

Modeling and Simulation in Distributed Parameters for a Dryer of Cocoa Beans

(Modelado y Simulación en Parámetros Distribuidos para un Secador de Cacao)

P. Parra Rosero, *Member, IEEE*

Abstract — This paper presents a model in distributed parameters for a drying plant of cocoa beans. The plant is composed of a combustion chamber, an air fan thrust and a drying chamber integrated by a rotating cylinder. The model was developed in the EcosimPro® platform, in which the process of simulation, sensitivity analysis and estimation of parameters were implemented. For the optimization and validation of the model were used real plant data. This research examines a valid alternative to artificial drying of cocoa beans.

Index Terms — Modeling, optimization, parameters, sensitivity, simulation, validation.

I. INTRODUCCIÓN

En el año 2013 se ubica al Ecuador como el sexto productor de cacao a nivel mundial, con un volumen de 190000 toneladas métricas. Para el año 2013 la producción de cacao a nivel mundial se distribuyó en un 69.8% en África, un 16.1% en América y un 14.1% en Asia y Oceanía. Costa de marfil es el principal productor de cacao con 1470000 toneladas métricas [1]. El 5% de la producción mundial del cacao corresponde a cacao fino o de aroma, correspondiendo al Ecuador el 63% de esa producción a nivel mundial [2].

La mayor parte de la producción de cacao ecuatoriano que se exporta corresponde a cacao en grano. Del total de cacao y derivados exportados el 1% corresponde a chocolate, 2% a cacao en polvo, 2% a manteca, grasa y aceites de cacao, 4% a pasta de cacao y el 90% restante a cacao en grano [3].

En África, Asia, América del Sur y América Central los procesos de producción de cacao son muy similares. Las etapas más críticas dentro de este proceso son la fermentación y el secado, siendo estas las responsables de generar y mantener las cualidades organolépticas del producto.

Se identifican claramente dos fases dentro del proceso de fermentación. La fase anaeróbica, que se realiza sin la presencia del

aire, comienza una vez abiertas las mazorcas, las cuales se contaminan con una serie de microorganismos, tales como levaduras que actúan sobre los azúcares de la pulpa o mucílago, transformándolos en alcohol etílico. Durante este proceso se desprende calor, incrementando así la temperatura del lote de grano. En la fase anaeróbica también se detecta la presencia de ácido láctico, que posteriormente se convertirá en ácido butírico. En la fase aeróbica, la presencia de aire permite que las bacterias acéticas transformen el alcohol en ácido acético (vinagre), el mismo que ingresa a los cotiledones y produce la muerte del embrión [4].

El proceso de secado del grano de cacao se lo puede realizar de forma natural o forzada. En la etapa de secado continúa el proceso de oxidación iniciado en la fermentación y se completa la formación de aquellos compuestos que determinan las cualidades organolépticas, como el aroma (pirazinas y aldehídos) y el sabor (teobromina, cafeína y taninos) del cacao. En esta etapa además se desarrolla la pigmentación de color marrón a partir de los compuestos fenólicos (antocianinas)[5].

Para el secado forzado del cacao se utilizan distintas fuentes de calor, preferentemente las generadas a partir de la combustión de carburantes como el gas natural. Para el beneficiado de cacao en Ecuador se utilizan mayoritariamente secadores indirectos por lotes. Existen algunos tipos de secadores forzados: estufas, secadoras con leña, secadoras de combustión, secadoras eléctricas y la secadora de cacao tipo Samoa. La mayor parte de la producción de cacao proviene de países en donde el secado es predominantemente natural, sin embargo en algunas regiones geográficas los períodos de cosecha coinciden con épocas de lluvia y humedad alta, en cuyo caso inevitablemente se recurre al secado artificial [6].

Varios autores han abordado la temática del secado forzado de alimentos, pero, no muchos autores han publicado estudios acerca del secado forzado de cacao de forma específica. Hay trabajos desarrollados en torno al secado de otro tipo de alimentos en sistemas cilíndricos y rotatorios, por ejemplo en [7], se describe una aplicación para un secador rotatorio de azúcar; en [8], se presenta un modelo aplicado a desechos vegetales; en [9], se plantea el controlador predictivo de un secador rotatorio. También se encuentra el desarrollo del modelo y la simulación para un secador de pulpa de remolacha [10].

Se encuentra en la bibliografía también trabajos sobre el secado de café, por ejemplo en [18], se describe el desarrollo de dos programas de simulación matemática para el secado de café pergamino. Para la validación del modelo, los autores utilizaron resultados experimentales de secadores horizontales y verticales con flujos de aire concurrentes y en contracorriente.

En torno al secado forzado de cacao, en [11], se realiza un análisis del proceso de deshidratación del cacao con miras a la disminución del tiempo de secado. Los autores realizaron dos pruebas

Este trabajo fue enviado para revisión final el 20 de septiembre del 2015. Esta investigación fue desarrollada con el apoyo económico de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador y la tutoría científica de la Universidad de Piura – Perú.

P. Parra Rosero., Área de Ciencia y Tecnología, Universidad Politécnica Salesiana, Grupo de Investigación de Procesos Industriales (GIPI), e-mail: pparra@ups.edu.ec.

ISBN: 978-1-4673-8756-9/15/\$31.00 ©2015 IEEE.

experimentales de secado y análisis computacional basado en elementos finitos. Luego de analizar el comportamiento de las variables de temperatura y humedad, los autores concluyen que el cacao debía ser agitado dentro del horno para evitar quemaduras por contacto entre los granos y las bandejas metálicas.

En [11], los autores recomiendan no remover grandes cantidades de vapor de agua desde el aire ya que el aire seco deshidrata la superficie de los granos, provocando quemaduras.

En [12], se describe una investigación desarrollada para estudiar la cinética de secado de las capas individuales del grano de cacao, estas son la testa o cascarrilla y el cotiledón. Una capa fina de granos de cacao fue secada utilizando una bomba de calor y aire seco a temperaturas de 28.2 °C, 40.4 °C y 56 °C, registrando durante todo el proceso los contenidos de humedad de la testa y el cotiledón. Se pudo observar que durante las dos primeras horas del proceso, la reducción del contenido de humedad en la testa era más rápido que en el cotiledón. Seguidamente en la etapa intermedia de secado se registró mayor contenido de humedad en la testa con respecto al cotiledón. Finalmente se encontró mayor humedad en la testa que en el cotiledón, demostrando la migración de agua desde el cotiledón hacia la testa. En sus conclusiones, los autores argumentan que el comportamiento del contenido de humedad registrado en la testa y el cotiledón se explica con el postulado de transferencia de masa de Luikov [19], en este caso se encontró que el potencial de transferencia de masa para la testa es siempre menor que en el cotiledón, por lo tanto, se efectúa la transferencia de masa del cotiledón hacia la testa, aun cuando es menor el contenido de humedad en el cotiledón.

Dentro del ámbito de modelado también se encuentran referencias bibliográficas para el área de secado forzado de cacao. En [13], los autores publican una investigación que analiza los modelos existentes para la cinética de secado de una capa fina de granos de cacao tanto de forma natural como de forma artificial. Para este trabajo utilizaron un horno con circulación de aire caliente a una temperatura de 60 °C y un secador solar. Los datos obtenidos se procesaron con varios modelos de secado para capa fina publicados anteriormente y se introdujo un nuevo modelo, combinando los modelos de Page y el modelo de los dos términos. La selección del mejor modelo se realizó determinando los coeficientes de R^2 , chi-cuadrada reducida χ^2 y error cuadrático medio RMSE, entre los valores de predicción de los modelos y los valores obtenidos experimentalmente.

Los modelos utilizados en [13] son semi teóricos o empíricos, están basados en la segunda ley de Fick, con algunas simplificaciones y añadidas como son aquellos coeficientes empíricos que ayudan a mejorar el ajuste de la curva de secado. [13].

En [14], se presenta un trabajo orientado al modelado y simulación de una cámara para secado de cacao, que consiste en un cilindro rotatorio con flujo de aire caliente, en este caso el sistema trabaja por lotes. Las propiedades termodinámicas del proceso de secado de cacao son analizadas en el trabajo desarrollado por Corrêa, P.C. *et al.*, en [15].

El último aporte registrado en torno al secado artificial de cacao se presenta en [16], esta investigación trata sobre la simulación de la transferencia de calor y de masa en el proceso de secado de cacao, utilizando una bomba de calor.

El presente trabajo pretende aportar con el modelado y simulación de una cámara cilíndrica rotatoria con flujo de aire en cocorriente, diseñada específicamente para el secado de cacao, con miras a proponer una alternativa de secado artificial de forma continua para granos de cacao.

A continuación, en la sección 2 se realiza la descripción del modelo exponiendo: detalles y características de la planta piloto, consideraciones para el modelado, nomenclatura utilizada, ecuaciones y correlaciones implicadas en el proceso.

En la sección 3 se aborda la simulación del modelo, ejecutando a la vez la estimación de parámetros

Finalmente, en la sección 4 se describe el análisis y pruebas ejecutadas para la validación del modelo.

II. MODELADO DEL SISTEMA

a.. Descripción de la Planta Piloto

La planta piloto está conformada por un sistema de dosificación de grano, una cámara de combustión con ventilador de empuje y una cámara de secado que consiste en un cilindro rotatorio a través del cual fluye aire caliente en la misma dirección de avance del cacao. En la Fig. 1 se muestra una imagen del sistema de secado.

En el sistema de dosificación, cuyas características se describen en la TABLA I, se deposita en la tolva de alimentación cacao fermentado con 55% de humedad en base seca. En la parte inferior del sistema se aprovecha el efecto de la gravedad y la vibración para dosificar el flujo de granos de cacao de forma continua hacia la cámara de secado.

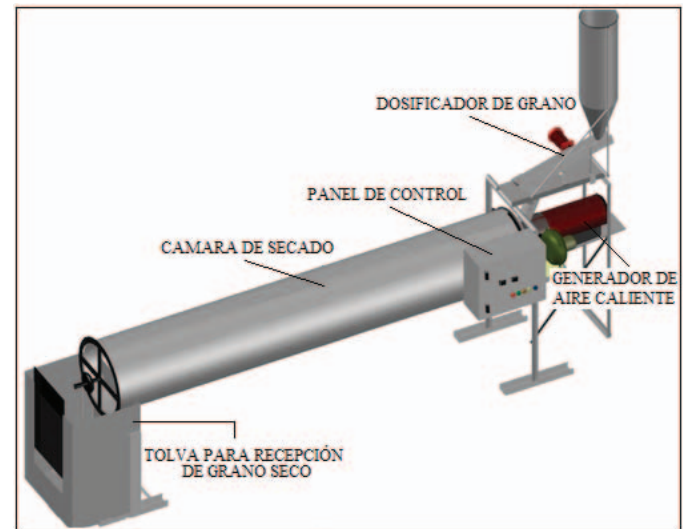


Fig. 1. Planta secadora de cacao.

La generación de aire caliente (gas de secado) es realizada con una cámara de combustión que toma aire del ambiente y lo calienta por efecto de la combustión de gas licuado de petróleo, el aire calentado es enviado hacia el cilindro rotatorio. Véase las características del generador de aire caliente en la TABLA II.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL DOSIFICADOR

	mínimo	máximo	Tipo
Capacidad dosificación	de 0.002 kg/s	0.020 kg/s	Vibrador
Capacidad almacenamiento		100 kg.	Tolva

TABLA II
CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR DE AIRE

	mínimo	máximo	Tipo
Diámetro		0.28 m	
Longitud		0.53 m.	
Potencia	12.4kW	31.2 kW	
Flujo de aire		0.3 kg/s	
Consumo de combustible	0.0001 kg/s	0.0007 kg/s	GLP
Temperatura de salida	30 °C	100 °C	

El cilindro rotatorio (cámara de secado), recibe las corrientes de cacao y de aire caliente. Internamente se produce el efecto de transferencia de calor por convección, el grano avanza por efecto de la rotación del cilindro y de la velocidad del gas de secado. El cacao

permanecerá un tiempo aproximado de 10 horas (tiempo de residencia) dentro del cilindro para alcanzar una humedad de 8% en base seca; valor que permite el almacenamiento, transporte y posterior procesamiento. En la Fig. 2 se muestra un esquema de la sección transversal del cilindro y en la TABLA III se detallan las características de la cámara de secado.



Fig. 2. Sección transversal de la cámara de secado.

TABLA III
CARACTERÍSTICAS DE LA CÁMARA DE SECADO

	mínimo	máximo	Tipo
Velocidad de rotación	0.5 rpm	4.0 rpm	Cilíndrica
Longitud		3.30 m.	
Diámetro		0.6 m.	

La planta está dimensionada para procesar una media diaria de 200 kg con un consumo promedio de 20 kg de gas combustible.

b. Consideraciones para el modelado

Para el modelo, se toma en cuenta que las variables de temperatura del cacao y del gas de secado cambian en función del tiempo y a través de la longitud del cilindro, de tal forma que se plantea un modelo de parámetros distribuidos.

No se consideran las pérdidas de energía causadas por la transferencia de calor desde el gas de secado hacia las paredes del cilindro ni por la transferencia desde estas paredes hacia el exterior, esto, para las dos cámaras, combustión y secado.

La transmisión de calor por radiación en el interior se asume nula.

Para el balance de energía se supone que la temperatura del grano no es homogénea.

Al grano de cacao se lo puede considerar como compuesto de dos compartimentos, como en el modelo de secado de arroz descrito en [20]. Una parte de agua y otra parte de sólido (cacao seco). Al interior del grano se produce un fenómeno de difusión que lleva el agua hacia la superficie y desde allí por evaporación el agua se descarga hacia la corriente de gas de secado. El gas de secado se comporta como gas ideal.

En la cámara de combustión la dinámica es instantánea, se desprecia el incremento de humedad a la salida y el calor específico del gas de salida se asume igual al calor específico del aire.

c. Nomenclatura

En la TABLA IV, se detalla la nomenclatura utilizada para el planteamiento del modelo.

TABLA IV
NOMENCLATURA

Parámetro	Descripción	Unidades
A_k	Área de transferencia de calor.	m^2
λ	Calor latente de evaporación del agua.	kJ/kg

C_{pa}	Calor específico del agua.	$kJ/(kg^\circ C)$
C_{pg}	Calor específico del gas de secado.	$kJ/(kg^\circ C)$
C_{pga}	Calor específico del aire.	$kJ/(kg^\circ C)$
ρ_c	Densidad del cacao.	kg/m^3
ρ_g	Densidad del aire (gas de secado).	kg/m^3
F_g	Flujo volumétrico de gas húmedo	m^3/s
h_{c1}	Coefficiente de transmisión de calor entre el gas y el cacao húmedo.	
h_{c2}	Coefficiente de transmisión de calor entre el gas y el cacao seco.	
H_{ag}	Entalpía de formación del agua	kJ
E_{ch}	Energía de intercambio del cacao húmedo	kJ
E_{gh}	Energía de intercambio del gas húmedo	kJ
H_{pn}	Poder calorífico del gas combustible GLP	kJ/kg
K_a	Coefficiente de transferencia de masa.	$kg\ agua/s$
Parámetro	Descripción	Unidades
K_v	Constante de ajuste para relación velocidad gas con velocidad cacao	s
K_w	Constante de ajuste para relación flujo másico cacao-velocidad del cacao.	m^{-1}
L	Longitud del cilindro.	m
mc	Masa de cacao.	kg
mg	Masa de gas.	kg
Pat	Presión atmosférica.	Pa
p_{mg}	Peso molecular del gas de secado.	$kg/kmol$
Q	Calor transferido del gas hacia la superficie del cacao.	kJ
R	Constante de los gases ideales.	$kJ/(kmol^\circ C)$
$Secc$	Sección de transferencia de calor.	m^2
Sh	Relación entre superficie húmeda y superficie seca del cacao.	
T_a	Temperatura del aire ambiente	$^\circ C$
T_c	Temperatura del cacao a la entrada.	$^\circ C$
T_g	Temperatura del gas entrada cámara de secado - salida cámara de combustión.	$^\circ C$
u	Eficiencia de la combustión.	
V_c	Velocidad de avance del cacao.	m/s
V_{rot}	Constante de ajuste velocidad rotacional del cilindro.	s^{-1}
W_c	Flujo másico de cacao seco.	kg/s
W_{comb}	Flujo de combustible GLP.	kg/s
W_{ch}	Flujo másico de cacao húmedo.	kg/s
W_g	Flujo másico de gas seco, aire de secado.	kg/s
W_{ga}	Flujo másico de aire, entrada cámara de combustión.	kg/s
W_{gh}	Flujo másico de gas húmedo, aire de secado.	kg/s
W_{dif}	Flujo de difusión.	kg/s
W_{evap}	Flujo de evaporación.	kg/s
X	Humedad del cacao en base seca.	$kg\ agua/(kg\ sustancia\ seca)$
X_c	Humedad crítica del cacao en base seca.	$kg\ agua/(kg\ sust.\ seco)$
X_{int}	Humedad interna del cacao en base seca.	$kg\ agua/(kg\ sustancia\ seco)$
X_{sup}	Humedad superficial del cacao en base seca.	$kg\ agua/(kg\ sustancia\ seco)$
Y	Humedad del gas en base seca.	$kg\ agua/(kg\ sustancia\ seco)$
Y_a	Humedad del aire, entrada cámara de combustión en base seca.	$kg\ agua/(kg\ sustancia\ seco)$

d. Ecuaciones y correlaciones

En la Fig. 3 se puede observar el planteamiento para el manejo de variables del sistema de parámetros distribuidos, siguiendo el método

de las líneas.[17]. La longitud total del cilindro se divide en n partes. Para este caso se realizó la simulación para n igual a 2, 4, 8 y 10.

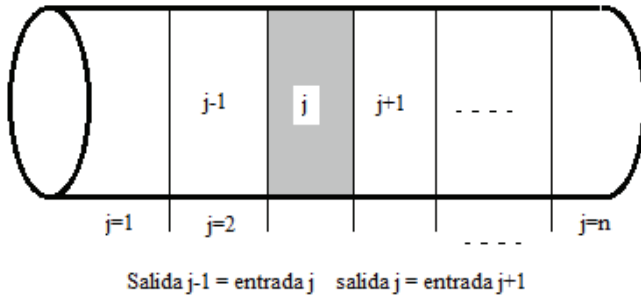


Fig. 3. Esquema de parámetros distribuidos.

Se ilustran en la Fig. 4, la humedad interna, la humedad superficial, el flujo de difusión y el flujo de evaporación dentro del grano de cacao. La humedad total viene dada por la suma de las dos humedades parciales. El flujo de difusión transporta humedad desde la parte interna del grano hacia la capa superficial del mismo y el flujo de evaporación transporta la humedad desde la superficie hacia el gas de secado.

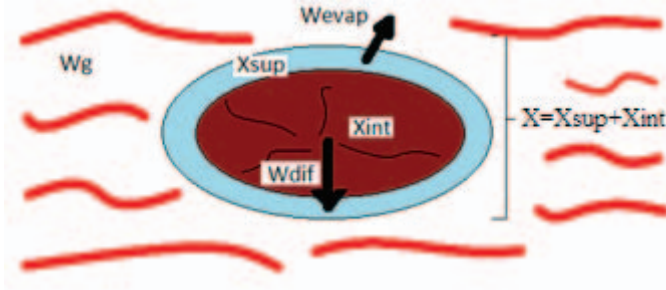


Fig. 4. Esquema de variables para el grano de cacao.

Se plantean las ecuaciones y correlaciones para la etapa j , desde $j = 1$ (primera etapa), hasta $j = n$ (última etapa). Para las variables de contorno se utilizarán subíndices e y s para las entradas y salidas respectivamente, por ejemplo en (2) debe interpretarse que el flujo de cacao a la salida de la etapa $[j-1]$ $Wc_{s,j-1}$ es igual al flujo de cacao a la entrada de la etapa $[j]$ $Wc_{e,j}$.

A continuación se describen las ecuaciones de los balances de masa para el cacao y el gas por separado y diferenciando la parte seca de la parte húmeda.

En las ecuaciones (1) y (2) se considera solamente la parte seca del cacao. La variación de la masa de cacao con respecto al tiempo viene dada por la diferencia de flujos másicos de cacao de entrada y salida en la etapa j .

Balance de masa de cacao en base seca:

$$d(mc_{s,j})/dt = Wc_{s,j-1} - Wc_{s,j} \quad (1)$$

$$Wc_{s,j-1} = Wc_{e,j} \quad (2)$$

En (3) y (4) se representa la variación de humedad de cacao tomando en cuenta únicamente la humedad interna de los granos. Nótese que a la diferencia de los flujos de humedad se le resta el flujo de difusión $Wdif$ debido a la pérdida de humedad desde la parte interna hacia la parte superficial del grano.

Balance de agua interna en el cacao:

$$d(mc_{s,j} * Xint_{s,j})/dt = Wc_{s,j-1} * Xint_{s,j-1} - Wc_{s,j} * Xint_{s,j} - Wdif_j \quad (3)$$

$$Xint_{s,j-1} = Xint_{e,j} \quad (4)$$

La variación de la humedad del cacao, considerando solamente la parte superficial del grano se plantea en (5) y (6). En este caso, a la diferencia de flujos másicos de humedad se suma el flujo de difusión $Wdif$ que viene desde la parte interna del grano y se resta el flujo de evaporación $Wevap$ que sale desde la superficie del grano hacia el gas de secado.

Balance de agua superficial en el cacao:

$$d(mc_{s,j} * Xsup_{s,j})/dt = Wc_{s,j-1} * Xsup_{s,j-1} - Wc_{s,j} * Xsup_{s,j} + Wdif_j - Wevap_j \quad (5)$$

$$Xsup_{s,j-1} = Xsup_{e,j} \quad (6)$$

En las ecuaciones (7) y (8) se representa a la variación con respecto al tiempo de la masa de gas en base seca, como la diferencia de flujos másicos de gas de entrada y de salida en la etapa j .

Balance de masa de gas en base seca:

$$d(mg_j)/dt = Wg_{s,j-1} - Wg_{s,j} \quad (7)$$

$$Wg_{s,j-1} = Wg_{e,j} \quad (8)$$

El flujo de gas en base seca Wg se mantiene constante a lo largo de todo el cilindro (9). El flujo de gas húmedo varía debido al aporte del flujo de evaporación proveniente del cacao.

$$Wg_{e,j} = Wg_{e,[1]} \quad (9)$$

La humedad contenida en el gas varía en dependencia de la diferencia de flujos de entrada y salida y del flujo de evaporación $Wevap$, extraído al cacao durante el proceso de secado, como se representa en (10) y (11).

Balance de agua en el gas:

$$d(mg_j * Y_{s,j})/dt = Wg_{s,j-1} * Y_{s,j-1} - Wg_{s,j} * Y_{s,j} + Wevap_j \quad (10)$$

$$Y_{s,j-1} = Y_{e,j} \quad (11)$$

Para los balances de energía no se hace diferencia entre las partes húmeda y seca, tanto del gas como del cacao; es decir, se plantean balances globales.

En las ecuaciones (12) y (13) se representa la variación de energía como la diferencia de las energías de intercambio de la masa de cacao de entrada y salida en la etapa j , adicionando el calor Q_j aportado por el gas al grano y que produce el calentamiento del mismo y restando la energía invertida para que en el grano se produzca la evaporación de la humedad superficial.

Balance de energía del cacao:

$$d(mch_j * Ech_{s,j})/dt = Wc_{s,j-1} * (1 + X_{s,j-1}) * Ech_{s,j-1} - Wc_{s,j} * (1 + X_{s,j}) * Ech_{s,j} + Q_j - Wevap_j * (\lambda + Hag) \quad (12)$$

$$Ech_{s,j-1} = Ech_{e,j} \quad (13)$$

Los valores de Energía de intercambio para el cacao húmedo Ech , son interpolados desde una tabla obtenida en función de datos de temperatura del grano T_c y la humedad en base seca X . Estos datos son experimentales.

Para el balance de energía del gas se resta el calor Q_j y se suma la energía aportada a través del flujo de evaporación que se integra al gas de secado. Nótese en (14), que los factores antes citados tienen signos contrarios a los encontrados en (12). En (15) se establece el enlace entre dos etapas contiguas.

Balance de energía al gas:

$$d(mgh_j * Egh_{s,j})/dt = Wg_{s,j-1} * (1 + Y_{s,j-1}) * Egh_{s,j-1} - Wg_{s,j} * (1 + Y_{s,j}) * Egh_{s,j} - Q_j + Wevap_j * (\lambda + Hag) \quad (14)$$

$$Egh_{s,j-1} = Egh_{e,j} \quad (15)$$

En (16) se establece la relación existente entre la masa de cacao húmedo mch y la masa de cacao seco mc , en función de la humedad en base seca X . Tener en cuenta que la humedad en base seca está dada por el cociente entre la cantidad de agua contenida en el grano y la cantidad de masa seca del mismo.

$$mch_j = mc_j * (1 + X_{s,j}) \quad (16)$$

La suma de las humedades parciales es igual a la humedad total X del cacao (17).

$$X_{s,j} = X_{int,s,j} + X_{sup,s,j} \quad (17)$$

En la ecuación (18) se representa el flujo de calor desde el gas de secado hacia el grano. Cuando existe humedad en la parte superficial del grano, todo el calor se invierte en evaporar esta humedad.

Mientras se seca el grano y se alcanza el nivel de humedad crítica X_c , es decir cuando la velocidad de secado deja de ser constante, resulta mucho más difícil extraer el contenido de humedad del grano. La velocidad de secado decrece notoriamente y el flujo de calor que deja de invertirse en el proceso de evaporación pasa a calentar la masa de cacao seco. Debido a este fenómeno se incluyen en la ecuación los coeficientes h_{c1} , h_{c2} y Sh que establece la relación entre las humedades superficial y crítica. En (18) se modela el cambio de velocidad de secado a través de Sh_j y $(1 - Sh_j)$.

$$Q_j = h_{c1} * A_k * (Tg_j - Tc_j) * Sh_j + h_{c2} * A_k * (Tg_j - Tc_j) * (1 - Sh_j) \quad (18)$$

El flujo de evaporación de humedad desde la superficie del grano se determina en (19), en función del calor latente de evaporación del agua λ y de la diferencia de temperaturas entre el gas de secado y el cacao.

$$Wevap_j = ((A_k * h_{c1}) / \lambda) * (Tg_j - Tc_j) * Sh_j \quad (19)$$

La diferencia de humedades superficial e interna establece la cantidad de agua que fluye desde la parte interna hacia la parte superficial del grano, por efecto de difusión. En (20), K_d es el coeficiente de transferencia de masa, este parámetro es estimado en el proceso de validación del modelo.

$$Wdif_j = K_d * (X_{int,s,j} - X_{sup,s,j}) \quad (20)$$

En (21), se establece la relación entre el flujo másico Wc y la velocidad del cacao Vc . En (22) se relaciona la velocidad del grano con la velocidad del gas de secado Vg y la velocidad de rotación del cilindro $Vrot$.

La velocidad del gas de secado depende del flujo volumétrico de gas Fg y de la sección libre del cilindro por donde fluye el gas. Esta sección a su vez se determina en función de la sección transversal del cilindro $Secc$, restándole la superficie de grano que obstruye la circulación del mismo. Véase (23).

$$Wc_{s,j} = K_w * mc_j * Vc_j \quad (21)$$

$$Vc_j = K_v * Vg_j * Vrot \quad (22)$$

$$V_{g,j} = Fg / (Secc - m_{c,j} / (\rho_c * L/n)) \quad (23)$$

En (24) se relaciona el flujo másico de gas seco $Wg_{s,[1]}$ con el flujo volumétrico de gas $Fg_{[1]}$.

$$Fg_{[1]} = Wg_{s,[1]} * (1 + Y_{s,[1]}) / \rho_g \quad (24)$$

La relación planteada en (25), permite establecer una diferencia entre la condición en la cual la humedad superficial X_{sup} es mayor o igual a la humedad crítica del grano, situación en la que Sh toma el valor de uno y no afecta a la condición de velocidad de secado a velocidad constante y cuando X_{sup} es menor que X_c , entonces Sh toma un valor inferior a la unidad e inserta el efecto de velocidad

decreciente de la velocidad de secado. Sh permite modelar el grado de facilidad o dificultad con el cual se puede extraer humedad del grano.

$$Sh_j = \min(1, X_{sup,s,j} / X_c) \quad (25)$$

En (26) se relaciona el flujo de evaporación $Wevap$ con la velocidad de evaporación V_{evap} .

$$Wevap_j = V_{evap,j} * mc_j \quad (26)$$

Para la cámara de combustión, en (27) se establece que a la salida (entrada a la cámara de secado), el flujo de gas de secado está constituido por el flujo de aire ambiental Wga calentado y el flujo de gases de combustión generados por efecto de quemar el GLP $Wcomb$.

Balance de masa para la cámara de combustión:

$$Wgh_{e[1]} = Wga + Wcomb \quad (27)$$

En la ecuación (28) se plantea el balance de energía para la cámara de combustión.

$$Wga * Cp_{ga} * Ta + Wcomb * H_{pn} * u = Cp_g * Tg_{e[1]} * Wgh_{e[1]} \quad (28)$$

Como se trata al gas de secado como gas ideal, se plantea la ecuación (29).

$$Wgh_{e[1]} = Fg_{e[1]} * pmg * Pat / (R * (Tg_{e[1]} + 273)) \quad (29)$$

En la cámara de combustión se asume que en el proceso de calentamiento el aire no pierde ni gana humedad. (30).

$$Y_{e[1]} = Ya \quad (30)$$

III. SIMULACIÓN

Para la implementación del modelo y su respectiva simulación se utilizó Ecosimpro®. En la Fig. 5 se observa la gráfica de humedad del cacao a la salida de cada una de las etapas en función del tiempo. Debe tomarse en cuenta que se trata de un proceso dinámico no lineal. Los primeros 30000 segundos corresponden al estado transitorio y posteriormente se observa que el sistema alcanza plenamente el estado estacionario.

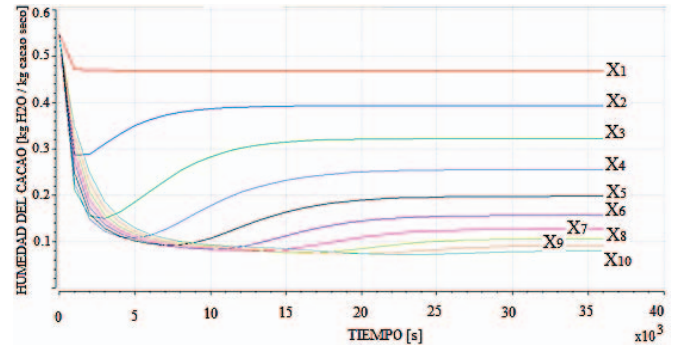


Fig. 5. Curvas de humedad para las 10 etapas del cilindro.

Los valores de humedad de cacao registrados para cada etapa del cilindro van desde X1 hasta X10 y disminuyen progresivamente mientras se acerca a la salida o última etapa de la cámara de secado. Nótese que las gráficas parten con un valor de humedad del grano de 55% en base seca a la entrada y llega al estado estacionario con un valor de humedad X10 de 8% en base seca a la salida.

En la Fig. 6 se muestran los valores de temperatura del gas de secado Tg y temperatura del cacao Tc a lo largo de la cámara de secado. Esta gráfica muestra valores de temperatura en estado estacionario. Nótese que los niveles de Tg van en disminución en función de la longitud del cilindro, este comportamiento del modelo

es coherente con la realidad de la planta y se debe a la transferencia de calor desde el gas hacia la masa de cacao y al incremento de la humedad del gas.

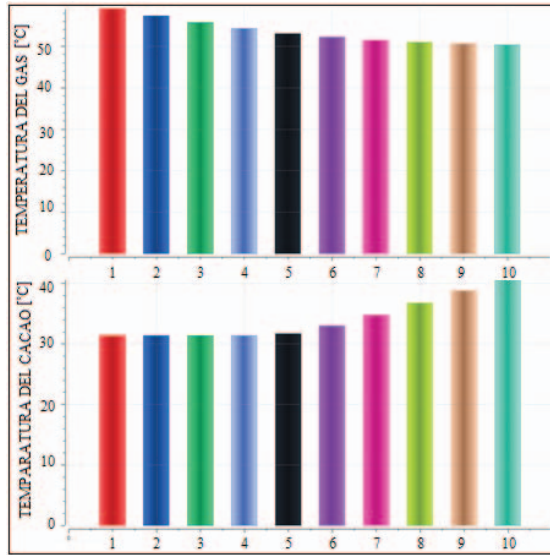


Fig. 6. Perfil de la evolución de las temperatura del gas de secado T_g y del cacao T_c para las 10 etapas del cilindro.

Al evaporarse la humedad superficial del grano, el flujo de gas húmedo de secado se incrementa; si la temperatura del gas de secado a la entrada del cilindro se mantiene constante, entonces la temperatura del gas a la salida siempre será menor que la temperatura del gas a la entrada.

Para el caso de la temperatura del cacao T_c , se observa un fenómeno inverso, a medida que el grano avanza por la cámara de secado va perdiendo humedad y además en las últimas etapas, para cuando la humedad del grano alcanza su valor crítico, entonces el proceso de extracción de humedad es más difícil (más lento), por lo tanto el calor aportado por el aire de secado pasa a calentar el cacao, elevando así su temperatura.

IV. RESULTADOS - VALIDACIÓN DEL MODELO

Para la validación del modelo propuesto se procedió a realizar un análisis de sensibilidad de los parámetros utilizados en el planteamiento del modelo. Se ajustaron los valores de los parámetros hasta conseguir que el sistema alcance el estado estacionario, posteriormente se procedió a realizar variaciones individuales de todos los parámetros, identificando a los de mayor incidencia sobre las variables de humedad y temperatura del cacao y del gas de secado.

El coeficiente de transmisión de calor entre el gas y el cacao húmedo h_{c1} , el coeficiente de transmisión de calor entre el gas y el cacao seco h_{c2} , el coeficiente de transferencia de masa K_d , la constante de ajuste para la relación entre la velocidad del gas y la velocidad del cacao K_v y la constante de ajuste para la relación entre el flujo másico y la velocidad del cacao K_w , resultaron ser los parámetros frente a los cuales el sistema es más sensible.

Luego del análisis de sensibilidad, se plantearon los valores límites de los parámetros para que el modelo evolucione correctamente y alcance el estado estacionario. Los límites establecidos se muestran en la TABLA V.

A través de una rutina de optimización se consigue estimar los valores de los parámetros con los cuales la diferencia entre los datos reales de la planta y los datos del modelo es mínima. La rutina programada, permite fijar el valor de un parámetro dentro de su rango factible y variar los valores de los otros parámetros de forma iterativa. Luego se repite el proceso con todos los parámetros,

mientras se van estimando aquellos valores que permiten obtener una diferencia mínima entre la respuesta del modelo y la respuesta real de la planta.

Parámetro	Límite inferior	Límite superior	Valor inicial
h_{c1}	0.11	0.13	0.12
h_{c2}	0.08	0.12	0.09
K_d	0.003	0.006	0.005
K_v	0.003	0.006	0.04
K_w	0.5	1.5	1.0

En la TABLA VI se muestran los resultados del experimento de estimación de parámetros. Los resultados obtenidos no dependen del valor inicial asignado a cada parámetro. Este planteamiento considera que para cada valor de los parámetros (variables de decisión), el modelo predice un valor para la salida. El error de predicción establecido por la diferencia entre la predicción de la salida y el valor medido de la misma, es una medida de la bondad del modelo. El experimento consiste en encontrar el valor de los parámetros que minimizan el error de predicción.

El tiempo de ejecución de la rutina de optimización implementada es de 80 minutos aproximadamente, trabajando con una sola variable de salida.

Parámetro	Valor inicial	Valor estimado
h_{c1}	0.11	0.115027
h_{c2}	0.09	0.112
K_d	0.005	0.00350451
K_v	0.04	0.0053
K_w	1.0	1.34973

Para concluir con el proceso de validación, se ingresaron al modelo los parámetros estimados, se ejecutó un nuevo experimento con los mismos datos de entrada (flujo de combustible) para la planta y para el modelo. En la Fig. 7 se observan las gráficas de humedad del cacao T_c obtenidas por medición en la planta y por simulación en el modelo.

Los datos de humedad se obtuvieron tomando almendras de cacao con una frecuencia de muestreo de 1000 s.

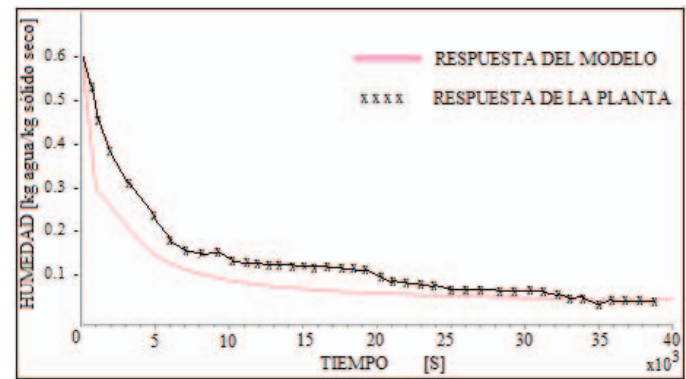


Fig. 7. Curvas de Humedad obtenidas del modelo y de la planta de secado.

V. CONCLUSIONES.

De acuerdo a los resultados obtenidos en los experimentos realizados para la validación, se afirma que el modelo planteado representa de una forma bastante aproximada a la dinámica de funcionamiento de la planta de secado de cacao.

Al comparar las respuestas del modelo y de la planta real, se puede observar que la simulación queda sistemáticamente debajo de

los datos experimentales. Podría mejorarse el proceso de estimación de parámetros con miras a minimizar la diferencia entre los dos resultados.

Queda demostrado que efectivamente las variables de humedad y temperatura, tanto para el cacao como para el gas de secado varían a través del tiempo y en función de la posición dentro del cilindro de secado.

Al trabajar con el modelo de parámetros distribuidos, en este caso, se pudo observar que al incrementar el número de etapas sobre 10, ya no se observan diferencias significativas entre etapas adyacentes.

Se puede aprovechar la planta piloto y el modelo desarrollado para diseñar diferentes algoritmos de control y rutinas de optimización para futuras mejoras en el diseño. Podría optimizarse el consumo de combustible, si el proceso opera bajo un lazo cerrado de control.

REFERENCIAS

- [1] Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, Vol. XXXIX, No. 4, Cocoa year 2012/13. Published: 02-12-2013. Elaborado por ICCO (Organización Internacional del Cacao).
- [2] ASOCIACIÓN NACIONAL DE EXPORTADORES DE CACAO en PORTAL OFICIAL DE ANECACAO.
- [3] Análisis del Sector del Cacao y Elaborados. Banco Central del Ecuador (BCE) Dirección de Inteligencia Comercial e Inversiones PRO ECUADOR, pp. 8-16, 2013.
- [4] Rosa Pérez Piza. La Calidad del Cacao. Programa de Capacitación a facilitadores y agricultores en la cadena del Cacao. Estación Experimental Central de la Amazonía. Ecuador, pp. 18-19, 2009.
- [5] Cros, E. and N. Jeanjean. 1995. Cocoa quality: effect of fermentation and drying. Plantations, recherche, développement. 24:25-27.
- [6] Enríquez G. A. Cacao Orgánico. Guía para Productores Ecuatorianos. Instituto Nacional Autónomo de investigaciones Agropecuarias. INIAP. Ecuador, pp 287-294, 2004.
- [7] Savaresi M. Bitmead Robert R. Pierce Robert. On Modelling and Control of a Rotary Sugar Dryer. Control Engineering Practice 9 (2001) 249-266.
- [8] Iguaz A., Esnoz A., Martínez G., López A., Vírveda P. Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer Journal of Food Engineering, Volume 59, Issues 2–3, September 2003, Pages 151-160.
- [9] Didriksen Helge. Model based predictive control of a rotary dryer. Chemical Engineerin Journal 86 (2002) 53-60.
- [10] Merino A. MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SECADERO DE PULPA. 2ª Reunión de Usuarios de EcosimPro, UNED, Madrid 24-25 de febrero del 2003.
- [11] Tinoco H., Ospina D. Análisis del proceso de deshidratación del Cacao para la disminución del tiempo de secado. Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 13, p. 53-63. (Julio 2010). Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín-Colombia.
- [12] C.L. Hii, C.L. Law, S. Suzannah. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying. Journal of Food Engineering. ELSEVIER. 2011.
- [13] C.L. HII, C.L. LAW y M. CLOKE. Modelling of Thin Layer Drying Kinetics of Cocoa Beans During Artificial and Natural Drying. Journal of Engineering Science and Technology. Vol. 3, No. 1 (2008) 1 – 10
- [14] Parra P., Saavedra R., Ipanaqué Alama W. (2012). Modelación y Simulación en Ambiente Ecosimpro de una Cámara de Secado para Cacao. Ponencias del XV Congreso Latinoamericano de Control Automático. 23 – 26, Octubre del 2012 Lima, Perú.
- [15] Corrêa, P.C., De Oliveira, G.H.H., De Souza Santos, E., Treto, P.C. Thermodynamic properties of drying process of cocoa beans. 6th International CIGR Technical Symposium - Towards a Sustainable Food Chain: Food Process, Bioprocessing and Food Quality Management. (2011).
- [16] C.L. Hii, C.L. Law , M.C. Law. Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer. Applied Thermal Engineering 54 (2013) 264e271. ELSEVIER.
- [17] Caballero D. El método de las líneas y su aplicación en problemas de ingeniería de alimentos: secado en lechos fluidizados. Facultad de Ciencia y tecnología. Universidad Simón Bolívar. Investigación Universitaria Multidisciplinaria. Año 5, N.5, Diciembre 2006.
- [18] Parra Coronado A, Roa Mejía G, Oliveros Tascón C. SECAFÉ Parte I: Modelamiento y simulación matemática en el secado mecánico de café pergamino. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.12, n.4, p.415–427, 2008.
- [19] Luikov, A.V.; Heat and Mass Transfer in Capillary Porous Bodies, Pergamon Press, New York, USA (1966).
- [20] Olmos, A., Trelea, I.C., Courtois, F., Bonazzi, C. and Trystram, G. Dynamic Optimal Control of Batch Rice Drying Process. Drying Technology 20(7):1319-1345. 2002.