más utilizado a nivel planta piloto, Figura 6, con calentamiento directo y modo de funcionamiento discontinuo, el material puede ser un sólido en forma de terrones o pasta, éste se esparce uniformemente sobre una bandeja de metal de 10 a 100 mm de profundidad, el aire utilizado es arrojado por un ventilador y calentado mediante resistencias eléctricas, vapor de agua o mediante un gas inerte. Después del secado, se abre

el gabinete y las bandejas se reemplazan con otras conteniendo más material para secar. Generalmente los secadores de bandejas operan por cargas, además tienen la desventaja de no secar el producto uniformemente, dependiendo de su posición en el secador. Por ello, se necesita girar las bandejas durante el proceso para lograr un secado uniforme (Singh y col., 1998).

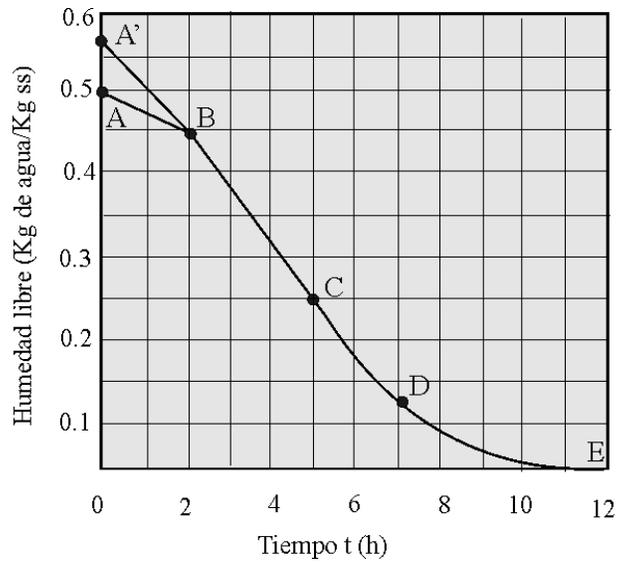


Figura 6. Secador de charolas o de bandejas.

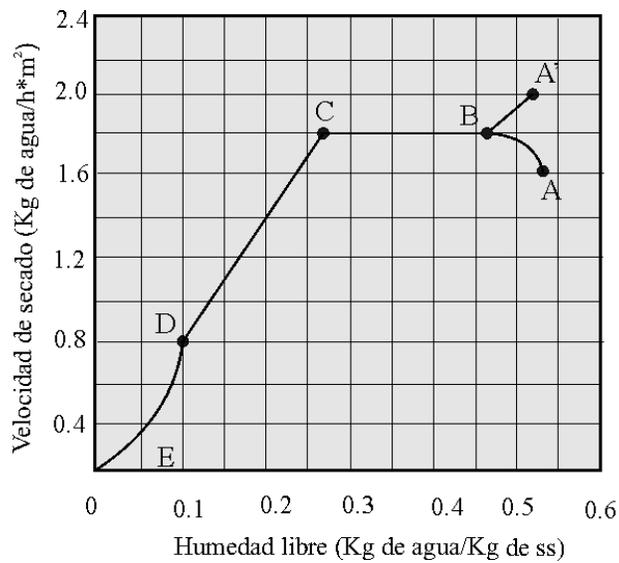
2.4 Curvas de secado

Cuando un sólido se seca experimentalmente, casi siempre se obtienen datos que asocian el contenido de humedad con el tiempo. La Gráfica 1, esta curva representa el caso general en que los sólidos mojados pierden humedad, primero por evaporación desde una superficie saturada del sólido, después sigue un periodo de evaporación de la superficie saturada que tiene un área que gradualmente va disminuyendo, y por último cuando el agua del interior del sólido se evapora. Esta curva indica que la velocidad de secado está sujeta a variar en función del tiempo o el contenido de humedad. Esta variación se ilustra con mayor claridad diferenciando gráfica o numéricamente la curva y haciendo una representación gráfica de la velocidad de secado en función del contenido de humedad en base seca, como se ilustra en la Gráfica 2, o como velocidad de secado en función del tiempo, como señala la Gráfica 3. Estas curvas de velocidad demuestran que el secado no

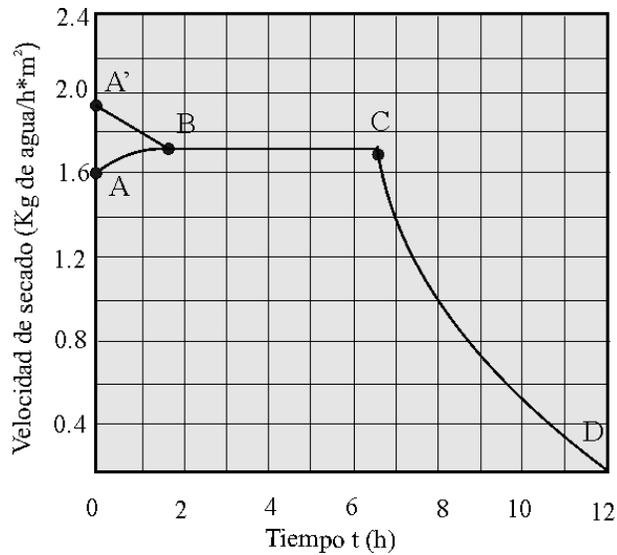
es un proceso suave y continuo en el cual existe un solo mecanismo que ejerza el control a lo largo de toda su duración (Perry y col., 1992).



Gráfica 1. Contenido de humedad en función del tiempo.



Gráfica 2. Velocidad de secado en función del contenido de humedad.



Gráfica 3. Velocidad de secado en función del tiempo.

2.4.1 Descripción de las curvas de secado. Las curvas antes mostradas representan el proceso de secado a condiciones constantes. Empezando en el tiempo cero el contenido inicial de humedad libre corresponde al punto A. Al principio el sólido suele estar a una temperatura inferior de la que tendrá al final y la velocidad de evaporación va en aumento, por el contrario, cuando el alimento está a una temperatura más elevada A', la velocidad de evaporación disminuye hasta llegar al punto B, en el cual, la temperatura de la superficie alcanza su valor de equilibrio. Este periodo inicial de ajuste en estado estacionario suele ser bastante corto y por lo general se pasa por alto en el análisis de los tiempos de secado (Geankoplis, 1998; Treybal, 2001). La recta entre el punto BC tienen una pendiente y velocidad constante. Durante este periodo, la superficie del sólido está muy húmeda al principio y sobre ella hay una película de agua continua. Esta capa de agua, es agua libre y actúa como si el sólido no estuviera presente. La velocidad de evaporación con las condiciones establecidas para el proceso, es independiente del sólido y esencialmente igual a la velocidad que tendría una superficie líquida pura. Si el sólido es poroso, la mayor parte del agua que se evapora durante el periodo de velocidad constante proviene de su interior. Este periodo continúa mientras el agua siga llegando a la superficie con la misma rapidez con la que se evapora (Geankoplis, 1998).

Los periodos de velocidad decreciente inician en el punto crítico de humedad C, al concluir los procesos de velocidad constante. En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener una película continua. La superficie ya no está totalmente húmeda, y la porción húmeda comienza a disminuir durante el periodo de velocidad decreciente hasta que la superficie queda seca en su totalidad, punto D. El segundo periodo de velocidad decreciente empieza en el punto D, aquí, el plano de evaporación comienza a desplazarse con lentitud por debajo de la superficie. El agua evaporada atraviesa el sólido para llegar hasta la corriente de aire. Es posible que la cantidad de humedad que se elimine durante este periodo sea bastante pequeña, pero aún así, el tiempo requerido puede ser largo (Geankoplis, 1998).

La existencia de un primer periodo de secado fue demostrada por la observación de una etapa de velocidad constante de secado. Sin embargo, con materiales altamente moldeables, toda la velocidad de secado es engañosa debido al decrecimiento sustancial de la superficie de intercambio. En frutos como la manzana, no se presenta una primera etapa de secado constante, debido a la alta porosidad del material (May y col., 2000). Adicionalmente, durante la primera etapa del proceso de secado, la velocidad del aire es significativa ya que él representa el parámetro que intensifica la transferencia de masa y calor (Lewicky y col., 1990).

Este trabajo se basó principalmente en reducir las desventajas con las que cuenta un secador de charolas estático. Una vez que se construyó el equipo, se realizó la deshidratación de ajo obteniendo curvas de secado con ajo (*Allium sativum L.*), y posteriormente una determinación del cambio de color de las muestras deshidratadas en solución con respecto a una muestra de ajo fresco. Por tal motivo se consideró importante incluir información sobre estos aspectos.

2.5 Importancia del ajo

El uso del ajo como alimento y como agente medicinal tiene sus orígenes en Asia. En el 2000 a.C. en China, formaba parte de la dieta diaria, especialmente cuando era consumido con alimentos crudos (Kahn, 1996; Moyers, 1996). En la medicina china le atribuían propiedades contra enfermedades respiratorias y digestivas, principalmente la diarrea e infestación por lombrices (Woodward, 1996), también se trataban la fatiga, dolor de cabeza, insomnio e impotencia (Kahn, 1996; Moyers, 1996). En la antigua India identificaron que tenía propiedades diuréticas y que ayudaba a la movilización de fluidos de los espacios extravasculares, reduciendo la presión sanguínea, disminuyendo el colesterol y la agregación de plaquetas (Steiner y col., 1996).

Actualmente, existen numerosas investigaciones enfocadas al estudio de los compuestos químicos del ajo, identificando un número importante de compuestos organosulfurosos responsables de las características sensoriales y fisiológicas que otorga (Abraham y col., 1976; Fenwick y col., 1984; Block y col., 1992).

El ajo (*Allium sativum* L.), Figura 7, contiene por lo menos 33 compuestos sulfurosos, varias enzimas, 17 aminoácidos y minerales tales como el selenio (Newall y col., 1996). Contiene una concentración alta de compuestos sulfurosos que ninguna otra especie del género *Allium* presenta. Estos compuestos son responsables del olor pungente y de muchos efectos medicinales que se le atribuyen (Song y col., 2002). El ajo posee actividad antimicrobiana (antibacterial y antifúngica) y consumirlo puede ayudar a prevenir la arterioesclerosis y enfermedades coronarias, así como la agregación de plaquetas, también influye en los parámetros de coagulación de la sangre, muestra actividad hipocolesterolemia e inhibición del cáncer gastrointestinal (Fenwick y col., 1985; Dorant y col., 1993; Huang y col., 1994).



Figura 7. Ajo (*Allium sativum*).

El diente de ajo intacto contiene el aminoácido aliina, el compuesto sulfuroso más abundante en ese vegetal. Cuando es cortado o triturado la enzima alinasa convierte a la aliina en alicina, la cual es un miembro de la clase de compuestos organosulfurosos descubierto en 1944 (Cavallito y col., 1944). La alicina es uno de los compuestos responsables de proveer el sabor característico, así como de otorgarle propiedades antimicrobianas al ajo.

Actualmente, el ajo es un producto que se comercializa de diversas formas como ajo en polvo, en gránulos, en puré, pasta y aceite. Sin embargo durante su procesamiento existe la formación de pigmentos coloridos, por ejemplo, el color verde, azul-verdoso o compuestos azulados (Josly y col., 1956; Lukes, 1986). El mecanismo para la producción de pigmentos del ajo empieza una vez que éste es cortado, cuando la enzima alinasa degrada a la isoaliina y sus análogos a tiosulfinatos y posteriormente, estos tiosulfinatos reaccionan con algunos aminoácidos y compuestos carbonílicos (formaldehído, acetaldehído, propionaldehído y acroleína) produciendo los pigmentos que generan una coloración rojiza (Block, 1992; Naganathan, 1992 y Lawson y col., 1991), sin embargo éste pigmento puede ser enmascarado por muchos otros compuestos verde-azulados formados (Kubec y col., 2004). Al involucrarse compuestos carbonílicos y amínicos se asume que están ocurriendo reacciones de Maillard (Kubec y col., 2004).

Se eligió secar ajo debido a que es un alimento ampliamente consumido ya sea como condimento para acompañar las comidas, o por sus propiedades medicinales que anteriormente se mencionaron y que le son atribuidas, debido a esto, es importante

encontrar mejores condiciones de procesamiento de secado del ajo, para obtener un producto con una apariencia aceptable por el consumidor.

2.6 El color como indicador de calidad

El color es una propiedad de la materia directamente relacionada con el espectro electromagnético y que, por lo tanto, se puede medir físicamente en términos de su energía radiante o intensidad, y por su longitud de onda. El ojo humano solo puede percibirlo cuando su energía corresponde a una longitud de onda que oscila entre 380 y 780 nm. Con esto, el color se puede definir como “parte de la energía radiante que el ojo humano percibe mediante las sensaciones visuales que se generan por la estimulación de la retina del ojo” (Kramer y col., 1970).

El color es una de las características más importantes que tienen los alimentos para su aceptación, ya que es el primer contacto que tiene el consumidor con los productos. Los alimentos tanto en forma natural como en forma procesada, presentan un color característico y bien definido mediante el cual el consumidor los identifica, cualquier cambio que éste sufra puede causar el rechazo de los productos. Los colores de los alimentos se deben a distintos compuestos, principalmente orgánicos, algunos de ellos se producen durante su manejo y procesamiento y otros que son pigmentos naturales o colorantes sintéticos añadidos. Cuando se someten a tratamientos térmicos, los alimentos desarrollan tonalidades que van desde un ligero amarillo hasta un intenso café, generados por los productos de las reacciones de Maillard y de caramelización; en otras ocasiones, los pigmentos que contienen se alteran y cambian de color (Badui, 1999).

El color de un objeto tiene tres atributos: **Matiz**; es la clase de color, y está determinado por el valor exacto de la longitud de onda de la luz reflejada. Unos cuantos nanómetros de diferencia significan la mezcla con otro color y, por lo tanto, un tono diferente (Anzaldúa, 1990; Calvo y col., 1997). **Brillo**; está relacionado con la reflectancia

o transmitancia del color (Ranganna, 1991). **Saturación**; puede ser definido como el grado de mezcla que tenga un color con el blanco (Ranganna, 1991).

Para medir el color, es necesario relacionar el matiz, el brillo y la saturación del color con las propiedades de la luz que estimulan la retina. La cantidad de luz del espectro visible reflejada o transmitida por un cuerpo coloreado puede ser medida mediante un espectrofotómetro. Una curva espectral da una completa especificación del color en términos físicos, ya que muestra la intensidad de la luz a diferentes longitudes de onda.

Con la finalidad de especificar un color con bases científicas, la Comisión Internacional de Iluminación (CIE) definió un espacio físico de colores fundado en la teoría de la percepción tricromática. Ésta teoría se basó en la igualación de colores mediante la mezcla de cantidades apropiadas de tres estímulos fundamentales: rojo, verde y azul, los cuales se designan con las letras **X**, **Y** y **Z**, respectivamente (Calvo y col., 1997). Entendiendo como estímulos los colores imaginarios rojo, verde y azul, y la cantidad que de ellos se requiere para formar un color se llama valor triestímulo (Ranganna, 1990). Para especificar un color según el sistema CIE se necesitan las coordenadas de cromaticidad **x**, **y**. La representación de los colores espectrales en términos de **x** y **y**, da lugar al gráfico en forma de herradura denominado diagrama de cromaticidad (Figura 22) (Calvo y col., 1997).

Otro sistema que se utiliza para identificar un color en un producto es el Sistema Hunter. Este sistema relaciona los parámetros **L**, **a** y **b**, donde **L** corresponde a la luminosidad, **a** define el componente rojo-verde; rojo para valores positivos y verde para valores negativos, y el parámetro **b** define el componente amarillo-azul; amarillo para los valores positivos y azul para los valores negativos (Calvo y col., 1997).

3. HIPÓTESIS

Con la construcción del secador de charolas giratorio se podrá obtener un producto deshidratado homogéneamente y de buena calidad sensorial. Así como minimizar la manipulación durante el proceso de secado.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Construir un secador de charolas giratorio y validar su funcionamiento mediante la deshidratación de ajo a diferentes condiciones, obteniendo un producto deshidratado homogéneamente y con una apariencia aceptable.

4.2 Objetivos específicos

- Construir el secador de charolas giratorio con los materiales apropiados para su mejor funcionamiento y, con un sistema electrónico confiable para el control de las variables del sistema (temperatura y velocidad de flujo de aire).
- Deshidratar ajo a diferentes condiciones de temperatura y velocidad de aire, obteniendo sus respectivas curvas de secado.
- Determinar la apariencia del ajo deshidratado mediante la obtención del color de las muestras deshidratadas, y haciendo una comparación con respecto a una muestra de ajo fresco.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Materiales

Para la construcción se utilizaron los siguientes materiales:

- 1 Lámina de Aluminio de 3 x 1.20 m calibre 14
- 1 Lámina de acero inoxidable de 3 x 1.20 m, calibre 14
- 4 Placas de poliestireno expandido de 0.02 m, de grosor como aislante térmico
- 6 Barras de suministro de acero inoxidable de 5/16 x 1 m
- 1 Placa de 1.50 x 0.60 m. de asbesto como aislante térmico
- 2 Bisagras de 7.5 cm de largo
- 1 Bisagra de 5 cm de largo
- 2 Ángulos de aluminio de $\frac{3}{4}$ de pulgada
- 2 Chumaceras
- 1 Motor monofásico de 186.5 W
- 1 Ventilador de 10.6 W
- 2 Resistencias de 850 y 800 W cada una

Para la construcción del sistema electrónico vea el Apéndice C, en el cual se enlistan los materiales empleados, así como la forma de elaboración de los circuitos.

5.2 Metodología para la construcción del secador

Para construir el secador de charolas giratorio se siguieron los pasos que muestra la Figura 8.

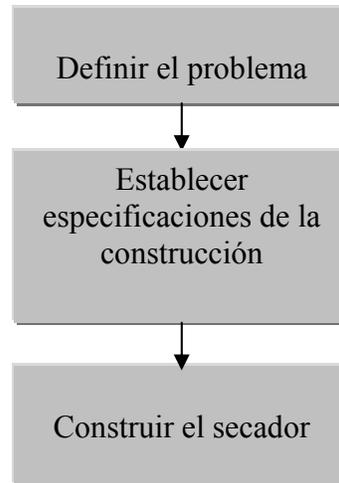


Figura 8. Pasos que integran la metodología para la construcción del equipo.

5.2.1 Definición del problema. Como se mencionó anteriormente, los secadores de charolas estáticos son los más utilizados a nivel planta piloto, sin embargo tienen la desventaja que cuando operan a velocidades de flujo de aire bajas (1-5 m/s), generalmente es necesario cambiar de posición las charolas que contienen el alimento con el fin de que éste último se deshidrate de forma homogénea, sin embargo esto incrementa tanto el tiempo de operación como el trabajo. Se podría pensar que el incrementar las velocidades de flujo de aire sería una solución, sin embargo, cuando se deshidratan alimentos poco densos, pueden volarse y con esto, disminuir la eficiencia de la cantidad final de producto seco, además de incrementar el consumo energético durante la operación (Singh y col., 1998). Es por esto que se propone la construcción de un secador de charolas giratorio con el fin de obtener una distribución de calor uniforme dentro de la cámara de secado, teniendo como resultado, la obtención de un producto deshidratado de buena calidad y eliminando la manipulación durante el proceso de secado, ya que el equipo opera de forma electrónica teniendo un regulador de velocidad de aire y un sistema que controlará la temperatura del equipo durante todo el proceso. Para observar los gradientes de temperatura dentro de la cámara se colocaron tres sensores ubicados en la parte superior, media e inferior del equipo.

Obteniendo con esto, un secador que opera sin problemas hasta 24 h para realizar un proceso de deshidratación.

5.2.2 Establecimiento de las especificaciones para la construcción. Dentro de las especificaciones se encuentran las siguientes:

- Para dimensionar el equipo, se estableció una cantidad inicial de material a secar, para ello, se propuso 1 kg de ajo fresco, el cual será distribuido en 4 charolas de acero inoxidable, con una capacidad de 0.250 kg aproximadamente de ajo por charola. Para deshidratar esta cantidad de producto, se propuso construir un cubo de 40 cm de arista, por lo que las dimensiones de las charolas fueron de 0.36 m x 0.10 m dando un área de 0.036 m² por charola.
- El manejo de los alimentos debe llevarse a cabo en equipos que sean adecuados para mantener un alimento inocuo, es por esto, que la mayoría de ellos se elabora con acero inoxidable, sin embargo, en este caso se empleó lámina de aluminio de calibre 14 para la construcción de la parte exterior del equipo, ya que es un material económico y resistente a la oxidación. Para la construcción interna y para la elaboración de las charolas se empleó lámina de acero inoxidable de calibre 14, ya que esta parte estará en contacto directo con los alimentos.
- Para que el eje que sostiene a las charolas gire adecuadamente y con la menor fricción posible, se utilizó un par de chumaceras.
- Tomando en cuenta que la cámara de secado debe ser adiabática, y la temperatura máxima de operación puede ser de 60 °C, se eligió poliestireno expandido comúnmente llamado unicel de 2 cm de grosor, como aislante térmico.
- Se eligió una llave de mariposa para abrir y cerrar fácilmente la puerta del secador, además de que con este tipo de llave se puede presionar lo suficiente la puerta, reduciendo la transferencia de calor. También se colocó un empaque, en la parte interna de la puerta cubriendo toda la orilla de la misma.
- Para el suministro de aire se optó por utilizar un ventilador de 10.6 W, este proporcionó una velocidad de flujo de aire máxima de 1.2 m/s y fue colocado en la parte inferior del área de suministros, siendo desmontable para posteriores cambios.

- Para conocer el suministro de calor necesario para calentar el aire de una temperatura promedio ambiental de 25°C a 50°C máximo se utilizó la Ecuación 4, donde el ΔT la diferencia de temperatura de 25°C (ambiental) a 50°C.

$$Q = \dot{m}C_p\Delta T \quad \text{Ec. (4)}$$

Q	Calor (W)	
\dot{m}	Flujo másico de aire (kg/s)	
C_p	Capacidad calorífica (J/kg°C)	1005
ΔT	Diferencia de temperatura (°C)	25

El valor del flujo másico de aire, \dot{m} , se calculó mediante la Ecuación 5.

$$\dot{m} = a\rho_a v \quad \text{Ec. (5)}$$

ρ_a	Densidad del aire (Kg/m ³)	1.1
v	Velocidad lineal del aire (m/s)	1.2
a	Área (m ²)	0.036

Dando como resultado 1,243.7 W para calentar el aire de una temperatura ambiental promedio de 25°C a 50°C, basándonos en esto, se compraron 2 resistencias, las cuales proporcionaron 1,650.0 W para llevar a cabo los procesos de secado.

- El lugar donde se colocó la resistencia fue cubierto en la parte interna por asbesto como aislante térmico, ya que es el lugar donde hay la mayor acumulación de calor y por lo tanto podría ocasionar accidentes en el momento de manipular el equipo. La sección que corresponde a las resistencias eléctricas es desmontable con la finalidad de poder manipular este lugar en el momento que se requiera.
- El monitor también es desmontable para permitir el cambio de algún componente del sistema electrónico.

5.2.3 Construcción del secador. Para la construcción del equipo se siguió una serie de pasos que se muestran a continuación. Las Figuras y Fotografías a las que se hace referencia se encuentran en el Apéndice A.

1. Para la elaboración de la cámara de secado, se construyeron 2 cubos, el interno de 40 cm de arista y el externo de 44 cm de arista, y entre ambos se colocó el poliestireno expandido de 2 cm de grosor. En la Figura 18 se presentan las medidas que se hicieron sobre la lámina de aluminio y la línea punteada que se logra distinguir muestra el lugar donde se hicieron los cortes. Obteniendo entre los dos cubos, 6 partes, 2 rectángulos etiquetados con los números 1, 2, 3 y 4, y 4 cuadros etiquetados con los números 5 y 6.
2. El cuadrado número 3 de ambos cubos es la parte superior del secador, por lo tanto se hizo un orificio en forma de rectángulo de 10 x 5 cm utilizando una Fresadora Modelo EM3116, que sirvió para la salida del aire húmedo.
3. El cuadrado número 1 de ambos cubos es la parte inferior del secador, y al cual se le hizo un orificio en forma de rectángulo de 10 x 36 cm, que es la entrada del aire caliente a la cámara de secado.
4. Posteriormente los cuadrados 1, 2, 3 y 4 de ambos cubos se doblaron y soldaron formando un semicubo como muestra la Foto 1 y el cuadrado 5 se soldó en la parte posterior del semicubo como muestra la Foto 2.
5. Después se colocó el poliestireno expandido entre los dos cubos formados quedando como muestra la Foto 3.
6. Entorno a la entrada de aire se le colocó un ángulo de 90° de aluminio de $\frac{3}{4}$ de pulgada con el motivo de embonar el área de suministro donde se ubican las resistencias y el ventilador que forman parte del equipo, Foto 4.
7. A la puerta se le colocó un empaque negro como muestra la Foto 5, para evitar la fuga de aire y pérdida de calor durante el proceso de secado.
8. Se colocaron las dos bisagras de 7.5 cm a 4 cm de la orilla superior e inferior del lado derecho del semicubo como muestra la Foto 6, sujetándolas con 6 remaches cada una.

9. A la puerta se le colocó una llave de mariposa para presionar lo suficiente y reducir la pérdida de calor. La llave quedó sostenida con 3 remaches como muestra la Foto 7.
10. Con un suministro de acero inoxidable de 0.8 cm de grosor se formó el carrusel que sostiene a las charolas. Si el carrusel es visto de forma horizontal como muestran las Fotos 8 y 9, tiene una longitud de 48 cm y un diámetro de 28 cm. Posteriormente se hicieron dos perforaciones a los lados de la cámara de secado para sostener el carrusel mediante el eje. De los 48 cm de largo del eje, se utilizaron 2 cm del lado izquierdo para introducirlo en una chumacera y otros 2 cm para montarlo en el motor.
11. Se construyeron 8 charolas de acero inoxidable doblándolo y cortándolo de tal manera que las charolas quedaran con medidas de 10 cm de ancho por 36 cm de largo y 2 cm de alto. A estas charolas se le hicieron perforaciones de 0.2 cm de diámetro quedando como muestra la Foto 10.
12. Para la construcción del área de suministros se hicieron las medidas que muestra la Figura 19 con un flexómetro y los dobleces con una Dobladora Dizher sobre la lámina de aluminio. Los ángulos que muestran la parte posterior y frontal fueron de 45° y son las líneas punteadas que se muestran en la Figura 19.
13. Una vez que se tuvieron estas partes para construir el área de suministros, se abrió una puerta como muestra la Foto 11 de 36 cm de ancho x 32 cm de largo. Posteriormente se le colocó un ángulo de aluminio de $\frac{3}{4}$ de pulgada en la parte descubierta para poder sostener la puerta por medio de 6 pijas. Después se cortaron 4 placas rectangulares de asbesto con el propósito de funcionar como un aislante térmico con capacidad para soportar temperaturas por arriba de los 100°C y colocarlas en la parte donde irán las resistencias. Las placas de asbesto fueron 2 de 10 x 20 cm y 2 de 37 x 20 cm y es la parte oscura que se logra distinguir en la Foto 11.
14. En la Foto 12, se muestra la forma en que se colocaron las resistencias en el área de suministros. Las resistencias alargadas quedaron cubiertas en los extremos por unas rondanas de porcelana con el propósito de aislar el calor y fueron sostenidas con 2 placas de aluminio las cuales se sujetaron con 2 pijas cada una. La resistencia de

espiral quedó sostenida mediante 3 trozos de aluminio sujetos con 3 pijas en el asbesto.

15. El ventilador quedó sostenido en la parte inferior del área de suministros mediante un ángulo de aluminio de $\frac{3}{4}$ de pulgada el cual está atravesado a lo ancho y sujetado mediante 4 remaches como muestra la Foto 13.
16. Las medidas para construir el monitor se muestran en la Figura 20, donde las partes A, B y C se hicieron por duplicado. La parte A corresponde a la parte frontal y posterior del monitor, B es la parte superior e inferior del monitor y la parte C conforma a la pared interior del monitor cubriendo el motor que hace girar a las charolas y soporta al sistema electrónico, Foto 14. La parte D es la parte lateral derecha del monitor. Las líneas punteadas se doblaron para formar pestañas. Las partes A, B y C se unieron con remaches para quedar fijas y la parte D se unió con 12 pijas para hacerla desmontable y que en caso de ser necesario permita arreglar o cambiar algunas partes del sistema electrónico.
17. Como se mencionó anteriormente, la parte A se hizo por duplicado donde una de ellas es la parte frontal del monitor, por lo tanto con ayuda de la Fresadora se hicieron algunos cortes como muestra la Foto 14, con el motivo de colocar la pantalla, el teclado, los interruptores, los botones y los focos que ayudarán a identificar las condiciones de secado. Estos aditamentos se describen a continuación de forma descendente de acuerdo a la Foto 14:
 - Una pantalla que indica la temperatura de operación así como la velocidad de flujo de aire a la que se está operando y muestra la temperatura de cada uno de los tres sensores.
 - Un teclado que sirve para ingresar la temperatura a la que se desea operar el equipo en el momento que la solicite la pantalla.
 - El primer interruptor, se colocó para encender los circuitos y pedir que se ingrese la temperatura.
 - El segundo interruptor sirve para encender el motor que hace girar las charolas y un regulador para la intensidad de la velocidad radial de las charolas.
 - El tercer interruptor sirve para encender el ventilador y un regulador de la velocidad de flujo.

- El cuarto y último interruptor sirve para encender las resistencias. Los cuatro interruptores tienen focos que indican si están apagados o encendidos.
- En la parte inferior hay tres botones que al oprimirlos muestran la temperatura de cada sensor.

Las Figuras 9-17 muestran los esquemas de las diferentes vistas del secador con sus dimensiones principales. Para esto, se utilizó el Software Corel Draw 12 para realizar los planos del equipo a una escala de 1:100.

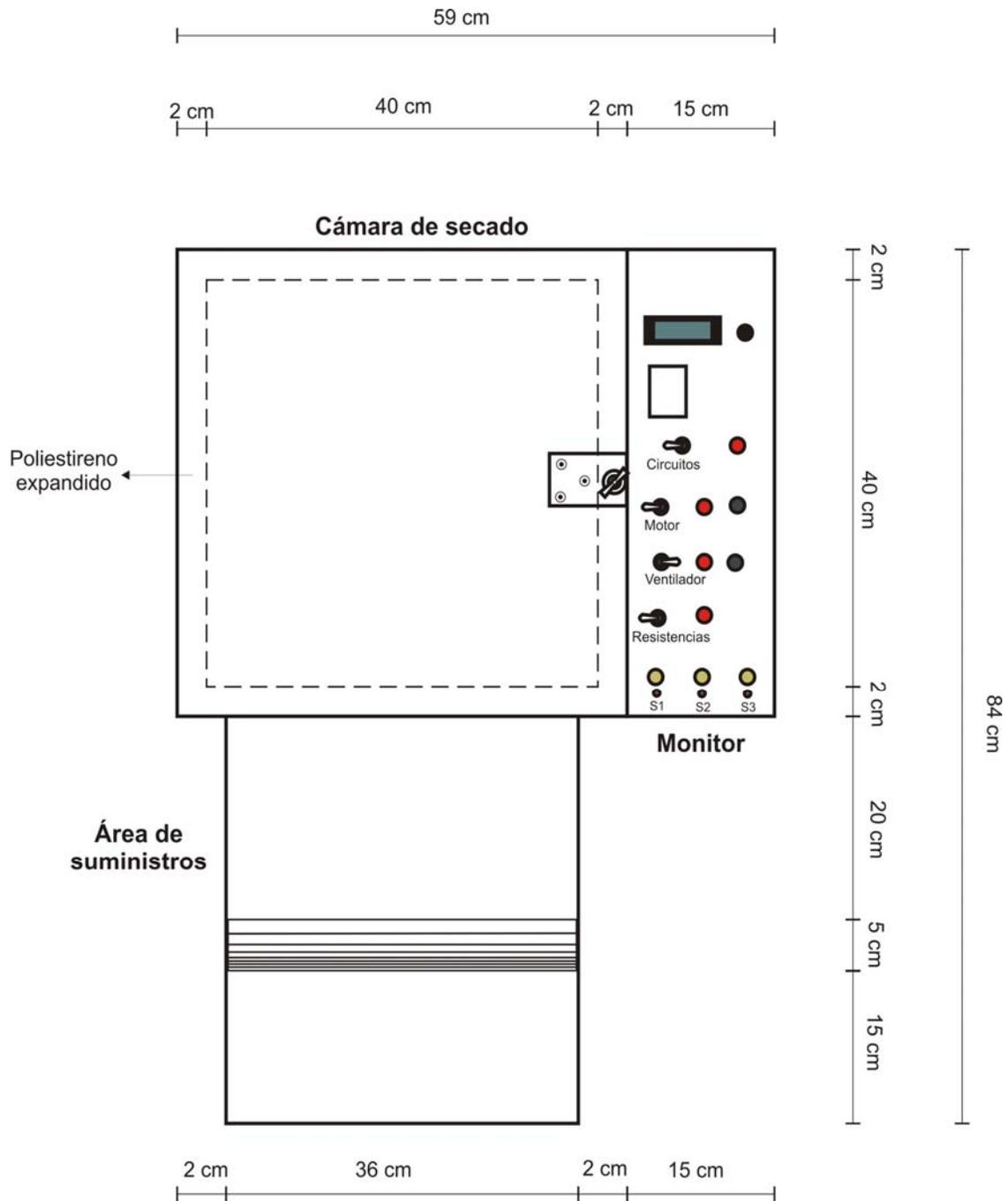


Figura 9. Vista frontal del secador.

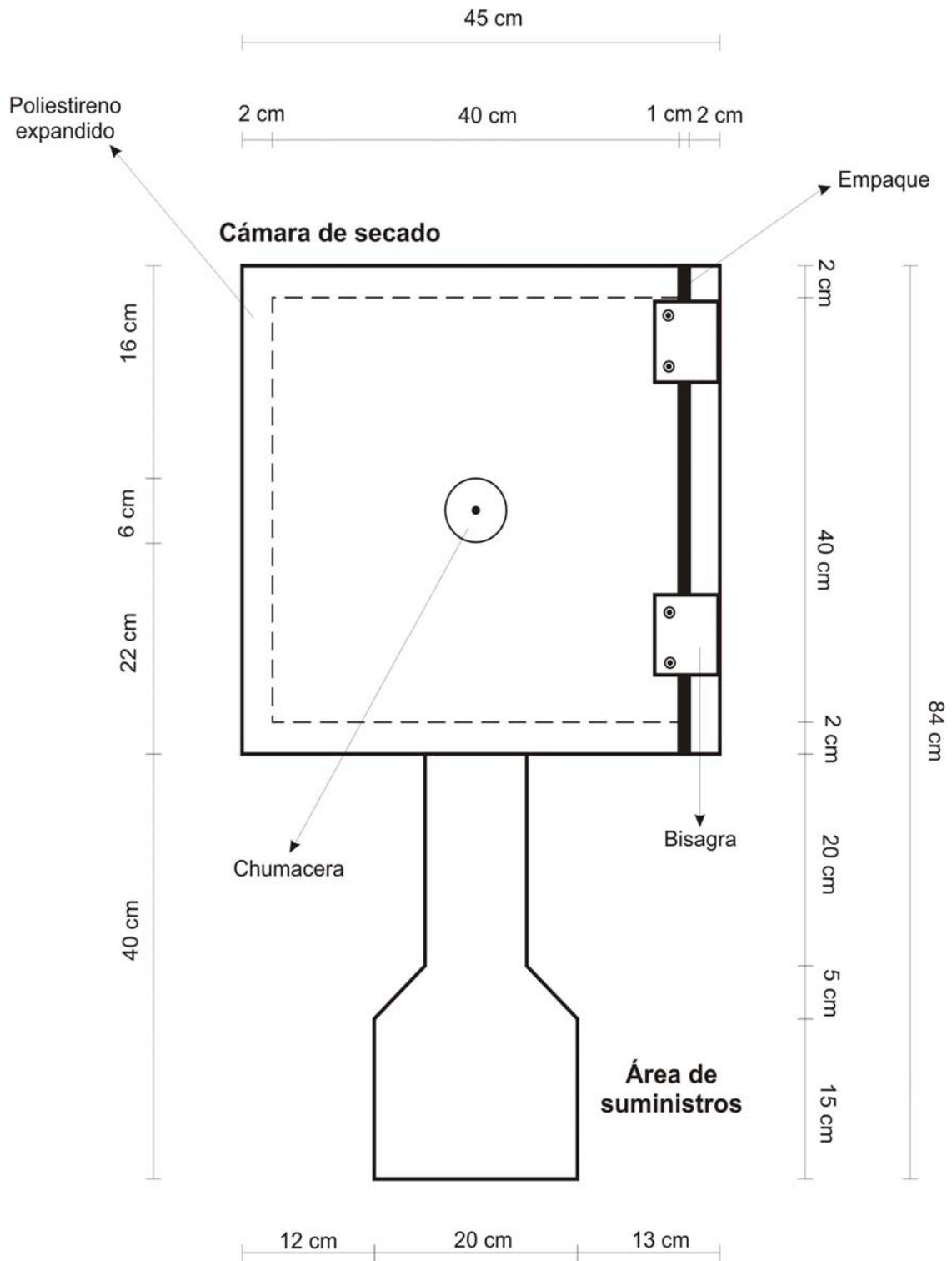


Figura 10. Vista lateral izquierda del secador.

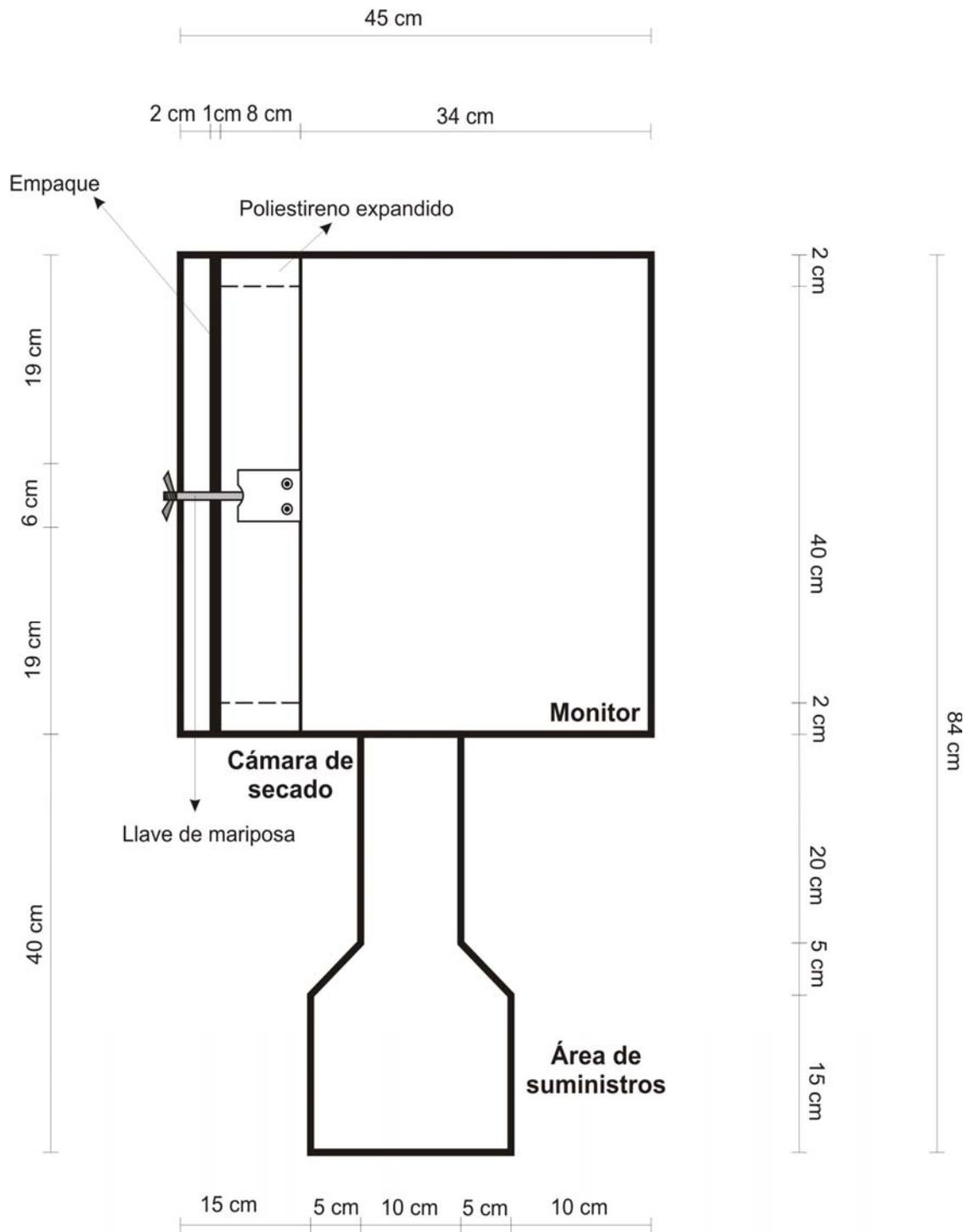


Figura 11. Vista lateral derecha del secador.

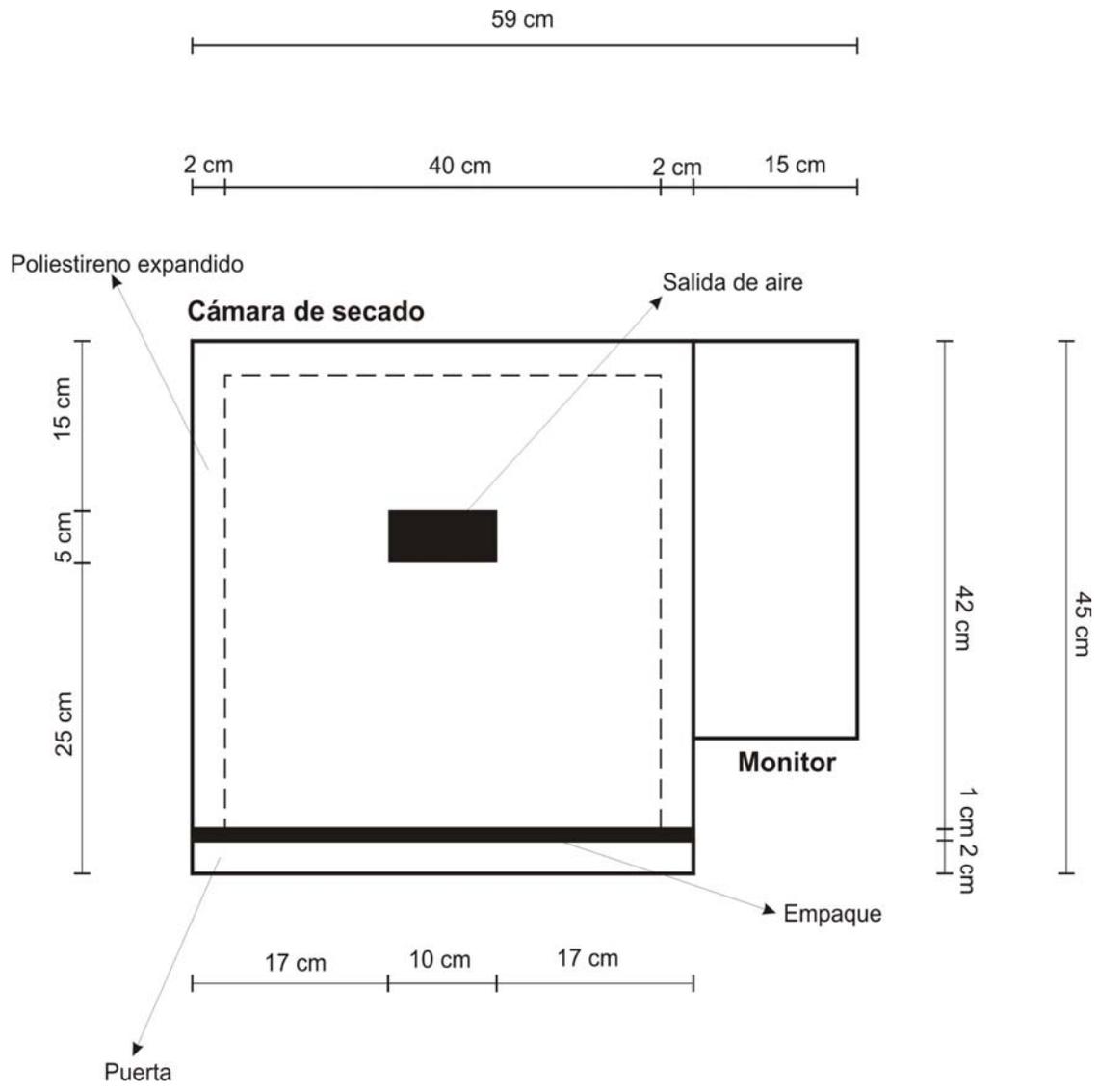


Figura 12. Vista superior del secador.

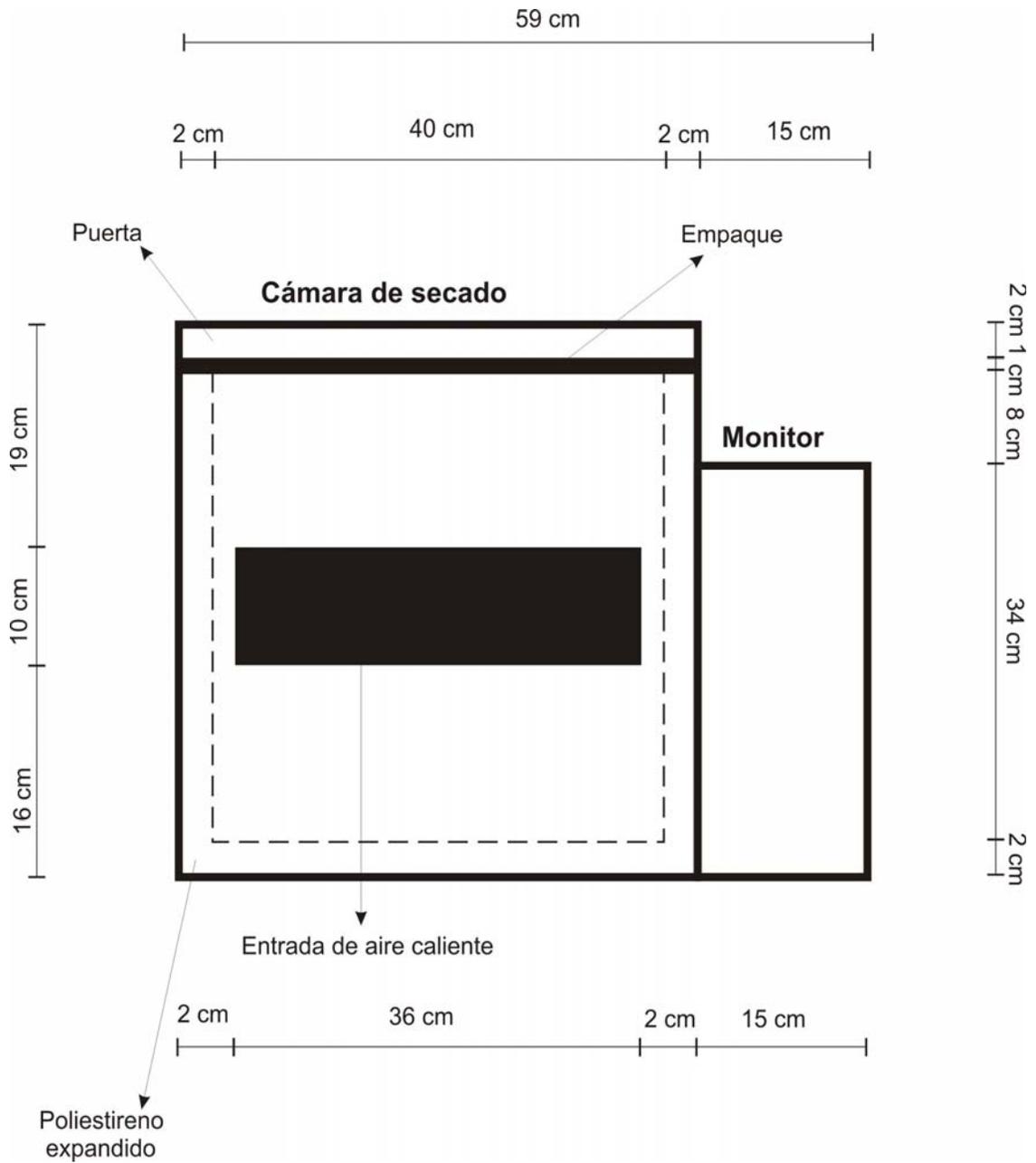


Figura 13. Vista inferior de la cámara de secado.

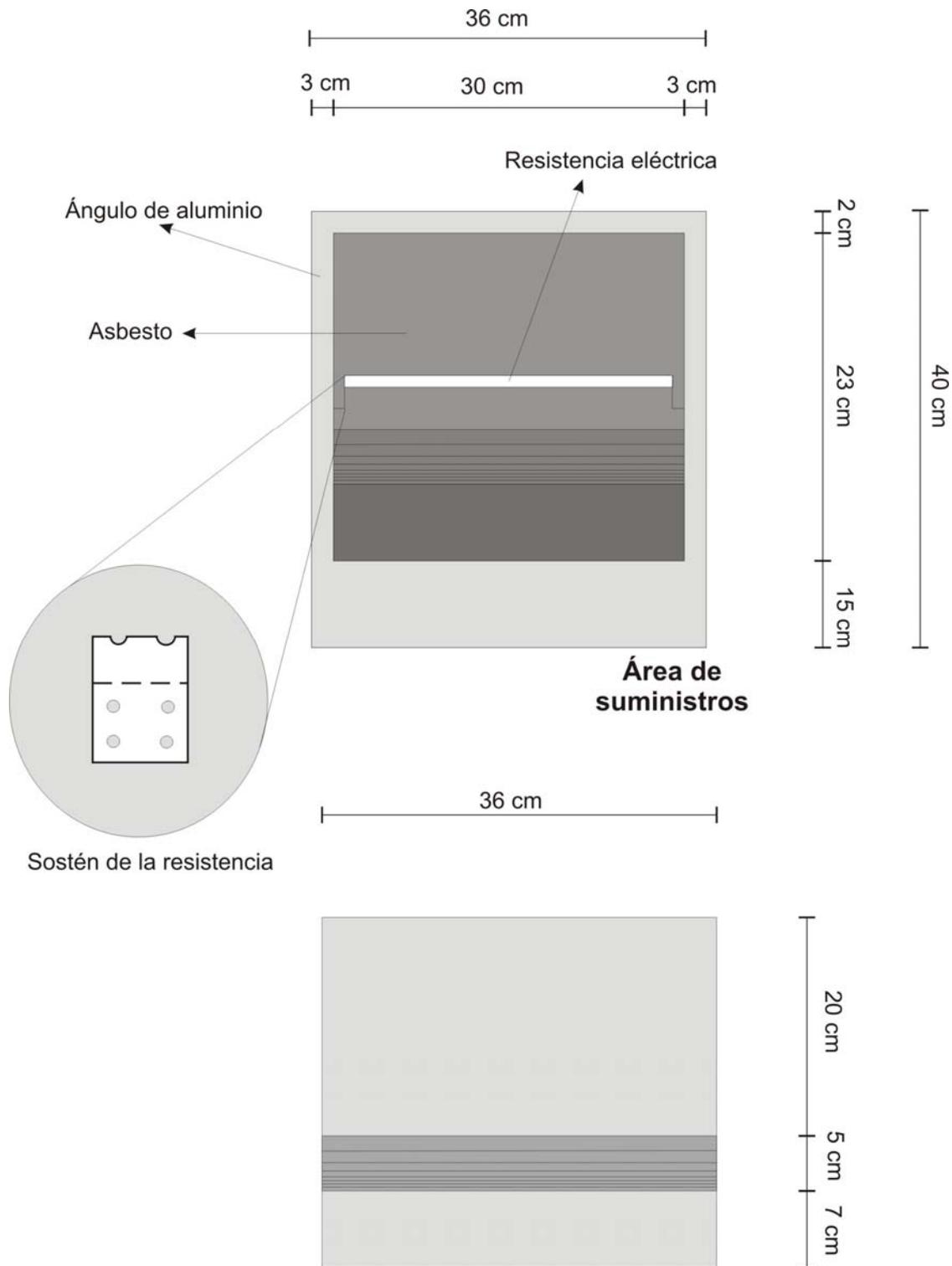
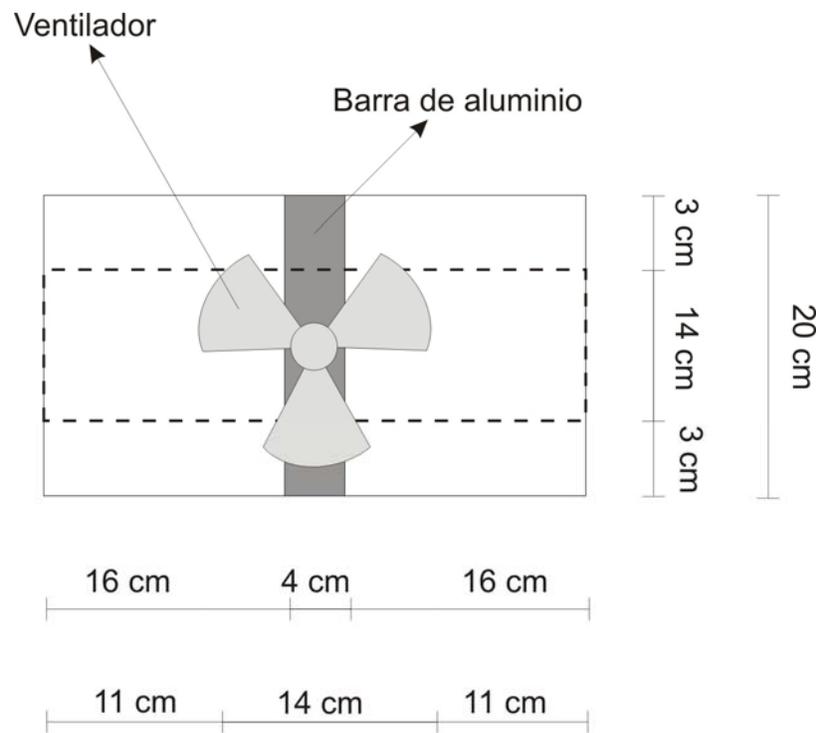


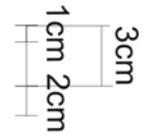
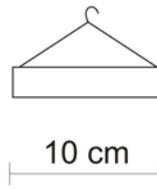
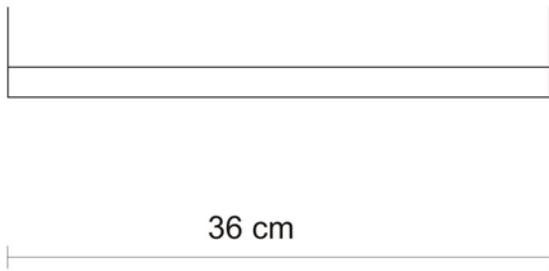
Figura 14. Vista frontal del área de suministros.



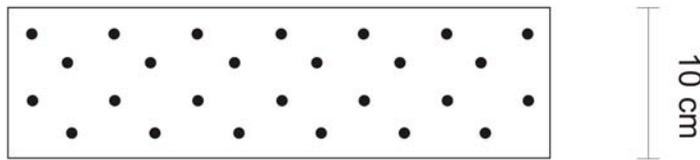
Área de suministros

Figura 15. Vista inferior del área de suministros.

Vista frontal



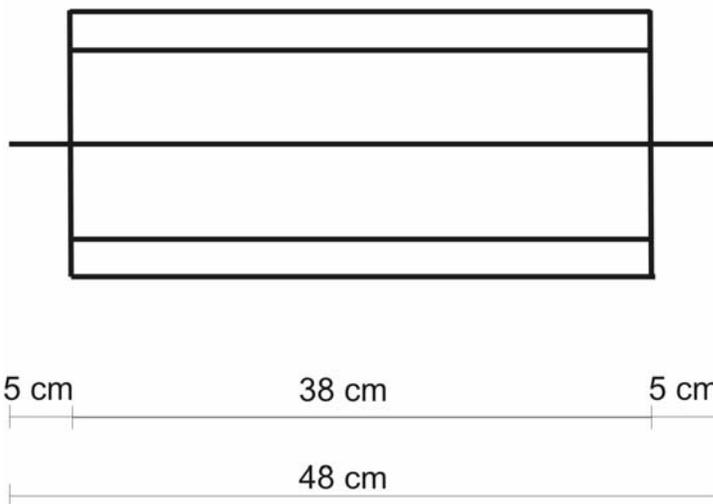
Vista lateral



Vista superior

Figura 16. Vista lateral, superior y frontal de una charola.

Vista frontal



Vista lateral

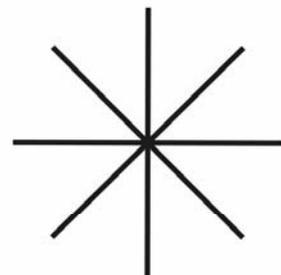


Figura 17. Vista lateral y frontal del carrusel.

5.3 Metodología para la valoración del secador.

La muestra que se utilizó fue Ajo (*Allium sativum L.*) proveniente de la comunidad de San Juan Teitipac, perteneciente al Municipio de Tlacolula, Oaxaca, el cual fue cosechado durante el mes de Junio de 2005.

La valoración del secador se realizó mediante la deshidratación de ajo y su posterior determinación de color que adquirió durante el proceso. La Figura 21 muestra los pasos que se siguieron para la valoración del secador.

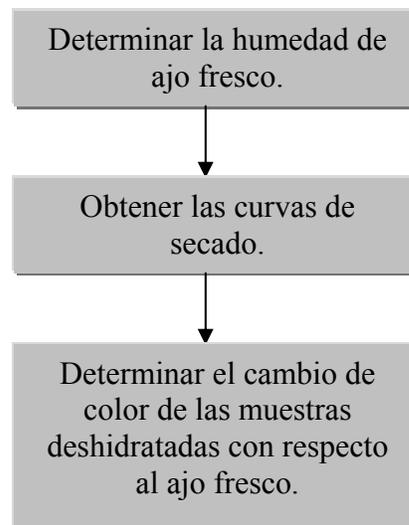


Figura 21. Diagrama para la valoración del secador de charolas giratorio.

5.3.1 Determinación de la humedad de ajo fresco. Se calculó como la pérdida de peso después de secar la muestra a 100 °C (+/-2) hasta peso constante, de acuerdo al método descrito por la NOM-116-SSA1-1994.

Mediante la Ecuación 6 se obtuvo la humedad total del ajo.

$$X = \frac{W_i - W_f}{W_i} (100) \quad \text{Ec. (6)}$$

X	Humedad total del ajo (%)
W_i	Peso inicial del ajo (kg. de agua + kg. de sólido seco)
W_f	Peso final del ajo (kg. de sólido seco)

5.3.2 Determinación de humedad de equilibrio. En el secado de productos, es importante conocer el contenido de humedad de equilibrio, ya que representa el contenido de humedad limitante en ciertas condiciones de humedad y temperatura. Si el material se seca a una humedad inferior a la que posee normalmente en equilibrio con el aire atmosférico, volverá a su valor de equilibrio al almacenarse bajo condiciones normales, a menos que se tomen precauciones especiales, evitando la exposición del material al aire ambiental. La humedad de equilibrio se determinó por pérdida de peso a condiciones constantes de 40 y 50°C y a una humedad relativa de 20% y 6.5 % respectivamente hasta llegar a un peso constante y mediante la Ecuación 3 se obtuvo la pérdida total de agua para cada una de las dos condiciones manejadas. La humedad relativa se calculó midiendo la temperatura de bulbo húmedo durante dos semanas, y se determinó el promedio resultando una temperatura de 22 °C, posteriormente con un diagrama psicométrico se calculó la humedad relativa con una temperatura de bulbo seco de 40 y 50 °C según fue el caso (Geankoplis, 1998).

5.3.3 Obtención de las curvas de secado. Para obtener las curvas de secado se prepararon cuatro charolas con aproximadamente 250 g de ajo rebanado cada una y estas rebanadas se acomodaron como muestra la Foto 15 (Apéndice A). Se identificaron 3 rebanadas de ajo por cada charola teniendo un total de 12 rebanadas, de las cuales se monitoreó la pérdida de peso durante todo el proceso de deshidratado cada media hora. Con esto se obtuvieron 4 curvas de secado a las condiciones M1 (50°C-1.2 m/s), M2 (50°C-0.9 m/s), M3 (40°C-1.2 m/s) y M4 (40°C-0.9 m/s). Cuando las 12 rebanadas llegaban a una pérdida de humedad del 96 a 97 %, se suspendían las corridas y el contenido de las 4 charolas se almacenaba en frascos de polietileno previamente etiquetados.

Para realizar la curva de pérdida de humedad con respecto al tiempo se utilizó la Ecuación 7 para las cuatro condiciones manejadas.

$$X_p = \frac{W_i - W_t}{W_i \times X^*} (100) \quad \text{Ec. (7)}$$

- X_p Pérdida de humedad (%)
 W_i Peso inicial del ajo (kg. de agua + kg. de sólido seco)
 W_t Peso del ajo a diferentes tiempos (kg de agua + kg de sólido seco)
 X^* Humedad de equilibrio a 40 y/o 50°C según sea el caso (kg de agua/kg de ss)

Para la obtención de las curvas de velocidad de secado, primero se calculó la humedad de las muestras a diferentes tiempos mediante la Ecuación 8, posteriormente se calculó la humedad libre mediante la Ecuación 9 y finalmente la velocidad de secado con la Ecuación 10.

$$X_t = \frac{W_t - S_s}{S_s} \quad \text{Ec. (8)}$$

- X_t Humedad del ajo a diferentes tiempos (kg de agua / kg de sólido seco)
 S_s Peso del sólido seco (kg de sólido seco)

$$X_l = X_t - X^* \quad \text{Ec. (9)}$$

- X_l Humedad libre (kg de agua libre / kg de sólido seco)
 X^* Humedad de equilibrio (kg de humedad de equilibrio / kg de sólido seco)

$$R = -\frac{L_s}{A} \frac{dX_l}{dt} \quad \text{Ec. (10)}$$

R	Velocidad de secado (kg de agua / h m ²)
L _s	Peso de sólido seco usado (kg)
A	Área superficial del producto expuesta al secado (m ²)

El área se calculó para cada una de las 12 rebanadas de ajo, después de haberlas pesado y antes de introducirlas al secador se dibujó el contorno de cada rebanada en papel milimétrico, posteriormente se recortaron sus contornos y finalmente se pesaron. Se recortó un centímetro cuadrado de papel milimétrico y se pesó. Con una relación del peso del contorno recortado de cada rebanada entre el peso del centímetro cuadrado del papel milimétrico se obtuvo finalmente el área de cada rebanada.

5.3.4 Determinación de la Actividad acuosa. La Actividad acuosa fue medida durante el proceso de secado cada media hora durante las primeras 2 horas y después cada hora hasta que las muestras llegaron a un peso constante. Este procedimiento se repitió para las cuatro condiciones manejadas M1, M2, M3 y M4, utilizando un medidor de actividad acuosa marca Decagon. Las muestras fueron elegidas al azar entre las cuatro charolas utilizadas. Los datos que se obtuvieron fueron tabulados y mediante la ecuación 1, se convirtieron a humedad relativa (HR%).

5.3.5 Determinación de color en ajo fresco y seco. La determinación de color se realizó en ajo fresco y en las muestras de ajo deshidratado a diferentes condiciones (M1, M2, M3 y M4), utilizando un Espectrofotómetro de UV/visible y realizando barridos de 400 a 700 nm midiendo la absorbancia. Los pasos que se siguieron fueron los siguientes:

1. Las fuentes de color que se emplearon fueron: indicador verde malaquita disolviendo 5 mg en 50 mL de HCl 0.2 N y 100 mL de agua destilada, rojo de metilo disolviendo 1 mg en 100 mL de agua destilada, 35 mL de HCl 0.2 N y 3 mL de NaOH 1 N, este último permitió el ajuste de pH, obteniéndose un concentrado rojo del cual posteriormente se tomó un volumen de 5 mL y se mezcló con 90 mL de agua destilada, y colorante azul disolviendo 2 mg en 100 mL de agua destilada.
2. Se emplearon alícuotas de 3 mL de las soluciones coloridas antes preparadas y se colocaron en las celdas de cuarzo, posteriormente se hicieron barridos de 400 a 700

nm en el espectrofotómetro de UV/visible, obteniéndose una serie de datos como muestran las Tablas del Apéndice B.

3. Para la preparación de las muestras de ajo deshidratado se empleó 1 g de muestra, que se molió en un mortero y se disolvió en 6 mL de agua destilada, posteriormente las muestras se colocaron en el Vórtex durante 5 minutos y finalmente se centrifugaron durante 15 minutos a 1000 rpm. Las muestras se decantaron y filtraron obteniéndose un concentrado del cual se tomó 1 mL de cada muestra y se mezcló con 2 mL de agua destilada y se colocaron en las celdas de cuarzo para realizar los barridos de 400 a 700 nm, recopilando los datos de absorbancia cada 10 nm como muestran las Tablas del apéndice B. Para el ajo fresco se realizó el mismo procedimiento que en el ajo deshidratado conociendo que el ajo fresco tiene un contenido de humedad de 64.4% en base húmeda.
4. Para el análisis de los datos obtenidos se utilizó como referencia el sistema CIE, en el cual, los datos obtenidos del Espectrofotómetro fueron convertidos a valores triestímulos (Moslemi, 1967) de la siguiente forma: primero se realizó el producto de cada solución colorida con cada muestra de ajo y posteriormente se hizo una sumatoria de estos productos, en el Apéndice B se muestran los resultados obtenidos.
5. Se calcularon las coordenadas de cromaticidad mediante las Ecuaciones 11, 12 y 13.

$$x' = \frac{X}{X + Y + Z} \quad \text{Ec. (11)}$$

$$y' = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad \text{Ec. (12)}$$

$$z' = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad \text{Ec. (13)}$$

6. Para analizar el color en las muestras de ajo fresco, M1, M2, M3 y M4 se utilizaron los términos de L (grado de luminosidad), a (intensidad del color rojo para valores positivos y verde para colores negativos) y b (intensidad del color amarillo para valores positivos y azul para colores negativos), utilizando el método Hunter (Sharma, 2000). Estos términos se calcularon utilizando las Ecuaciones 14, 15 y 16.

$$L = 10.0\sqrt{Y} \quad \text{Ec. (14)}$$

$$a = \frac{17.5(1.02X - Y)}{\sqrt{Y}} \quad \text{Ec. (15)}$$

$$b = \frac{7.0(Y - 0.847Z)}{\sqrt{Y}} \quad \text{Ec. (16)}$$

7. Para determinar el cambio de color de las muestras deshidratadas con respecto al ajo fresco se utilizó la Ecuación 17, donde el subíndice “f” representa a la muestra de ajo fresco y el subíndice “m” representa las muestras de ajo deshidratado.

$$\delta E = \sqrt{(L_m - L_f)^2 + (a_m - a_f)^2 + (b_m - b_f)^2} \quad \text{Ec. (17)}$$

8. Para determinar la intensidad del color, δC , en las muestras deshidratadas con respecto a la muestra de ajo fresco, se utilizó la Ecuación 18.

$$\delta C = \sqrt{(a_m - a_f)^2 + (b_m - b_f)^2} \quad \text{Ec. (18)}$$

9. El ángulo del Tono, indica el grado de “tostado” o “dorado” (Heimdal y col., 1995), en otras palabras, incrementa el color amarillo y/o disminuye el color verde y éste parámetro fue calculado mediante la Ecuación 19.

$$\text{Angulo del Tono} = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad \text{Ec. (19)}$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.1 Funcionamiento del equipo

El secador de charolas giratorio construido se muestra en la Foto 16, el cual tiene un sistema que controla la temperatura y velocidad de flujo de aire, lo que permitió tener condiciones constantes durante todo el proceso. Se le adicionó un tubo a la salida del secador con el motivo de disminuir el olor a ajo en el ambiente donde se realizaron los procesos de deshidratación

Los sensores de temperatura que se colocaron monitorearon la distribución de temperatura dentro de la cámara de secado, obteniendo un gradiente de aproximadamente 0.8°C (+/-) a las condiciones M1 y M4, y un gradiente de 0.4°C (+/-) a las condiciones M2 y M3.



Foto 16. Vista frontal del secador de charolas giratorio construido.

Cuando el equipo se encendía y se ingresaba la temperatura a la que se quería trabajar, se necesitó de aproximadamente 10 minutos para alcanzar la temperatura deseada,

consecuentemente las charolas se ingresaron a la cámara de secado después de este tiempo de estabilización.



Foto 17. Vista interna de la cámara de secado.

Las charolas fueron colocadas como muestra la Foto 17 y giran a una velocidad angular máxima de 20 rpm, esta velocidad puede ser regulada de acuerdo a los requerimientos del usuario. En este caso se utilizaron las 20 rpm para llevar a cabo el secado del ajo.

6.2 Determinación de la humedad en ajo fresco

El contenido de humedad promedio del ajo, 64.4% en base húmeda, se determinó con una desviación estándar de 0.0122, correspondiente a 1.81 kg de agua/kg de sólido seco.

6.3 Determinación de humedad de equilibrio

El contenido de humedad de equilibrio a 40°C fue de 59.7% en base húmeda con una desviación estándar de 0.8046 y la humedad de equilibrio a 50°C fue de

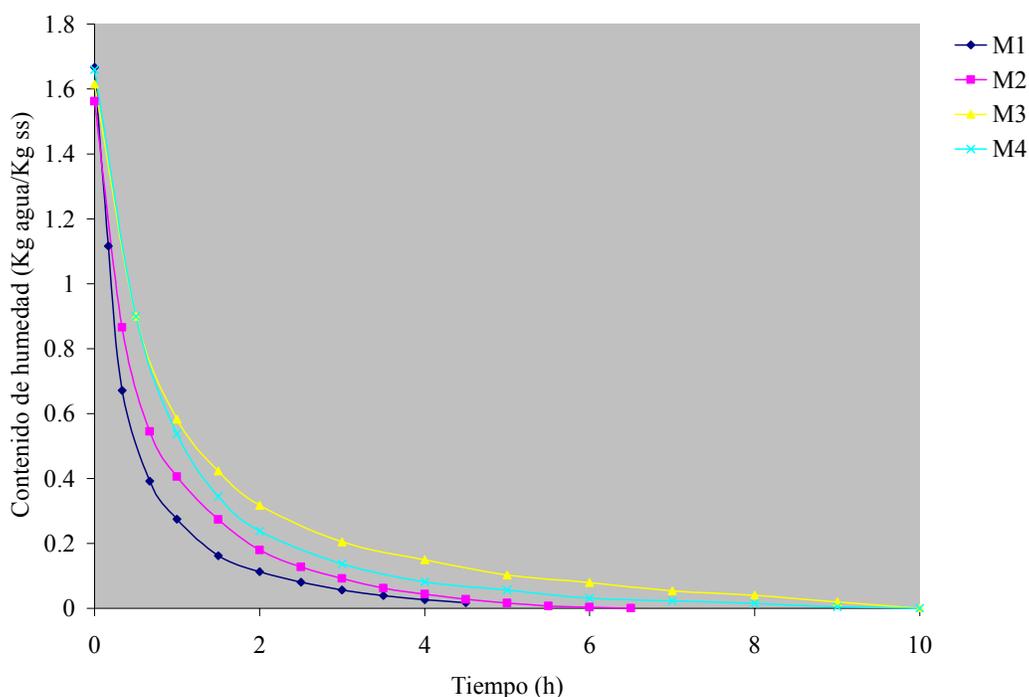
62.4% con una desviación estándar de 0.8136. A partir de estos resultados, se establece que el ajo deshidratado, con un 3-5% de humedad remanente, forzosamente debe estar aislado del aire ambiental.

6.4 Obtención de las curvas de secado

Una curva de secado típica es la que se muestra en la Gráfica 4, en donde se muestra el cambio del contenido de humedad en base seca a las condiciones M1 (50°C-1.2 m/s), M2 (50°C-0.9 m/s), M3 (40°C-1.2 m/s) y M4 (40°C-0.9 m/s). La pérdida de humedad se dio más rápido al inicio del proceso, cuando el flujo de aire evaporaba fácilmente el agua de la superficie del ajo. Los tiempos requeridos para reducir el contenido de humedad de alrededor de 1.81 kg de agua/kg de ss a aproximadamente 0.02 kg de agua/kg de ss para todas las muestras, fueron de 5 h para M1, 6.5 h para M2 y 10 h para M3 y M4. Sharma y col., (2000) realizaron experimentos sobre el proceso de secado en dientes de ajo rebanados en secadores de charolas estático, utilizando un flujo de aire de 3 m/s y temperaturas de 60 y 70°C, obteniendo como resultado tiempos de secado de 11.5 y 6.5 h respectivamente, reduciendo el contenido de humedad de 1.8 kg de agua/kg de ss a 0.06 kg de agua/kg de ss. Esto indica que a 50°C y con un flujo de aire de 1.65 m/s, además de existir un consumo de energía menor y de eliminar la manipulación durante el proceso, también se obtienen tiempos cortos de secado obteniendo 0.02 kg de agua/kg de ss, eliminando aún más la cantidad de agua en ajo que lo reportado por Sharma y col., (2000).

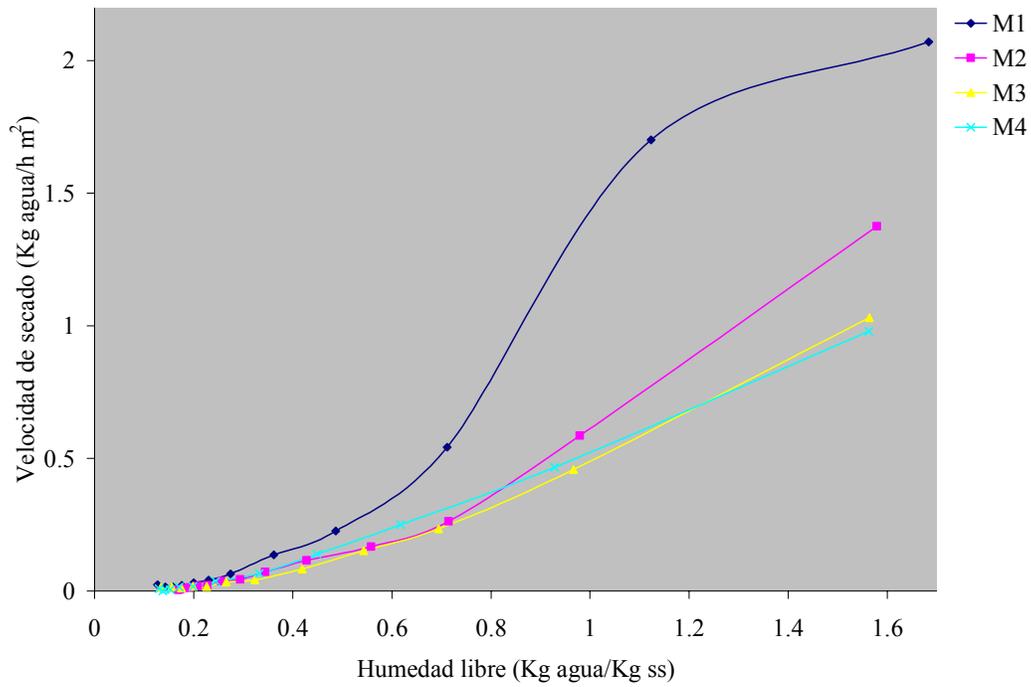
Es importante resaltar que a medida que se incrementó la temperatura en la cámara de secado, la velocidad de flujo de aire influyó de forma importante. Esto se corrobora al observar que el tiempo de secado de M1 disminuye 1.5 h respecto a M2. Contrariamente, a una temperatura de 40°C la velocidad del flujo de aire no influyó de forma importante, reflejándose en los tiempos de secado de 10 h para M3

y M4. Esto se atribuye a que la humedad relativa tiene mayor influencia que la velocidad del aire durante todo el proceso a una temperatura de 40°C.



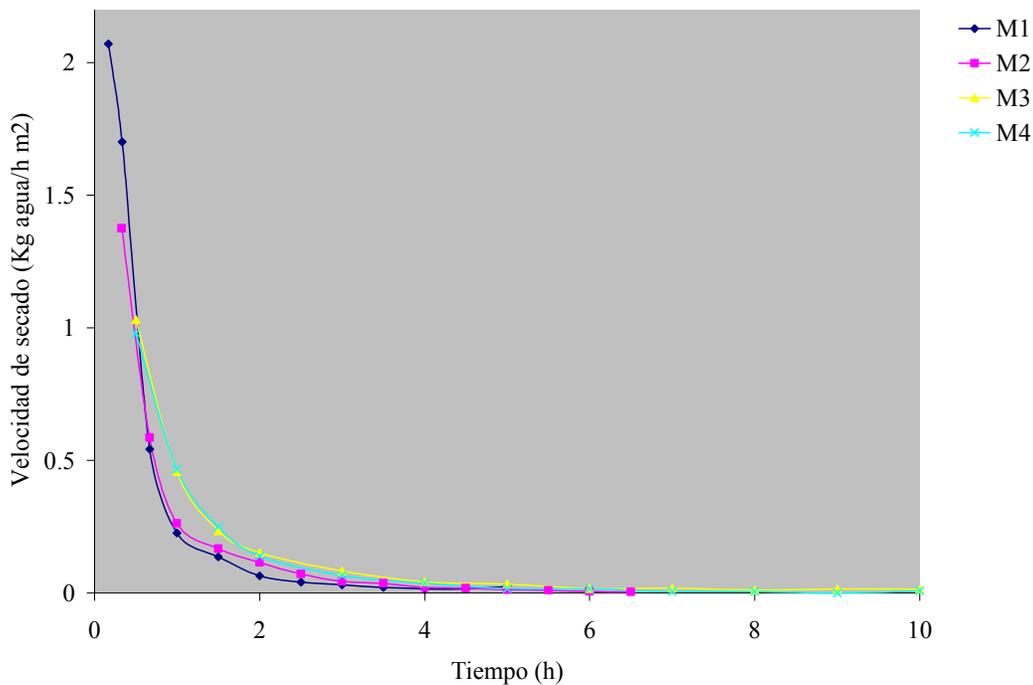
Gráfica 4. Curva de pérdida de humedad en función del tiempo para M1, M2, M3 y M4.

Los datos de velocidad de secado no muestran el periodo de velocidad constante, Gráfica 5, únicamente los periodos de velocidad decreciente, y el primero comienza cuando la superficie del producto en contacto con el aire alcanza el umbral de higroscopicidad. Adicionalmente, existe una disminución de la velocidad de secado debido a una reducción de la superficie efectiva de transferencia atribuida al encogimiento del producto. Hawlader (1990), menciona que este comportamiento es debido a que no llega a existir una película de agua en la superficie del producto debido a la rapidez del secado y por lo tanto el agua se desplaza a la superficie desde el interior de la muestra, evaporándose casi inmediatamente. En el 2001, Ahmed describe un comportamiento similar de las curvas de velocidad en la deshidratación de chile a 60°C en estufas convencionales.



Gráfica 5. Velocidad de secado en función de la humedad libre para M1, M2, M3 y M4.

La Gráfica 6, muestra que aproximadamente a las 3-4 h, se terminó el primer periodo de velocidad decreciente y empezó el segundo periodo, aquí, la velocidad de secado es bastante lenta, pero el tiempo para eliminar ésta agua generalmente es largo (Geankoplis, 1998).



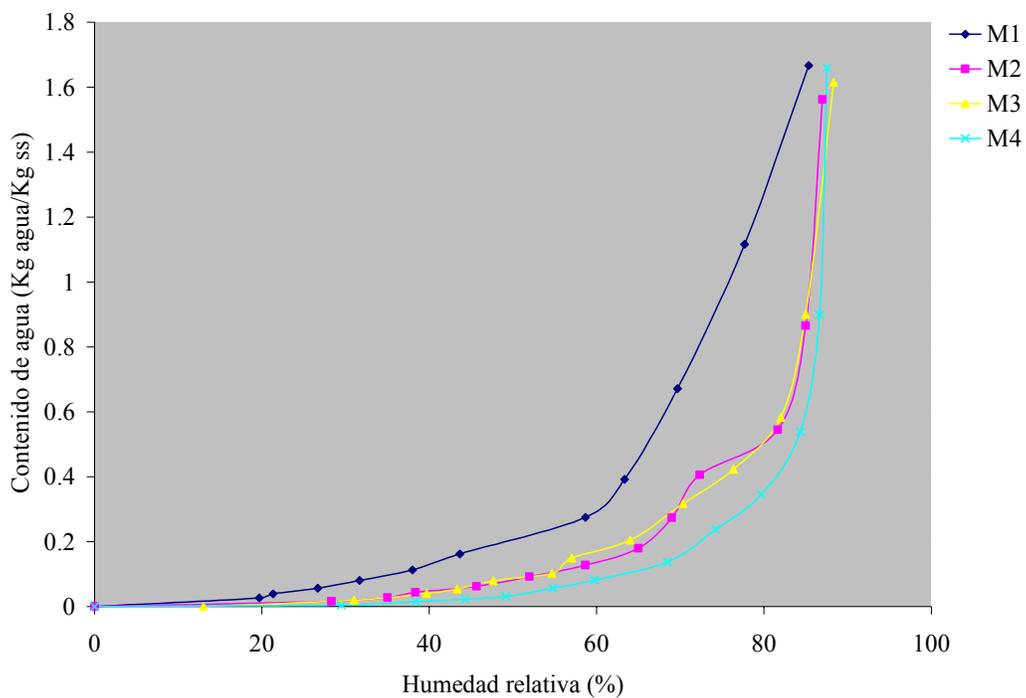
Gráfica 6. Velocidad de secado en función de la humedad libre para M1, M2, M3 y M4.

6.5 Determinación de Actividad acuosa

La Gráfica 7, muestra los contenidos de humedad en equilibrio en base seca de las muestras de ajo durante el proceso de secado en función del porcentaje de humedad relativa, y como se puede observar con valores de humedad relativa altos, de aproximadamente 60 a 80%, el contenido de humedad de equilibrio aumenta con gran rapidez. Cuando las humedades relativas son bajas, el contenido de humedad de equilibrio es bajo para alimentos con gran cantidad de sólidos solubles (Geankoplis, 1998).

El comportamiento que presentan las gráficas son típicas para alimentos esponjosos de tipo celular y de origen orgánico y biológico, ya que suelen presentar valores altos de humedad en equilibrio (Geankoplis, 1998). Con un contenido de humedad de entre 0.002 a 0.01 kg de agua /kg de ss, las cuatro muestras tienen un equilibrio a una humedad relativa de 20% para las condiciones de M1 y M2, y un 30% para las condiciones de M3 y M4, sin

embargo al incrementar la humedad relativa aumenta el contenido de humedad en equilibrio para la muestra M1, es decir, que a medida que disminuye la velocidad de flujo de aire, disminuye la temperatura y aumenta el porcentaje de humedad relativa, consecuentemente disminuye el contenido de humedad de equilibrio de las muestras de ajo.



Gráfica 7. Contenido de agua en función de la humedad relativa para M1, M2, M3 y M4.

6.6 Determinación del color en ajo fresco y seco

Los datos obtenidos mediante las ecuaciones 11, 12 y 13 se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Fracciones de x' , y' y z' de acuerdo al sistema CIE.

	x'	y'	z'
Ajo fresco^a	0.36	0.37	0.26
Ajo deshidratado^a	0.36	0.37	0.28
Ajo fresco	0.35	0.38	0.27
M1	0.35	0.39	0.26
M2	0.35	0.39	0.26
M3	0.35	0.40	0.25
M4	0.35	0.39	0.26

^a Datos reportados por Baysal y col., (2003) para ajo fresco y deshidratado en un secador de charolas a 50°C utilizando un espectrofotómetro (Datacolour, texflahs, USA) con muestras sólidas.

Como se puede apreciar en la Tabla 7, los datos obtenidos son similares a los reportados por Baysal y col., (2003), esto permite establecer que la técnica utilizada en este trabajo produjo resultados confiables. Con un diagrama de Cromaticidad CIE como el de la Figura 22, nos podemos dar una idea del color de las muestras ubicando las coordenadas de x' y y' en el diagrama.

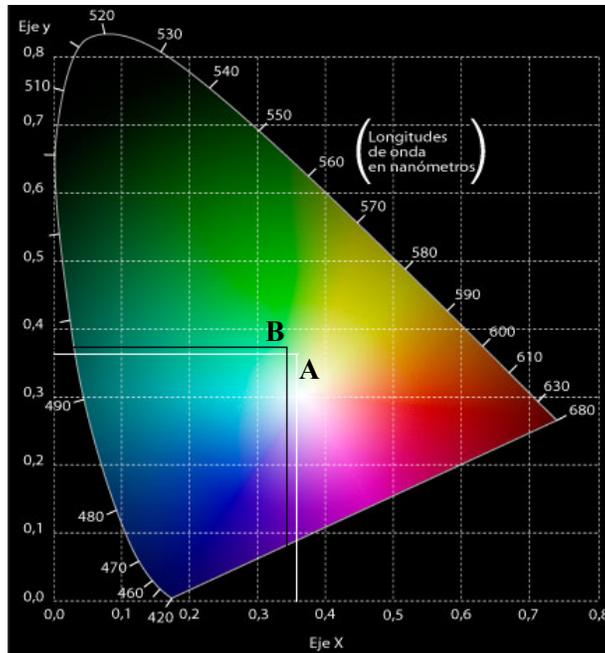


Figura 22. Diagrama de cromaticidad CIE.

En la Figura 22, la línea blanca indica la posición del color del ajo fresco* (A) reportado por Baysal y col., y la línea negra la posición del ajo fresco (B) trabajado, apreciando que ambas tienen un color ligeramente verde-amarillo. La pequeña diferencia que existe puede atribuirse a la diferencia en la preparación de las muestras, ya que las mediciones de (B) se realizaron en soluciones acuosas, mientras que las mediciones de la muestra (A) se realizaron sobre sólidos.

Los datos que se obtuvieron mediante las Ecuaciones 14-19 para las muestras deshidratadas y la muestra control de ajo fresco, se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de L, a, b, δE , δC y ángulo del Tono obtenidos para las diferentes muestras.

Muestra	L	a	b	δE	Ángulo del Tono	δC
Ajo fresco	20.0	19.3	5.5		16.1	
M1	12.7	12.9	1.6	17.1	17.2	6.6
M2	12.9	13.1	1.6	17.2	17.1	6.3
M3	12.0	12.5	1.5	17.1	18.0	6.9
M4	12.6	13.2	1.7	17.4	16.6	6.3

Como se puede observar, el ajo fresco presentó mayor brillantez con respecto a las muestras deshidratadas (M1, M2, M3 y M4), esto puede ser atribuido a efectos como el encogimiento y la pérdida de agua durante el proceso de deshidratación (Sapers y col., 1987). De igual forma, los valores de a y b disminuyeron en las muestras de ajo deshidratado con respecto a la muestra de ajo fresco, es decir, existe una pérdida de color amarillo y rojo, lo cual se puede apreciar al notar un color verdoso en las muestras deshidratadas. Kubec y col., (2004) mencionan que la producción de este color verde en las muestras de ajo deshidratadas se debe a la producción de compuestos pigmentados una vez que el ajo rebanado es rehidratado. Sin embargo, de acuerdo a un análisis de varianza para un modelo factorial de dos factores (Temperatura y Velocidad de flujo de aire) y utilizando una distribución F con un nivel de significancia de 0.05 los parámetros L, a, b, δE y δC , de las muestras deshidratadas no mostraron diferencia significativa entre ellas. Por otro lado, existe una diferencia significativa del ángulo del Tono de la muestra M3, con respecto a las demás muestras deshidratadas, esto indica que a mayor tiempo de exposición de las muestras al proceso de secado y a mayor velocidad del aire, existe un color más “tostado” que a menores tiempos y a menores velocidades de flujo de aire (Ren y col., 1998), por lo que las condiciones de 40°C y 1.2 m/s son las menos apropiadas para deshidratar ajo.

7. CONCLUSIONES

- Se construyó un secador de charolas giratorio que opera de forma automática después de ingresar las condiciones de temperatura (20-60°C) y velocidad del aire (0-1.2 m/s) a las que se desea trabajar.
- Con el equipo se pueden realizar procesos de secado a condiciones constantes de temperatura y velocidad de flujo de aire, ya que se tiene un sistema electrónico que controla estas dos variables.
- Dentro de la cámara de secado no existe un gradiente significativo de temperatura para las dos temperaturas manejadas (40 y 50°C), indicando que hay una distribución homogénea de calor durante el proceso de secado y consecuentemente una pérdida de humedad homogénea en todas las charolas.
- A 50°C, la velocidad de flujo de aire no tiene influencia significativa sobre el secado de las muestras de ajo.
- A velocidades de flujo de 1.2 y 0.9 m/s, no se observan periodos de velocidad de secado constante.
- El proceso de secado de ajo, a las condiciones manejadas produce una pérdida de luminosidad y pérdida del color rojo y amarillo, llegando a aparecer un color verdoso debido a las reacciones que se presentan una vez que el ajo rebanado es rehidratado.
- Las condiciones de secado de 40°C y 1.2 m/s son las menos indicadas para deshidratar ajo, debido a que presentaron tiempos prolongados de operación, además de mostrar un color tostado en el ajo deshidratado.
- Las mejores condiciones encontradas son a 50°C y 1.2 m/s con un tiempo de 5 h y con parámetros de calidad aceptables.

8. PERSPECTIVAS

- Debido a que el secador de charolas giratorio se propone como una mejora para un secador de charolas estático, se recomienda hacer una comparación de productos deshidratados en ambos equipos y posteriormente determinar las diferencias sensoriales y nutritivas que se presentan con estos procesos.
- Realizar una determinación cromatográfica de los componentes químicos y sus concentraciones, en ajo deshidratado en el secador de charolas giratorio a las cuatro condiciones manejadas.
- Debido a que no existe referencia bibliográfica para este tipo de secadores, se vuelve importante realizar un modelado matemático para simular el proceso de secado en el equipo.

9. REFERENCIAS

Abraham K. O., Shankaranarayana M. L., Raghavan B., Natarajan C. P. **1976**. Volatile sulfur compounds in food flavors. *CRC Critical Review Food Technology* 9,193-200.

Ahmed J., Shivhare U. S., Raghavan G. S. **2001**. Effect of pretreatment on drying characteristics and color of dehydrated green chilli. *Department of Food Science and Technology*. India.

ASAE, ASAE D271.2. **1980**. Psychrometric Data. *Agricultural Engineers Yearbook American Society of Agricultural Engineers*, St. Joseph, Michigan.

Badui, D. S. *Química de los Alimentos*, **1993**. Ed. Pearson Educación. México. 34-35.

Baysal T., Icier F., Ersus S. Yildiz H. **2003**. Effects of microwave and infrared drying on the quality of carrot and garlic. *Eur Food Research Technology*. 218,68-73.

Block, E. **1992**. The organosulfur chemistry of the Genus *Allium*-Implications for the organic chemistry of sulfur. *Angew. Chemical International Engineering* 31, 1135-1178.

Brennan J. G., Butters J. R., Cowell N. D. **1998**. Las operaciones de la Ingeniería de los Alimentos. Ed. Acribia, S. A. España. 395-407.

Calvo C., Durán L. **1997**. Óptica y color: Temas en tecnología de alimentos. V. 1. Instituto Politécnico Nacional. México D. F. 432-441.

Cavallito, C. J., Bailey, J. H. **1944**. Allicin, the antibacterial principle of *Allium sativum* L. Isolation, physical properties and antibacterial action. *Journal of American Chemical Society*. 66, 1950-1951.

Dorant E, Van der Brandt P. A., Goldbohm R. A., Hermus R. J., Sturmans F. **1993**. A prospective cohort study on dietary fat and the risk of postmenopausal breast cancer. *British Journal Cancer*. 67,424-42.

Fellows P. **1994**. Tecnología del Procesado de los Alimentos. Ed. Acribia. España. 216-218.

Fenwick GR, Hanley AB. **1984**. "The Genus *Allium*". *CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 22, 199-377.

Foust A. **1990**. Principios de Operaciones unitarias. Ed. Cecsca. México. 468-484.

Geankopolis C. J. **1998**. Procesos de Transporte y Operaciones unitarias. Editorial CECSA. 578-601.

Hawladar M. N., Uddin M. S., Ho J. C. **1990**. Drying characteristics of tomatoes. *Journal of Food Engineering*. 259-268.

Heimdal H., Kühn B. F., Poll L., Larsen L. M. **1995**. *Journal of Food Science*. 60, 1265-1268.

Heldman D. R., **1998**. Introducción a la Ingeniería de los Alimentos. Ed. Acribia, S. A. España. 455-459.

Huang M-T, Ferraro T, Ho C-T. **1994**. Cancer chemoprevention by phytochemicals in fruits and vegetables. *Journal of American Chemical Society*, Washington, DC. 9-14.

Joslyn, M. A., Sano, T. **1956**. The formation and decomposition of green pigment in crushed garlic tissue. *Food Research Technology*. 21, 170-183.

Kahn, G. **1996**. History of garlic. In *Garlic: The Science and Therapeutic Application of Allium sativum L. and Related Species*. New York. 25–36.

Kubec R., Hrbacova M. Musah R. A., Velisek J. **2004**. Allium Discoloration: Precursors Involved in Onion Pinking and Garlic Greening. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*. 52, 5089-5094.

Kramer A., Twigg, B. A. 1970. Quality Control for the Food Industry. *The Avi Publishing Westport, Conn.* 213-216.

Lawson, L. D., Wood S. G., Hughes B. G. **1991**. HPLC analysis of allicin and other thiosulfinates in garlic clove homogenates. *Planta Medicinal*. 57, 263-270.

Leistner, L. y Rodel, W. **1976**. “The stability of intermediate moisture foods with respect to microorganism”, en *Intermediate Moisture Foods*. *Applied Science Publisher Ltd*. Londres. 301-308.

Lewicky P. P. y Col. **1990**. Process Engineering and Food Industry Equipments. Processes of Heat and Mass Transfer. Warszawa. 111-113.

Lukes, T. M. **1986**. Factors governing the greening of garlic puree. *Journal of Food Science*. 51, 1577-1582.

May B. K., Perré P. and Sinclair A. J. Halmos A. L. **2000**. Does the First Drying Stage Exist Foodstuff. In the Twelfth International Drying Symposium, The Hague, Netherlands. 98-112.

Moreno B. **1985**. Microorganismos de los Alimentos. Ed. Acribia. España. 86-88.

Moslemi A. A., **1967**. Quantitative Color Measurement for Black Walnut Wood. Research Paper NC-17. St. Paul. Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 543-550.

Moyers, S. **1996**. Garlic in Health, History and World Cuisine. *Suncoast Press*, St. Petersburg. 1-36.

Mujumdar A. S. **1995**. Handbook of industrial drying. V. 1 and 2. Marcel Dekker, New York. 102-105.

Naganathan S., **1992**. Organosulfur Chemistry of Allium Species. Thesis, SUNY Albany. 342-352.

Newall C. A., Anderson L. A., Phillipson J. D. **1996**. Herbal medicines: a guide for health-care professionals. *Pharmaceutical Press*, London, 9, 296.

Norma Oficial Mexicana NOM-116-SSA1-**1994**, Bienes y Servicios. Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico.

Perry R. H., Green D. W., Maloney J. O. **1996**. Manual del Ingeniero Químico. Tomo II. Ed. McGRAW-HILL. 20-23

Ranganna S. **1991**. Handbook of analysis and quality control for fruit and vegetables products. McGraw-Hill. Nueva York. 231-243.

Ress J. A, Bettison J. **1991**. Procesado Térmico y Envasado de los Alimentos. Ed. Acribia. España. 166-188.

Sapers D. M., Douglas J. **1987**. AOAC Official Methods of Analysis of the Association of Official Agricultural Chemists, 10th edn. AOAC, USA

Scout W. J. **1953**. “Water relations of *Staphylococcus aureus* at 30°C”. *Journal of Biology Science*. 546-549.

Scott, W. J. **1957**. “Water relation of food spoilage microorganism”, *Advanced Food Research*. 231-233.

Sharma G. P., Prasad S. **2001**. Drying of garlic (*Allium sativum*) cloves by microwave-hot air combination. *Journal of Food Engineering*. 99-105.

Song K, Milner JA. **2002**. The influence of heating on the anticancer properties of garlic *Herbal Gram*. 20-21.

Steiner M., Khan A. H., Holbert, D., Lin R. I. **1996**. A double-blind crossover study in moderately hypercholesterolemic men that compared the effect of aged garlic extract and placebo administration on blood lipids. *Journal of Clinical Nutrition*. 64, 866–870.

Treybal R.E. **2001**. Operaciones de Transferencia de Masa. Editorial McGRAW-HILL. Segunda Edición. 212-217.

Van Arsdel W. B., Copley M. J. **1963**. Food dehydration. Vol. I. Principles. *The Avi Publishing Westport Company*. 50-52.

Vega M. H., Góngora N. M., Barbosa C. G. V. **2001**. Advances in dehydration of foods. *Journal of Food Engineering*. 49, 271-289.

Verrips, C. T. y Van Rhee, R. **1981**. “Heat inactivation of *Staphylococcus epidermis* at various water activities”. *Applied Environmental Microbiology*. 41,1128.

Woodward, P. W. **1996**. Garlic and Friends: The History, Growth and Use of Edible Alliums. Hyland House, Melbourne. Australia. 2–22.

APÉNDICE A. Figuras y Fotografías correspondientes a la metodología.

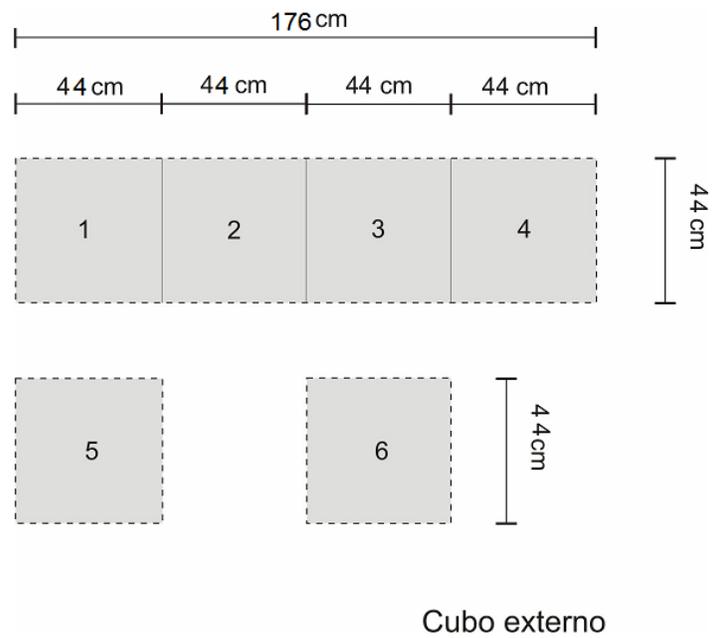
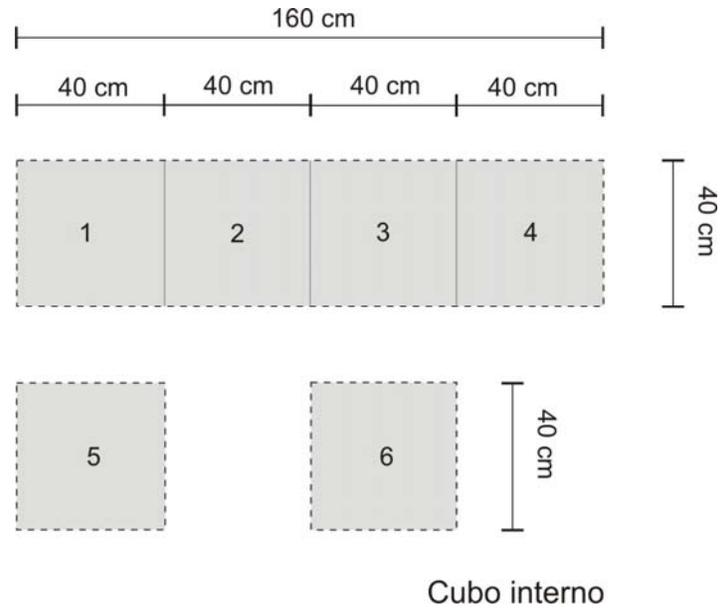


Figura 18. Medidas sobre la lámina de aluminio del cubo interno y externo.



Foto 1. Construcción de los cubos interno y externo del secador.



Foto 2. Unión de la parte posterior del cubo.



Foto 3. Ubicación del poliestireno expandido entre los dos cubos.



Foto 4. Vista inferior de la cámara de secado mostrando el ángulo de aluminio.



Foto 5. Empaque colocado en la puerta del secador.



Foto 6. Bisagra colocada en la puerta del secador.



Foto 7. Llave de mariposa empleada para cerrar y abrir la puerta del secador.



Foto 8. Carrusel de acero inoxidable que sostendrá las charolas.



Foto 9. Ubicación del carrusel dentro de la cámara de secado.



Foto 10. Charola de acero inoxidable.

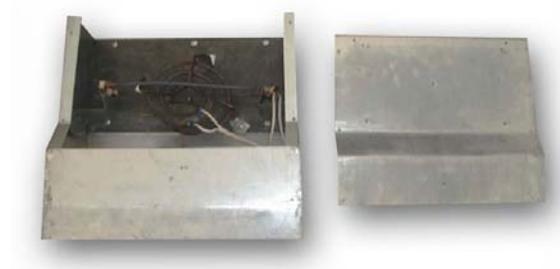


Foto 11. Área de suministro desarmada.

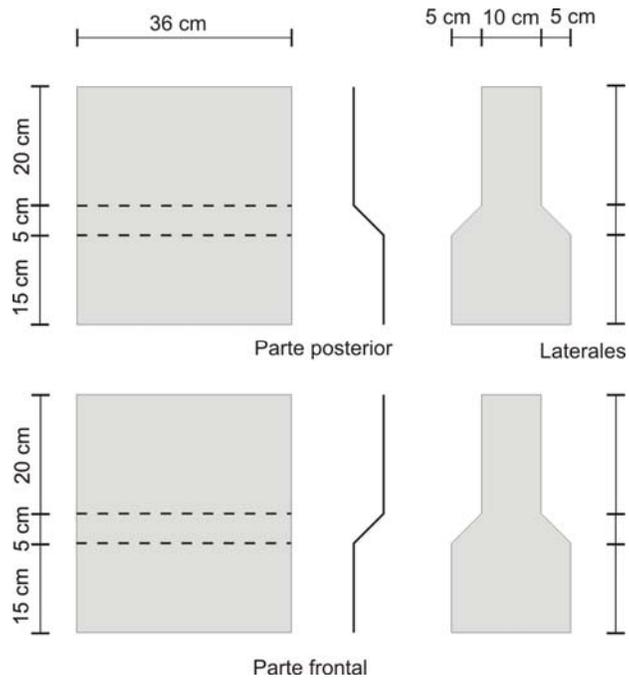


Figura 19. Medidas y dobleces para la construcción del área de suministros.



Foto 12. Ubicación de las resistencias en el área de suministros.



Foto 13. Ubicación del ventilador en la parte inferior del área de suministros.

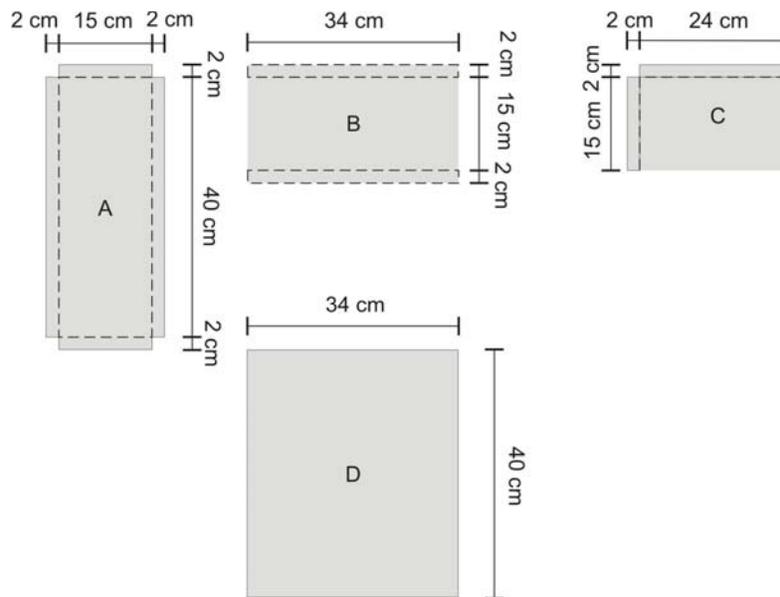


Figura 20. Medidas y dobleces para la construcción del monitor.



Foto 14. Parte frontal del monitor.



Foto 15. Preparación de las charolas con ajo.

APÉNDICE B. Resultados de los datos triestímulos.

Tabla 2. Datos triestímulos para la muestra M1 (50 °C-1.2 m/s).

Longitud	Malaquita	Azul	Rojo	M1	X*M1	Y*M1	Z*M1
400	0.1828	0.0908	0.0176	0.5282	0.0093	0.0965	0.0479
410	0.2326	0.1080	0.0240	0.4876	0.0117	0.1134	0.0527
420	0.2771	0.0659	0.0347	0.4499	0.0156	0.1247	0.0296
430	0.2962	0.0226	0.0521	0.4165	0.0217	0.1234	0.0094
440	0.2717	0.0072	0.0804	0.3886	0.0312	0.1056	0.0028
450	0.2315	0.0039	0.1205	0.3636	0.0438	0.0842	0.0014
460	0.2001	0.0039	0.1749	0.3403	0.0595	0.0681	0.0013
470	0.1760	0.0049	0.2471	0.3176	0.0785	0.0559	0.0016
480	0.1544	0.0066	0.3284	0.2980	0.0979	0.0460	0.0020
490	0.1332	0.0092	0.4138	0.2801	0.1159	0.0373	0.0026
500	0.1144	0.0130	0.4945	0.2633	0.1302	0.0301	0.0034
510	0.0999	0.0191	0.5679	0.2475	0.1406	0.0247	0.0047
520	0.0936	0.0285	0.6065	0.2339	0.1418	0.0219	0.0067
530	0.0961	0.0419	0.5995	0.2216	0.1328	0.0213	0.0093
540	0.1098	0.0607	0.5738	0.2110	0.1211	0.0232	0.0128
550	0.1404	0.0884	0.5390	0.2012	0.1085	0.0283	0.0178
560	0.1858	0.1358	0.4457	0.1931	0.0861	0.0359	0.0262
570	0.2360	0.2018	0.2896	0.1824	0.0528	0.0430	0.0368
580	0.2848	0.2724	0.1394	0.1793	0.0250	0.0511	0.0488
590	0.3540	0.3406	0.0507	0.1731	0.0088	0.0613	0.0590
600	0.4596	0.4300	0.0159	0.1674	0.0027	0.0770	0.0720
610	0.5747	0.6106	0.0047	0.1626	0.0008	0.0935	0.0993
620	0.6040	0.8628	0.0003	0.1582	0.0001	0.0956	0.1365
630	0.4873	0.9955	-0.0011	0.1538	-0.0002	0.0750	0.1531
640	0.3133	0.7978	-0.0009	0.1447	-0.0001	0.0453	0.1155
650	0.1703	0.4467	-0.0006	0.1415	-0.0001	0.0241	0.0632
660	0.0845	0.1978	-0.0003	0.1358	0.0000	0.0115	0.0269
670	0.0405	0.0789	0.0000	0.1309	0.0000	0.0053	0.0103
680	0.0196	0.0296	0.0001	0.1267	0.0000	0.0025	0.0037
690	0.0109	0.0109	0.0000	0.1231	0.0000	0.0013	0.0013
700	0.0070	0.0051	0.0000	0.1201	0.0000	0.0008	0.0006
					X=1.4357	Y=1.6275	Z=1.0593

Tabla 3. Datos triestímulos para la muestra M2 (50 °C-0.9 m/s).

Longitud	Malaquita	Azul	Rojo	M2	X*M2	Y*M2	Z*M2
400	0.1828	0.0908	0.0176	0.5341	0.0094	0.0976	0.0485
410	0.2326	0.1080	0.0240	0.4968	0.0119	0.1156	0.0537
420	0.2771	0.0659	0.0347	0.4616	0.0160	0.1279	0.0304
430	0.2962	0.0226	0.0521	0.4297	0.0224	0.1273	0.0097
440	0.2717	0.0072	0.0804	0.4027	0.0324	0.1094	0.0029
450	0.2315	0.0039	0.1205	0.3775	0.0455	0.0874	0.0015
460	0.2001	0.0039	0.1749	0.3540	0.0619	0.0708	0.0014
470	0.1760	0.0049	0.2471	0.3309	0.0818	0.0582	0.0016
480	0.1544	0.0066	0.3284	0.3100	0.1018	0.0479	0.0021
490	0.1332	0.0092	0.4138	0.2906	0.1202	0.0387	0.0027
500	0.1144	0.0130	0.4945	0.2730	0.1350	0.0312	0.0035
510	0.0999	0.0191	0.5679	0.2571	0.1460	0.0257	0.0049
520	0.0936	0.0285	0.6065	0.2436	0.1477	0.0228	0.0069
530	0.0961	0.0419	0.5995	0.2315	0.1388	0.0222	0.0097
540	0.1098	0.0607	0.5738	0.2207	0.1267	0.0242	0.0134
550	0.1404	0.0884	0.5390	0.2107	0.1136	0.0296	0.0186
560	0.1858	0.1358	0.4457	0.2022	0.0901	0.0376	0.0275
570	0.2360	0.2018	0.2896	0.1943	0.0563	0.0459	0.0392
580	0.2848	0.2724	0.1394	0.1871	0.0261	0.0533	0.0510
590	0.3540	0.3406	0.0507	0.1802	0.0091	0.0638	0.0614
600	0.4596	0.4300	0.0159	0.1741	0.0028	0.0800	0.0748
610	0.5747	0.6106	0.0047	0.1689	0.0008	0.0971	0.1031
620	0.6040	0.8628	0.0003	0.1642	0.0001	0.0991	0.1416
630	0.4873	0.9955	-0.0011	0.1590	-0.0002	0.0775	0.1583
640	0.3133	0.7978	-0.0009	0.1534	-0.0001	0.0481	0.1224
650	0.1703	0.4467	-0.0006	0.1477	-0.0001	0.0252	0.0660
660	0.0845	0.1978	-0.0003	0.1421	0.0000	0.0120	0.0281
670	0.0405	0.0789	0.0000	0.1370	0.0000	0.0056	0.0108
680	0.0196	0.0296	0.0001	0.1333	0.0000	0.0026	0.0039
690	0.0109	0.0109	0.0000	0.1315	0.0000	0.0014	0.0014
700	0.0070	0.0051	0.0000	0.1285	0.0000	0.0009	0.0007
					X=1.4957	Y=1.6864	Z=1.1016

Tabla 4. Datos triestímulos para la muestra M3 (40 °C-1.2 m/s).

Longitud	Malaquita	Azul	Rojo	M3	X*M3	Y*M3	Z*M3
400	0.1828	0.0908	0.0176	0.5332	0.0094	0.0974	0.0484
410	0.2326	0.1080	0.0240	0.4860	0.0116	0.1130	0.0525
420	0.2771	0.0659	0.0347	0.4444	0.0154	0.1231	0.0293
430	0.2962	0.0226	0.0521	0.4068	0.0212	0.1205	0.0092
440	0.2717	0.0072	0.0804	0.3764	0.0302	0.1023	0.0027
450	0.2315	0.0039	0.1205	0.3492	0.0421	0.0808	0.0013
460	0.2001	0.0039	0.1749	0.3232	0.0565	0.0647	0.0013
470	0.1760	0.0049	0.2471	0.2978	0.0736	0.0524	0.0015
480	0.1544	0.0066	0.3284	0.2195	0.0721	0.0339	0.0015
490	0.1332	0.0092	0.4138	0.2561	0.1060	0.0341	0.0023
500	0.1144	0.0130	0.4945	0.2376	0.1175	0.0272	0.0031
510	0.0999	0.0191	0.5679	0.2204	0.1251	0.0220	0.0042
520	0.0936	0.0285	0.6065	0.2059	0.1248	0.0193	0.0059
530	0.0961	0.0419	0.5995	0.1931	0.1158	0.0186	0.0081
540	0.1098	0.0607	0.5738	0.1820	0.1044	0.0200	0.0110
550	0.1404	0.0884	0.5390	0.1718	0.0926	0.0241	0.0152
560	0.1858	0.1358	0.4457	0.1631	0.0727	0.0303	0.0222
570	0.2360	0.2018	0.2896	0.1556	0.0451	0.0367	0.0314
580	0.2848	0.2724	0.1394	0.1489	0.0208	0.0424	0.0405
590	0.3540	0.3406	0.0507	0.1426	0.0072	0.0505	0.0486
600	0.4596	0.4300	0.0159	0.1370	0.0022	0.0630	0.0589
610	0.5747	0.6106	0.0047	0.1321	0.0006	0.0759	0.0807
620	0.6040	0.8628	0.0003	0.1274	0.0000	0.0770	0.1099
630	0.4873	0.9955	-0.0011	0.1228	-0.0001	0.0599	0.1223
640	0.3133	0.7978	-0.0009	0.1181	-0.0001	0.0370	0.0942
650	0.1703	0.4467	-0.0006	0.1135	-0.0001	0.0193	0.0507
660	0.0845	0.1978	-0.0003	0.1093	0.0000	0.0092	0.0216
670	0.0405	0.0789	0.0000	0.1052	0.0000	0.0043	0.0083
680	0.0196	0.0296	0.0001	0.1014	0.0000	0.0020	0.0030
690	0.0109	0.0109	0.0000	0.0978	0.0000	0.0011	0.0011
700	0.0070	0.0051	0.0000	0.0949	0.0000	0.0007	0.0005
					X=1.2666	Y=1.4625	Z=0.8912

Tabla 5. Datos triestímulos para la muestra M4 (40 °C-0.9 m/s).

Longitud	Malaquita	Azul	Rojo	M4	X*M4	Y*M4	Z*M4
400	0.1828	0.0908	0.0176	0.4963	0.0087	0.0907	0.0451
410	0.2326	0.1080	0.0240	0.4625	0.0111	0.1076	0.0500
420	0.2771	0.0659	0.0347	0.4319	0.0150	0.1197	0.0285
430	0.2962	0.0226	0.0521	0.4028	0.0210	0.1193	0.0091
440	0.2717	0.0072	0.0804	0.3783	0.0304	0.1028	0.0027
450	0.2315	0.0039	0.1205	0.3558	0.0429	0.0824	0.0014
460	0.2001	0.0039	0.1749	0.3353	0.0586	0.0671	0.0013
470	0.1760	0.0049	0.2471	0.3151	0.0778	0.0555	0.0016
480	0.1544	0.0066	0.3284	0.2976	0.0977	0.0459	0.0020
490	0.1332	0.0092	0.4138	0.2814	0.1164	0.0375	0.0026
500	0.1144	0.0130	0.4945	0.2661	0.1316	0.0304	0.0034
510	0.0999	0.0191	0.5679	0.2516	0.1429	0.0251	0.0048
520	0.0936	0.0285	0.6065	0.2391	0.1450	0.0224	0.0068
530	0.0961	0.0419	0.5995	0.2276	0.1364	0.0219	0.0095
540	0.1098	0.0607	0.5738	0.2174	0.1247	0.0239	0.0132
550	0.1404	0.0884	0.5390	0.2077	0.1119	0.0292	0.0184
560	0.1858	0.1358	0.4457	0.1982	0.0883	0.0368	0.0269
570	0.2360	0.2018	0.2896	0.1899	0.0550	0.0448	0.0383
580	0.2848	0.2724	0.1394	0.1821	0.0254	0.0519	0.0496
590	0.3540	0.3406	0.0507	0.1744	0.0088	0.0617	0.0594
600	0.4596	0.4300	0.0159	0.1675	0.0027	0.0770	0.0720
610	0.5747	0.6106	0.0047	0.1614	0.0008	0.0927	0.0985
620	0.6040	0.8628	0.0003	0.1551	0.0000	0.0937	0.1338
630	0.4873	0.9955	-0.0011	0.1496	-0.0002	0.0729	0.1490
640	0.3133	0.7978	-0.0009	0.1445	-0.0001	0.0453	0.1153
650	0.1703	0.4467	-0.0006	0.1401	-0.0001	0.0239	0.0626
660	0.0845	0.1978	-0.0003	0.1356	0.0000	0.0115	0.0268
670	0.0405	0.0789	0.0000	0.1312	0.0000	0.0053	0.0104
680	0.0196	0.0296	0.0001	0.1260	0.0000	0.0025	0.0037
690	0.0109	0.0109	0.0000	0.1223	0.0000	0.0013	0.0013
700	0.0070	0.0051	0.0000	0.1186	0.0000	0.0008	0.0006
					X=1.4530	Y=1.6033	Z=1.0485

Tabla 6. Datos triestímulos para la muestra de ajo fresco.

Longitud	Malaquita	Azul	Rojo	Ajo fresco	X*Af	Y*Af	Z*Af
400	0.1828	0.0908	0.0176	1.0141	0.0178	0.1853	0.0921
410	0.2326	0.1080	0.0240	0.98485	0.0236	0.2291	0.1064
420	0.2771	0.0659	0.0347	0.94944	0.0330	0.2631	0.0626
430	0.2962	0.0226	0.0521	0.91056	0.0474	0.2697	0.0206
440	0.2717	0.0072	0.0804	0.87232	0.0701	0.2370	0.0063
450	0.2315	0.0039	0.1205	0.83455	0.1005	0.1932	0.0032
460	0.2001	0.0039	0.1749	0.79692	0.1394	0.1594	0.0031
470	0.1760	0.0049	0.2471	0.75817	0.1873	0.1334	0.0037
480	0.1544	0.0066	0.3284	0.72817	0.2391	0.1124	0.0048
490	0.1332	0.0092	0.4138	0.6963	0.2881	0.0927	0.0064
500	0.1144	0.0130	0.4945	0.66192	0.3273	0.0757	0.0086
510	0.0999	0.0191	0.5679	0.63007	0.3578	0.0630	0.0120
520	0.0936	0.0285	0.6065	0.6042	0.3664	0.0566	0.0172
530	0.0961	0.0419	0.5995	0.58185	0.3488	0.0559	0.0244
540	0.1098	0.0607	0.5738	0.56221	0.3226	0.0617	0.0341
550	0.1404	0.0884	0.5390	0.54328	0.2928	0.0763	0.0480
560	0.1858	0.1358	0.4457	0.52561	0.2343	0.0977	0.0714
570	0.2360	0.2018	0.2896	0.50727	0.1469	0.1197	0.1024
580	0.2848	0.2724	0.1394	0.49047	0.0684	0.1397	0.1336
590	0.3540	0.3406	0.0507	0.47645	0.0241	0.1686	0.1623
600	0.4596	0.4300	0.0159	0.46416	0.0074	0.2133	0.1996
610	0.5747	0.6106	0.0047	0.45215	0.0021	0.2598	0.2761
620	0.6040	0.8628	0.0003	0.44029	0.0001	0.2659	0.3799
630	0.4873	0.9955	-0.0011	0.42735	-0.0005	0.2082	0.4254
640	0.3133	0.7978	-0.0009	0.41434	-0.0004	0.1298	0.3305
650	0.1703	0.4467	-0.0006	0.40238	-0.0002	0.0685	0.1797
660	0.0845	0.1978	-0.0003	0.3925	-0.0001	0.0332	0.0776
670	0.0405	0.0789	0.0000	0.38477	0.0000	0.0156	0.0304
680	0.0196	0.0296	0.0001	0.37597	0.0000	0.0074	0.0111
690	0.0109	0.0109	0.0000	0.35947	0.0000	0.0039	0.0039
700	0.0070	0.0051	0.0000	0.34689	0.0000	0.0024	0.0018

X=3.6444 Y=3.9984 Z=2.8392

APÉNDICE C. Construcción del Sistema electrónico de control de temperatura y velocidad del aire.

En colaboración con el Ing. en Computación **Arvea Reyes Christian Manuel**.

Para la construcción de un sistema electrónico que permita controlar la temperatura en el interior del secador y medir la velocidad del aire en la entrada de la cámara del mismo, se empleó un sistema basado en el microcontrolador AT89C52 de Atmel perteneciente a la arquitectura 8051.

El sistema se compone de dos subsistemas principales: el sistema de control de temperatura en el que se empleó el sensor LM35Z y el sistema de medición de velocidad de aire basado en el sensor ITR8102.

Para la realización del sistema se contó con las instalaciones del Centro de Laboratorios de Electrónica Avanzada de la Universidad Tecnológica de la Mixteca.

En el sistema se desarrollaron las siguientes funciones:

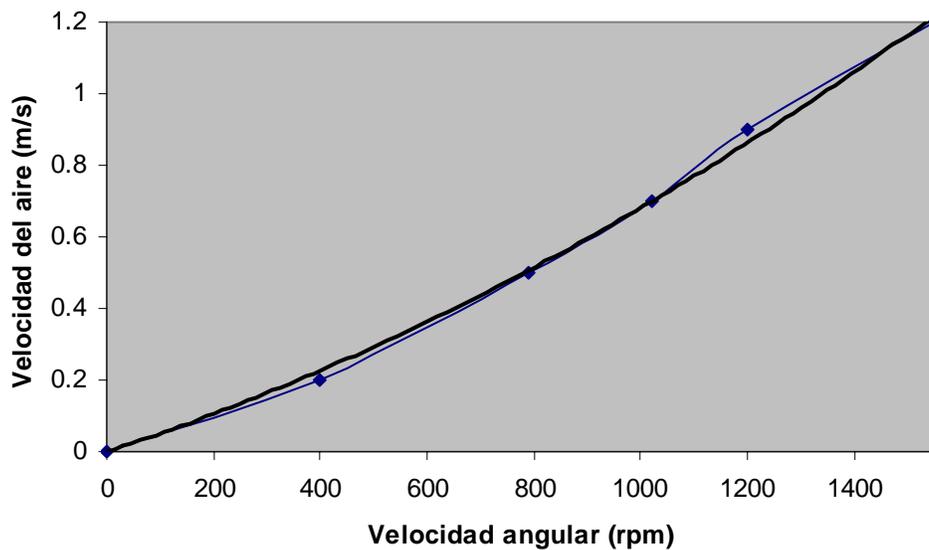
1. *Control de temperatura en la cámara de secado.* El sistema dispone de sensores para evaluar la temperatura en la parte superior, media e inferior de la cámara de secado, de manera que el sistema de calentamiento con base en resistencias eléctricas se active o desactive de acuerdo a la temperatura seleccionada por el usuario. Si la temperatura es menor a la deseada se activan las resistencias y si la temperatura es igual o excede la temperatura deseada, las resistencias se desactivan.
2. *Medición de la velocidad de aire.* Para obtener el valor de la velocidad del aire se emplearon dos sensores infrarrojos que detectan el paso de las aspas del ventilador que genera la corriente de aire, de esta manera se obtiene el valor de las revoluciones por minuto del ventilador y, mediante el empleo de un termoanemómetro modelo 80-4925 FPM marca Extech se midió la velocidad del aire. De acuerdo a la grafica 1 se relacionó la velocidad del aire contra las

revoluciones por minuto medidos con los sensores, esta gráfica se ajustó a una ecuación polinomial de orden 2 obteniendo un error de 0.99 y la siguiente ecuación:

$$y = (2 \times 10^{-07})(x^2) + 0.0005x$$

Donde:

y Velocidad del aire (m²/s)
x Velocidad angular del ventilador (rpm)



Grafica 1. Relación de la velocidad angular del ventilador con la velocidad del aire.

3. *Empleo de una pantalla LCD como interfaz.* Para establecer una comunicación con el usuario más eficiente, se empleó una pantalla LCD de 2 líneas de 16 caracteres para desplegar mensajes al usuario y mostrar los valores de temperatura y velocidad del aire.
4. *Utilización de un teclado matricial de 12 teclas para la obtención de datos.* El usuario dispone de un teclado matricial de 12 teclas para ingresar el valor de la temperatura que se desea controlar, los valores disponibles son los dígitos más dos teclas de control.

5. *Realización de un panel de control.* Se construyó un panel de control para la activación individual de cada componente del equipo, como lo son, el sistema de control, el giro del motor monofásico, el ventilador y las resistencias eléctricas (utilizadas para calentar el aire), además se incluyen interruptores para activar a los sensores de temperatura.

Para el adecuado funcionamiento del hardware fue necesaria la programación del microcontrolador. Mediante el software ProView se desarrolló el código en lenguaje C, en donde las rutinas principales son: la lectura del teclado matricial para el ingreso de datos de usuario, la interpretación de los valores enviados por los sensores y el control del sistema de calentamiento.

Materiales y Metodología

El material empleado en el desarrollo del sistema es el siguiente:

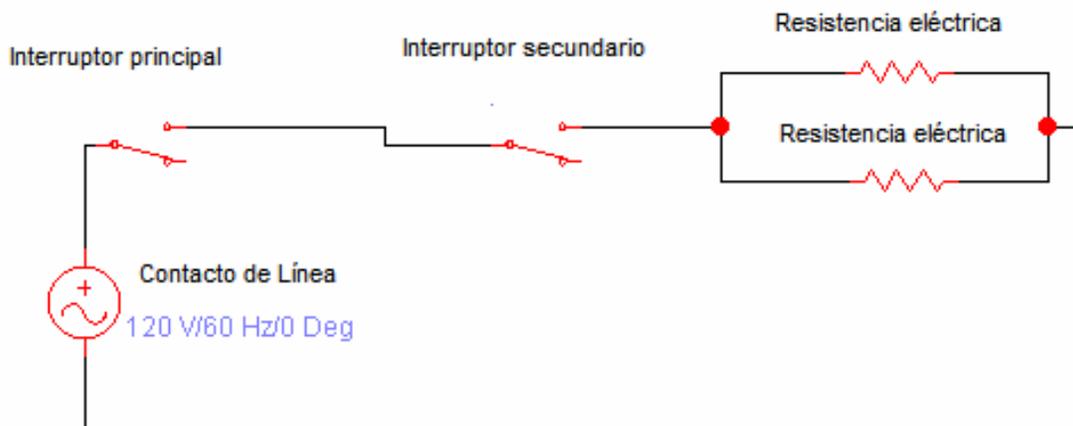
- Material Electrónico
 - Microcontrolador AT89C52 de Atmel
 - Sensor de temperatura LM35Z
 - Sensor infrarrojo ITR8102
 - Convertidor analógico digital ADC0804
 - Cristal oscilador de 12 MHz
 - Pantalla de cristal líquido AND491
 - Amplificadores operacionales LM358
 - Potenciómetros de precisión
 - Compuertas lógicas
 - Capacitares cerámicos y electrolíticos
 - Puente de diodos
 - Transformador de 12 V a 1.5 Amperios
 - Rectificador a 5V
 - Resistencias ¼ Watt
 - Interruptores push-button
 - Placas de armado

- Material Eléctrico
 - Interruptores
 - Reguladores de potencia
 - Cable UTP
 - Cable calibre 14
 - Resistencias eléctricas
- Material Complementario
 - Software ProView
 - Grabador universal AllMax

Para una mejor comprensión del desarrollo del sistema, se presentan por separado las etapas que lo componen, presentado al final una perspectiva completa del sistema.

Sistema de Calentamiento

El componente principal de este sistema es un par de resistencias eléctricas empleadas para calentar el aire que ingresa a la cámara de secado. Enseguida se presenta el circuito de este sistema:



El interruptor principal es activado por el usuario, mientras el secundario es controlado por el *sistema de control* para controlar la temperatura.

Sistema de Panel de Control

El funcionamiento de este sistema tiene como función permitir al usuario activar o desactivar cada sistema utilizando interruptores, colocados en el panel frontal del equipo.

Sistema de Interfaz de Usuario

Para establecer una comunicación con el usuario se requiere de medios que permitan el intercambio de información con el sistema. Para cumplir con este propósito se utiliza una pantalla LCD para la presentación de información (salida) y un teclado matricial para el ingreso de datos (entrada).

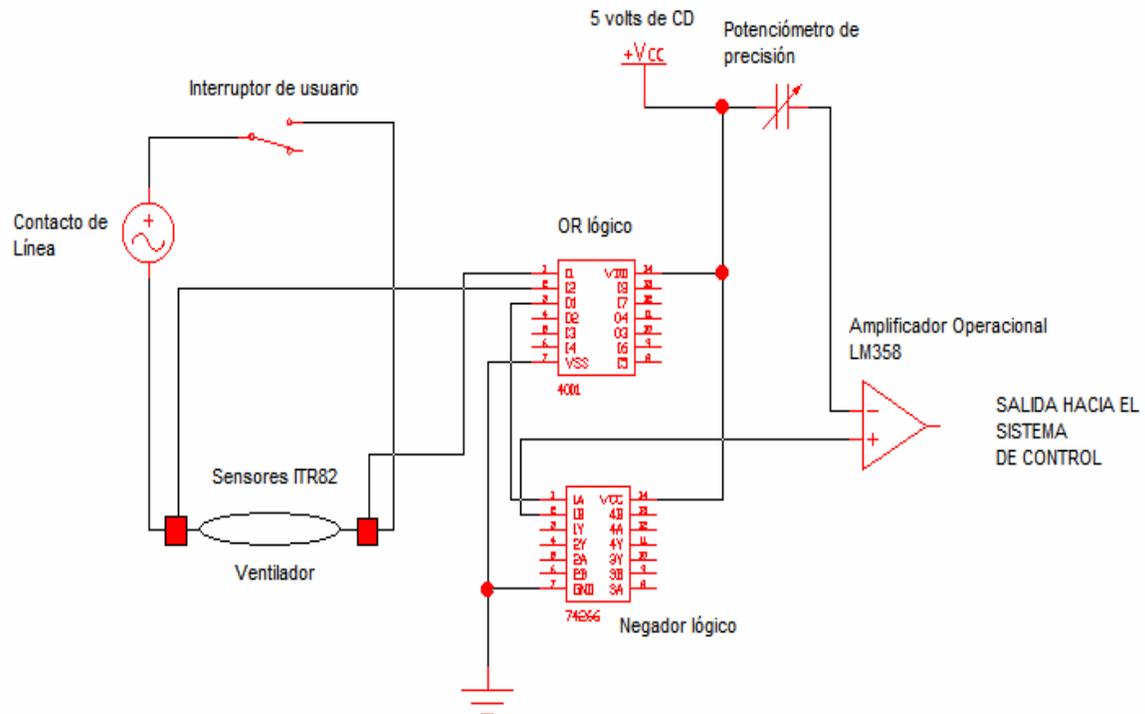
El esquema de este sistema, así como su funcionamiento dependen del *sistema de control* por lo que serán presentados mas adelante.

Sistema de Ventilación

El sistema de ventilación se basa en el control de la potencia consumida por el ventilador del equipo. Esto se realiza mediante un regulador de potencia, el cual se encarga de controlar el paso de la corriente eléctrica en el motor del ventilador.

Para obtener el valor de la velocidad de aire se colocaron dos sensores infrarrojos que se encargan de “contar” las veces que una aspa del ventilador pasa por su posición, de esta manera se obtienen las revoluciones por segundo que desarrolla el motor del ventilador y posteriormente se relacionaron las revoluciones por minuto con la velocidad del aire medida con el termoanemómetro.

La siguiente figura muestra el esquema de este sistema:



Sistema Sensor de Temperatura

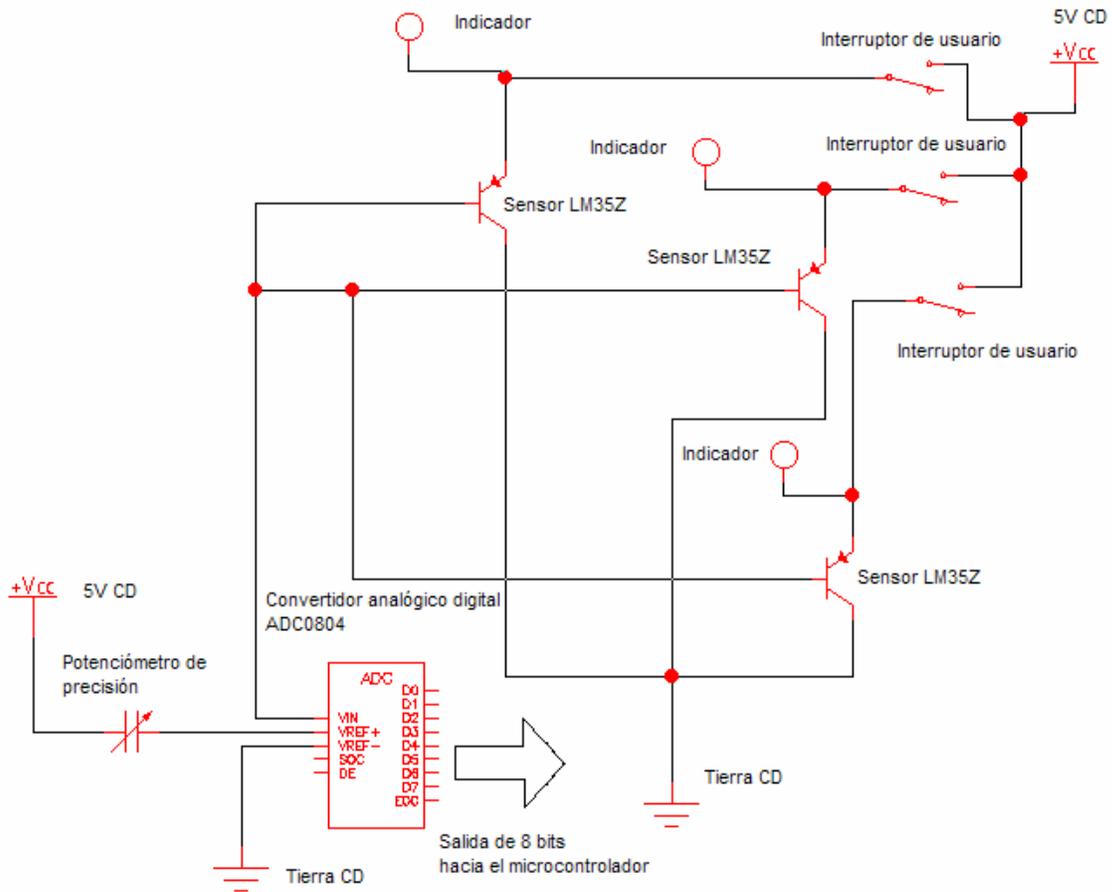
Este sistema está basado en el funcionamiento del transistor LM35Z, el cual presenta un voltaje de salida de acuerdo a la temperatura del ambiente en el que se encuentra, con una relación de 1mV por grado centígrado.

La salida del sensor se dirige a un convertidor analógico digital ADC0804, que de acuerdo a un voltaje de referencia convierte el nivel de voltaje de entrada a un número binario de 8 bits el cual es interpretado en una escala de 0 a 100, que corresponde a grados centígrados.

Un número binario de 8 bits genera 256 valores diferentes y con ellos representamos una escala de 0 a 100, por lo tanto el factor utilizado es el resultado de dividir 100 entre 256, esto es 0.39, de esta manera tenemos el valor de la temperatura de acuerdo a la siguiente escala.

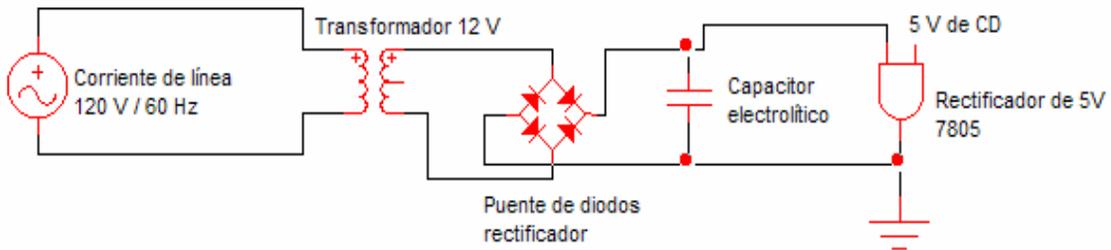
Número de 8 bits	Valor en grados centígrados
0000 0000	0
0000 0001	0.39
0000 0010	0.78
...	...
1111 1110	99.22
1111 1111	99.61

El esquema de este sistema se presenta a continuación:



Sistema de Alimentación

El propósito de este sistema es proveer de corriente directa a los dispositivos de los demás sistemas, para esto se construyó una fuente de voltaje de 5 voltios. El funcionamiento de la fuente consiste en transformar y rectificar la señal de línea de 120 voltios de corriente alterna (CA) para obtener 5 voltios de corriente directa (CD) a su salida. El esquema del sistema se presenta a continuación:



Sistema de Control

El control de todo el sistema se basa en el microcontrolador, este dispositivo se encarga de interpretar las entradas del *sistema de interfaz de usuario*, del *sistema sensor de temperatura* y del *sistema de ventilación*, así como de enviar señales de control al *sistema de calentamiento* y presentar los datos al usuario.

Para el adecuado funcionamiento del sistema se realizó un programa en lenguaje C en el software ProView, que esta orientado a la programación de microcontroladores de la familia 8051. Después de compilar el código en ProView, obtenemos un archivo HEX, que es el código que manejan microcontroladores basados en la tecnología Intel, este archivo se graba directamente a la memoria del microcontrolador AT89C52 a través del grabador universal AllMax. Todo el equipo y software utilizado en la realización del sistema se encuentra disponible en los laboratorios de Electrónica Analógica y de Comunicaciones Digitales del Centro de Laboratorios de Electrónica Avanzada de la UTM.

El código completo del programa se presenta como funciones principales:

- Inicialización de la pantalla LCD.
- Escritura de mensajes en la pantalla LCD.
- Lectura del teclado matricial.
- Contador interno de 1 segundo.
- Lectura de datos del convertidor analógico digital (temperatura).
- Lectura de interrupciones generadas por los sensores infrarrojos (ventilador).
- Interpretación y conversión de datos.

Ahora veremos el diagrama de bloques del sistema completo. En el se muestra el intercambio de datos entre los sistemas.

