

Análisis del desempeño energético de un equipo de secado de cacao en el sureste de México

Carlos A. Sánchez-Ramos^{1*}, David J. Jiménez-Rodríguez¹, Martín Vargas-Angeles²

¹ Instituto Politécnico Nacional, Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Unidad Tabasco, Circuito Tabasco Pte. s/n, Edif. FINTAB, Parque Industrial Tabasco Business Center, Carr. Reforma–Dos Bocas Km 17+920. Cunduacán, Tabasco, C.P. 86691.

² Instituto Politécnico Nacional, Centro Mexicano para la Producción más Limpia, Av. Acueducto S/N, Ticomán, Gustavo A. Madero. Ciudad de México, 07340.

Fecha de recepción: 18 de octubre de 2024 - Fecha de aceptación: 13 de mayo de 2025

Resumen

Las secadoras convectivas de tipo samoa son las más utilizadas en el sureste de México para el secado de granos de cacao, ya que su construcción es sencilla y económica; por otra parte, el proceso de secado permite la conservación de los granos de cacao por periodos prolongados de tiempo, manteniendo la calidad y reduciendo la actividad enzimática. Para el análisis de la tecnología y la identificación de áreas de oportunidad se llevó a cabo un estudio de eficiencia energética en una secadora convectiva de tipo samoa, utilizando una metodología para estudios energéticos en sistemas térmicos. Se realizaron imágenes termográficas para obtener perfiles de temperatura de las partes que componen la secadora e identificar las pérdidas de calor; además de mediciones eléctricas en el motor de la secadora para obtener los parámetros de operación del motor y la demanda de energía eléctrica. Después de analizar la información recabada, los resultados mostraron que el desempeño energético de la secadora fue deficiente. Se encontraron medidas con un potencial de ahorro de 2,950 kWh/año de energía térmica y 495 kWh/año de energía eléctrica, equivalentes a una reducción de emisiones de 0.86 toneladas de CO₂/año, mejorando el desempeño energético del proceso de secado de granos de cacao y contribuyendo de manera directa a la disminución de emisiones y al desarrollo sostenible.

Palabras claves: Proceso de secado, eficiencia energética, secadora de cacao, termografía industrial.

Analysis of the energy performance of cocoa drying equipment in the southeast of Mexico

Abstract

Samoa-type convective dryers are the most used in the southeast of Mexico for drying cocoa beans since they have a simple and economical construction; likewise, the drying process allows the conservation of cocoa beans for prolonged periods of time, maintaining quality and reducing

* carsanchez_ime@hotmail.com

enzymatic activity. For the analysis of the technology and the identification of opportunity areas, an energy efficiency study was carried out in a Samoa-type convective dryer, using a methodology for energy studies in thermal systems. Thermographic images were taken to obtain temperature profiles of the parts that make up the dryer and identify heat losses, electrical measurements were also taken in the dryer motor to obtain the operating parameters of the motor and the demand for electrical energy. After analyzing the information collected, the results showed that energy performance was deficient. Measures were found with potential savings of 2,950 kWh/year of thermal energy and 495 kWh/year of electrical energy, equivalent to a reduction of 0.86 tons of CO₂/year, improving the energy performance of the cocoa bean drying process and contributing directly to emissions reduction and sustainable development.

Keywords: Drying process, energy efficiency, cocoa dryer, industrial thermography.

Introducción

La sostenibilidad implica un enfoque integral que considera los aspectos ambientales, sociales y el desarrollo económico, una forma de mejorar la sostenibilidad de una empresa u organización es incrementar la eficiencia energética de sus equipos, sistemas y procesos productivos. La eficiencia energética es una medida fundamental para potenciar el desarrollo económico en las empresas a través de instalaciones más eficientes (Funseam, 2020), también nos permite coadyuvar a cuatro grandes retos del sector energético mundial: el cambio climático, la calidad y seguridad del suministro, la evolución de los mercados y la disponibilidad de las fuentes de energía. Una de las principales maneras de ahorrar energía es a través de las prácticas aplicadas en el día a día en la forma de operación y uso de equipos. La energía es algo que se puede gestionar, al hacerlo, se obtiene reducción de costos y el incremento de la competitividad (CONUEE/GIZ, 2016).

El secado es un proceso térmico complejo en el que se produce simultáneamente una transferencia de calor y humedad. Este complejo proceso depende de diferentes parámetros como la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del aire, las propiedades físicas del material y el contenido de humedad inicial del producto. El objetivo

principal del proceso de secado es reducir la actividad del agua contenida en el producto para prevenir el crecimiento de microorganismos y reducir la actividad enzimática, prolongando así la vida útil del producto a temperatura ambiente (Kaur, 2022) y, además, en el caso de los granos de cacao, permitir el adecuado almacenamiento previo a las siguientes etapas de transformación.

El secado de los granos de cacao suele realizarse mediante diferentes métodos, como la exposición a la luz solar, o por el calor producido por la quema de leña o de combustibles fósiles. Un proceso industrializado comúnmente utilizado para el secado de los granos de cacao es el aire caliente producido por la combustión de gas, acoplado a un flujo de aire impulsado por un ventilador eléctrico; sin embargo, este proceso puede generar impactos ambientales y económicos como emisiones de gases de efecto invernadero y altos costos de electricidad. En consecuencia, para lograr productos de mejor calidad y procesos sustentables, es necesario reducir el consumo de energía y la huella de carbono, para ello se requiere desarrollar análisis, innovaciones tecnológicas y mejoras de diseño sobre el uso del flujo de energía, la eficiencia energética y las pérdidas de energía en las tecnologías de secado.

La elaboración de un estudio de eficiencia energética incluye un conjunto de técnicas para determinar el grado de eficiencia con la que es utilizada la energía en los procesos y equipos consumidores de energía, y a partir de éste, se detectan oportunidades de mejora en las instalaciones eléctricas y procesos correspondientes. Es necesario, además, implementar indicadores energéticos porque permiten la evaluación y el seguimiento de la salud energética de una empresa (Bruni et al., 2017).

El presente estudio consistió en analizar la operación de una secadora de tipo samoa e identificar las áreas de oportunidad que representaran potenciales de mejorar el desempeño energético de la tecnología, contribuyendo a mejorar la sostenibilidad del proceso de secado de cacao. Este estudio podría contribuir a reducir los impactos al medio ambiente y los costos de producción, ya que este tipo de secadoras utilizan gas combustible para generar el aire caliente y son las más utilizadas en los centros de acopio de cacao de la región productora de México.

Metodología

Para el análisis de la tecnología y la identificación de áreas de oportunidad, se llevó a cabo un estudio de eficiencia energética a un sistema de secado de cacao de tipo samoa, para ello se utilizó la metodología para estudios energéticos en sistemas térmicos de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) (CONUEE, 2021). Aunque la metodología de CONUEE fue diseñada para calderas de vapor y aislamiento térmico, ésta se puede aplicar para el estudio de una secadora de granos, ya que también es un sistema térmico. A continuación, se describen los pasos utilizados para el estudio de eficiencia energética:

- **Recopilación de información:**

En la recopilación de información la principal estrategia es el análisis de los factores y equipos que consumen energía eléctrica y térmica de una instalación o sistema a evaluar. Durante este paso se debe solicitar la siguiente información: factura y/o recibos de consumos energéticos (electricidad, agua y combustibles) de por lo menos un año, registros de la producción de forma mensual (toneladas de cacao seco producido por periodo de tiempo), también las especificaciones técnicas (tipo de tecnología, antigüedad promedio, capacidad, potencias, formas y tiempos de operación) de los equipos consumidores de energía, en este caso el motor eléctrico de la secadora y el quemador de gas. También se realiza un recorrido por las instalaciones que permite obtener datos en campo e identificar preliminarmente las áreas de oportunidad.

- **Evaluación energética:**

Para conocer el consumo de energía eléctrica y térmica de los equipos que conforman la secadora e identificar los desperdicios de energía se requiere realizar mediciones eléctricas y térmicas. Para el caso del motor eléctrico, se realizaron mediciones utilizando un analizador de calidad de la energía monofásica marca AEMC modelo 8230, a través de este equipo se obtuvieron datos como: voltaje de alimentación, corriente eléctrica, factor de potencia y demanda de energía. En el caso del quemador de gas, la estructura de la secadora, la carcasa metálica que cubre el quemador y el motor eléctrico, se utilizó una cámara termográfica marca FLIR modelo

E60 para identificar el perfil de temperatura de esos elementos e identificar pérdidas de energía térmica. También se utilizaron algunos otros equipos para realizar mediciones puntuales como: amperímetro de gancho marca EXTECH modelo MA-410, termómetro infrarrojo - 50°C a 650°C marca FLUKE modelo 62 MAX+, termómetro Digital de contacto marca TES modelo 1300, termo-Anemómetro marca CEM modelo DT-168, distanciómetro laser marca FLUKE modelo 414-D. A partir de los datos obtenidos se realizaron los cálculos energéticos y se determinó el comportamiento del sistema.

- **Determinación del comportamiento del sistema:**

Se estimó el consumo de energía de acuerdo con las mediciones y los datos de placa, las pérdidas energéticas de los elementos que componen la secadora, se analizó mediante software las mediciones eléctricas obtenidas con el analizador de redes, así como los perfiles de temperatura de la cámara termográfica.

- **Dictamen energético:**

Considerando el comportamiento del sistema, se evaluaron los potenciales de ahorro energético de las áreas de oportunidad identificadas.

En la Figura 1 se muestra un diagrama que describe de manera breve los pasos de la metodología utilizada en el estudio realizado a la secadora de cacao tipo samoá.

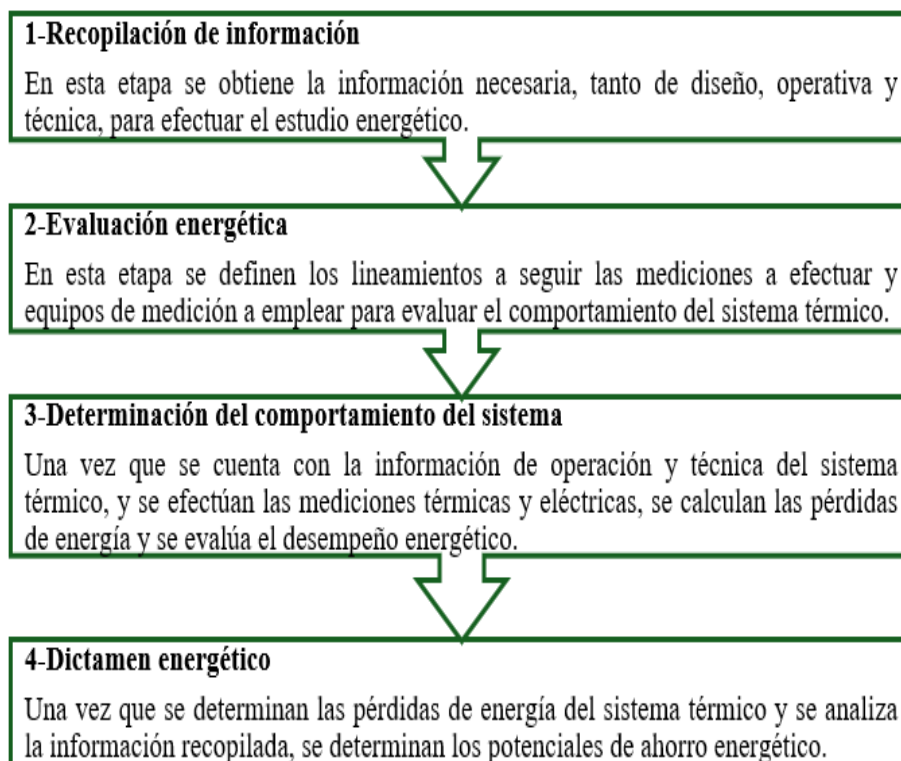


Figura 1. Diagrama simplificado de los pasos a seguir para el estudio energético de la secadora de cacao.

Parámetros energéticos eléctricos

Para los cálculos energéticos del motor se utilizaron ecuaciones que relacionan parámetros eléctricos del motor. Para el cálculo de la potencia de entrada o medida ($P_{entrada}$) en kilowatts (kW) se utilizó la siguiente ecuación:

$$P_{entrada} = \frac{V \cdot I \cdot F.P.}{1000} \quad (1)$$

Donde V (volts) representa el voltaje de alimentación, I (amperes) expresa la corriente consumida y F.P. expresa el factor de potencia del motor (valor adimensional menor a 1), estos datos se obtuvieron de la medición.

Para obtener el consumo de energía eléctrica anual (EE_{anual}) expresado en kilowatts hora (kWh) se utilizó la siguiente ecuación:

$$EE_{anual} = P_{entrada} \cdot \#horas_{año} \quad (2)$$

Donde $\#horas_{año}$ expresa la cantidad de horas que opera el motor al año.

Para obtener el factor de carga al que opera actualmente el motor utilizamos la siguiente ecuación:

$$F.C. = \frac{P_{entrada} \cdot \eta_{nom.}}{P_{nom.}} \quad (3)$$

Donde F.C. es el factor de carga al que opera el motor (valor adimensional, multiplicado por 100 se obtiene en porcentaje), $\eta_{nom.}$ (adimensional menor a 1) es la eficiencia nominal y $P_{nom.}$ (kW) es la potencia nominal del motor, ambos datos se obtuvieron de la placa del motor.

Para calcular la potencia de salida del motor (P_{salida}) en kilowatts se utilizó la siguiente

ecuación:

$$P_{salida} = P_{nom.} \cdot F.C. \quad (4)$$

La potencia de salida es el trabajo útil que realiza el motor al mover una carga o bien la potencia requerida por el proceso.

Para obtener el ahorro de energía ($A_{EE \text{ anual}}$) se utilizó la siguiente ecuación:

$$A_{EE \text{ anual}} = EE_{anual} - EE_{anual \text{ prop.}} \quad (5)$$

Donde $EE_{anual \text{ prop.}}$ es el consumo de energía eléctrica anual (kWh) de la medida de ahorro propuesta.

Parámetros energéticos térmicos

Para realizar los cálculos de las pérdidas térmicas existentes en las paredes (envolventes) de la secadora de granos de cacao, la carcasa que contiene el motor y el quemador de gas, se usaron expresiones que agrupan parámetros como la temperatura, espesor, conductividad térmica, entre otros.

Se empleó la siguiente ecuación para obtener las pérdidas de calor por unidad de área (m^2):

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1} + \frac{X_1}{K_1} + \frac{X_2}{K_2} + \frac{X_1}{K_1} + \frac{1}{h_2}} \quad (6)$$

Donde q (W/m^2) es la pérdida de calor en Watts por metro cuadrado, T_1 ($^{\circ}C$) es la temperatura del aire al interior en grados centígrados, T_2 ($^{\circ}C$) es la temperatura del aire al exterior, h_1 ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$) es el coeficiente de transferencia de calor del aire al interior, h_2 ($W/m^2 \cdot ^{\circ}C$) es el coeficiente de transferencia

de calor del aire al exterior, K_1 (W/m.°C) es la conductividad térmica del aplanado, K_2 (W/m.°C) es la conductividad térmica del ladrillo, X_1 (m) el espesor del aplanado expresado en metros y X_2 (m) el espesor del ladrillo.

Con la siguiente ecuación calculamos la pérdida de energía térmica (Q) en Watts (W) en el envoltorio de la secadora:

$$Q = q \cdot A_{cond.} \quad (7)$$

Donde $A_{cond.}$ es el área conductora de calor de las paredes de la secadora de granos.

Con la siguiente ecuación se realizó el cálculo de las pérdidas de calor por superficie de área, considerando que se añade aislamiento térmico a las paredes de la secadora de granos en ambos lados:

$$q_{aisl.} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h_1} + \frac{X_1}{K_1} + \frac{X_3}{K_3} + \frac{X_2}{K_2} + \frac{X_1}{K_1} + \frac{X_3}{K_3} + \frac{1}{h_2}} \quad (8)$$

De acuerdo con la ecuación anterior $q_{aisl.}$ (W/m²) es la pérdida de calor por superficie de área añadiendo aislamiento térmico, K_3 (W/m.°C) es la conductividad térmica del aislamiento térmico y X_3 (m) el espesor del aislamiento.

La pérdida de energía térmica ($Q_{aisl.}$) obtuvo de la ecuación:

$$Q_{aisl.} = q_{aisl.} \cdot A_{cond.} \quad (9)$$

Para el cálculo de la pérdida de calor en la carcasa metálica que contiene al motor y al quemador de gas se utilizó la siguiente ecuación:

$$Q_{carc.} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi \cdot r_1 \cdot L \cdot h_1} + \frac{\ln r_2 / \ln r_1}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot K_4} + \frac{1}{2\pi \cdot r_2 \cdot L \cdot h_2}} \quad (10)$$

Donde $Q_{carc.}$ (W) es la pérdida de calor en la carcasa, T_1 (°C) es la temperatura del aire al interior, T_2 (°C) es la temperatura del aire al exterior de la carcasa, h_1 (W/m².°C) es el coeficiente de transferencia de calor del aire al interior, h_2 (W/m².°C) es el coeficiente de transferencia de calor del aire al exterior, K_4

(W/m.°C) es la conductividad térmica de la carcasa, L es la longitud, r_1 es el radio interior y r_2 es el radio exterior de la carcasa.

Para obtener la pérdida de calor añadiendo aislante térmico a la carcasa ($Q_{carc. aisl.}$), se empleó la siguiente ecuación:

$$Q_{carc. aisl.} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2\pi \cdot r_1 \cdot L \cdot h_1} + \frac{\ln r_2 / \ln r_1}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot K_4} + \frac{\ln r_3 / \ln r_2}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot K_5} + \frac{1}{2\pi \cdot r_3 \cdot L \cdot h_2}} \quad (11)$$

K_5 (W/m.°C) representa la conductividad térmica del aislamiento térmico de la carcasa y r_3 el radio exterior (con aislante térmico) de la carcasa.

Descripción de la secadora de granos

El estudio de eficiencia energética se aplicó a una secadora de cacao tipo samoa, la cual está conformada por una estructura rectangular y un cabezal de insuflación elaborados de ladrillo y recubiertos con aplanado de mortero en ambos lados, dentro de la estructura se encuentra una rejilla de acero inoxidable de grado alimenticio sobre la que se coloca el producto a secar, el flujo de aire caliente se genera mediante un ventilador que se encuentra acoplado en serie con un quemador de gas L.P., el aire caliente entra a la secadora a través de un cabezal.

La secadora tiene las siguientes dimensiones 10.4 metros de largo, 3.2 metros de ancho, 0.9 metros de alto, el lecho de secado (altura total menos la altura a la que se encuentra instalada la rejilla) tiene una profundidad de 0.55 metros, por tanto, el área y el volumen del

lecho de secado es equivalente a 33.6 metros cuadrados y 18.5 metros cúbicos. De acuerdo con la información proporcionada por los operarios, el espesor del lecho de secado de granos de cacao se maneja entre 10 y 20 centímetros, y dependiendo la producción solicitada puede alcanzar un espesor de hasta 40 centímetros. De acuerdo con el espesor de lecho y el área, la secadora tiene una capacidad mínima de 2.6 y máxima de 10.4 toneladas de cacao húmedo. Según datos de los operarios, el tiempo estimado de secado es aproximadamente de 15 horas y al año, operando alrededor de 300 días; la cantidad de horas que opera la secadora al año (#horas_{año}) equivale a 4,500 horas. Las áreas que conducen calor al exterior son las dos paredes largas de la samoa, cada una tiene 0.9 metros de alto por 10.4 metros de largo y el cabezal de insuflación el cual posee unas dimensiones de 1.45 metros por 0.9 metros. El área conductora de calor ($A_{conductora}$) es equivalente a 20.025 metros cuadrados (m^2). En la Figura 2 se muestra un modelo realizado en software de diseño asistido por computadora (CAD) de la secadora de granos de cacao:

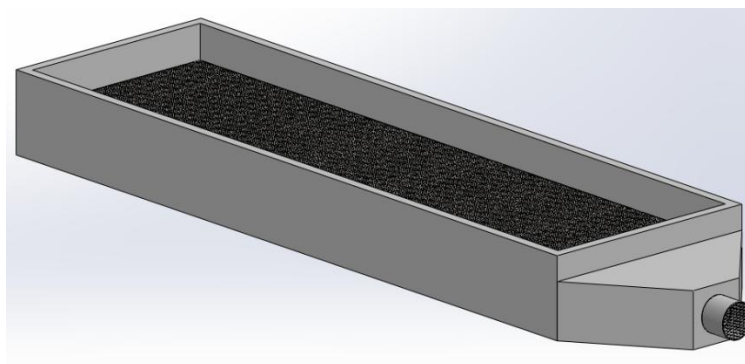


Figura 2. Modelo de la secadora de granos de cacao tipo samoa.

Para el cálculo de la pérdida de calor en las paredes se emplearon los siguientes datos: conductividad térmica del aplanado (K_1)= 13.872 Watts sobre metro por grado centígrado (W/m °C), conductividad térmica del ladrillo

(K_2)= 0.0867 W/m °C, coeficiente de transferencia de calor del aire al interior de la secadora (h_1)= 34.177 Watts sobre metro cuadrado por grado centígrado (W/m^2 °C), coeficiente de transferencia de calor del aire al

exterior de la secadora (h_2)= 9.398 W/m² °C (Vásquez et al., 2013), espesor del aplanado (X_1)= 0.015 m, espesor del ladrillo (X_2)= 0.12 m, temperatura del aire al interior de la secadora (T_1)= 90 °C y temperatura del aire al exterior de la secadora (T_2)= 28 °C.

Para el cálculo de la pérdida térmica de la carcasa se utilizaron los siguientes datos: conductividad térmica de la carcasa (K_4)= 80 W/m °C, coeficiente de transferencia de calor del aire al interior de la carcasa (h_1)= 34.177 W/m² °C, coeficiente de transferencia de calor del aire al exterior (h_2)= 9.398 W/m² °C, radio interior (r_1)= 0.248 m, radio exterior (r_2)= 0.25 m, longitud (L)= 0.4 m, temperatura del aire al interior de la carcasa (T_1)= 90 °C y temperatura del aire al exterior (T_2)= 28 °C.

De acuerdo con los datos de placa, el motor eléctrico que impulsa el ventilador de la secadora tiene las especificaciones: motor monofásico de corriente alterna, potencia nominal de 2 HP, voltaje 127/220 Volts, corriente nominal 21.6/11 Amperes, velocidad nominal 3480/3460 RPM, temperatura de operación 40 °C, factor de servicio 1.15 y eficiencia nominal 72%.

Resultados y discusión.

De acuerdo con la inspección realizada al motor eléctrico que impulsa el ventilador de la secadora se encontraron las siguientes problemáticas:

- El motor tiene polvo de manera excesiva provocando que funcione a mayor temperatura.
- El motor nunca ha recibido mantenimiento preventivo, debido a esto los rodamientos ya presentan desgaste, provocando mayor fricción al girar la flecha.
- De acuerdo con los datos de placa, el motor tiene una eficiencia estándar equivalente a 72%.

- El motor arranca de manera directa provocando disminución del voltaje de la instalación y consumo excesivo de corriente al arrancar.
- No existe un sistema de control para regular la velocidad de giro de la flecha, por lo tanto, siempre funciona a las revoluciones por minuto máxima.
- Funcionamiento a corriente nominal por tanto existe mayor calentamiento del cableado.

Se realizaron mediciones eléctricas en el circuito que alimenta al motor eléctrico y se obtuvieron los siguientes valores: Corriente eléctrica (I) 8.53 Amperes, Voltaje (V): 132.4 Volts y factor de potencia (F.P.) 0.8. De igual manera, se realizó una inspección física del secador, incluyendo la termografía aplicada a las zonas de la secadora, donde se identificó lo siguiente:

- La distribución del aire caliente es inadecuada, presentando zonas con demasiada variación de temperatura, lo que provoca que el secado de los granos de cacao no sea uniforme, esto puede repercutir en la homogeneidad o la calidad final del producto.
- Se detectó que el quemador pudiera estar funcionando de manera inadecuada, ya que la flama presentó color naranja en algunas partes, lo que indica condiciones de combustión incompleta.
- Existen pérdidas de energía térmica debido a que la carcasa donde se contiene el motor-ventilador no tiene aislamiento térmico y la unión al conducto de aire de entrada es deficiente.
- En las paredes de la samoa existen pérdidas térmicas por conducción y convección debido a que no poseen aislamiento térmico en las superficies.

En la Figura 4, se observa una termografía general donde se visualiza la distribución de

temperaturas del lecho de secado.

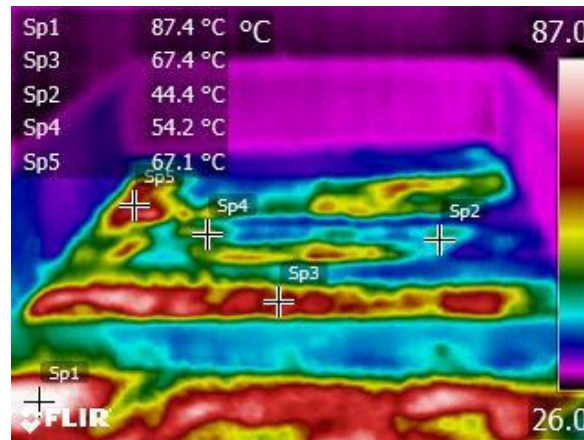


Figura 4. Imagen térmica general de la distribución de temperaturas de la secadora.

A continuación, se muestra una termografía con un acercamiento a la distribución de temperaturas de un área del lecho de secado

que contiene los granos a secar y de una sección de rejilla sin granos.

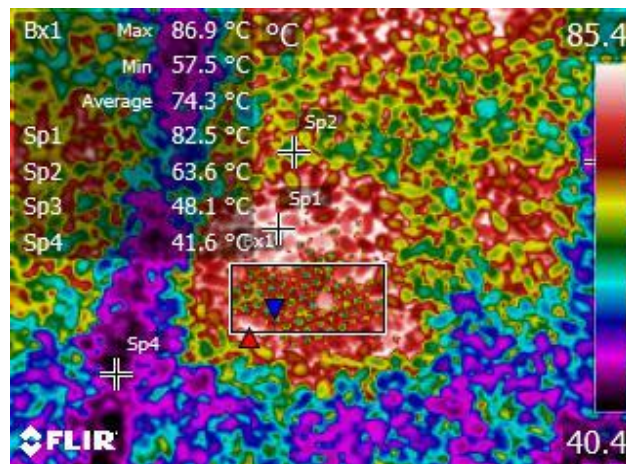


Figura 5. Imagen térmica de la distribución en un área específica y en rejilla.

Analizando las Figuras 4 y 5 se observa que no existe homogeneidad en la distribución de temperaturas del lecho de secado de la secadora, en las diferentes zonas del lecho de secado la temperatura es variable

encontrando zonas desde 44.4 grados centígrados (°C) hasta 87.4 °C. La temperatura del aire de salida de la rejilla es en promedio 74.3 °C. En la siguiente imagen (Figura 6) se observa que el quemador está

funcionado de manera inadecuada, debido a que la flama se aprecia en color naranja en

algunas partes, lo que indica condiciones de combustión incompleta.

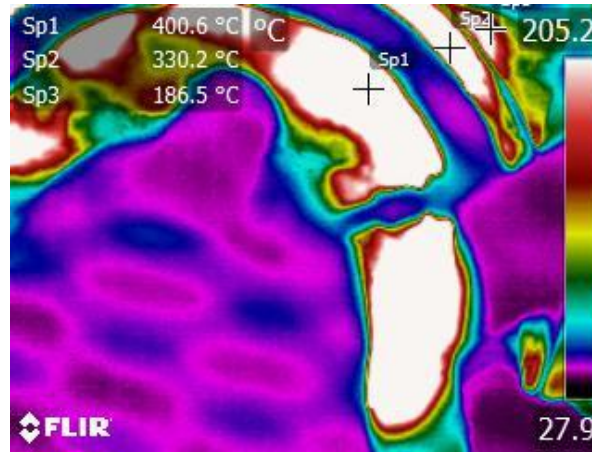


Figura 6. Imagen térmica de la flama del quemador de gas.

En la Figura 7, se muestra la carcasa metálica que contiene en su interior al motor-ventilador y al quemador de gas, al ser de un

material conductor de calor y no tener ningún aislamiento en este elemento existe una gran cantidad de desperdicio de energía térmica.

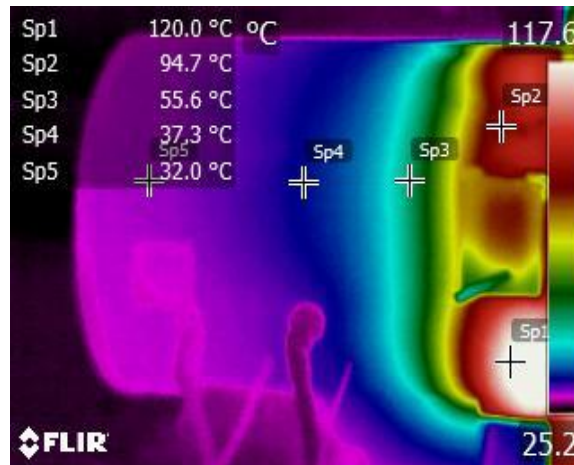


Figura 7. Imagen térmica de la carcasa motor, ventilador, quemador.

En la figura anterior. se aprecia como existen una variación en la temperatura de la carcasa, siendo la zona más caliente la que se encuentra rodeando al quemador de gas (parte izquierda de la imagen térmica) con valores de temperatura desde 55 a 120 °C, mientras que la

zona donde se genera el flujo de aire forzado se mantiene a temperatura ambiente (32 °C).

Se utilizó la ecuación (1) y los datos obtenidos de las mediciones eléctricas para calcular la potencia de entrada (P_{entrada}) del motor eléctrico

a plena carga, que fue equivalente a 0.9 kW.

Con la ecuación (2), obtuvimos el consumo anual de energía eléctrica (EE_{anual}) del motor, el cual fue de 4,050 kWh.

Utilizando la ecuación (3) y datos de placa del motor eléctrico calculamos el factor de carga (F.C.) al que opera actualmente el motor. Se obtuvo un factor de carga de 0.4349 o 43.5%.

A continuación, con la ecuación (4) calculamos la potencia de salida o trabajo útil (P_{salida}) del motor de la secadora de granos, que es equivalente a 0.65 kW.

El motor que utiliza la secadora para generar el flujo de aire caliente tiene una eficiencia nominal (n_{nom}) de 72% (de acuerdo con el dato de placa) y opera con un factor de carga (F.C.) de 43.5%, esto indica que la potencia del motor actual esta subutilizada; por tanto, se propone el cambio a un motor con una potencia nominal ($P_{\text{nom.}}$) de 1.5 caballos de potencia (HP) o 1.12 kW y eficiencia nominal (n_{nom}) de 82.5%.

Para obtener el factor de carga con el motor propuesto se empleó la ecuación (4), la potencia de salida (P_{salida}) y la potencia nominal ($P_{\text{nom.}}$) del motor propuesto, por tanto, el factor de carga (F.C.) del nuevo motor es 0.5804 o 58%.

Para calcular la potencia de entrada (P_{entrada}) del motor propuesto se utilizó la ecuación (3), la potencia nominal ($P_{\text{nom.}}$), factor de carga (F.C.) y eficiencia nominal (n_{nom}) del motor propuesto, obteniendo un valor de 0.79 kW.

Utilizando la ecuación (2) se obtuvo un consumo anual propuesto de 3,555 kWh, con la ecuación (5) calculamos el ahorro de energía anual de 495 kWh, reduciendo el consumo de energía eléctrica en un 12.2%. Considerando que 1 kWh equivale a la emisión de 0.000438 toneladas de CO₂ (Semarnat, 2024), al realizar

el cambio de motor se obtendría una disminución de 0.22 toneladas de CO₂.

Por otro lado, se detectaron pérdidas térmicas realizando mediciones con la cámara termográfica, las cuales ocurren principalmente en las paredes largas de la samoa y la zona superior del cabezal de insuflación por donde ingresa el flujo de aire caliente.

Con la ecuación (6) se realizaron los cálculos de la pérdida de calor por unidad de área de la secadora obteniendo un resultado de 40.7 W/m².

Con la ecuación (7) obtuvimos la pérdida actual de energía térmica (Q) en las paredes de la secadora siendo equivalente a 815.8 W.

Para reducir la pérdida térmica en las paredes de la secadora de cacao, se propone recubrir ambas caras de las paredes de placas de aislante térmico en este caso se sugiere fibra de vidrio con espesor (X3) de 1 pulgada, la cual tiene una conductividad térmica (K_3)= 0.038 W/m °C, debiendo considerar que la fibra de vidrio debe recubrirse con placas metálicas para evitar la contaminación del producto.

Para obtener la pérdida de calor por unidad de área considerando la propuesta de añadir aislamiento térmico ($q_{\text{aisl.}}$) en ambas caras del secador, se utilizó la ecuación (8), el resultado obtenido es 21.7 W/m².

Para obtener la pérdida de calor propuesta ($Q_{\text{aisl.}}$) utilizamos la ecuación (9) obteniendo un resultado de 434.3 W. Esto supone un ahorro de energía térmica de 46.8% equivalente a 381.5 W.

Considerando un periodo de secado de 15 horas y 300 días de operación al año, se obtiene que el ahorro anual de energía térmica es equivalente a 1716.7 kWh, tomando en cuenta

que 1 kilogramo (kg) de gas L.P. equivale a 13.74 kWh (SENER, 2024), calculamos que al año se podrían ahorrar 124.9 kg de gas L.P.

Para calcular la reducción de emisiones de CO₂ consideramos que 1 kg de gas L.P. genera 3 kg de CO₂ (INECC, 2014), por tanto, la reducción anual de emisiones de CO₂ sería equivalente a 0.37 Toneladas de CO₂.

Otra importante zona donde se presentan pérdidas térmicas es la carcasa metálica que cubre el motor-ventilador y el quemador de gas L.P., ya que no posee ningún tipo de aislamiento térmico.

Como se observa en la termografía de la Figura 6 solo la sección de la carcasa que tiene en su interior el quemador presenta calentamiento, la sección anterior al quemador se enfría debido al flujo de aire que genera el motor ventilador. Por tanto, para el cálculo de la pérdida de energía térmica de la carcasa sólo se consideró una sección longitudinal de 40 centímetros.

Para obtener la pérdida de calor en la carcasa ($Q_{\text{carc.}}$) utilizamos la ecuación (10). La pérdida de calor en las condiciones analizadas para la sección de la carcasa es equivalente a 280.2 W.

Para disminuir la pérdida de calor en la carcasa se recomienda instalar aislamiento térmico sobre la superficie longitudinal de la carcasa, para este caso se propone fibra de vidrio con un espesor de 1 pulgada, la cual posee una conductividad térmica (K_5)= 0.038 W/m °C, se considera el radio exterior con aislante (r_3)= 0.2754 m.

Para calcular la pérdida de calor en la carcasa

añadiendo aislante ($Q_{\text{carc. aisl.}}$) se utilizó la ecuación (11), el resultado obtenido es 6.2 W, lo que indica una disminución de las pérdidas de calor en la carcasa equivalente a 274 W.

Tomando en cuenta la información proporcionada por los operarios de la secadora: tiempo de secado de 15 horas y 300 días de operación al año, se obtuvo el ahorro anual de energía térmica de, 1,233 kWh, considerando que 1 kilogramo de gas L.P. equivale a 13.74 kWh, calculamos que al año es posible ahorrar 89.7 kg de gas L.P.

Para obtener la reducción de emisiones de CO₂, consideramos que 1 kg de gas L.P. genera 3 kg de CO₂, por tanto, la reducción anual de emisiones de CO₂ sería equivalente a 0.27 Toneladas de CO₂.

La pérdida total de energía térmica (Q_{total}) en la secadora de estudio se obtiene al sumar la pérdida de energía térmica (Q) en las paredes y en la carcasa ($Q_{\text{carc.}}$) siendo de 1,096 W. En un estudio realizado sobre una secadora de granos de tipo lecho fluidizado se obtuvo que la pérdida de calor a través de las paredes es equivalente a 409 W. (Mirmanto et al., 2023), mientras que en otro estudio sobre el mismo tipo de secadora de granos la pérdida de calor equivale a 360 W. (Syahrul et al., 2019). La pérdida de calor de la secadora analizada es superior a lo encontrado en otros estudios, lo que representa un área de oportunidad para mejorar el desempeño energético de la secadora.

A continuación, se presentan los resultados con los potenciales de ahorro obtenidos del estudio energético realizado.

Tabla 2. Potencial de ahorro de energía eléctrica.

Concepto	KWh/año
Sustitución de motor eléctrico	495

Tabla 3. Potencial de ahorro de energía térmica.

Concepto	KWh/año	Kg/año (gas L.P.)
Aislamiento en paredes y cabezal de insuflación	1,717	124.9
Aislamiento en carcasa (quemador de gas)	1,233	89.7
Total	2,950	214.7

En la siguiente gráfica (Figura 8), se observa el porcentaje para cada una de las medidas potencial de ahorro de energía representado en propuestas.

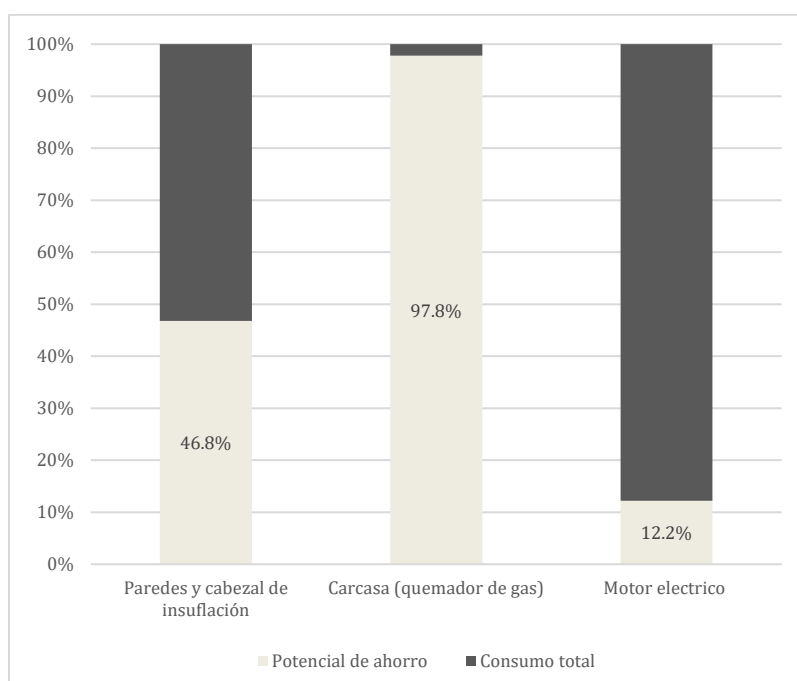


Figura 8. Potencial de ahorro de energía en porcentaje.

Conclusiones

El presente estudio permitió identificar fuentes de desperdicio de energía y áreas de oportunidad en una secadora convectiva de granos de cacao tipo samoa, que podrían disminuir tanto el consumo de energía eléctrica, como de energía térmica. Esto también representa potenciales opciones de mejoras de diseño, que pudieran contribuir a aumentar la sostenibilidad del proceso de secado de granos de cacao. Se identificaron

potenciales de ahorro en energía térmica de 2,950 kWh/año (214.7 kg/año de gas L.P.) equivalentes a una reducción de emisiones de 0.64 toneladas de CO₂/año; así como, un potencial de ahorro de energía eléctrica de 495 kWh/año, equivalentes a una disminución de emisiones indirectas de 0.22 toneladas de CO₂/año.

Reconocimientos

Los autores agradecen el apoyo otorgado por el

Instituto Politécnico Nacional a través del proyecto SIP 20241516 de convocatoria interna, denominado: “Estudio del desempeño del proceso y uso de la energía mediante la simulación de un secador de granos de cacao”.

Referencias

- Bruni, G., De Santis, A., Herce, C., Leto, L., Martini, C., Martini, F., Toro, C. (2021). From Energy Audit to Energy Performance Indicators (EnPI): A Methodology to Characterize Productive Sectors. The Italian Cement Industry Case Study. *Energies*, 14(24), 8436.
- CONUEE. (2021). Metodología para el “Diagnóstico energético en sistemas de generación. Ciudad de México, México: Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (Conuee).
- CONUEE/GIZ. (2016). Manual para la Implementación de un Sistema de Gestión de la Energía. Ciudad de México, México: Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), en colaboración con Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Funseam. (2020). Eficiencia energética y transición ecológica. Simposio empresarial internacional. Navarra, España : Civitas.
- INECC. (2014). Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).
- Kaur, T. (2022). Effect of drying on the microbial growth, nutritional value & antioxidant activities of various food: A Review . *Int. J. of Food Science and Nutrition* , 63-66.
- Mirmanto, M., Sukmawaty, S., Putra, G., Asmoro, I., & Syahrul, S. (2023). Heat transfer analysis in fluidized bed dryer with heat exchanger pipe for corn material . *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1-6.
- Semarnat. (2024). Factor de emisión del sistema eléctrico nacional. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/896217/aviso_fesen_2023.pdf
- SENER. (2024). Prospectiva de Gas Natural y Gas L.P. 2015-2029. Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/44326/Prospectiva_Gas_Natural_y_Gas_LP.pdf
- Syahrul, S., Cahyono, A., Mirmanto, M., Tira, H., Sukmawaty, S., & Putra, G. (2019). The effect of grain mass variations on drying time by adding a pipe heat exchanger to a fluidized bed dryer. *Proceedings of the 2nd International Conference on Bioscience, Biotechnology, and Biometrics*.
- Vásquez, R., Bolaina, C., & Valenzuela, F. (2013). Datos Técnicos Para Reducir El Consumo De Energía En Secadoras Tipo Samoa. Universidad Juárez Autónoma De Tabasco (UJAT).