

IoT-based Environmental Monitoring and Prediction of Banana Moisture Content in a Solar Greenhouse Dryer

B. López-Velasco , A. Ruiz-García , J. G. Cebada-Reyes , *Member, IEEE*, and C. A. Villaseñor-Perea 

Abstract—Modernizing the drying process will reduce agricultural product waste and environmental pollution. The aim of this study was to design a monitoring system based on the internet of things (IoT), temperature and relative humidity for a solar dryer. This system consists of a data collection module that gathers data regarding temperature (T_a), external relative humidity (RH) and on/off time of the solar dryer exhaust fans; a communication module that transmits T_a and RH information via LoRa and Wifi to ThingSpeak for monitoring on a mobile device; and a power module providing electrical power for system operation by solar energy. The operation of the IoT monitoring system was evaluated in three drying experiments of Dominican bananas (*Musa paradisiaca* var *sapientum*), in which system performance was satisfactory, allowing the user to visualize graphically in a web and mobile interface the behavior of T_a and RH inside the dryer. The data measured by the system were used to predict banana moisture content with an autoregressive model with exogenous variables (ARX) identified online. The mathematical model found predicted the behavior of moisture content with a good goodness of fit, with values of $R^2 = 0.99$, $MSE = 1.29 \times 10^{-5}$ and $MAE = -5.03 \times 10^{-6}$. The solar dryer allowed reducing the moisture content of bananas up to 19.84 % wet basis (w.b.) in a period of 4 days and by 20.03% w.b. for 5 days in the presence of rainfall.

Link to graphical and video abstracts, and to code: <https://latam.ieceer9.org/index.php/transactions/article/view/9160>

Index Terms—Arduino, LoRa protocol, ThingSpeak, ARX model.

I. INTRODUCCIÓN

El plátano (*Musa* spp.) es una fruta tropical, rica en carbohidratos, fibras dietéticas, ciertas vitaminas, minerales, compuestos fenólicos y antioxidantes. Como resultado, el consumo del plátano está asociado con beneficios para la salud y la disminución del riesgo de enfermedades. Estas características hacen de esta fruta una de las más consumidas en el mundo [1]. Sin embargo, debido a su alto contenido de humedad, el plátano es un fruto perecedero y está sujeto a un

rápido deterioro después de la cosecha. Para reducir su contenido de humedad y en consecuencia prolongar su vida útil, se han utilizado diferentes técnicas de secado [2]. Generalmente, el secado del plátano se realiza a la intemperie resultando en frutos secos de mala calidad debido a la contaminación por insectos, polvo y lluvia. Además, la energía solar se utiliza de manera ineficiente [3]. Para resolver estos problemas, se ha propuesto el uso de sistemas de secado solar de tipo invernadero que ofrecen un proceso de secado rápido, eficiente e higiénico y amigables con el medio ambiente [4].

El rápido aumento de la población mundial, el agotamiento de los recursos, las pérdidas de alimentos debido al deterioro, etc., han generado la necesidad de la implementación de tecnologías novedosas para la modernización de procesos agrícolas como el secado [5], [6]. La integración de las metodologías de secado sostenible con las últimas tecnologías de la información como la internet de las cosas (IoT) y las redes de sensores inalámbricos, puede conducir a la modernización de este proceso, que tendrá como resultado la disminución del desperdicio de los productos agrícolas y la reducción de la contaminación ambiental [7], [8].

La IoT es un campo emergente que permite un monitoreo del proceso de deshidratado eficiente y confiable [9]. En la actualidad, se han desarrollado sistemas inteligentes basados en IoT para realizar el monitoreo del proceso de secado. Catania *et al.* [10] diseñaron un sistema de control y monitoreo de bajo costo para el proceso de secado de hierbas aromáticas en un secador de gabinete. El prototipo del sistema está basado en una placa Arduino Mega 2560, nueve celdas de carga Siemens 7MH5102-1PD00 y un sensor de temperatura y humedad relativa DHT22. Los datos adquiridos por los sensores se transmitieron a través de Wi-Fi a una cuenta de ThingSpeak para monitorear el proceso de secado en tiempo real. Los resultados experimentales mostraron que el sistema es adecuado para monitorear la pérdida de humedad. Aumporn *et al.* [11] evaluaron un sistema de IoT en 18 secadores tipo invernadero de gran escala. Los secadores fueron equipados con sistemas de monitoreo y control que permitieron monitorear a distancia la temperatura y humedad relativa del aire interior del secador, el peso e imágenes del proceso de secado de plátano a través de un teléfono móvil. Aunque estos sistemas han demostrado ser funcionales, su dependencia de protocolos de corto alcance como WiFi y de la red eléctrica limita su implementación en sitios sin acceso a estos recursos.

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Roberto S. Murphy (Corresponding author: Agustín Ruiz-García).

B. Lopez-Velasco, A. Ruiz-García, J. G. Cebada-Reyes, and C. A. Villaseñor-Perea are with the Universidad Autonoma Chapingo, Texcoco, Mexico (e-mails: baltazarlv@outlook.com, aruizg@chapingo.mx, jcebadar@chapingo.mx, cvillaseñorp@chapingo.mx).

Por otro lado, para el diseño de algoritmos de control en sistemas de secado solar los modelos autorregresivos con variables exógenas (ARX), han demostrado ser útiles para predecir el comportamiento del contenido de humedad en plátano [12] y hojas de caucho [13]. Sin embargo, la calidad de las predicciones puede mejorarse al estimar sus parámetros en línea durante el proceso de secado.

Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue desarrollar un sistema apoyado en la IoT, basado en el protocolo LoRa y alimentado por energía solar, para el monitoreo de la temperatura y humedad relativa en el proceso de secado de plátano en un secador solar tipo invernadero. Adicionalmente, con los datos obtenidos del sistema de monitoreo identificar en línea un modelo ARX para predecir un paso hacia adelante el contenido de humedad del producto. El artículo está estructurado de la siguiente manera, en la sección II se describe el diseño experimental, el sistema de monitoreo y el modelado matemático. La sección III presenta la discusión y análisis de resultados, y en la sección IV se presentan las conclusiones.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Descripción del Secador Solar

Las pruebas de secado de plátano dominico se llevaron a cabo en un secador solar tipo invernadero de forma parabólica (Fig. 1a) con dimensiones de 10 x 9 m de base y 3.5 m de altura. El sistema está construido de acero galvanizado, cuenta con piso de concreto reforzado, cubierta de policarbonato de doble pared de 0.006 m de espesor y con protección contra rayos UV. En la parte frontal cuenta con dos entradas de aire cada una con 0.3 x 1.5 m y en la pared trasera tiene instalados dos extractores con capacidad de 9,435 m³ h⁻¹ cada uno, accionados mediante motores monofásicos de 0.5 HP, empleados para controlar el flujo de aire en el interior del secador.

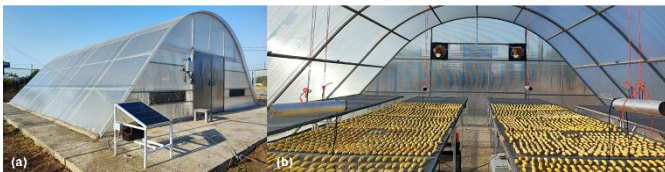


Fig. 1. a) Secador solar parabólico tipo invernadero y b) deshidratado de plátano dominico.

B. Experimento de Deshidratado

Los plátanos utilizados en los tres experimentos de secado realizados el 11, 18 y 26 de marzo de 2023 presentaban un grado de maduración entre 6 y 7 de acuerdo con la escala estándar Von Loesecke [14]. Para los experimentos, los plátanos se pelaron y extendieron como una capa delgada, sin pretratamiento, sobre las mesas de secado en el interior del secador a las 7:00 h (Fig. 1b). En el sistema de control on-off del secador se estableció que la temperatura del aire no excediera 50 °C, temperatura máxima recomendada para el deshidratado de plátano [15]. Durante las pruebas, a las 19:00 h, las muestras se atemperaron y se guardaron en bolsas selladas herméticamente con la finalidad de que no ganaran o perdieran humedad, y se concluyeron los experimentos cuando el producto alcanzó un peso aproximadamente constante.

C. Medición de Color y Sólidos Solubles

El color de las muestras de plátano frescas y secas se midieron con un espectrofotómetro de esfera (X-Rite Modelo SP60 Series). Este instrumento define el color en términos de los valores L^* , a^* y b^* de las propiedades de cromaticidad de la Comisión Internacional de Iluminación (CIE). El valor L^* se utiliza para indicar luminosidad ($L^* = 100$ para blanco) y oscuridad ($L^* = 0$ para negro), a^* describe la intensidad de color rojo ($a^* > 0$) y de color verde ($a^* < 0$), b^* describe la intensidad de color amarillo ($b^* > 0$) y de color azul ($b^* < 0$). Se eligieron los sistemas $L^*a^*b^*$ y $L^*a^*h^*$ porque son los más utilizados en la evaluación de alimentos secos y ampliamente aceptados en toda la industria agrícola para evaluar la calidad visual de los productos [3].

El espectrofotómetro fue calibrado con una placa de referencia blanca y negra al comienzo de las mediciones. Para cada muestra, se realizaron tres mediciones en el centro del fruto. A partir de las coordenadas L^* , a^* y b^* , el ángulo de matiz (h) se calculó con la ecuación [16]:

$$h = \begin{cases} \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right), & \text{cuando } a^* > 0 \\ 180^\circ + \tan^{-1}\left(\frac{b^*}{a^*}\right), & \text{cuando } a^* < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Los valores de h varían de 0° (rojo puro), 90° (amarillo puro), 180° (verde puro) a 270° (azul puro) [17], [18]. Croma (C^*) que indica la intensidad del color o la saturación se define como [16]:

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (2)$$

El cambio de color total (ΔE) entre el plátano fresco y seco se calculó con la ecuación siguiente [19]:

$$\Delta E = \sqrt{(L^* - L_{ref}^*)^2 + (a^* - a_{ref}^*)^2 + (b^* - b_{ref}^*)^2} \quad (3)$$

donde L_{ref}^* , a_{ref}^* y b_{ref}^* son las propiedades de luminosidad e intensidad de color de las muestras frescas; y L^* , a^* y b^* son las propiedades de luminosidad e intensidad de color de las muestras secas.

El contenido de sólidos solubles totales (SST) de las muestras de plátano frescas y secas se determinó utilizando un refractómetro Atago modelo PAL-1.

D. Estructura del Sistema de Monitoreo

El sistema se basa en sensores para monitorear en tiempo real la temperatura T_a (°C) y humedad relativa RH (%) en la cámara de secado, y el tiempo de encendido y apagado de los extractores t_{ext} (s). El sistema de monitoreo consta de tres módulos: adquisición de datos, comunicación y alimentación (Fig. 2). Las características de los sensores y componentes electrónicos usados en la construcción del sistema de monitoreo se muestran en la Tabla I y II, respectivamente.

El módulo de adquisición de datos fue dividido en dos partes. En la primera parte (Fig. 3, Parte I) se encuentran cuatro sensores BME680, el Arduino Mega secundario que se encarga de la lectura de dos sensores BME680 y enviar los datos al Arduino Mega primario. Este último realiza la lectura de los dos sensores BME680 restantes; a continuación, lee el módulo RTC y registra e imprime los datos de temperatura y humedad relativa, con la fecha y hora en la tarjeta SD y en el Display

LCD, respectivamente. Finalmente, el Arduino Mega primario se comunica con la placa LilyGO TTGO notificándole el valor promedio de temperatura y humedad relativa de los cuatro sensores BME680.

La segunda parte (Fig. 3, Parte II) se encarga del registro del tiempo de encendido y apagado de los extractores a través de la lectura del consumo de corriente. Para el monitoreo del consumo de energía se utiliza el sensor STC-013 conectado a una tarjeta ADS1115, que convierte la señal analógica proporcionada por el sensor a una señal digital que es recibida e interpretada por el Arduino UNO, que a continuación lee el RTC y guarda e imprime el evento de encendido y apagado con la estampa de tiempo en la SD y LCD, respectivamente.

El valor promedio de la T_a y RH de las lecturas proporcionadas por los cuatro sensores BME680 se enviaron cada 10 s mediante los protocolos de comunicación de LoRa y Wifi a la plataforma ThingSpeak, que permite visualizar los datos en tiempo real a través de una interfaz web y móvil. Para realizar esta acción, se implementó un servidor local donde interactúan dos placas LilyGO TTGO con el módulo de adquisición de datos como se muestra en la Fig. 4.

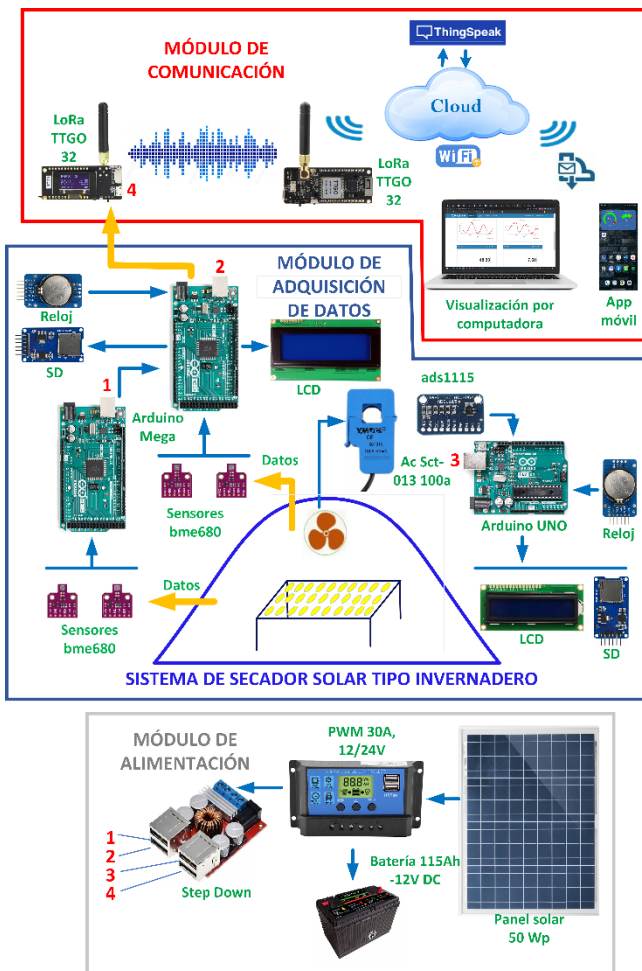


Fig. 2. Funcionamiento del sistema de sensores diseñado para el monitoreo de un secador solar.

Las placas LilyGO TTGO se configuraron para trabajar en la

frecuencia de banda 915 MHz con un ancho de banda de 125 kHz y un factor de propagación (SF) igual a 12 para lograr una comunicación inalámbrica de largo alcance, con alta resistencia a interferencias y una eficiencia espectral mejorada. Se optó por esta configuración, donde la velocidad de transmisión de datos es secundaria frente a la necesidad de una combinación robusta y de larga distancia, permitiendo así la transmisión de los datos a una velocidad de 156 bps a 1.14 km de distancia del secador, donde el dispositivo LilyGO TTGO receptor (Fig. 4) se conectó con un router WiFi para transmitir la información a ThingSpeak.

El módulo de alimentación (Fig. 5) suministra 4.2 Wh de energía eléctrica al sistema de monitoreo usando energía solar. Se compone de una celda fotovoltaica de 50 Wp, conectada a un controlador de carga PWM encargado de mantener cargada la batería y suministrar corriente al módulo Step Down, cuyos puertos se utilizaron para alimentar a los tres Arduinos y al módulo emisor LilyGO TTGO.

El funcionamiento de sistema de monitoreo fue corroborado en el secador solar sin producto del 18 de octubre al 7 de noviembre de 2022, comprobando su correcto funcionamiento.

TABLA I

| CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES DEL SISTEMA DE MONITOREO | | | | |
|----------------------------------------------------------|---------------------------|---------------|--------------------|----------------------|
| Sensor | Rango de operación | Resolución | Precisión | Voltaje de operación |
| BME680 | -40 a +85 °C 0 a 100 % | ±1 °C ±3 % | 0.01 °C 0.008 % | 3 to 5 V |
| SCT-013 | 20 a 100 % A | | 1.00 % | ≤ 660V |

TABLA II

LISTA DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS DEL SISTEMA DE MONITOREO

| Descripción | Cantidad | Modelo | Fabricante |
|-------------------------------|----------|--------------|-------------------|
| Placa microcontroladora | 2 | MEGA 2560 R3 | Arduino |
| Tarjeta de comunicación | 2 | TTGO LORA 32 | Lilygo |
| Reloj en tiempo real | 2 | DS3231 | Maxim Integrated |
| Tarjeta microSD | 2 | 74LVC125A | Nexperia |
| Convertidor analógico/digital | 1 | ADS1115 | Texas Instruments |
| Pantalla LCD monocromática | 1 | 020N004L | Vishay |
| El circuito integrado I2C | 1 | MD1602I | Surenoo |
| Fotocelda solar | 1 | PCF8574 | Texas Instruments |
| Batería recargable | 1 | 50 Wp | Genérico |
| Regulador de voltaje | 1 | 31T | Ms Battery |
| | 1 | PWM 30A | Kimiss |
| | 1 | Step Down | Genérico |
| | 1 | 4 Puertos | Genérico |

E. Mediciones y Sistema de Registro de Datos

Los puntos de medición durante los experimentos se distribuyeron en el secador (Fig. 6). La temperatura del aire T_a (°C) y humedad relativa RH (%) por encima de las muestras se monitorearon con los sensores bme680. Las señales generadas por los sensores se almacenaron cada diez segundos y después fueron procesadas para obtener la T_a y RH cada minuto.

Adicionalmente, se emplearon dos sensores de temperatura y humedad relativa HygroVUE 10 (Campbell Scientific) como sensores de referencia para evaluar el desempeño de los sensores bme680.

Los sensores se protegieron de la radiación solar con un tubo de PVC de 0.5 m de longitud recubierto de aluminio [20]. La radiación solar global R_g ($W\ m^{-2}$), la temperatura T_{amb} ($^{\circ}C$) y humedad relativa RH_{amb} (%) del ambiente exterior se registraron cada minuto con una estación meteorológica Hobo U30 (Onset Computer Corporation). El tiempo de encendido y apagado de los extractores (t_{ext}) se registró cada 5 segundos, el cual fue procesado para obtener una señal en porcentaje de encendido y apagado de los extractores por minuto.

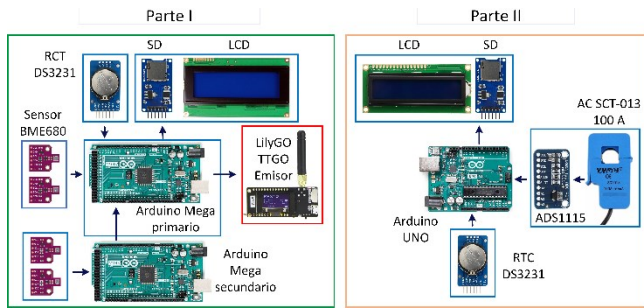


Fig. 3. Arquitectura del módulo de adquisición de datos del sistema monitoreo.

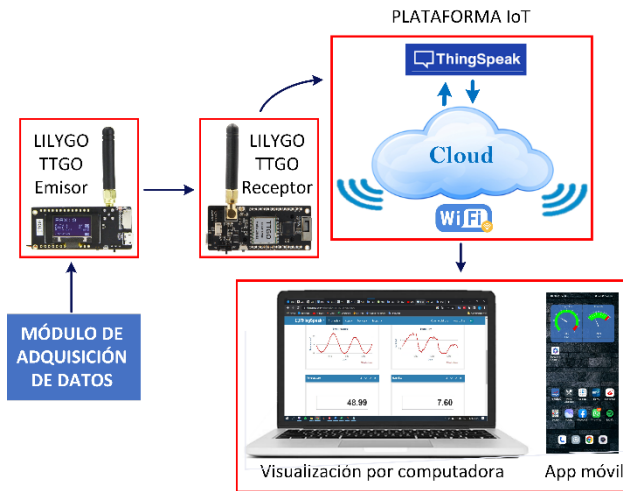


Fig. 4. Arquitectura del módulo de comunicación del sistema de monitoreo.

La pérdida de peso del producto en el tiempo se registró en cuatro muestras en el secador (M_1, M_2, M_3, M_4) (Fig. 6), que se pesaron en intervalos de 0.5 h utilizando una balanza digital con una precisión de ± 0.01 g (Microscopios Velab). Los experimentos comenzaron con el registro del peso inicial de cada una de las muestras. Al finalizar, el porcentaje de materia seca en las muestras se determinó mediante el método de la estufa, el cual consiste en deshidratar la muestra a $105\ ^{\circ}C$ durante 24 h.

$$\%M_{wb} = \left(\frac{W_0 - W_d}{W_0} \right) \cdot 100 \quad (4)$$

donde W_0 es el peso de la muestra húmeda (kg) y W_d es el peso de la muestra seca (kg).

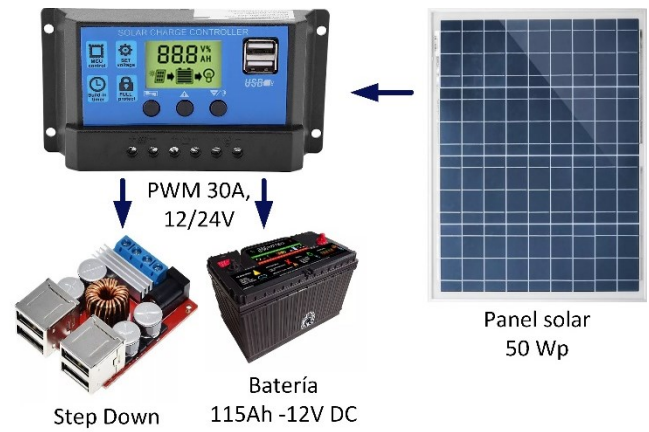


Fig. 5. Módulo de alimentación del sistema de monitoreo.

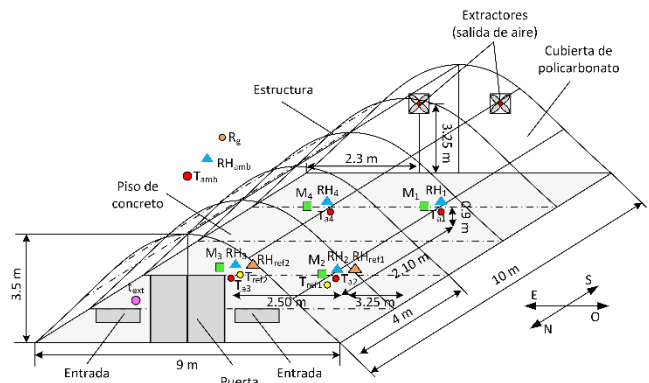


Fig. 6. Distribución de los sensores de medición para la temperatura (T_a), humedad relativa (RH), temperatura de referencia (T_{ref}) y humedad relativa de referencia (HR_{ref}) del aire dentro del secador, muestras del producto (M), señal de encendido y apagado de los extractores (t_{ext}), radiación global (R_g), temperatura (T_{amb}) y humedad relativa (RH_{amb}) del aire exterior.

F. Modelado del Contenido de Humedad del Producto

Los datos obtenidos de los experimentos se utilizaron para predecir el contenido de humedad de los plátanos mediante modelos autorregresivos con entradas exógenas (ARX). El modelo ARX implementado es un modelo de múltiples entradas y salida única (MISO), que de acuerdo con Montoya-Ríos *et al.* [21] se puede representar matemáticamente en tiempo discreto mediante la siguiente expresión:

$$A(z) \cdot y(k) = \sum_{i=1}^{nu} B_i(z) \cdot u_i(k - nk_i) + e(k) \quad (5)$$

donde z es el operador de desplazamiento hacia atrás, y es la salida, u_i son las entradas, e es el ruido blanco, nu es el número total de entradas y nk_i es el número de muestreos correspondientes a cada retardo de tiempo de entrada. $A(z)$ y $B_i(z)$ son polinomios con la siguiente estructura:

$$A(z) = 1 + a_1 \cdot z^{-1} + \dots + a_{na} \cdot z^{-na} \quad (6)$$

$$B_i(z) = b_{0i} + b_{1i} \cdot z^{-1} + \dots + b_{nb_i} \cdot z^{-nb_i} \quad (7)$$

donde na y nb son el orden para los polinomios A y B , respectivamente; a y b son coeficientes por determinar en el procedimiento de identificación.

Los coeficientes de los polinomios $A(z)$ y $B_i(z)$ de los modelos ARX en el primer experimento se inicializaron de forma aleatoria, y los coeficientes finales obtenidos se emplearon para inicializar la predicción del contenido de humedad en las muestras de plátano del segundo y tercer

experimento. La estimación de los parámetros se realizó mediante los algoritmos para la estimación en línea: factor de olvido (λ) variado de 0.98 a 0.995, filtro de Kalman y gradiente normalizado, disponibles en la caja de herramientas de identificación de sistemas de Matlab. Los órdenes de los modelos se variaron de 1 a 3 manteniéndolos homogéneos.

Las variables de entrada para los modelos ARX fueron las variables proporcionadas por el sistema IoT: T_a , RH y t_{ext} y como salida el contenido de humedad del producto (M_{wb}). Los valores de M_{wb} con intervalos de muestreo de un minuto usado en los modelos ARX se obtuvieron mediante una interpolación lineal de los datos medidos cada 30 minutos. Las estadísticas de ajuste utilizadas para evaluar el desempeño de los modelos identificados fueron: el coeficiente de determinación (R^2), el error medio absoluto (MAE) y el error cuadrático medio (MSE) [22].

III. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Evolución de las Variables Ambientales

La radiación solar global durante las pruebas de secado realizadas se muestra en la Fig. 7 (solo se muestra el experimento uno). Como puede observarse, en la mayoría de los días se tuvo presencia de nubes y lluvia por las tardes. En general, se obtuvieron picos máximos de radiación por arriba de los 1000 W m^{-2} , con un pico máximo de 1026.9 W m^{-2} , 1018.9 W m^{-2} y 1053.1 W m^{-2} en el primer día del experimento uno, segundo día del experimento dos y quinto día del tercer experimento, respectivamente.

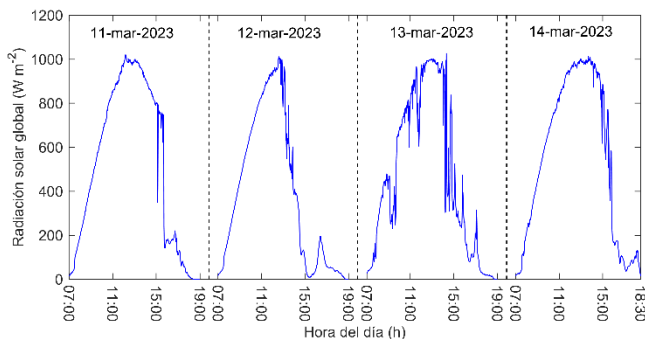


Fig. 7. Radiación solar global (R_g) durante el experimento uno de secado de plátano dominico.

La temperatura en el interior del secador fluctuó debido a la variación en la radiación solar global; por las tardes, en donde hubo mayor nubosidad y presencia de lluvia se observa que la temperatura disminuyó drásticamente (Fig. 8, solo se muestra el experimento uno). Además, se observó que la temperatura del aire dentro de la cámara de secado fue superior a la temperatura del aire del ambiente debido al efecto invernadero. En la Fig. 8 se puede observar que la temperatura se mantuvo por debajo de los 50° la mayor parte del tiempo durante los experimentos, solo en algunos instantes el sistema de control no funcionó correctamente, por ello, se observan temperaturas superiores a los 50°C . Para los días 20 y 21 de marzo, en donde no hubo presencia de nubosidad, la temperatura en el interior del secador alcanzó los 50° a las 9:30 h y esta comenzó a

disminuir hasta las 17:30 h dando un total de 8 h efectivas de secado.

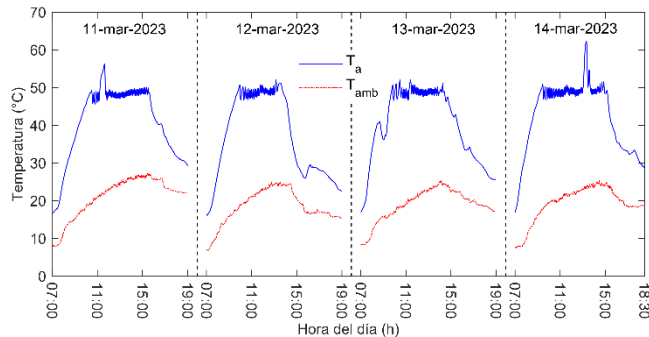


Fig. 8. Temperatura en el interior (T_a) y exterior (T_{amb}) del secador solar durante el deshidratado de plátano en el experimento uno.

En todos los experimentos, la humedad relativa dentro del secador fue menor a la humedad relativa del ambiente (Fig. 9, solo se muestra el experimento uno). Esto se debió principalmente a que la temperatura de secado fue mayor respecto a la temperatura ambiente. Esto confirma que la humedad relativa dentro del secador tiene potencial para un secado más rápido, en comparación con el secado natural a la intemperie, donde se obtendrá una baja velocidad de secado si se tiene una humedad relativa alta. Los resultados obtenidos en estos experimentos son similares a los reportados por Janjai *et al.* [23], quienes deshidrataron plátano en un secador solar tipo invernadero de forma parabólica con cubierta de policarbonato.

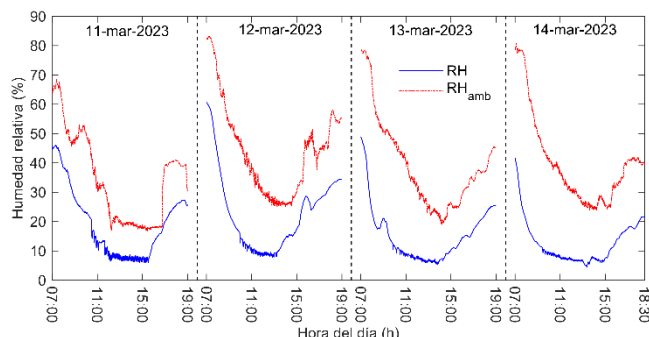


Fig. 9. Humedad relativa en el interior (RH) y exterior (RH_{amb}) del secador solar durante el deshidratado de plátano en el experimento uno.

B. Contenido de Humedad del Plátano

La disminución del contenido de humedad de las muestras durante los experimentos fue similar y únicamente en el experimento tres se incrementó en un día el tiempo de secado, debido al aumento en la humedad relativa dentro del secador por la infiltración de humedad ocasionado por la lluvia (Fig. 10). El contenido de humedad de los plátanos se redujo de un 70% a un 20% w.b., humedad que está dentro del estándar adoptado para el plátano seco de 20 a 25% [17], [24]. Aumporn *et al.* [11] reportaron resultados similares durante el secado de plátano en 18 secadores tipo invernadero con control de la temperatura. Sin embargo, la pérdida del contenido de humedad fue menor a lo reportado por Aumporn *et al.* [12] quienes durante el deshidrato de plátano en un secador solar de uso doméstico redujeron su contenido de humedad inicial de 69%

hasta un contenido final de 13% w.b.

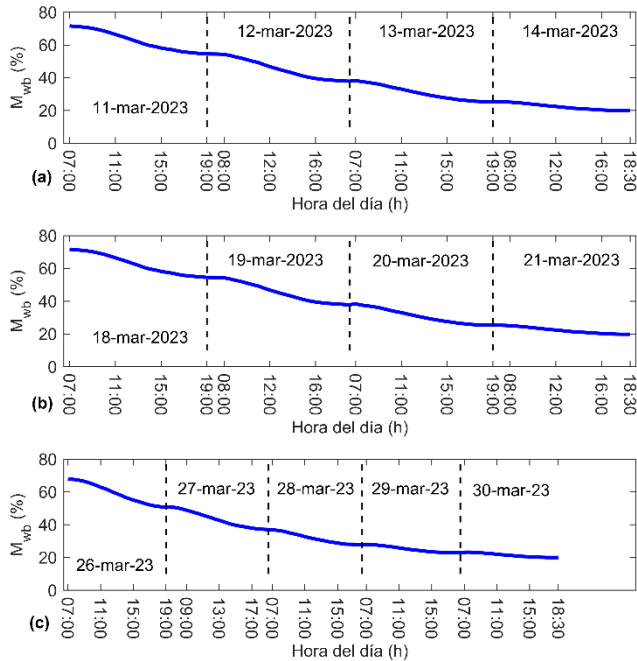


Fig. 10. Variación del contenido de humedad del plátano dominico en el interior del sistema secador solar tipo invernadero. (a) Experimento uno, (b) experimento dos, (c) experimento tres.

C. Propiedades del Plátano Deshidratado

Los resultados de la medición del color del plátano se muestran en la Tabla III. El color del plátano fresco cambió de un color amarillo a rojo-amarillo después del proceso de secado. Los valores de los índices de color del plátano deshidratado indican que es color marrón dorado oscuro. Nabnean y Nimnuan [3] obtuvieron este mismo color en rodajas de plátano deshidratadas en un secador solar doméstico de convección forzada. El cambio de color promedio del plátano deshidratado para los tres experimentos fue 27.94, que indica que hay una diferencia apreciable en el plátano deshidratado respecto a las muestras frescas. Por otro lado, se observó un incremento en la concentración de azúcar en los tres experimentos, lo cual concuerda con lo obtenido por Ferreira y Freitas [25] quienes reportaron un aumento en la concentración de azúcar del plátano deshidratado respecto a muestras frescas.

D. Desempeño del Sistema de Monitoreo

Los datos de T_a y RH adquiridos continuamente por el sistema de monitoreo durante el proceso de secado se muestran de manera gráfica a través de la plataforma ThinSpeak. En la Fig. 11 se muestra la interfaz móvil a través de la cual el usuario puede monitorear los datos del clima en el interior del secador; así mismo permite visualizar los datos en gráficas que se actualizan en línea (Fig. 12). Estos resultados confirman que el sistema de monitoreo fue capaz de recopilar y mostrar las variables del clima interior a través de una computadora y un teléfono móvil conectados a Internet. Además, ThingSpeak generó una base de datos en Excel (.csv) que permite el análisis de la información después del experimento. La plataforma

ThingSpeak permite la inclusión del código Matlab, donde se puede implementar el modelo ARX para predecir en línea el contenido de humedad del producto, usando como entradas los datos proporcionados por el sistema de monitoreo.

El protocolo de comunicación de LoRa permitió enviar los datos desde la ubicación del secador, donde no se cuenta con conexión a internet, a un sitio con acceso a una red de internet localizada a 1.14 km de distancia. El sistema de monitoreo tiene la ventaja de funcionar con energía solar, por lo cual, puede ser instalado en sistemas de secado solar localizados en zonas remotas donde no se tenga acceso a una red eléctrica y sin acceso a internet.

Por otro lado, se obtuvieron valores de R^2 de 0.995 y 0.977 entre las mediciones de temperatura y humedad relativa con los sensores bme680 y las mediciones de los sensores HygroVUE 10 (datos no mostrados), lo que indica que las mediciones realizadas por los sensores del sistema IoT son confiables.

E. Modelación del Contenido de Humedad del Producto

En la Tabla IV se muestran para el experimento uno los mejores modelos ARX identificados en línea para predecir un paso hacia adelante el contenido de humedad del plátano durante su deshidratado. De acuerdo con la R^2 , MSE y MAE , el mejor modelo fue el identificado con el método de gradiente conjugado normalizado, con estructura: $na = 2$, $nb = [2 \ 2 \ 2]$ y $nk = [2 \ 2 \ 2]$. En la Fig. 13 se muestra la evolución del contenido de humedad del plátano medido y predicho con el modelo ARX para los tres experimentos. Como se observa, el modelo identificado predice de manera precisa el comportamiento del contenido de humedad del producto durante los tres experimentos. El modelo identificado predice de manera precisa el contenido de humedad del producto en los experimentos dos y tres, de acuerdo con las estadísticas R^2 , MSE y MAE (Tabla V).

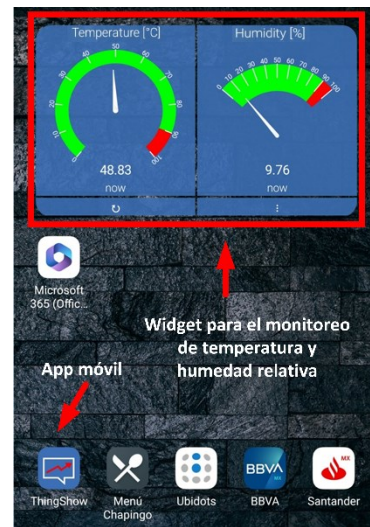


Fig. 11. Interfaz móvil del sistema de monitoreo.

TABLA III
VARIACIONES DE COLOR Y CONTENIDO DE AZÚCAR DEL PLÁTANO DOMINICO FRESCO Y DESHIDRATADO

| Experimento | Estado del plátano | Valor de color | | | | | ΔE | Contenido de azúcar (°Brix) |
|-------------|--------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|------------|-----------------------------|
| | | L^* | a^* | b^* | C^* | h | | |
| 1 | Fresco | 76.23 | 3.41 | 30.56 | 30.74 | 83.63 | 25.63 | 9.00 |
| | Deshidratado | 55.56 | 4.32 | 15.42 | 16.01 | 74.35 | | 10.49 |
| 2 | Fresco | 75.08 | 3.67 | 35.19 | 35.38 | 84.05 | 29.86 | 16.36 |
| | Deshidratado | 52.31 | 5.74 | 15.98 | 16.97 | 70.24 | | 19.16 |
| 3 | Fresco | 74.96 | 2.93 | 32.40 | 32.53 | 84.83 | 28.33 | 14.02 |
| | Deshidratado | 52.10 | 5.49 | 15.85 | 16.77 | 70.90 | | 25.99 |

TABLA IV
MEJORES MODELOS ARX IDENTIFICADOS EN LÍNEA OBTENIDOS PARA PREDECIR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL PLÁTANO DURANTE EL EXPERIMENTO UNO

| Algoritmo de estimación | na | nb | nk | R^2 | MSE | MAE |
|------------------------------------|------|-------|-------|-------|-----------------------|------------------------|
| Factor de olvido $\lambda = 0.995$ | 2 | 2 2 2 | 2 2 2 | 0.99 | 2.16×10^{-5} | 4.03×10^{-4} |
| Factor de olvido $\lambda = 0.99$ | 2 | 2 2 2 | 2 2 2 | 0.99 | 2.22×10^{-5} | -4.25×10^{-5} |
| Factor de olvido $\lambda = 0.99$ | 3 | 3 3 3 | 3 3 3 | 0.99 | 2.34×10^{-5} | -4.06×10^{-5} |
| Filtro de Kalman | 2 | 2 2 2 | 2 2 2 | 0.99 | 1.33×10^{-5} | -2.83×10^{-5} |
| Filtro de Kalman | 3 | 3 3 3 | 3 3 3 | 0.99 | 1.37×10^{-5} | -1.95×10^{-5} |
| Filtro de Kalman | 1 | 1 1 1 | 1 1 1 | 0.99 | 1.08×10^{-4} | 1.08×10^{-4} |
| Gradiente normalizado | 2 | 2 2 2 | 2 2 2 | 0.99 | 1.29×10^{-5} | -5.03×10^{-6} |
| Gradiente normalizado | 3 | 3 3 3 | 3 3 3 | 0.99 | 1.29×10^{-5} | -4.97×10^{-6} |
| Gradiente normalizado | 1 | 1 1 1 | 1 1 1 | 0.99 | 9.02×10^{-2} | -3.15×10^{-3} |

na : número de retrasos de la variable de salida. nb : número de retrasos para las variables de entrada. nk : retardo entre las variables de entrada y salida. R^2 : coeficiente de determinación. MSE : error cuadrático medio. MAE : error absoluto medio.

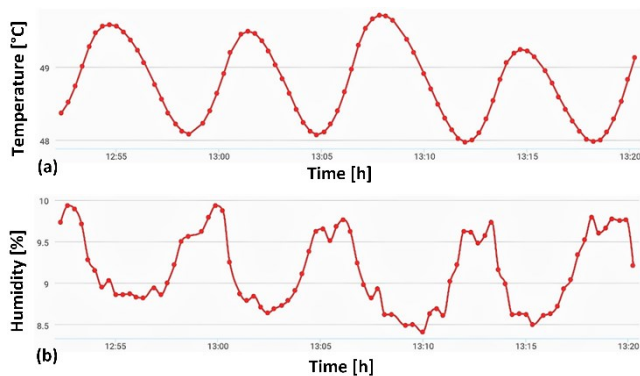


Fig. 12. Visualización gráfica del comportamiento de (a) temperatura y (b) humedad del aire en la interfaz móvil.

TABLA V
ESTADÍSTICOS DE EVALUACIÓN DEL MODELO ARX PARA PREDECIR EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL PLÁTANO

| Experimento | R^2 | MSE | MAE |
|-------------|-------|-----------------------|------------------------|
| 2 | 0.99 | 1.81×10^{-4} | -7.83×10^{-6} |
| 3 | 0.99 | 3.24×10^{-5} | -4.78×10^{-6} |

El modelo ARX identificado en combinación con el sistema de monitoreo basado en IoT, permite realizar la predicción en línea del contenido de humedad del producto. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Aumporn *et al.* [12], quienes predijeron de forma adecuada el contenido de humedad de muestras de plátano con un modelo ARX en un secador solar de uso doméstico. Los modelos ARX también se han empleado

para predecir de forma efectiva el contenido de humedad en láminas de caucho durante su deshidratado en un secador solar tipo invernadero [13].

V. CONCLUSIONES

El sistema de monitoreo apoyado en IoT permitió al usuario monitorear de forma remota el comportamiento de la temperatura y humedad relativa, a través de una interfaz web y móvil durante el proceso de secado de plátano en el interior de un sistema de secado solar tipo invernadero. La combinación del protocolo de comunicación de LoRa y la alimentación con energía solar permitió instalar el sistema de monitoreo en un secador solar localizado en un sitio sin acceso a internet. El plátano deshidratado obtuvo un color visualmente no atractivo (marrón dorado oscuro) y una mayor concentración de azúcar respecto al plátano fresco, su contenido de humedad estuvo en el rango comercial y se alcanzó en un tiempo similar a lo reportado en la literatura. El modelo ARX identificado en línea para predecir un paso hacia adelante el contenido de humedad del plátano durante su deshidratado fue de bajo orden y preciso de acuerdo con las estadísticas R^2 , MSE y MAE . Al ser un modelo que estima sus parámetros en línea, no es necesario recalibrarlo periódicamente en cada proceso de deshidratado por las variaciones del sistema. Finalmente, a futuro se incluirá en el sistema una balanza electrónica para la medición del contenido de humedad del producto, mismo que será de utilidad para un manejo más eficiente del proceso de secado. El modelo ARX identificado en combinación con el sistema de monitoreo basado en IoT y la medición del peso del producto, permitirá la

predicción en línea del contenido de humedad del producto.

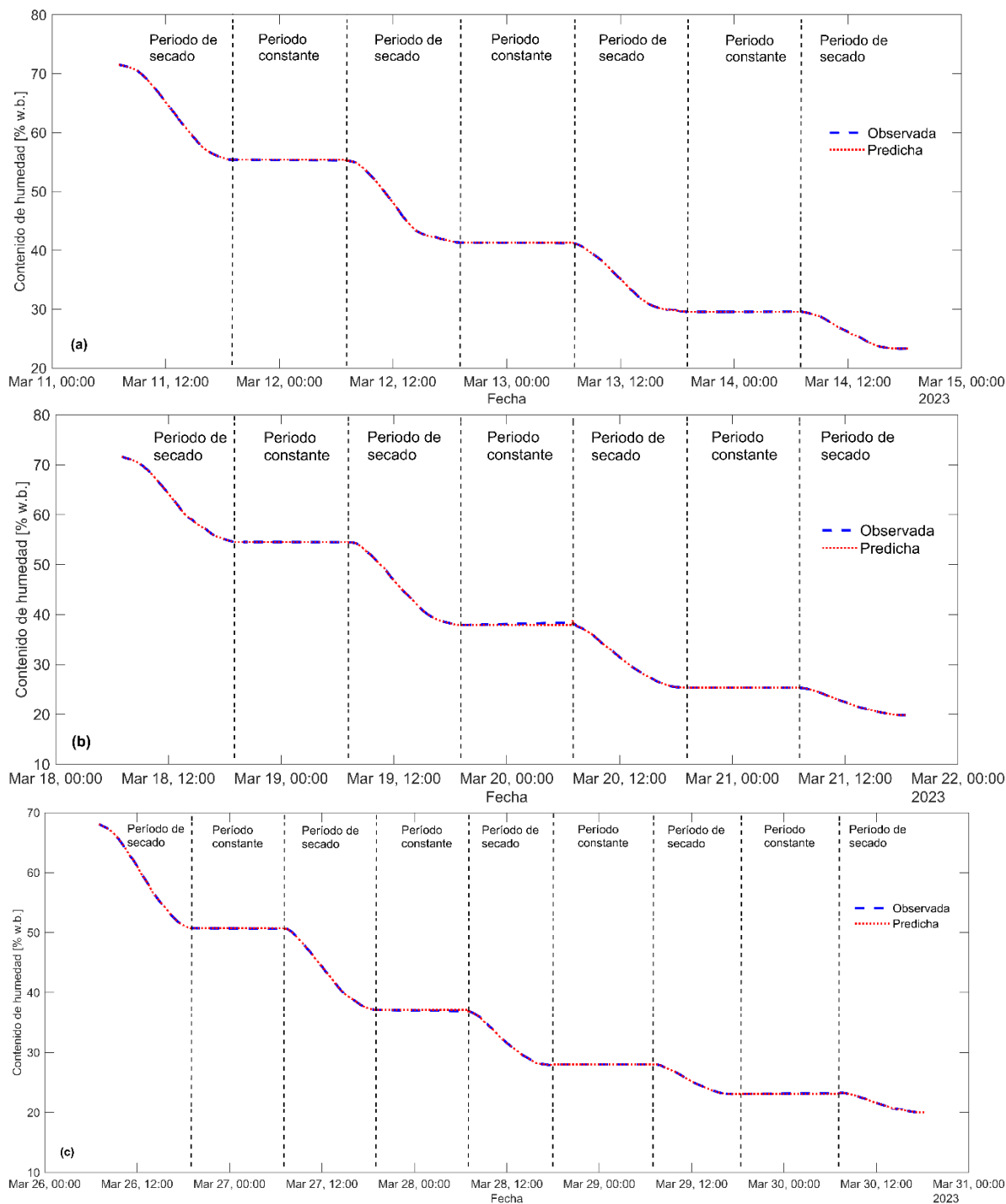


Fig. 13. Contenido de humedad del plátano medido y predicho un paso hacia adelante con el modelo ARX. (a) Experimento uno, (b) experimento dos, (c) experimento tres.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor extiende su agradecimiento al CONAHCYT y al Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo, por el apoyo brindado para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] A. Amini Khoozani, J. Birch, and A. E.-D. A. Bekhit, "Production, application and health effects of banana pulp and peel flour in the food industry," *J Food Sci Technol*, vol. 56, no. 2, pp. 548–559, 2019, doi: 10.1007/s13197-018-03562-z.
- [2] E. Seyedabadi, M. Khojastehpour, and M. H. Abbaspour-Fard, "Convective drying simulation of banana slabs considering non-isotropic shrinkage using FEM with the Arbitrary Lagrangian–

- Eulerian method,” *Int J Food Prop*, vol. 20, no. sup1, pp. S36–S49, 2017, doi: 10.1080/10942912.2017.1288134.
- [3] S. Nabnean and P. Nimnuan, “Experimental performance of direct forced convection household solar dryer for drying banana,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 22, p. 100787, 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100787.
- [4] P. Pankaew, O. Aumporn, S. Janjai, T. Mundpookhiew, and B. K. Bala, “Performance of parabolic greenhouse solar dryer equipped with rice husk burning system for banana drying. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 52–65, 2019.
- [5] V. K. Quy et al., “IoT-Enabled Smart Agriculture: Architecture, Applications, and Challenges,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 7, p. 3396, 2022, doi: 10.3390/app12073396.
- [6] A. Maroli, V. S. Narwane, and B. B. Gardas, “Applications of IoT for achieving sustainability in agricultural sector: A comprehensive review,” *J Environ Manage*, vol. 298, p. 113488, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113488.
- [7] M. Raj et al., “A survey on the role of Internet of Things for adopting and promoting Agriculture 4.0,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 187, p. 103107, 2021, doi: 10.1016/j.jnca.2021.103107.
- [8] A. Rehman, T. Saba, M. Kashif, S. M. Fati, S. A. Bahaj, and H. Chaudhry, “A Revisit of Internet of Things Technologies for Monitoring and Control Strategies in Smart Agriculture,” *Agronomy*, vol. 12, no. 1, p. 127, 2022, doi: 10.3390/agronomy12010127.
- [9] A. Popa et al., “An Intelligent IoT-Based Food Quality Monitoring Approach Using Low-Cost Sensors,” *Symmetry (Basel)*, vol. 11, no. 3, p. 374, 2019, doi: 10.3390/sym11030374.
- [10] P. Catania, R. Gaglio, S. Orlando, L. Settanni, and M. Vallone, “Design and Implementation of a Smart System to Control Aromatic Herb Dehydration Process,” *Agriculture*, vol. 10, no. 8, p. 332, 2020, doi: 10.3390/agriculture10080332.
- [11] O. Aumporn, R. Wattan, S. Pattarapanitchai, M. Sangsan, and S. Janjai, “Study of large-scale solar dryers equipped with monitoring and control systems for banana drying,” *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 1–16, 2021.
- [12] O. Aumporn, S. Janjai, T. Khunkaew, and B. K. Bala, “Development of a household scale solar dryer: Performance, evaluation and ARX modeling,” *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, vol. 16, no. 1, pp. 1–11, 2021.
- [13] O. Aumporn, P. Pankaew, N. Chanpen, and S. Janjai, “Experimental performance and Auto-Regressive with eXogenous Input (ARX) modelling of an anti-UV polycarbonate sheet-covered solar dryer equipped with a control system for drying para rubber sheets,” *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*, vol. 16, no. 2, pp. 68–80, 2021.
- [14] CEAGESP, “Programa Brasileiro para a Modernização da Horticultura & Produção Integrada de Frutas,” 2006.
- [15] P. Nimnuan and S. Nabnean, “Improvement of the Thepsatri Rajabhat-type household solar dryer. *Journal of Energy Systems*,” *Journal of Energy Systems*, vol. 6, no. 4, pp. 572–582, 2022.
- [16] A. F. López Camelo and P. A. Gómez, “Comparison of color indexes for tomato ripening,” *Hortic Bras*, vol. 22, no. 3, pp. 534–537, 2004, doi: 10.1590/S0102-05362004000300006.
- [17] L. L. Macedo, C. da Silva Araújo, W. C. Vimercati, S. H. Saraiva, and L. J. Q. Teixeira, “Evaluation of different bleaching methods applied to yacon,” *J Food Process Eng*, vol. 42, no. 7, p. e13276, 2019, doi: 10.1111/jfpe.13276.
- [18] W. C. Vimercati et al., “Physicochemical, rheological, microbiological and sensory properties of newly developed coffee flavored kefir,” *LWT*, vol. 123, p. 109069, 2020, doi: 10.1016/j.lwt.2020.109069.
- [19] M. Maskan, “Kinetics of colour change of kiwifruits during hot air and microwave drying,” *J Food Eng*, vol. 48, no. 2, pp. 169–175, 2001, doi: 10.1016/S0260-8774(00)00154-0.
- [20] E. Erell, V. Leal, and E. Maldonado, “Measurement of air temperature in the presence of a large radiant flux: an assessment of passively ventilated thermometer screens,” *Boundary Layer Meteorol*, vol. 114, pp. 205–231, 2005, doi: 10.1007/s10546-004-8946-8.
- [21] A. P. Montoya-Ríos, F. García-Mañas, J. L. Guzmán, and F. Rodríguez, “Simple Tuning Rules for Feedforward Compensators Applied to Greenhouse Daytime Temperature Control Using Natural Ventilation,” *Agronomy*, vol. 10, no. 9, p. 1327, 2020, doi: 10.3390/agronomy10091327.
- [22] D. Chicco, M. J. Warrens, and G. Jurman, “The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation,” *PeerJ Comput Sci*, vol. 7, p. e623, 2021, doi: 10.7717/peerj-cs.623.
- [23] S. Janjai, P. Intawee, J. Kaewkiew, C. Sritus, and V. Khamvongsa, “A large-scale solar greenhouse dryer using polycarbonate cover: Modeling and testing in a tropical environment of Lao People’s Democratic Republic,” *Renew Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1053–1062, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.09.008.
- [24] D. de V. S. Batista, R. L. Cardoso, R. C. B. de Godoy, and N. S. Evangelista-Barreto, “Estabilidade físico-química e microbiológica de banana passa orgânica,” *Ciência Rural*, vol. 44, no. 10, pp. 1886–1892, 2014, doi: 10.1590/0103-8478cr20130442.
- [25] T. H. B. Ferreira and M. L. F. Freitas, “Production, physical, chemical and sensory evaluation of dried banana (*Musa cavendish*),” *Emir J Food Agric*, vol. 31, no. 2, pp. 102–108, 2019, doi: 10.9755/ejfa.2019.v31.i2.1912.



Baltazar López-Velasco received the degree of Agricultural Mechanical Engineer and Master in Agricultural Engineering at the Universidad Autónoma Chapingo. His areas of interest are the internet of things, drying of agricultural products, modeling and simulation of biosystems.



Agustín Ruíz-García received the degree in Irrigation Engineering and the Ph.D. in Agricultural Engineering from the Universidad Autónoma Chapingo. He is currently a full-time Professor at the Irrigation Department, Universidad Autónoma Chapingo. His research interests include irrigation engineering, controlled environment agriculture, biosystems modeling and optimization, and evolutionary computation.



José Guillermo Cebada-Reyes (Member IEEE) received the degree in electronics from the Benemérita Universidad Autónoma de Puebla and the Ph.D. in Agricultural Engineering from the Universidad Autónoma Chapingo. He is currently a full-time Professor at the Universidad Autónoma Chapingo adjunct to the Department of Agricultural Mechanical Engineering. His research interests include robotics, biological and industrial process automation, meta-heuristic optimization, visual servoing, applied electronics in bioprocesses and industrial processes.



Carlos Alberto Villaseñor-Perea received the degree of Agricultural Mechanical Engineer at the Universidad Autónoma Chapingo and the degree of Doctor of Science in Fruit Growing at the Colegio de Postgraduados. He is currently a full-time professor in the Department of Agricultural Mechanical Engineering at the Universidad Autónoma Chapingo. His areas of interest include mechanical properties of biological products, computer aided design and new materials in agriculture.