

Modelado y Simulación de un Secador Solar Híbrido para Masa de Café en Pepa

Milton Javier Muñoz Neira

Trabajo de Grado para Optar el título de Magister en Ingeniería Electrónica

Director

Rodrigo Correa

Ph.D. Polymer Science And Engineering

Codirector

Manuel Roa

Magister en Polímeros y Biopolímeros

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones, E3T

Maestría en Ingeniería Electrónica

Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A Laura, por su gran amor, apoyo y entrega incondicional

A María José, Juan Felipe, Margarita María, Lucía Isabel y Juan Ignacio, por su alegría,

confianza e inspiración

A Jerónimo y María del Rosario, por sus oraciones y por su ejemplo

Agradecimientos

Al profesor Rodrigo Correa, por su decidido apoyo y su eficaz dirección.

A Manuel Roa, por su oportuna y sincera codirección.

A Colciencias y a la Gobernación de Santander, por su apoyo para el desarrollo de los estudios de maestría, como beneficiario de la beca otorgada a través de la convocatoria 771 del 2017.

A la empresa Café Legendario y su gerente Jesús Martínez, por el apoyo brindado a la investigación y a la iniciativa presentada en la convocatoria 771.

A Unisangil por el apoyo brindado durante la estancia de estudios.

A Oscar Muñoz, por su hermandad y desinteresado apoyo durante todo el ejercicio de la beca.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	11
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Marco referencial	14
3. Metodología	18
4. Resultados	24
5. Artículos publicados y sometidos	29
6. Conclusiones	31
Referencias	34

Lista de Tablas

Tabla 1. Parámetros y variables asociados a Ns	21
Tabla 2. Resultados asociadas a los objetivos del proyecto.....	24
Tabla 3. Artículos Publicados y Sometidos	29

Lista de Figuras

Figura 1. Proceso pruebas analíticas	18
Figura 2. Proceso modelado de la cinética de secado	19
Figura 3. Diagrama básico de un colector solar	23

RESUMEN

TITULO: MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SECADOR SOLAR HÍBRIDO
PARA MASA DE CAFÉ EN PEPA*

AUTOR: MILTON JAVIER MUÑOZ NEIRA**

PALÁBRAS CLAVE: CAFÉ, SECADO SOLAR, ENTROPÍA

DESCRIPCIÓN:

El presente documento sintetiza los principales resultados, de la investigación relacionada con el modelado y simulación de un sistema de secado solar indirecto, para masa de café en pepa, a partir del principio de mínima generación de entropía. Su ejecución contempló el estudio termoquímico del grano y de su endocarpio, para diversas condiciones de calentamiento, así como la obtención y análisis de las curvas de secado y de los coeficientes de difusión asociados, para una temperatura estándar de 50°C, a partir de la aplicación de la segunda ley de Fick.

Los experimentos mostraron que, en promedio, la deshidratación del grano sin cascarilla es aproximadamente un 50% más rápida respecto al secado del grano sin descascarar. El modelado y simulación de un colector solar de 4m², con parámetros ajustados para garantizar un valor mínimo del número adimensional de la entropía generada en el sistema, es también detallado y analizado. Este diseño contempló las irreversibilidades del sistema ocasionadas por transferencia de calor, así como las producidas por el flujo de la masa de aire que circula en el colector. Para el colector diseñado de 4m², se encontró que el número óptimo de aletas debe estar entre 7 y 9 por cara, y que la velocidad del flujo de aire deber variarse entre 0.02 y 0.05 m/s.

La investigación desarrollada constituye un primer paso para el desarrollo de esta tecnología solar, así como para su futura inserción en la economía cafetera regional.

* Tesis de Maestría en Ingeniería Electrónica, Trabajo de Investigación

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director de Tesis: Rodrigo Correa, Ph.D.

ABSTRACT

TITLE: MODELING AND SIMULATION OF AN HYBRID SOLAR DRYER FOR COFFEE MASS IN GRAIN*

AUTHOR: MILTON JAVIER MUÑOZ NEIRA**

KEYWORDS: COFFEE, SOLAR DRYING, ENTROPY

DESCRIPTION:

The following document presents the main results of the research related to modeling and simulation of an indirect solar drying system, for coffee grains, based on the principle of entropy generation minimization. Its development contemplated the thermochemical study of the grain and its endocarp, for diverse heating conditions, as well as obtaining of drying curves and its diffusion coefficients, for a standard temperature of 50°C, from applications of Fick second law.

Experiments reveal that, on average, the dehydration of the grains without parchment is, approximately, 50% faster respect to dehydration of the grains with parchment. Modeling and simulation of a solar collector of 4m², with adjusted parameters for guarantee a minimum value of entropy generation number, was done too. This design contemplated the irreversibility of the system by heat transfer and by the air flux that circulates through the collector. For the collector designed with an area 4m², the research found that the optimum fins number must be between 7 and 9 and that the air velocity must be regulated between 0.02m/s and 0.05m/s.

This research work can be considered as a first step for developing this kind of solar technology and its future application in the regional coffee economy.

* Master's Thesis in Electronic Engineering, Research Work.

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering, School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Thesis Director: Rodrigo Correa, Ph.D.

Introducción

El café es uno de los productos más significativos de la economía colombiana. En promedio, durante los últimos años, el café es el producto que más ha contribuido al crecimiento del PIB en la agricultura del país, con un aporte aproximado del 13%. Se estima que en Colombia el café genera alrededor de 800.000 empleos directos, según datos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. En Santander, según la Federación Nacional de Cafeteros, existen cerca de 31.753 productores de café, presentes en 69 municipios del departamento. Santander genera así el 4.9% de la producción nacional de este cultivo, y cuenta con el 5.1% del total de las áreas cultivadas en Colombia.

Entre los diversos aspectos que garantizan un buen factor de venta del café y, al mismo tiempo, un buen producto, se encuentra la calidad de su secado. En Colombia, tradicionalmente esta labor ha sido asumida exponiendo los granos de manera directa al sol, o por medio de secadores mecánicos. Sin embargo, existen diversos problemas asociados a estos procesos, entre ellos el riesgo de contaminación del grano cuando es expuesto de manera directa al sol, la contaminación ambiental cuando es secado por medios mecánicos (debido a la quema de combustible), y la falta de un adecuado control automático de las variables inmersas en el proceso, en ambos casos.

Es por esto que, una alternativa al secado tradicional solar y mecánico, es el secado solar indirecto apoyado en el uso de colectores solares, conocido como sistema de secado solar artificial.

En Colombia, el secado de los granos de café se lleva a cabo luego del denominado beneficio de vía húmeda, que entrega los granos con una humedad cercana al 53%. Esta humedad debe ser llevada a valores entre el 10.5% y el 11.5% durante el secado. No lograr estos niveles de humedad ponen en riesgo las almendras, al hacerlas vulnerables al deterioro por micro organismos. De otra parte, humedades por debajo del 10% deterioran el producto y empobrecen su calidad para el posterior procesamiento. Adicionalmente, es crucial que las temperaturas de secado sean idóneas, para evitar, por ejemplo, la volatilización de componentes aromáticos por exceso de temperatura.

Con el fin de realizar un aporte a la apropiación de esta tecnología, el presente proyecto de investigación proyectó el modelado y simulación de un secador de café a partir de un colector solar, aplicando el criterio de mínima generación de entropía, de modo que su estructura considerase la calidad de la energía empleada en el proceso de transferencia de calor. Este paso, se considera fundamental para una posterior implementación de un sistema automático de secado.

La investigación partió de preguntarse qué parámetros de diseño deben considerarse en el modelado de un secador solar para masa de café en pepa, de modo que la entropía generada en el sistema sea mínima. A partir de esta pregunta, se establecieron tres objetivos de trabajo. El primero buscó el análisis térmico de los granos y de su cascarilla, lo cual se logró por medio de pruebas de TGA, DSC e IR. El segundo objetivo se centró en el modelado de la cinética de secado de los granos, con y sin endocarpio, y en el diseño de un colector solar con una temperatura de salida de 50°C, planteado a partir de la minimización de la variación adimensional de la entropía generada en el sistema. El tercer objetivo se estructuró para contar con un análisis del sistema, que a partir de experimentación y de simulaciones, permitiese

determinar algunos patrones de rendimiento. Para este fin, se calcularon y analizaron los coeficientes de difusión de las curvas de secado obtenidas, y se efectuaron simulaciones que permitieron visualizar la variación de la entropía generada, ante cambios en los parámetros geométricos de la placa del colector solar y de la velocidad del flujo de aire destinado a secar los granos.

El marco referencial considerado a lo largo de la investigación, así como los métodos implementados, los principales resultados y las conclusiones del trabajo, son presentados a continuación. Un detalle más profundo del trabajo, puede leerse, de igual manera, en los seis artículos producidos a partir de los experimentos y simulaciones llevados a cabo.

1. Objetivos

Los objetivos aprobados para el desarrollo de la investigación fueron los siguientes.

1.1 Objetivo General

Modelar y simular un secador solar híbrido para masa de café en pepa que permita establecer la humedad a valores entre 10% y 12% (w/w).

1.2 Objetivos Específicos

1. Realizar una serie de pruebas analíticas sobre una muestra de café en pepa como TGA (análisis termo-gravimétrico), DSC (calorímetro diferencial de barrido) y el análisis de los gases generados mediante un IR (Infrarrojo) acoplado a ellos y en tiempo real.
2. Modelar un sistema de secado solar híbrido para masa de café en pepa a partir del estudio de la generación mínima de entropía en el sistema.
3. Analizar la operación del sistema de secado modelado a partir de la simulación del mismo y determinar algunos indicadores que definan su rendimiento.

2. Marco Referencial

Secar de manera adecuada el grano de café, es un paso fundamental de su manejo en post cosecha. Un buen secado garantiza que el grano esté protegido de afectaciones por hongos e

insectos, o que el grano germine, lo cual preserva su calidad durante el almacenamiento previo al tueste (FAO, 2011; Puerta, 2006). El secado realizado de manera adecuada favorece así mismo una mejor calidad de la taza de café (Henao, 2015; Puerta, 2001; Ribeiro et al., 2018). La Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, exige, como condición mínima de calidad, que los granos de café seco no tengan una humedad superior al 12.5% en base húmeda (FNC, 2016). En la práctica, el grano debe entregarse para la venta con valores de humedad entre el 10.5 y 12%. Este secado, de acuerdo a las recomendaciones de CENICAFE, debe realizarse a temperaturas entre 45 y 50°C (Puerta, 2001).

La cinética del secado conlleva determinar la pérdida de humedad para cada instante de tiempo. Dicha humedad perdida, M_t , está definida por la ecuación (1), en la que, m_0 es la masa inicial del grano, m_t es la masa del grano en el tiempo t , y M_0 es la humedad inicial calculada con la ecuación (2), donde m_d es la masa seca del grano. La humedad en base seca (b.s.) se determina a partir de M_t , con la ecuación (3).

$$M_t = 1 - \frac{(m_0) * (1 - M_0)}{m_t} \quad (1)$$

$$M_0 = \frac{m_0 - m_d}{m_0} \quad (2)$$

$$M = \frac{M_t}{1 - M_t} \quad (3)$$

La variación de la humedad con el tiempo sigue la segunda ley de Fick (Crank, 1975), según se expresa en la ecuación (4), en la que D es el coeficiente efectivo de difusión. Si la geometría del grano es asumida como aproximadamente esférica, la solución de la ecuación (4) tiene la forma de la ecuación (5), (Amaral et al., 2018), en la que MR es la relación adimensional de humedad, M_0 la humedad inicial expresada en base seca, M_e la humedad de equilibrio, también

en base seca, y r el radio promedio de los granos. Una solución más general puede expresarse según la ecuación (6).

$$\frac{dM}{dt} = D \nabla^2 M \quad (4)$$

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-D \frac{n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (5)$$

$$MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \exp(-k_i * t) \quad (6)$$

En Colombia, el modo tradicional de secar el grano de café es exponiéndolo de manera directa al sol, o por medio de secadores mecánicos. Sin embargo, existen diversos problemas asociados a estos procesos, entre ellos el riesgo de contaminación del grano cuando es expuesto de manera directa al sol, la contaminación ambiental cuando es secado por medios mecánicos, debido a la quema de combustible, y la falta de un adecuado control automático de las variables inmersas en el proceso, en ambos casos.

Una alternativa al secado tradicional solar y mecánico, es el secado solar indirecto apoyado en el uso de colectores solares. Dicho secado posee la ventaja de ser amigable con el medio ambiente y de ser más eficiente que la exposición directa al sol. Revisiones del estado del arte, clasificación de secadores solares, modos de operación y aplicaciones, son expuestas en (Ekechukwu & Norton, 1999a, 1999b; Ekechukwu, 1999; A. Kumar, Singh, Prakash, & Ashutosh, 2014; M. Kumar, Sansaniwal, & Khatak, 2016; Sharma, Chen, & Vu Lan, 2009; Vijayavenkataraman, Iniyan, & Goic, 2012), entre otros. En el marco del estudio y análisis de teorías y aplicaciones de la energía solar, (Tiwari, Tiwari, & Shyam, 2016) exponen los principios teóricos de la radiación solar, la termodinámica asociada al uso de dicha energía, así

como el fundamento de los colectores y los secadores solares. Por su parte (Mujumdar, 2015), en el contexto del estudio de secadores industriales, dedica el capítulo 14 a la explicación de los fundamentos de los secadores solares, su clasificación, aspectos económicos, modelado, simulación y control.

Para optimizar el proceso de secado por medio de colectores solares, es primordial garantizar que la entropía generada en el sistema sea mínima, lo cual constituye el principio de mínima generación de entropía (EGM, por sus siglas en ingles), el cual se fundamenta en el teorema de Gouy-Stodola (Bejan, 1999), expresado en la ecuación (7), en la que W_{lost} es el trabajo perdido en un sistema, $\dot{S}_{gen}$ la variación de la entropía generada en el mismo, y T_o la temperatura ambiente. De acuerdo con el teorema, el modo de minimizar el trabajo perdido, es minimizar la variación de la entropía generada.

$$W_{lost}=T_o\dot{S}_{gen} \quad (7)$$

Los fundamentos de la EGM pueden leerse en (Bejan, 2016; Prakash, Lienhard, & Zubair, 2010; Sciacovelli, Verda, & Sciubba, 2015). Sus aplicaciones al diseño de colectores solares, se esbozan en (Bejan, Kearney, & Kreith, 1981; Ge, Wang, Wang, Zhang, & Guan, 2014; Mortazavi & Ameri, 2018; Saha & Mahanta, 2001; Torres, Cervantes de Gortari, Ibarra, & Picon, 2001; Torres, Navarrete, Zaleta, & Cervantes-de Gortari, 2003; Torres, Navarrete, & Ibarra, 2002), entre otros autores. Estas aplicaciones parten del balance general de entropía en el sistema, según la ecuación (8) (Cengel & Boles, 2015), la definición de la variación de la entropía generada, ecuación (9), y un balance de energía, cuyo modelo simplificado es representado por la ecuación (10). En la ecuación (8) S_{heat} es la entropía neta que el medio intercambia con el sistema por transferencia de calor, S_{mass} la entropía

intercambiada con el sistema por transferencia de masa, S_{gen} la entropía generada (dado que el sistema no es reversible), y S_{system} la entropía neta del sistema. La ecuación (9) tiene las mismas variables que la ecuación (8) pero derivadas respecto al tiempo. En la ecuación (10), q_{sun} es el calor suministrado por el solar por unidad de área, q_{air} el calor del aire en el colector por unidad de área, $\dot{m}$ la variación de la masa de aire que circula por el colector, c_v la capacidad calorífica a volumen constante por unidad de área del colector, T_c la temperatura del colector y A el área del mismo.

$$S_{heat} + S_{mass} + S_{gen} = \Delta S_{system} \quad (8)$$

$$\dot{S}_{gen} = \frac{dS_{system}}{dt} - \dot{S}_{heat} - \dot{S}_{mass} \quad (9)$$

$$q_{sun} = q_{air} + \dot{m}c_v \frac{dT_c}{dA} \quad (10)$$

3. Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos, se siguieron los siguientes pasos.

Pruebas Analíticas.

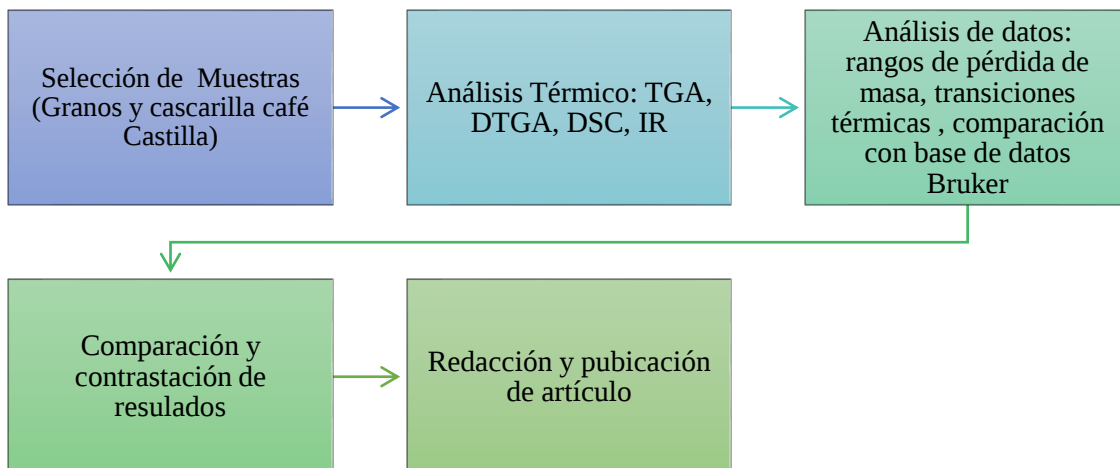
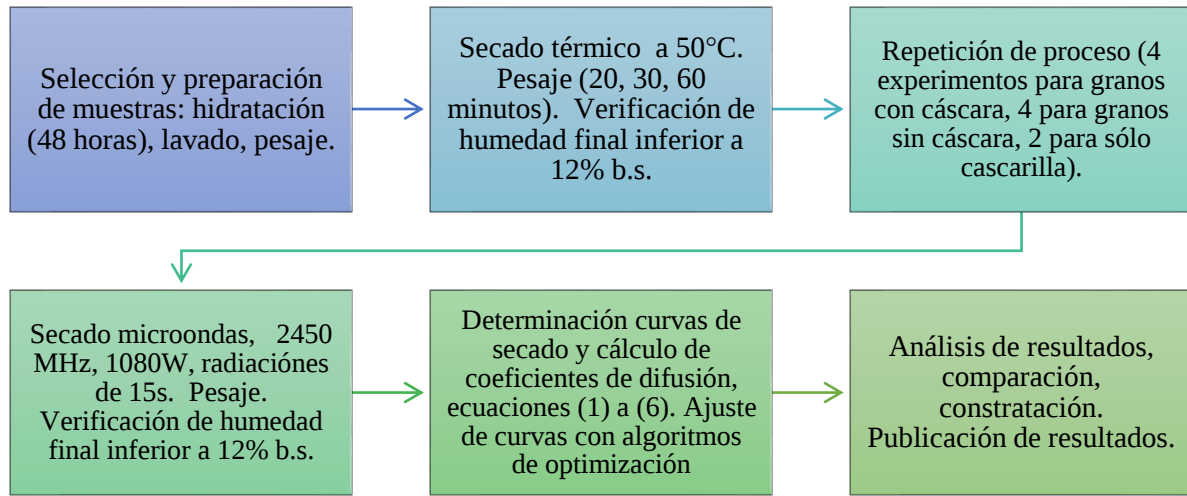


Figura 1. Proceso pruebas analíticas

Cinética de Secado.*Figura 2.* Proceso modelado de la cinética de secado

En el ajuste de las curvas de secado, como función objetivo se usó la ecuación (11), donde M es el vector de los N datos reales obtenidos las medidas de pérdida de agua, y M^* los datos inferidos por el modelo. Los datos estimados por el modelo fueron comparados con los datos reales a partir del cálculo del error medio cuadrático (ecuación 12), y del coeficiente de determinación (ecuación 13). Todos los algoritmos fueron corridos en Matlab 2018.

$$f_{\text{obj}} = \sum_1^N (M - M^*)^2 = 0 \quad (11)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_1^N (M - M^*)^2}{N}} \quad (12)$$

$$\gamma^2 = 1 - \frac{\sum_1^N (M - M^*)^2}{\sum_1^N (M - \bar{M})^2} \quad (13)$$

Minimización de la Entropía Generada en el Colector Solar. A partir de las ecuaciones (9) y (10), y siguiendo a (Bejan et al., 1981) y a (Torres et al., 2001), se obtuvo una expresión para la variación normalizada de la entropía generada en el colector solar, N_s , a partir de la cual se determinaron los parámetros que minimizan su valor, y maximizan por tanto la exergía en el colector. En esta investigación, la expresión deducida para N_s considera el aporte que a ella hace el flujo de aire que circula en el colector solar. Este flujo es el mismo que luego de ser calentado en el colector, entra en contacto con los granos de café para secarlos. Generalmente este aporte es ignorado por los trabajos desarrollados sobre el tema, pero como se observa en los resultados obtenidos, su influencia sobre la entropía generada es significativa. Así mismo, La placa del colector solar fue tratada como un disipador de calor con aletas rectangulares. La expresión para N_s y sus ecuaciones asociadas, son expuestas a continuación. La tabla 1 resume las variables y parámetros inmersos en dichas ecuaciones.

$$N_s = 1 - \frac{1}{\theta_{\text{sun}}} + BF_d V_f + M \left(\ln \left(\frac{\theta_{\text{out}}}{\theta_{\text{in}}} \right) - \theta_{\text{out}} + \theta_{\text{in}} \right) \quad (11)$$

$$N_s = \frac{\dot{S}_{\text{gen}} T_0}{\dot{Q}_{\text{sun}}} \quad (12)$$

$$M = \frac{\dot{m} c_v T_0}{\dot{Q}_{\text{sun}}} = \frac{\dot{m} c_v T_0}{GA_c (\tau \sigma)} \quad (13)$$

$$B = \frac{1}{GA_c (\tau \sigma)} \quad (14)$$

$$\theta_{\text{in}} = \frac{T_{\text{in}}}{T_0}, \quad \theta_{\text{out}} = \frac{T_{\text{out}}}{T_0}, \quad \theta_{\text{sun}} = \frac{T_{\text{sun}}}{T_0} \quad (15)$$

$$M = \left[(\theta_{\text{max}} - 1) \ln \left(\frac{\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{in}}}{\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{out}}} \right) \right]^{-1} \quad (16)$$

$$\theta_{\max} = 1 + \frac{GA_c(\tau\sigma)}{hA_p T_0} = 1 + \frac{\dot{Q}_{\text{sun}}}{hA_p T_0} \quad (17)$$

Tabla 1.

Parámetros y variables asociados a N_s

Variable	Definición	Unidades
N_s	Número adimensional, variación de la entropía generada en el colector solar	Adimensional
G	Radiación solar por unidad de área	$[\text{Wm}^{-2}]$
A_c	Área del colector	$[\text{m}^2]$
A_p	Área de transferencia de calor en la placa del colector	$[\text{m}^2]$
$\tau\sigma$	Producto de la absorbancia por la transmitancia, en el colector solar	Adimensional
F_d	Fuerza de arrastre del aire al pasar por el colector	$[\text{N}]$
V_f	Velocidad del aire que circula por el colector solar	$[\text{m/s}]$
$\dot{Q}_{\text{sun}}$	Potencia suministrada por la radiación solar	$[\text{W}]$
$\dot{m}$	Variación de la masa de	$[\text{Kg/s}]$

	aire que circula por el colector	
c_v	Capacidad calorífica del colector solar a volumen constante por unidad de área	[J/ Kg K]
h	Coeficiente de transferencia de calor del aire al circular por el colector	[W/m ² K]
$T_c, T_{in}, T_{out}, T_o, T_{sun}$	Temperatura del colector Temperatura del aire que entra al colector Temperatura del aire que sale del colector Temperatura ambiente Temperatura aparente del sol	[K]
$\theta_{in}, \theta_{out}, \theta_{sun}$	Temperaturas normalizadas respecto a la temperatura ambiente	Adimensional

Nótese que el área de transferencia de calor, A_p , es al menos igual al doble del área del colector, dado que el aire en el colector circula tanto por la superior como inferior de la placa interna (ver Figura 3). Si dicha placa contiene aletas, el área necesariamente será mayor al doble

de A_c . $\theta_{\max}$ es la temperatura máxima normalizada teórica, que puede alcanzar el colector solar. Tanto $\theta_{\max}$ como el factor M , se hallan solucionando el modelo simplificado del balance de energía en el colector solar. Dicha solución se muestra en la ecuación (18).

$$T_c = \left(\frac{GA_c}{hA_p} + T_0 \right) + \left(T_{in} - \left(\frac{GA_c}{hA_p} + T_0 \right) \right) e^{\left(\frac{-hA_p}{\dot{m}c_v} \right)} \quad (18)$$

El coeficiente de transferencia de calor del aire, h , se halló a partir del cálculo del número de Nusselt, y la fuerza de arrastre F_d a la partir del cálculo del número de Reynolds. Tanto h como F_d dependen por tanto de la geometría de la placa del colector. De este modo, en la minimización de N_s están implícitos tres parámetros geométricos y una variable: el número de aletas de la placa, N , el ancho de cada aleta t_{fin} , la altura de la aleta, H , y la velocidad del flujo de aire, V_f . Haciendo uso de un algoritmo de optimización por PSO, los valores de estos parámetros fueron hallados, de modo que el valor adimensional de la entropía generada fue minimizado.

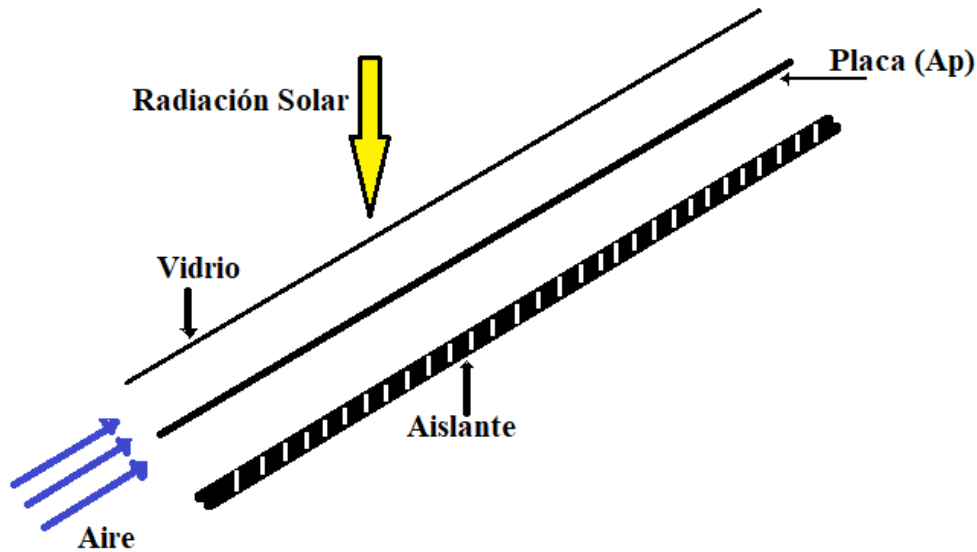


Figura 3. Diagrama básico de un colector solar

Detallados los métodos empleados para el cumplimiento de los objetivos, se presentarán a continuación los principales resultados obtenidos.

4. Resultados

Los resultados obtenidos han sido publicados y sometidos en diversas revistas, según se resume en el ítem Artículos Publicados y Sometidos, del presente trabajo (Tabla 1). La siguiente tabla presenta una síntesis de dichos resultados, en relación a los objetivos planteados para el proyecto.

Tabla 2.

Resultados asociadas a los objetivos del proyecto

Pruebas Analíticas

El análisis térmico estableció los rangos de pérdida de masa del grano de café, a velocidades de calentamiento de 5°C/min y 10°C/min, para temperaturas hasta los 1000°C. La investigación caracterizó también el grano a través de calorimetría diferencial de barrido (DSC) y análisis infrarrojo (IR). El endocarpio del grano (cascarilla) fue analizado con base en las mismas pruebas (TGA, DSC, IR), y los resultados fueron comparados y contrastados con los de la pepa. Entre otros aspectos, el análisis térmico permitió establecer que, en efecto, una temperatura de secado que no afecta la composición del grano, debe ser inferior a 60°C, temperatura a la cual la mayor pérdida de masa es debida a la evaporación del agua, sin que

esta (la pérdida de masa) represente un porcentaje mayor al 0.5%, cuando la velocidad de calentamiento es de 5°C/min o de 10°C/min. De otra parte, los análisis muestran que el rango comprendido entre 219°C y 254°C es relevante para el proceso de tueste, dato que es coherente con los resultados presentados por (Rivera, Velasco, & Rincón, 2013).

Publicaciones del autor asociadas (Ver Tabla 1)

- *Thermal analysis of coffee beans of Castilla variety grown in*
- *Thermal Analysis of Coffee Hulls and their Effect on the Drying Process in Conventional Ovens*
- *-Infrared spectroscopy, thermoanalysis and diffusion coefficients for the endocarp of a Castilla variety coffee sample*

Modelado y Análisis de Rendimiento

(Cinética de Secado)

La cinética del grano con cascarilla y sin cascarilla fue establecida siguiendo la segunda ley de Fick. Un modelo compuesto por la suma de dos exponenciales fue ajustado por medio de algoritmos de optimización, tanto para un secado térmico a 50°C, como para un secado por microondas. El tiempo de secado, para los granos con cáscara, a una temperatura controlada de 50°C, fue en promedio de 18 horas, en tanto que el de los granos sin cascara fue de 10 horas. Estos resultados son similares a los encontrados por (Zuluaga & Gomez, 2015), para café arábigo secado con cáscara, y por (Patiño, Pencue, & Vargas, 2016), para café arábigo secado sin cáscara. Los experimentos de secado evidencian que el secado de los granos con cáscara posee un coeficiente de difusión, en promedio, un 46% menor que el coeficiente de

difusión de los granos secados sin cáscara, tanto en el secado térmico como por microondas. En el secado térmico, la consecuencia de esta difusión más lenta es un tiempo de secado un 50% mayor. Y aunque el secado por microondas es sensiblemente más rápido, la uniformidad de la temperatura del grano es menor, y la temperatura que puede alcanzar durante el secado supera los 90°C.

Publicaciones del autor asociadas (ver Tabla 1)

- *Thermal Analysis of Coffee Hulls and their Effect on the Drying Process in Conventional Ovens*
- *Estimating Drying Curves and Diffusion Coefficients in Coffee Drying (Castilla Variety) through Global Optimization Strategies*
- *Infrared spectroscopy, thermoanalysis and diffusion coefficients for the endocarp of a Castilla variety coffee sample.*

Así mismo, se ha sometido el artículo titulado *Comparative analysis of drying coffee grains by microwave and conventional oven*, el cual se encuentra en estado de revisión. (Ver Tabla 1)

Modelado y Análisis de Rendimiento

(Diseño de colector solar por EGM)

La investigación sintetizó un método para el diseño de un colector solar con mínima generación de entropía, que contempla la entropía generada tanto por transferencia de calor, como por el flujo de masa de aire que circula a través el colector, la cual generalmente es

ignorada. Para un área de 4 m^2 , el valor óptimo de aletas en la placa del colector, para garantizar una mínima generación de entropía, fue fijado en 18, 9 por cada lado de la placa. De igual manera, para este mismo propósito y considerando las variaciones de radiación durante un día soleado estándar, la velocidad de flujo fue fijada en un rango entre 0.015 y 0.046 m/s, en tanto que el espesor de las aletas estimado fue de $25 \times 10^{-3} \text{ m}$ y su altura en $5 \times 10^{-2} \text{ m}$. Estos valores consideraron variaciones de radiación solar entre los 200 and 700 W/m^2 .

Para que la temperatura del aire a la salida del colector, que es la temperatura de secado del grano, se mantenga en 50°C , es necesario que la velocidad del flujo de aire sea variante. Al aplicar el método de optimización, esta circunstancia fue considerada, fijando rangos de operación para esta velocidad, estimados previamente a partir del modelo simplificado del balance de energía en el colector.

Los resultados evidencian que, en el colector de 4 m^2 , velocidades inferiores a 0.019m/s o superiores a 0.05m/s, disparan el valor de entropía generada. De igual manera, un número de aletas inferior a 5 o mayor a 10 (por cada cara de la placa del colector), ocasionan un alto incremento en la entropía generada.

Publicaciones del autor asociadas (ver Tabla 1)

El análisis ampliado de estos resultados ha sido sometido en un artículo a la revista Engineering Journal, bajo el título de: *Entropy Generation Analysis for Designing Flat Plate Solar Collectors with Fins* (Ver Tabla 1)

Con base en el diseño elaborado y simulado, se ha sintetizado la siguiente secuencia de pasos para el modelado de un colector solar optimizado por mínima generación de entropía (EGM), según se describe a continuación.

- a. **Desarrollar el balance de entropía para el sistema** y de él hallar una expresión para N_s , el número adimensional de la variación de la entropía generada en el sistema
- b. **Hallar la relación de N_s con la geometría del sistema.** Esta geometría está asociada al número de Nusselt y al número de Reynolds. En efecto, la resistencia térmica del sistema es equivalente al producto del área de transferencia de calor (A_p) por el coeficiente de transferencia de calor del aire que circula por el colector (h), el cual a su vez depende del número de Nusselt. La fuerza de arrastre del aire depende, por su parte, del número de Reynolds.
- c. **Definir los parámetros geométricos y variables que deben calcularse para minimizar N_s .** Para el caso diseñado fueron N , t_{fin} , H y V_f .
- d. **Aplicar un método de optimización** para hallar los valores óptimos de los parámetros y variables.
- e. **Verificar con el modelo de energía del sistema**, si para los valores óptimos hallados, la temperatura de salida es la deseada y previamente asumida.
 - Si la temperatura de salida no es la requerida para el proceso de secado, los rangos de búsqueda en la optimización deberán ajustarse y volver a aplicar la optimización.
- f. **Repetir d. y e. para para distintos valores de radiación y temperatura de entrada.**

5. Artículos Publicados y Sometidos

Tabla 3.

Artículos Publicados y Sometidos

No	Artículo	Revista	Objetivo Específico Asociado
1	Publicado Thermal analysis of coffee beans of Castilla variety grown in	Revista Mexicana de Ingeniería Química ISSN: 1665-2738 Volumen 17 – No 3, 2018, pp. 1147-1158 A2 Publindex (Vigencia Actual)	Objetivo 1. Pruebas analíticas
2	Publicado Thermal Analysis of Coffee Hulls and their Effect on the Drying Process in Conventional Ovens	Indian Journal of Science and Technology ISSN-E: 0974-5645 Volumen 11 – No 36, 2018 A2 Publindex en la vigencia 2017	Objetivo 1. Pruebas Analíticas Objetivo 2 y 3. Modelado del sistema de secado. Análisis de Rendimiento
3	Publicado Estimating Drying Curves and Diffusion Coefficients in Coffee Drying (Castilla Variety) through Global Optimization Strategies	Indian Journal of Science and Technology ISSN-E: 0974-5645 Volumen 11 – No 45, 2018 A2 Publindex – Vigencia 2017	Objetivo 2 y 3. Modelado del sistema de secado. Análisis de Rendimiento

4	Publicado Infrared spectroscopy, thermoanalysis and diffusion coefficients for the endocarp of a Castilla variety coffee sample	Coffee Science. ISSN-E: 1984-3909 A2 Publindex – (Vigencia Actual)	Objetivo 1. Pruebas Analíticas Objetivo 2 y 3. Modelado del sistema de secado. Análisis de Rendimiento
5	Aceptado Comparative analysis of drying coffee grains by microwave and conventional oven	REDIN ISSN: 2422-2844 B Publindex – (Vigencia Actual)	Objetivo 2 y 3. Modelado del sistema de secado. Análisis de Rendimiento
6	Sometido / En Revisión Entropy Generation Analysis for Designing Flat Plate Solar Collectors with Fins	Dyna ISSN: 0012-7353 A2 Publindex (Vigencia Actual)	Objetivo 2 y 3. Modelado del sistema de secado. Análisis de Rendimiento

6. Conclusiones

La investigación realizada ha permitido caracterizar térmicamente muestras de café variedad Castilla, de la región sur oriental del departamento de Santander, establecer su cinética de secado para una temperatura estándar de 50°C, y modelar un colector solar que suministre aire a dicha temperatura, en un proceso con mínima generación de entropía. El análisis térmico evidencia que temperaturas entre 50 y 60°C son idóneas para el secado del grano, dado que en ese rango su composición química no es afectada, la mayor pérdida de masa es debida a evaporación de agua, y dicha pérdida no representa un porcentaje mayor al 0.5%. Como aporte al conocimiento de las características térmicas de los granos de café de esta variedad particular, los análisis efectuados estiman que el rango comprendido entre 219°C y 254°C es relevante para el proceso de tueste.

Los tiempos de secado a una temperatura controlada de 50°C para granos de café Castilla con cascarilla, fue en promedio de 18 horas, en tanto que el de los granos sin cascarilla fue de 10 horas. No es posible reducir este tiempo sin comprometer la calidad del grano, de acuerdo a los requerimientos exigidos para su exportación. Sin embargo, una alternativa al secado tradicional con cáscara, surge al considerar los resultados del secado de granos previamente descascarados. En efecto, tanto los análisis térmicos como los experimentos de secado evidenciaron que cascarilla y grano compiten por la absorción de calor durante el secado, lo que hace que la deshidratación del grano sin cascarilla sea aproximadamente un 50% más rápido respecto al secado del grano sin descascarar. Un proceso híbrido que contemple un secado preliminar con microondas podría ser de igual manera una alternativa, sin embargo, es necesario ajustar los tiempos de exposición a esta radiación para evitar sobre calentamiento del grano, según se evidencia en los ensayos llevados a cabo durante el proyecto.

La investigación realizada sintetizó un método para el diseño de colectores solares a partir del principio de mínima generación de entropía, en el que se consideran no solo las irreversibilidades del sistema ocasionadas por transferencia de calor, sino también las producidas por el flujo de la masa de aire que circula en el colector. La optimización del colector debe contemplar el uso de aletas, de un grosor y altura específica, para garantizar la minimización de la entropía generada. Se concluye por tanto, que la exergía del colector es mayor al estar dispuesta su placa con un determinado número de aletas. Para el colector diseñado de 4m^2 , ese número varía entre 7 y 9 aletas por cara. Fijar un rango idóneo para la variación de la velocidad de flujo del aire, por medio de la cual puede regularse la temperatura de salida del colector, es así mismo fundamental para garantizar la optimización térmica en el mismo. Para el colector diseñado, ese rango fue estimado entre 0.02 y 0.05 m/s.

Los resultados obtenidos son un aporte fundamental a la innovación y apropiación tecnológica del secado solar indirecto para el café regional, a partir del uso de colectores solares, como alternativa al secado tradicional en patio o mecánico por combustión.

6. Recomendaciones

Se recomienda dar continuidad al proyecto a través de la implementación de un prototipo de colector solar, dotado de la instrumentación electrónica necesaria para verificar y controlar su operación. A partir del prototipo instrumentado se deberá ajustar el modelo del balance de energía en el sistema, calcular las curvas de secado siguiendo el método ya evaluado, y hacer los

ajustes necesarios bajo el principio de mínima generación de entropía, de modo que su exergía en operación automática sea máxima.

De igual manera, se recomienda extrapolar los resultados obtenidos, en aplicaciones de secado para otro tipo de granos de igual relevancia para la región, como el cacao.

Referencias

- Amaral, R., Tavares de Andrade, E., Gomes, F., Borém, F. M., Avila, I., & Dias, C. D. A. (2018). Simulation of coffee fruit drying using computational fluid dynamics. *Coffee Science*, 13(4), 477–488. Retrieved from <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1489/PDF1489>
- Bejan, A. (1999). The Method of Entropy Generation Minimization. In *Energy and the Environment* (Vol. 15, pp. 11–22). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4593-0_2
- Bejan, A. (2016). *Advanced Engineering Thermodynamics* (4th ed.). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119245964>
- Bejan, A., Kearney, D. W., & Kreith, F. (1981). Second Law Analysis and Synthesis of Solar Collector Systems. *Journal of Solar Energy Engineering*, 103(1), 23. <https://doi.org/10.1115/1.3266200>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics An Engineering Approach* (8th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Crank, J. (1975). *the Mathematics of Diffusion* Clarendon Press Oxford 1975. [https://doi.org/10.1016/0306-4549\(77\)90072-X](https://doi.org/10.1016/0306-4549(77)90072-X)
- Ekechukwu, O. ., & Norton, B. (1999a). Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 615–655.

[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00093-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00093-4)

Ekechukwu, O. ., & Norton, B. (1999b). Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 657–667. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00094-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00094-6)

Ekechukwu, O. V. (1999). Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. *Energy Conversion and Management*, 40(6), 593–613.

[https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(98\)00092-2](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00092-2)

FAO. (2011). Grain crop drying, handling and storage. *Rural Structures in the Tropics: Design and Development*, 363–386. Retrieved from

<http://www.fao.org/docrep/015/i2433e/i2433e10.pdf>

FNC, F. N. de C. de C. (2016). Resolución_2_de_2016_café_verde.pdf. Retrieved from

http://www.cafedecolombia.com/static/files/Resolución_2_de_2016_café_verde.pdf

Ge, Z., Wang, H., Wang, H., Zhang, S., & Guan, X. (2014). Exergy analysis of flat plate solar collectors. *Entropy*, 16(5), 2549–2567. <https://doi.org/10.3390/e16052549>

Henao, A. J. (2015). *Evaluación del proceso de secado del café y su relación con las propiedades físicas, composición química y calidad en taza*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Retrieved from

<http://www.bdigital.unal.edu.co/51841/1/1128270450.2016.pdf%0Ahttp://www.bdigital.unal.edu.co/51841/>

Kumar, A., Singh, R., Prakash, O., & Ashutosh. (2014). Review on global solar drying status. *Agric Eng Int: CIGR Journal*, 16(4), 161–177.

Kumar, M., Sansaniwal, S. K., & Khatak, P. (2016). Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55(October 2017), 346–360.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.158>

Mortazavi, A., & Ameri, M. (2018). Conventional and advanced exergy analysis of solar flat plate air collectors. *Energy*, 142, 277–288. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.035>

Mujumdar, A. S. (2015). *Handbook of Industrial Drying*. (A. S. Mujumdar, Ed.), *Drying Technology* (Fourth Edi). CRC Press.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1080/07373937.2014.983704>

Patiño, M., Pencue, E., & Vargas, R. (2016). Determinación Del Contenido De Humedad En Granos De Café Pergamino Seco Utilizando Speckle Dinámico. *Biotecnología En El Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 14(2), 84. [https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)84-91](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)84-91)

Prakash, G., Lienhard, J., & Zubair, S. (2010). Entropy generation minimization of combined heat and mass transfer devices. *International Journal of Thermal Sciences*, 49(10), 2057–2066. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.04.024>

Puerta, G. (2001). Cómo garantizar la buena calidad de la bebida del café y evitar los defectos. *Cenicafé*, AT284, 8. Retrieved from www.cenicafe.org

Puerta, G. (2006). La humedad controlada del grano preserva la calidad del café. *Cenicafé*, 352, 1–8. Retrieved from <http://biblioteca.cenicafe.org/bitstream/10778/418/1/avt0352.pdf>

Ribeiro, B. B., Mickael, F., Câmara, D. M., Nazareno, A., Mendes, G., Anastácio, V., & Montanari, F. F. (2018). SENSORY ANALYSIS OF COFFEE DRIED WITH AND WITHOUT STIRRING. *Coffee Science*, 13(4), 455–464. Retrieved from <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1472/PDF1472>

Rivera, W., Velasco, X., & Rincón, C. A. (2013). TGA and FTIR evaluation of composition changes produced by roasting of coffee beans | Evaluación por TGA y FTIR de los cambios de composición producidos por la tostión en granos de café. *Revista Colombiana de Física*,

45(3), 0–4.

Saha, S. K., & Mahanta, D. K. (2001). Thermodynamic optimization of solar flat-plate collector.

Renewable Energy, 23, 181–193.

Sciacovelli, A., Verda, V., & Sciubba, E. (2015). Entropy generation analysis as a design tool -

A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43(December), 1167–1181.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.104>

Sharma, A., Chen, C. R., & Vu Lan, N. (2009). Solar-energy drying systems: A review.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(6–7), 1185–1210.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015>

Tiwari, G. N., Tiwari, A., & Shyam. (2016). *Handbook of Solar Energy*.

<https://doi.org/10.1007/978-981-10-0807-8>

Torres, E. ., Cervantes de Gortari, J. C. ., Ibarra, B. A. ., & Picon, M. (2001). A design method

of flat-plate solar collectors based on. *Exergy*, 1(1), 46–52.

Torres, E., Navarrete, J. ., Zaleta, A., & Cervantes-de Gortari, J. G. (2003). Optimal process of

solar to thermal energy conversion and design of irreversible flat-plate solar collectors.

Energy, 28(2), 99–113. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00095-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00095-6)

Torres, E., Navarrete, J. J., & Ibarra, B. A. (2002). Thermodynamic method for designing dryers

operated by flat-plate solar collectors. *Renewable Energy*, 26, 649–660.

Vijayavenkataraman, S., Iniyan, S., & Goic, R. (2012). A review of solar drying technologies.

Renewable and Sustainable Energy Reviews. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.007>

Zuluaga, C., & Gomez, L. M. (2015). Dynamic modeling of coffee beans dryer. *2015 IEEE 2nd*

Colombian Conference on Automatic Control, CCAC 2015 - Conference Proceedings.

<https://doi.org/10.1109/CCAC.2015.7345214>