

Desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales usando control difuso

Alejandro Castañeda Miranda*, Adrián González Parada**, Rafael Guzmán Cabrera**, Oscar G. Ibarra Manzano**

RESUMEN

Recientemente, el aprovechamiento de la energía solar en el deshidratado de productos agrícolas se ha vuelto cada día más común debido a los altos rendimientos en los productos post-cosecha. La inversión en tecnologías propias para contribuir con los productores del sector agroalimentario es un factor importante para el desarrollo de las cadenas productivas de nuestro país. En este trabajo se presenta el desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales utilizando control difuso. Este es un sistema térmicamente controlado que permite disminuir el tiempo de secado de varios días a unas horas. Se realizaron pruebas de secado usando flor de jamaica, en las cuales se pudo disminuir el tiempo de secado de cuatro días a aproximadamente 5 h. Se presentan tanto la parte de diseño conceptual, como resultados experimentales del mismo. Los resultados obtenidos permiten ver la viabilidad del diseño propuesto.

ABSTRACT

Recently, the use of solar energy in the dehydration of agricultural products is becoming more common as high yields in the post-harvest products. Investment in technologies for contributing to the producers of food products is an important factor for the development of the productive chains of our country. This paper presents the development of a solar oven for drying plants and vegetables using fuzzy control. This is a heat-controlled system that allows decreasing the drying time from several days to hours. Drying tests were conducted using jamaica flower, which could decrease the drying time from four days to about 5 h. We present both the conceptual design of the experimental results. The results obtained allow us to see the feasibility of the proposed design.

Recibido: 20 de octubre de 2009
Aceptado: 30 de octubre de 2011

INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos más antiguos utilizados por el hombre para la conservación de los alimentos es la deshidratación (principalmente en las zonas rurales). En un ambiente seco no pueden actuar ni los microorganismos ni las enzimas que arruinan estos productos, por esta razón el deshidratado es uno de los métodos más efectivos para preservar las frutas. Estos métodos de secado se originaron en los campos de cultivo cuando se dejaban deshidratar de forma natural las cosechas de cereales, forraje, y frutos. Comúnmente, estos productos eran extendidos al aire libre, sobre todo en superficies naturales, donde se exponían a la acción directa de los rayos solares, de tal manera que el producto recibiera calor y aireación para evaporar el agua. La desventaja de esta técnica era la disminución en la calidad del alimento, debido al poco control de higiene, así como los efectos del clima y de la contaminación. Este hecho llevó al diseño y desarrollo de secadores y deshidratadores solares, los cuales, haciendo uso de la luz solar y de las corrientes de aire, permitieron llevar a cabo el proceso de una manera mucho más eficiente. En nuestros días, existen sistemas de deshidratación mecánicos en los cuales el secado se realiza por medio de combustible, es decir, el secado se lleva a cabo por efecto de los gases generados al quemar el combustible (o al calentar el aire que, a su vez, llevará a cabo el proceso de deshidratación).

Palabras clave:

Horno solar; deshidratado; plantas y vegetales; control difuso.

Keywords:

Solar oven; dehydrated; plants and vegetables; fuzzy control.

En la actualidad, la deshidratación de alimentos sigue vigente por dos principales razones: la primera es que existen productos que si no se

*Universidad Politécnica de Querétaro, Carretera estatal 420 s/n, El Rosario, C. P. 76240, El Marqués, Querétaro, México.

**División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Carretera Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8 km, Comunidad de Palo Blanco, C. P. 36885, Salamanca, Gto. México. Tel. +52 (464) 64 7 99 40. Correo electrónico: guzmán@ugto.mx.

comercializan inmediatamente después de la cosecha, representan pérdidas para los productores; la segunda razón son las ventajas que se obtienen al llevar a cabo este proceso, como lo son el fácil transporte (por el menor peso) y la estabilidad microbiológica y fisicoquímica (facilitando de esta manera su almacenamiento y manipulación). Cabe mencionar que el valor nutritivo de la mayoría de los alimentos deshidratados no se ve afectado en forma importante con estas técnicas (Geankoplis, 1999). El secado se extiende a una amplia gama de productos, entre los que destacan: pescados, carnes, frutas, verduras, azúcar, almidones, especias y hierbas, entre otros (Ekechucwu *et al.*, 1999).

A lo largo del tiempo, se han desarrollado tecnologías cada vez más eficientes y eficaces para la deshidratación de alimentos; estas tecnologías se relacionan directamente con el contenido de agua en los alimentos, el cual es muy variable: 60 % - 75 % en carnes, 10 % - 20 % en cereales, 80 % - 90 % en frutas y hortalizas y 90 % - 95 % en hongos comestibles (Crapiste *et al.*, 1997). Los métodos de secado se han desarrollado precisamente alrededor de los requerimientos específicos de cada producto. En todos los métodos de deshidratación, el alimento a secar se debe poner en contacto con un medio, que con frecuencia es el aire, para eliminar la humedad del producto y sus alrededores. En general, la deshidratación se conduce según dos métodos básicos: proceso adiabático y no adiabático. En el proceso adiabático el calor de vaporización es suministrado por el calor sensible del aire en contacto con el producto a secar, mientras que en el proceso no adiabático el calor de evaporación es aportado por el calor radiante (o transferido) a través de paredes en contacto con el material a secar. En la selección del método adecuado de secado, así como la velocidad, se deben tomar en cuenta las características de los productos a deshidratar.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un horno solar para el secado de plantas y vegetales, la temperatura del horno es controlada por medio de redes neuronales a través de un sistema basado en control difuso. Al ser un proceso térmicamente controlado, se pretende disminuir el tiempo de secado de diversos productos agrícolas. Como caso de estudio, se presenta a continuación el secado de la flor de jamaica (*Hibiscus sabdariffa*), la cual es originaria de África y fue introducida a México en la época de la colonia. Desde su introducción al país, se ha cultivado en las regio-

nes cálidas y semi-cálidas; la producción se concentra en 15 estados: el 60 % de la producción en Guerrero, el 21 % en Oaxaca, el 4 % en Nayarit y el resto en los estados de Campeche, Colima, Jalisco, Michoacán, Morelos, Puebla, Quinta Roo, Sinaloa, Tabasco, Tamaulipas, Veracruz, y Yucatán. La producción se destina en su mayoría al consumo interno.

La flor de jamaica crece como arbusto y alcanza hasta 2 m o más; su flor es carnosa; la corola es de color blanco y el cáliz, cuando madura, se torna rojo con 4 o 5 pétalos y con largas espinas que rodean la flor y el tallo. Es una planta sensible al frío. Al alcanzar los 1,5 m, debe ser podada para que las ramas se extiendan a los lados. La cosecha se realiza cuando la planta inicia la maduración. Su ciclo es de 6 a 7 meses; se siembra en julio, florece en octubre y se cosecha entre diciembre y enero. Es un cultivo de temporal cuyo producto se encuentra disponible todo el año. En el mundo existen más de 150 variedades de esta planta. Ya seco el cáliz de la flor, éste tiene una vida de anaquel de 1 año; debe almacenarse seco, sombreado y airado para evitar plagas (Augstburger *et al.*, 2004).

La parte que más se aprovecha de la planta de jamaica es el cáliz o flor, la cual se utiliza en la fabricación de diversos productos, sin embargo, los cálices con mucha humedad se descomponen fácilmente debido a las condiciones favorables para reproducción de los microorganismos. Aún más, si se deshidratan demasiado o muy rápido, los cálices tienen menor cantidad de colorantes y saborizantes. Con motivo de esto, se tomó como caso de estudio el secado de dicha flor, ya que, como se puede apreciar, se requiere de un buen control de temperatura para llevar a cabo el deshidratado sin que se presenten las condiciones que faciliten el desarrollo de microorganismos (que terminen dañando al producto) y sin que la flor pierda sus características distintivas.

Cuando la flor es secada de manera tradicional, tarda aproximadamente 96 h (Brendorfer *et al.*, 1987); de aquí la necesidad de desarrollar herramientas que permitan disminuir este tiempo sin sacrificar la calidad del producto. Actualmente, la flor de jamaica es utilizada para elaborar diversos productos, entre los que destacan cervezas, jugos, jaleas y helados. En años recientes, se ha incrementado la producción de jamaica a nivel nacional, y cada vez es más la cantidad que se exporta a otros países. Por esta razón, se han desarrollado recientemente nuevas alternativas

para su conservación, con la clara finalidad de disminuir las pérdidas post-cosecha (Augstburger *et al.*, 2004).

Es necesario destacar, antes de proseguir, que el resto del artículo está organizado de la siguiente manera: en la sección segunda se presentan las consideraciones de diseño utilizadas en el presente trabajo; en la sección tercera se presentan los resultados experimentales obtenidos; por último, en la sección cuarta se presentan las conclusiones y el trabajo a desarrollar.

DESARROLLO

Para el diseño de un horno solar que sirva como sistema de secado de diversos productos agrícolas, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones: el aire de alimentación se calienta con energía solar, el mecanismo debe responder a los requerimientos de temperatura y de velocidad de banda durante el proceso de secado del producto que se desea deshidratar. Estos productos deben ser entregados libres de contaminantes, a diferencia de los métodos tradicionales de secado. Respecto al diseño de colectores solares, es necesario establecer un criterio con el fin de determinar el mejor colector para aplicaciones específicas; los procedimientos termodinámicos establecen una guía óptima para el diseño de superficies solares de colectores. Tales procedimientos se caracterizan y determinan de acuerdo a la aplicación y condiciones establecidas de operación mediante un modelo térmico (Garg P., 1997).

Tomando en cuenta las relaciones de los procesos de secado, el mecanismo funciona en forma continua y, por las condiciones físicas de adición de calor, el proceso para el deshidratado debe ser por contacto directo entre el producto y el aire de secado. De acuerdo al tratamiento teórico, el mecanismo predominante de transferencia de calor es por convección forzada, ante lo cual se debe considerar que los parámetros de secado para tener un adecuado control del proceso son: la transferencia de calor, la atmósfera de secado, el sistema sólido-líquido y las propiedades del sólido (Brendorfer *et al.*, 1987). Es importante considerar las características del producto que se desea deshidratar, ya que en función de éstas serán los ajustes que se deben realizar en cuanto a temperatura y tiempo de secado (entre otros factores). En este trabajo se realizaron pruebas utilizando flor de jamaica. El prototipo desarrollado permite el secado de hasta 50 kg diarios de producto por cada horno instalado. Una vista del diseño conceptual se muestra en la figura 1.

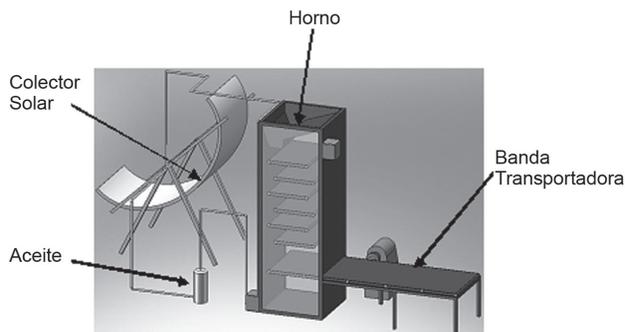


Figura 1. Diseño conceptual del prototipo propuesto.

Como se puede apreciar, el sistema propuesto consta del colector solar, un sistema de transmisión por medio de una banda transportadora y un recipiente contenedor de aceite (el cual es utilizado para calentar el producto e iniciar el proceso de deshidratación). Usualmente en el secado de productos alimenticios, los efectos causados en las propiedades físicas son el resultado de cambios en el tamaño, color, sabor y textura; muchos cambios químicos y enzimáticos toman fuerza en la conversión, sin embargo, estos efectos son no deseables debido a que el producto pierde características y propiedades propias. Una comparación de calidad entre secadores solares es necesaria puesto que las cualidades dependen de la temperatura, del diseño del secador, el flujo de aire y de otros parámetros (como los sensoriales). Los parámetros sensoriales son una combinación de las diferentes maneras de percibir el estado de los productos a la hora de consumirlos, es decir, se juzgan las cualidades que éstos presentan de forma visual, reflejándose en el color, tamaño, uniformidad, ausencia de defectos. No obstante, además de los parámetros sensoriales, es importante tener en cuenta que existen parámetros cuantitativos que son sumamente importantes, y que se deben de evaluar para determinar la calidad del producto (como son los atributos nutricionales y la capacidad de rehidratación).

Con lo mencionado hasta este punto, queda claro que se debe tener un muy buen control de temperatura con la finalidad de optimizar el tiempo de secado y conservar las características propias del producto. La temperatura del horno desarrollado en el presente trabajo es controlada por medio de control difuso. Un sistema de control basado en control difuso emplea principios de lógica difusa, y permite convertir estrategias de control basado en conocimiento experto en una estrategia de control automático (Astrom *et al.*, 1995; Chi-Tsong C., 1999; Witold, 1996).

El control difuso, a su vez, se rige por un conjunto de redes neuronales. Las redes neuronales artificiales pretenden emular la red neuronal biológica y se obtienen interconectando neuronas. Para ello se supone un modelo matemático simplificado de la neurona biológica. Este modelo es una generalización del propuesto por McCulloch y Pitts en 1943 (Michie *et al.*, 1994). El sistema propuesto tiene dos sensores y un motor para cada eje (cuatro foto-sensores, S_1 a S_4 , y dos motores, M_1 y M_2 , en total) como se muestra en la figura 2. En esta figura se pueden apreciar cuatro pesos sinápticos (W) por neurona junto con su umbral de activación.

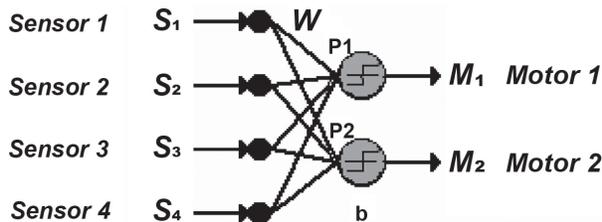
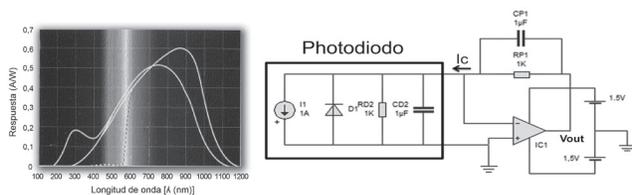


Figura 2. Red neuronal para la inclinación del seguidor.

Se llevó a cabo una caracterización del sensor óptico con la finalidad de obtener una relación entre la longitud de onda de la luz y la respuesta del sensor. La gráfica de estos resultados se muestra en la figura 3. También se presenta el diagrama esquemático del mismo, la configuración de conexión y la respuesta obtenida en el dominio de la frecuencia, de la cual además se muestra su expresión matemática. Como se puede ver, la máxima respuesta del sensor se tiene entre los 800 nm y 900 nm, lo cual se inscribe dentro del espectro de luz a la zona de infrarrojo (la luz visible se encuentra entre los 380 nm y los 780 nm).



$$\frac{V_o}{I} = \frac{R_f \Delta V}{s [R_f (C_d - (C_f (\Delta V - 1)) + C_f)] - (\Delta V - 1)}$$

Figura 3. Respuesta del sensor óptico y esquemático del mismo.

Como complemento a la respuesta del sensor óptico, se llevó a cabo la medición de la energía captada por el colector solar en función de las horas del día. Estos resultados se muestran en la figura 4, en la cual se puede apreciar que la mayor energía es captada entre las diez y las quince horas. La finalidad de estas

mediciones es que por medio de los motores y todo el sistema de control, el colector solar pueda dar seguimiento al sol, buscando captar la mayor cantidad de energía y hacer entonces más eficiente el proceso de deshidratación de los productos agrícolas.

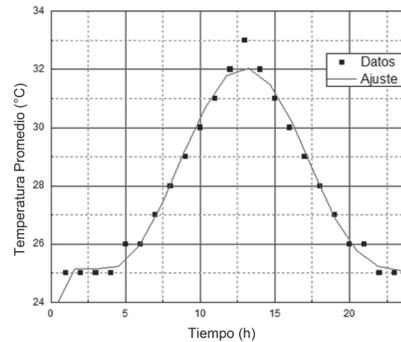


Figura 4. Respuesta del sistema mostrando el tiempo (h) versus temperatura.

Al momento de efectuar el acoplamiento del horno y los motores, usando el control difuso, se obtiene la respuesta mostrada en la figura 5. Cabe señalar que los resultados mostrados en esta figura de los motores y del horno, corresponde a los obtenidos al realizar un ploteo del seguidor solar contra la posición angular del sol; la respuesta del sistema arroja que los pesos sinápticos de la red contra el seguidor ajustan de manera automática la orientación del sistema. La finalidad es reducir el tiempo de secado en condiciones controladas afectando lo menos posible las propiedades básicas de valor nutricional. En nuestro caso de estudio, del secado de la flor de jamaica, por ejemplo, se debe considerar una temperatura dentro del secador de 60 °C, ya que con esto se garantiza el mantener las propiedades básicas de la flor (v. gr., el contenido de ácido ascórbico).

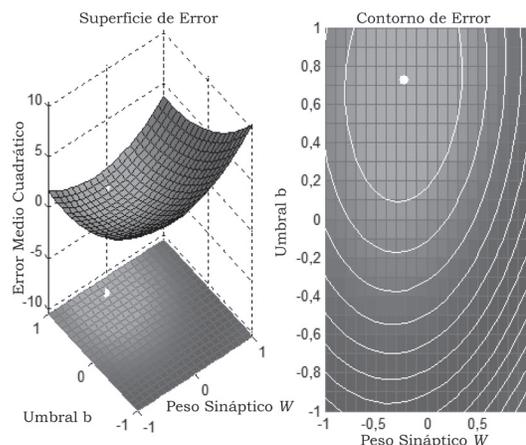


Figura 5. Respuesta del sistema neuronal ante la aplicación.

Es importante, sin embargo, poder tener el control de la temperatura dentro del secador, ya que el tiempo de secado para productos agrícolas es diferente y depende de las características físico-químicas del producto. En este sentido, un buen control de la temperatura permitirá la obtención de mejores resultados, y el control difuso es el encargado de proporcionar dicho control.

En la figura 6 se muestra la disposición física del mecanismo de transmisión de movimiento en el sistema de secado propuesto en el presente trabajo.

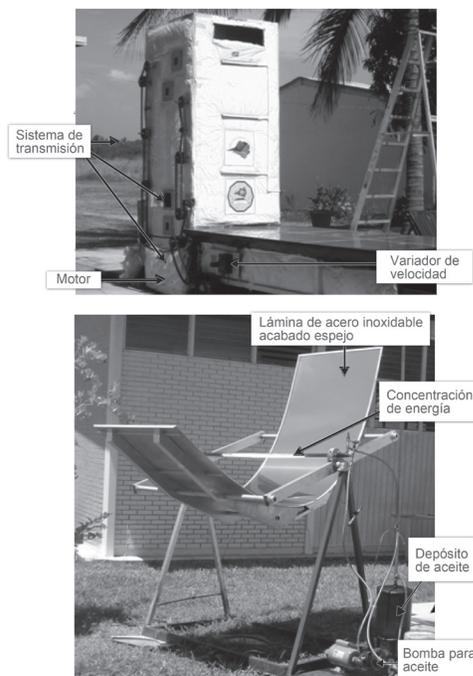


Figura 6. Mecanismo de transmisión de las bandas y concentrador de energía para calentar aceite.

RESULTADOS

La hipótesis del presente trabajo es que, mediante el diseño de un control difuso apropiado del sistema de secado térmicamente dirigido, se lograrán deshidratar productos agrícolas en menor tiempo y, del mismo modo, se disminuirán los niveles de contaminación (producidos por el sistema de secado tradicional), permitiendo así la generación de fuentes de empleo en el nivel rural. A lo anterior hay que agregarle que el sistema de control difuso fomentará el aprovechamiento y el desarrollo de las energías alternativas en nuestro medio social.

Como caso de estudio, se llevó a cabo el secado de la flor de jamaica. En nuestro estudio, el contenido óptimo de humedad recomendado para el deshidratado y secado de la jamaica fue de 10 % a 12 %; una vez deshidratadas las flores, se almacenaron en un lugar

fresco y seco durante tres o cuatro meses. Cabe aclarar que para obtener un producto seco, que cumpliera con los estándares de calidad que el mercado demanda, se tuvo el suficiente cuidado de alcanzar el equilibrio en el nivel máximo de secado y, de tal modo, obtener la eficiencia económica, la alta calidad micro-biológica y una conservación correcta de los componentes esenciales en la jamaica (los cuales se manipulan durante el proceso de secado). Para el caso de la flor, entre las variables que se debieron controlar se encuentran: el tiempo requerido para el secado, el porcentaje de humedad en el producto deshidratado, el costo de operación, la capacidad de carga y descarga, sabor, color, textura, limpieza y control del proceso. El tiempo de secado tradicional es de 96 h; con el diseño apropiado del sistema de secado térmicamente dirigido se logró deshidratar la jamaica en un tiempo de solo de 5,1 h en promedio, con una desviación estándar de 1,8 h. Es necesario aclarar algo a este respecto que entre los beneficios obtenidos no se haya solamente el tiempo de secado, además fue posible disminuir los niveles de contaminación producto del sistema de secado tradicional y se permite la generación de fuentes de empleo en el nivel rural, así como, el aprovechamiento del desarrollo de las energías alternativas en nuestro medio. Con la finalidad de mostrar las condiciones de secado, con respecto a la humedad, peso (kg) y temperatura (°C), se determinaron las condiciones iniciales de la jamaica, así como la pérdida de humedad y peso al estar sometida a la temperatura. Los resultados logrados se muestran en la gráfica de la figura 7. En ésta se puede observar la manera en que la flor de jamaica perdió peso conforme la temperatura se fue incrementando. Los datos obtenidos para esta prueba fueron:

- Peso de la jamaica en seco = 0,152 kg de sólido seco.
- Humedad inicial = 0,85 kg de H₂O/ 0,150 kg de sólido seco.
- Humedad final = 0,124 kg de H₂O/ 1 kg de sólido seco.

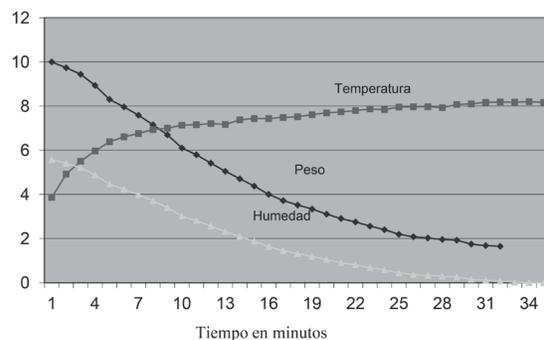


Figura 7. Determinación de la pérdida de peso y humedad en la flor de jamaica.

De acuerdo con estos datos, por cada kilogramo de flor de jamaica fresca existen 850 g de agua, por lo que para tener un kilogramo de flor seca (con 0,124 kg de humedad) se necesitaría un orden de 5,7 kg de jamaica fresca.

CONCLUSIONES

El aprovechamiento de la energía solar en el deshidratado de productos agrícolas es un elemento que, en nuestros días, cobra una gran importancia, ya que mediante el uso adecuado de la tecnología se pueden lograr altos rendimientos en los productos post-cosecha. Este trabajo muestra una alternativa eficiente y de bajo costo para el secado de productos agrícolas (en particular, la flor de jamaica). Gracias al experimento realizado, fue conseguida una reducción muy significativa en el tiempo de secado de la jamaica (logrando conservar sus características naturales), lo cual nos permitió comprobar el buen desempeño de sistema de control de temperatura por medio de control difuso. Del mismo modo, se consiguió una reducción en el tiempo de secado muy significativa (de 96 h a 5,1 h en promedio) logrando conservar las características requeridas del producto bajo estudio. También podemos concluir que existe una necesidad de dar a conocer a los campesinos, y productores de diversos productos agrícolas, los parámetros de calidad en el proceso de deshidratación, esto último en aras de reducir al mínimo cualquier contaminante que pudiera afectar la calidad sanitaria del producto. Como trabajo futuro, queda el diseño y desarrollo de una herramienta de cálculo y simulación con la cual se puedan comparar los resultados experimentales contra los determi-

nados a través del modelado de diferentes productos agrícolas, así como realizar pruebas de secado con otros productos de la misma índole.

REFERENCIAS

- Astrom, K. J., Hagglund, T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. Instrument Society of America. Research Triangle Park. N. C.
- Augstburger, F., Berger, R., Censkowsky, U. (2004). *Producción ecológica de Híbisco*. Natutland. Alemania: pp. 223-243.
- Brendorfer, B., Kennedy, L., Bateman, O., Trim, D. S., Mrema, G. C., Brobby, C. W. (1987). *Solar dryers, their role in post harvested processing*. Commonwealth Science Council. Londres.
- Chi-Tsong Chen (1999). *Linear system theory and Design*. Oxford University Press.
- Crapiste, G. H., Totstein, E. (1997). Design and performance evaluation of dryers. En Valentas Kenneth, J., Rotstein, E., Singh Paul (eds.). *Handbook of food engineering practice*. New York, CRC Pres.
- Ekechucwu, O. V., Norton, B. (1999). Review of solar energy drying system II: an overview of a solar drying technology. *Energy conversion and management*, vol. 40: pp 615-55.
- Geankoplis, C. J. (1999). *Proceso de transporte y operaciones unitarias*. CECSA. México.
- Garg, P. (1997). *Solar energy fundamental and application*. Tata McGraw Hill publishing CO. Ltd. New Delhi.
- Michie, D., Spiegelhalter, D. J., Taylor, C. C. (eds.) (1994). *Machine Learning, Neural and Statistical Classification*.
- Witold Pedrycz. (1996). *Fuzzy control and Fuzzy systems*. John Wiley & Sons Inc.