

# **DESARROLLO DE SECADORES SOLARES HÍBRIDOS CON CONTROL INTELIGENTE PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL USO DE ENERGÍA**

## *DEVELOPMENT OF HYBRID SOLAR DRYERS WITH INTELLIGENT CONTROL TO OPTIMIZE ENERGY USE*

### ***José Enrique Botello Álvarez***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*enrique.botello@itcelaya.edu.mx*

### ***Juan José Martínez Nolasco***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*Juan.martinez@itcelaya.edu.mx*

### ***Micael Gerardo Bravo Sánchez***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*gerardo.bravo@itcelaya.edu.mx*

### ***José Carlos González Figueroa***

Tecnológico Nacional de México / IT de Celaya, México  
*m1903122@itcelaya.edu.mx*

**Recepción:** 29/abril/2020

**Aceptación:** 29/octubre/2020

## **Resumen**

En la actualidad, la demanda de alimentos se ha incrementado sustancialmente en los países en desarrollo. Por otro lado, una tercera parte de los alimentos producidos son no consumidos, generando pérdidas y desperdicios en las cadenas de producción. Como línea de investigación, se considera la valorización de pérdidas y desperdicios de alimentos a través del desarrollo y mejora de productos y procesos destinados hacia la alimentación humana y ganadera siguiendo la filosofía de la “Producción más Limpia”. EL consumo energético en el secado industrial de alimentos se encuentra en el intervalo de 3 a 16 MJ por kilogramo de agua evaporada, con un costo de producción aproximado de \$4.71 a \$25.13 por la deshidratación de un kilogramo de producto seco en consumo de energía eléctrica. Actualmente se desarrolla un secador híbrido, que para una carga de 10 kg de vegetales frescos en operación por lote consume 5.66 MJ de energía eléctrica por

kilogramo de agua evaporada. Se postula que el consumo energético puede abatirse a través de un sistema control y administración de la energía.

**Palabras Clave:** Calidad de secado, caracterización, controlador, secador híbrido solar-eléctrico, monitoreo.

## **Abstract**

*Actualy, the demand for food has increased substantially in developing countries. On other hand, a third part of the food produced is not consumed, generating losses and waste in production chains. How investigation line, the valuation of food losses and waste is considered through the development and improvement of products and processes destinated for human and livestock feeding, following the “cleaner production” philosophy. The energy consumption in the industrial drying of food is in the range of 3 to 16 MJ per kilogram of evaporated water, with an approximate production cost of \$4.71 to \$25.13 for the dehydration of one kilogram of dry product in electrical energy consumption. Currently a hybrid dryer is being developed, which for a load of 10 kg of fresh vegetables in operation per batch consume 5.66 MJ of electrical energy per kilogram of evaporated water. It is postulated that energy consumption can be reduced through an energy management and control system.*

**Keywords:** *Characterization, controller, drying quality, hybrid dryer solar-electric, monitoring.*

## **1. Introducción**

El secado es una operación unitaria usada desde la antigüedad para la preservación de alimentos, consiste en la remoción de la humedad (Leon et al. 2002). Este proceso se implementa haciendo pasar aire caliente sobre o a través de los productos en deshidratación, normalmente se realizan en un rango de temperatura entre 40 y 60 °C, se busca que los alimentos conserven sus propiedades sensoriales y nutricionales [Kant et al., 2016].

El secado se realiza en contenedores donde la temperatura interna es controlada. Los secadores se catalogan en rotativos y no rotativos.

En el caso particular de secadores de secadores solares se clasifican según Zaredar et al (2018) en:

- Secadores solares directos.
- Secadores solares indirectos.
- Secadores solares pasivos (sin partes eléctricas).
- Secadores solares activos (con partes eléctricas).

En un secador solar híbrido se combina la energía solar con alguna energía convencional: calentamiento eléctrico o calorífico de la combustión de combustibles fósiles. En caso de secadores directos la energía solar incide directamente sobre los materiales, mientras en los indirectos la energía solar calienta el aire alimentado al secador, a través de un colector expuesto al sol.

La función de un colector solar es absorber la radiación solar; convirtiéndola en energía térmica empleada en el calentamiento de aire que fluye en su interior [Zoukit et al., 2019]. En día soleado un colector puede recibir una incidencia solar de hasta  $1000 \text{ W/m}^2$  generando aire con una temperatura promedio de  $56 \text{ }^\circ\text{C}$ . Un colector calentar un flujo adecuado de aire para mantener la operación de un secador durante unas 4 o 5 horas en un rango de temperaturas de  $40$  a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  [Zoukit et al., 2019].

La producción y emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) ha contribuido significativamente al cambio climático y calentamiento global. Los GEI son principalmente dióxido y monóxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno, entre otros. Normalmente la emisión de GEI se mide en toneladas equivalentes de  $\text{CO}_2$ . Por ejemplo, 1t de metano tiene un efecto invernadero equivalente a 21 t de  $\text{CO}_2$ . Actualmente, China es el principal productor de GEI, en el 2018 México generó 0.495 Mt de  $\text{CO}_{\text{eq}}$ .

La producción de  $\text{CO}_2$  se debe principalmente a la combustión de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica, seguido por el consumo de combustibles en maquinaria y automóviles. En México durante el 2017 la producción total de energía eléctrica fue de 823 TWh, de la cual solo 12.64 GWh se produjo por hidroeléctricas y 0.90 GWh por generación fotovoltaica.

El diseño y operación de equipos de procesos deben tener como premisa la eficiencia energética, así como incorporar el uso de energías renovables para contribuir significativamente al a reducir y mitigar el cambio climático.

Se han propuesto varias alternativas para reducir el consumo de energías convencionales y un mejor aprovechamiento de la energía solar en la operación y diseño de secadores. Una propuesta muy interesante es que junto con el colector de energía solar, debería existir un acumulador de energía [Reyes, Cubillos, Mahn, & Vásquez, 2014]. Este debe tener la particularidad de usar materiales de cambio de fase, donde, se acumule energía solar como calor latente de fusión. De esta manera, cuando la radiación solar disminuya, la placa absorbidora siga transfiriendo la energía acumulada con el material fundible.

Sin embargo, no todo se trata de diseño estructural. El uso de un control adecuado al sistema y el debido monitoreo de las correctas variables es esencial para implementar estrategias para aumentar la eficiencia energética. Durante el secado de alimentos se busca alcanzar y mantener estable la temperatura de operación en la cámara de secado. Sin embargo, el control de la temperatura no es suficiente para un buen secado, para obtener una buena calidad de productos y un secado rápido, los productos deben secarse con un equipo que pueda controlar la temperatura, el flujo de aire y la humedad [Zoukit et al., 2019].

Además, el principio de control que se debe realizar es que en rangos donde el error es grande; el control difuso debe ser aplicado, mientras que en el rango donde el error es pequeño; el controlador PID estará adaptado para actuar en este instante. De esta manera, con el control difuso se aumenta la velocidad de respuesta y se logra superar la característica no lineal del sistema, mientras que el PID elimina el error en estado estable [Xiao, Chen, Ouyang, Shao, & Qin, 2014].

El consumo energético en el secado industrial de alimentos se encuentra en el intervalo de 3 a 16 MJ por kilogramo de agua evaporada, con un costo de producción aproximado de \$4.71 a \$25.13 por la deshidratación de un kilogramo de producto seco en consumo de energía eléctrica. Actualmente, se desarrolla un secador solar híbrido, que, para una carga de 10 kg de vegetales frescos en operación, por lote, consume 5.66 MJ de energía eléctrica por kilogramo de agua evaporada. Se postula

que el consumo energético puede abatirse a través de un sistema control y administración de la energía.

## 2. Métodos

Actualmente, el secador que se está trabajando es un secador solar híbrido indirecto. Este secador se puede desglosar en tres partes fundamentales: el colector, la cabina de secado y el controlador del sistema.

### El colector solar

En la actualidad, el recurso solar, siendo el colector solar con el que cuenta el secador, tiene un área aproximada de 0.74 m<sup>2</sup>; donde las medidas de este son de 1.38 m de largo por 0.65 m de ancho y 0.15 m de profundidad.

Este elemento es posicionado en una planicie (al aire libre), teniendo una inclinación de 27° respecto del suelo. Con esta posición se logra obtener una incidencia perpendicular de los rayos solares sobre el panel, teniendo como consecuencia, una mayor eficiencia para la captación de estos.

El registro se realizó tomando las lecturas de la temperatura de entrada y de salida mediante sensores; y la irradiación solar presente investigándose en página web meteorológica. Cada registro estuvo comprendido en intervalos de 15 minutos entre cada uno. La modelación de intercambio de calor para la obtención de la eficiencia del colector se lleva a cabo al realizarse un balance de energía, donde las energías de entrada son igual a las energías de salida como se muestra en la ecuación 1.

$$\sum_{j=1}^n Q_{jEntrada} = \sum_{i=1}^n Q_{iSalida} \quad (1)$$

Esta ecuación se desarrolló en los términos que aparecen en la ecuación 2. Se incorpora las pérdidas de energía hacia el cuerpo del colector y su disipación al medio ambiente circundante.

$$Q_{AireEntrada} + Q_{Solar} = Q_{AireSalida} + Q_{Pérdidas} \quad (2)$$

Los flujos de calor en entradas y salidas de aire se evalúan por el producto del flujo másico y su entalpia específica (ecuación 3). Definiremos el calor de pérdida como

la diferencia entre la energía solar incidente y el calor útil. El último término es la cantidad de energía ganada por el aire al pasar a través del colector (ecuación 4).

$$(\dot{m} \hat{H})_{Aire_{Entrada}} + Q_{Solar} = (\dot{m} \hat{H})_{Aire_{Salida}} + (Q_{Solar} - Q_{Util}) \quad (3)$$

$$Q_{Util} = \dot{m}(\hat{H}_{Salida} - \hat{H}_{Entrada}) \quad (4)$$

Entonces la eficiencia energética puede expresarse por la ecuación 5.

$$\eta = \frac{\dot{m} (\hat{H}_{Salida} - \hat{H}_{Entrada})}{Q_{Solar}} \times 100 \quad (5)$$

Para la obtención del calor solar, se obtuvo el producto de la irradiación solar por el área donde se incide (ecuación 6).

$$Q_{Solar} = (I_{Solar})(area) \quad (6)$$

Mientras que, para el calor útil se obtuvo el producto del flujo másico del fluido por el Cp (calor específico) por el incremento de temperaturas (ecuación 7).

$$Q_{Util} = (\dot{m})(C_p)(\Delta T) \quad (7)$$

Para la conversión de datos, se consideró un flujo másico constante de 0.00571233 kg/s. Mientras que, para el calor específico se consideró en 1007 J/kg·K. Con estos datos se pudo obtener la información de la tabla 1.

### La cabina de secado

La cabina de secado está constituida por dos láminas de acero inoxidable, separadas entre sí por una capa de fibra de vidrio como aislante térmico, figura 1. Tiene una capacidad para sostener hasta 10 kg de producto, es decir, 2 kg por charola. Una bomba que realiza la recirculación del aire para aprovechar mayor el flujo de aire caliente; una chimenea donde emitirá el flujo de aire que contenga la humedad; una entrada proveniente del colector solar; y una resistencia eléctrica, la cual es la otra fuente de temperatura, volviendo al sistema en un sistema híbrido. Al igual que el colector solar, al sistema se le hizo un análisis de balance de energía. Para obtener la ecuación del balance se tomó de inicio la ecuación 1 para poder obtener la ecuación 8.

$$Q_{Aire_{Entrada}} + Q_{Electrica} = Q_{Aire_{Salida}} + Q_{Pérdidas} \quad (8)$$

Tabla 1 Calores obtenidos en un día alta incidencia solar.

Hora	Temp. Entrada.	Temp. Salida.	Q Útil.	I Solar.	Q Solar.	Eficiencia [%]
08:30:00 a. m.	15.73	20.33	7009.91	66.60	13461.92	52.07
08:45:00 a. m.	16.38	20.23	5864.28	86.20	17423.69	33.66
09:00:00 a. m.	17.06	20.74	5594.30	203.00	41032.59	13.63
09:15:00 a. m.	18.15	22.23	6208.58	276.40	55869.01	11.11
09:30:00 a. m.	20.69	26.39	8670.38	213.80	43215.61	20.06
09:45:00 a. m.	21.21	27.67	9816.01	242.60	49036.98	20.02
10:00:00 a. m.	21.43	28.70	11059.50	353.50	71453.31	15.48
10:15:00 a. m.	26.41	34.73	12654.30	540.00	109150.74	11.59
10:30:00 a. m.	32.14	42.37	15559.03	552.30	111636.95	13.94
10:45:00 a. m.	37.17	48.82	17724.20	561.70	113536.98	15.61
11:00:00 a. m.	35.00	59.00	36511.20	694.90	140460.83	25.99
11:15:00 a. m.	29.82	59.00	44391.20	730.10	147575.84	30.08
11:30:00 a. m.	29.98	59.00	44155.27	678.10	137065.03	32.21
11:45:00 a. m.	37.26	59.00	33080.52	737.80	149132.25	22.18
12:00:00 p. m.	39.69	59.00	29369.10	798.20	161340.96	18.20
12:15:00 p. m.	35.61	59.00	35581.52	818.90	165525.08	21.50
12:30:00 p. m.	35.08	56.97	33309.16	773.40	156328.12	21.31
12:45:00 p. m.	35.62	56.48	31747.36	798.10	161320.75	19.68
01:00:00 p. m.	40.00	58.50	28144.05	631.20	127585.09	22.06
01:15:00 p. m.	39.87	58.50	28338.64	650.20	131425.58	21.56
01:30:00 p. m.	40.55	58.50	27314.25	731.20	147798.19	18.48
01:45:00 p. m.	43.64	58.50	22610.53	757.10	153033.38	14.77
02:00:00 p. m.	43.60	58.50	22673.85	692.50	139975.72	16.20
02:15:00 p. m.	42.33	58.50	24605.03	804.60	162634.60	15.13
02:30:00 p. m.	37.64	58.50	31728.72	966.70	195400.04	16.24
02:45:00 p. m.	39.87	58.50	28338.64	798.90	161482.46	17.55
03:00:00 p. m.	41.77	58.50	25456.42	199.20	40264.50	63.22
03:15:00 p. m.	44.18	58.50	21788.40	56.40	11400.19	191.12
03:30:00 p. m.	43.26	58.50	23181.72	34.70	7013.95	330.51
03:45:00 p. m.	32.64	51.34	28453.84	31.80	6427.77	442.67
04:00:00 p. m.	30.33	45.57	23177.45	39.80	8044.81	288.10
04:15:00 p. m.	30.01	42.77	19409.49	88.30	17848.17	108.75
04:30:00 p. m.	30.93	43.84	19648.01	128.90	26054.69	75.41
04:45:00 p. m.	40.19	55.73	23641.86	174.40	35251.65	67.07
05:00:00 p. m.	40.01	59.00	28884.69	329.90	66683.02	43.32
05:15:00 p. m.	32.28	53.21	31832.51	468.50	94698.37	33.61
05:30:00 p. m.	28.48	43.21	22408.16	432.00	87320.59	25.66
05:45:00 p. m.	25.31	37.28	18208.65	267.50	54070.04	33.68
06:00:00 p. m.	23.35	31.40	12244.41	326.70	66036.20	18.54

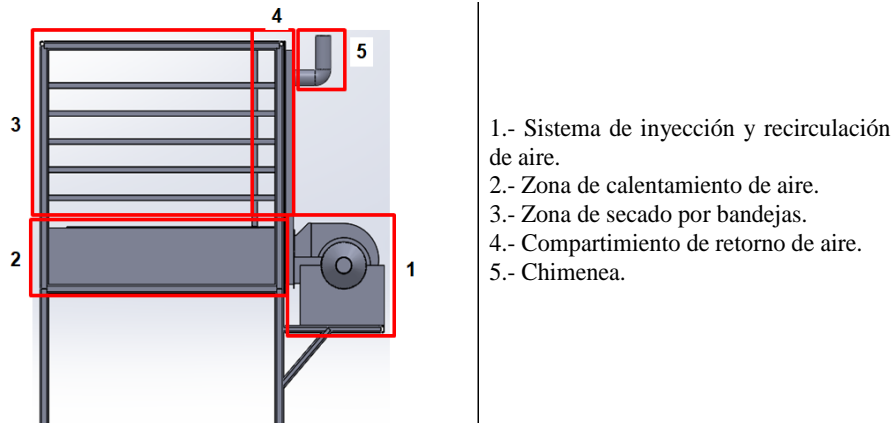


Figura 1 Secador híbrido solar-eléctrico actualmente trabajándose.

### El controlador

El sistema de control empieza desde una transformación de voltaje de 125 a 24 VCA mediante un transformador. Enseguida, atraviesa un divisor de voltaje, el cual, reduce la señal a un cuarto de amplitud respecto a la de entrada como se muestra en la figura 2.

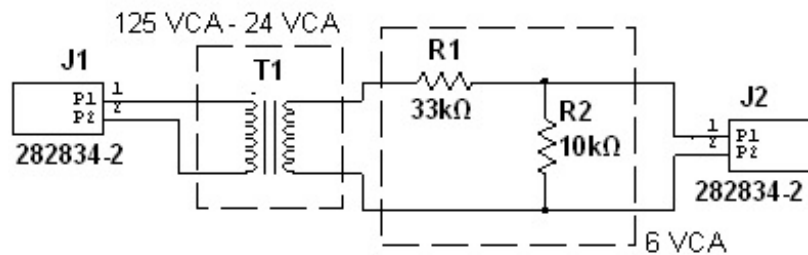


Figura 2 Transformación de 125 a 6 VCA para la detección del cruce por cero.

Ya reducida, esta señal junto con la del sensor de temperatura son leídas con una tarjeta myRio de la National Instruments, donde, la programación de esta se encarga de realizar un control P. El control está diseñado en la plataforma LabVIEW donde se encuentra dividido en cuatro sencillos bucles. Estos trabajan de forma “paralela” realizando una secuencia individualmente, pero al mismo tiempo, interconectados entre sí. El primer bucle realiza una lectura analógica de uno de los puertos de la tarjeta, donde, se recibe la señal proveniente del sensor. En este, se obtiene un promedio de todas las muestras leídas (figura 3).



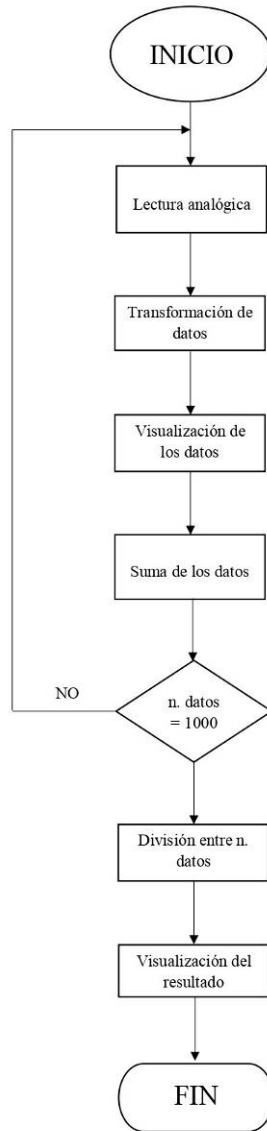


Figura 3 Diagrama de flujo de la obtención del promedio de la temperatura.

En un segundo bucle se procesa la señal de activación en forma digital, la cual es multiplicada con una compuerta “AND” con otra señal para tener el control de activación del controlador (figura 4).

Los últimos dos bucles se encargan de realizar el control. Uno de estos realiza la teoría de control proporcional, mientras que, por otra parte, el último realiza la sincronización para la activación del ángulo de disparo. Una vez realizado el control, la señal de salida de la tarjeta pasa a una etapa de potencia que se encarga de la manipulación de la corriente alterna para la activación de la resistencia (figura 5).

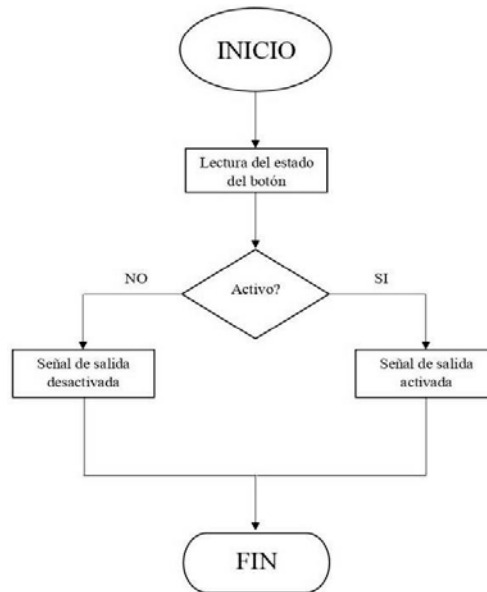


Figura 4 Diagrama de flujo del control de activación.

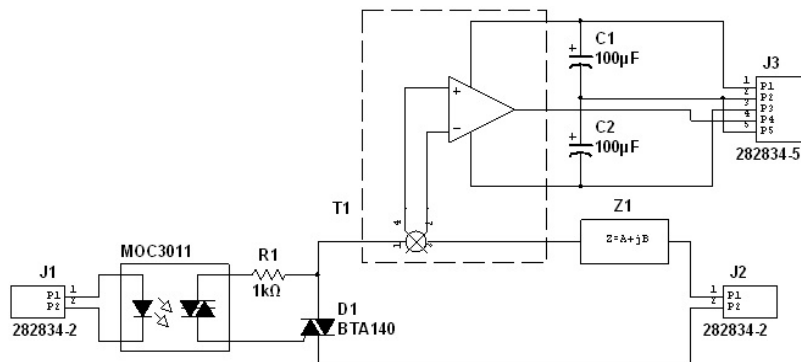


Figura 5 Circuito de la etapa de potencia.

Para el monitoreo del comportamiento del ángulo de disparo, se utiliza un transductor. Este dispositivo es alimentado con una fuente de  $\pm 15$  VCD convirtiendo la corriente en voltaje para posteriormente, leer esta señal.

### 3. Resultados

#### El colector solar

En el colector solar se encuentran tres placas separadas uniformemente entre sí, las cuales, captan la radiación del sol y generan una transferencia de calor incrementando la temperatura del flujo de aire que atraviesa el colector.

Con los datos obtenidos, se evaluó la eficiencia energética que proporciona la transferencia de calor en un día de incidencia solar. En la figura 6 se muestra las temperaturas en la entrada y salida de aire, como puede observarse se alcanzaron cerca de los 60 °C a la salida de aire. Se evaluó el calor útil que en promedio fue de 208 W, mientras la radiación solar alcanzó en promedio 405 W, con lo que la eficiencia es cercana a 57.3%.

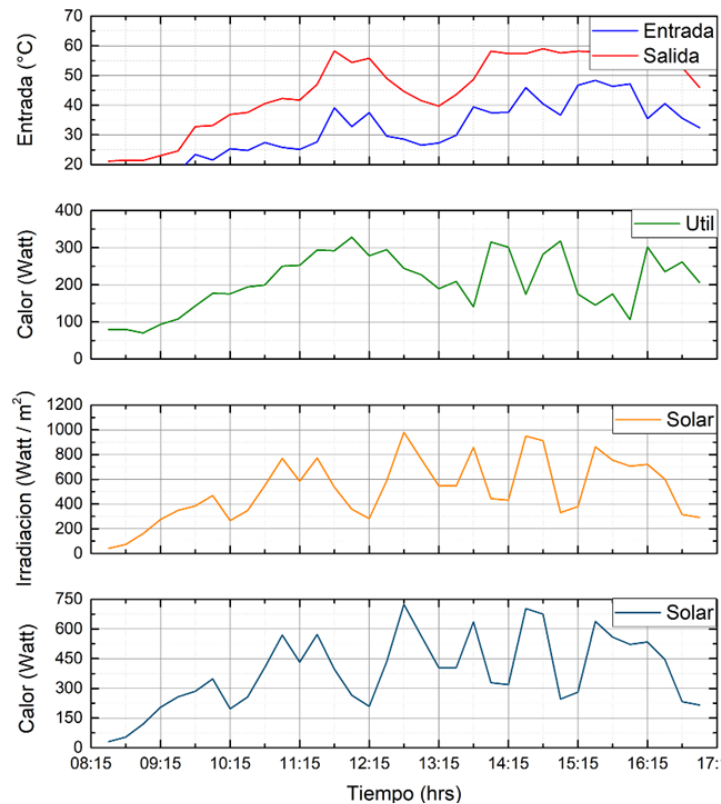


Figura 6 Comportamiento del colector con alta eficiencia.

### La cabina de secado

Al analizarse se obtuvo que la parte que más proporcionaba energía es la resistencia eléctrica, dejando al colector solar como una segunda e ineficiente fuente de energía calorífica (figura 7).

### El controlador

En general, el programa discretiza la señal de entrada y transformarla en temperatura. Pasa al controlador donde son aplicadas las leyes de control y emite

una señal de control la que es transformada en tiempo para la manipulación del ángulo de disparo.

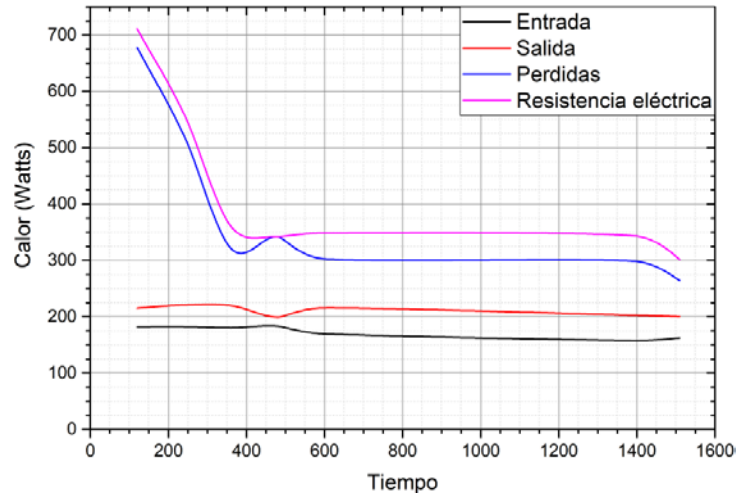


Figura 7 Balance de energía del secador medido en minutos transcurridos.

El sistema opera con una resistencia de 2 kW (Z1), lo que, con el control, obtienen un tiempo de estabilización de 37 minutos, mientras que el consumo de energía se presenta de hasta 1.37 kW/h (figura 8).

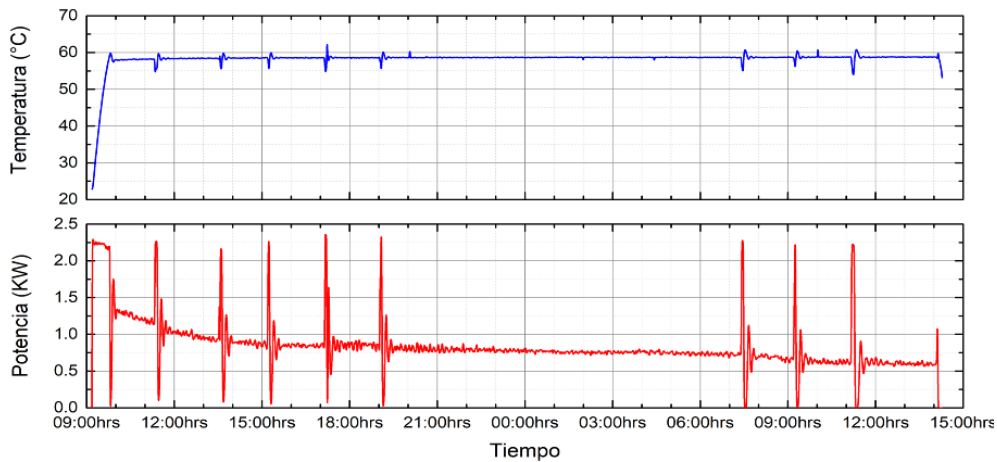


Figura 8 Comportamiento del controlador y el consumo de energía.

#### 4. Discusión

Al analizar todos los datos obtenidos, se puede decir que el sistema de secado se encuentra en el intervalo de costos de producción donde el consumo de potencia

promedio es de 12.6588 kW/h por corrida, esto en términos de producción quiere decir que se tiene un costo de MX\$8.05. A grandes rasgos, el sistema presenta un secado irregular (figura 9) consumiendo una alta cantidad energía eléctrica, es decir, consume mucha energía eléctrica para secar bajas porciones de producto con una mala calidad de secado. Esto en consecuencia, obliga a mantener al secador fuera de competencia comercial.

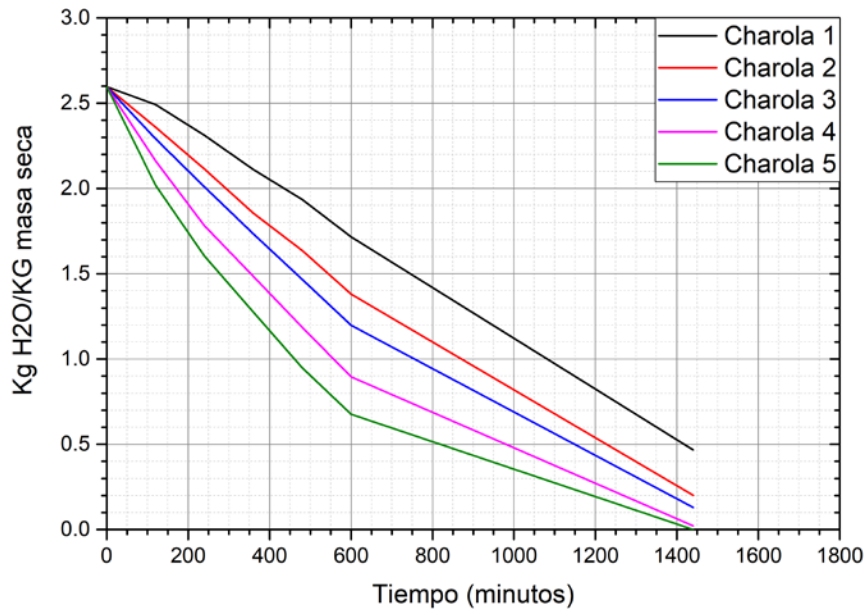


Figura 9 Comportamiento del secado de las charolas.

## 5. Conclusiones

De acuerdo con los datos obtenidos e investigaciones presentadas anteriormente, el uso de un control clásico o moderno sería una teoría muy obsoleta para el control de este secador. Esto se debe a que, por las variables que se deben manejar para la perfecta calidad de secado, el equipo se vuelve en un sistema discontinuo y no lineal. Como consecuencia, la no linealidad y la discontinuidad hace que el sistema presente un cierto grado de incertidumbre en la corrección del error. Por lo que se concluye que, se debe aplicar un control difuso para aumentar la velocidad de respuesta y lograr superar la característica no lineal del sistema, mientras que el PID elimina el error en estado estable. Así, de esta manera, se podrá superar la discontinuidad del sistema.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Dou, Z., Toth, J. D., & Westendorf, M. L. J. G. f. s. (2018). Food waste for livestock feeding: Feasibility, safety, and sustainability implications. 17, 154-161.
- [2] Kant, K., Shukla, A., Sharma, A., Kumar, A., Jain, A. J. I. f. s., & technologies, e. (2016). Thermal energy storage based solar drying systems: A review. 34, 86-99.
- [3] Leon, M. A., Kumar, S., Bhattacharya, S. J. R., & Reviews, S. E. (2002). A comprehensive procedure for performance evaluation of solar food dryers. 6(4), 367-393.
- [4] Reyes, A., Cubillos, F., Mahn, A., & Vásquez, J. (2014). Control system in a hybrid solar dryer. Paper presented at the 2014 5th International Renewable Energy Congress (IREC).
- [5] Sanjuán, N., Stoessel, F., Hellweg, S. J. E. s., & technology. (2014). Closing data gaps for LCA of food products: estimating the energy demand of food processing. 48(2), 1132-1140.
- [6] Xiao, Q., Chen, J., Ouyang, S., Shao, P., & Qin, F. (2014). Design and realization of the hardware for an intelligent solar drying system. Paper presented at the 2014 13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV).
- [7] Zaredar, A., Effatnejad, R., & Behnam, B. J. I. R. P. G. (2018). Construction of an indirect solar dryer with a photovoltaic system and optimised speed control. 12(15), 1807-1812.
- [8] Zoukit, A., El Ferouali, H., Salhi, I., Doubabi, S., & Abdenouri, N. (2019). Design of mamdani type fuzzy controller for a hybrid solar-electric dryer: case study of clay drying. Paper presented at the 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT).