

# Modelamiento de un sistema electromecánico de disco rotatorio con ciclos de variación de tiempo para la optimización del proceso de secado artificial a través del control de temperatura para la industria cacaotera

**Modeling of a rotating disk electromechanical system with time variation cycles for the optimization of the artificial drying process through temperature control for the cocoa industry**

Recibido: 23 de Octubre de 2019 - Aceptado: 10 de Noviembre de 2019



Yezid Rolando Vargas Gómez \* y  
Hernán Darío Díaz López \*\*

\* Grupo GITSEIN, Semillero SSCADA, Programa Electrónica Industrial, Unidades Tecnológicas de Santander Colombia. e-mail: yvargas@correo.uts.edu.co

\*\* Grupo GITSEIN, Semillero SSCADA, Programa Electrónica Industrial, Unidades Tecnológicas de Santander Colombia. e-mail: hdiaz@correo.uts.edu.co

## Resumen

Diseño integrado de una máquina de flujo continuo directo para mejorar el secado de cacao mediante simulación del modelo de parámetros concentrados para la elaboración del modelo en parámetros distribuidos escalado a procesos piloto según las necesidades de la provincia para pequeños cacaoteros.

Se muestra que es posible controlar la humedad aumentando el tiempo de permanencia del grano, al permitir la entrada salida del aire, garantizando una temperatura ideal para el producto, mediante su monitoreo. Aparecen varios efectos no lineales de los sistemas térmicos, siendo necesario realizar aproximaciones en diferentes rangos de operación, mitigando aquellas condiciones que generan sobrecostos al productor, presentando un sistema con base en una función de transferencia, a la cual se le realizan varias pruebas para conocer el punto adecuado de operación a escala real, evidenciadas en las labores desarrolladas en una empresa local en la mejora de sus silos para el beneficio ecológico del cacao.

## Abstract

This work presents the integrated design of a continuous direct flow machine to improve the cocoa drying by simulating the concentrated parameter model for the elaboration of the distributed parameter model scaled to pilot processes according to cocoa farmers needs in the province .

It was found that the humidity control is possible by increasing the residence time of the grain, allowing the air inlet/outlet flow which induces an ideal temperature for the product. Several non-linear effects of the thermal systems are detected, being necessary approximations in different operating ranges, mitigating those conditions that generate cost overruns to the producer, presenting a system based on a transfer function, to which several tests are performed to know the appropriate point of operation on a real scale, evidenced in the work carried out by a local company in the improvement of its silos for the ecological benefit of cocoa.

## 1. Introducción

En Colombia la actividad agraria es un pilar de la economía, considerándose como el motor de crecimiento del país. Durante el último año el sector agrario tuvo un crecimiento del 7.1% en el tercer trimestre. Dentro de los productos estrella, se encuentra el cacao en tercer lugar con el 22.8%, cuyo proceso de secado consiste en disminuir la humedad obtenida en la fermentación y llevarla hasta un 6 o 7%, lo cual permite que este sea almacenado, transportado y procesado sin deteriorar su calidad, siendo el proceso de secado el más importante en las actividades de poscosecha.

Es así como el presente está enfocado en maximizar las ventajas de utilizar métodos de secado artificial frente al método tradicional, utilizando un prototipo de secador circular a escala, con control de temperatura mediante el cual se disminuye el tiempo requerido de secado preservando su calidad. Se identifican las variables que afectan el proceso de secado para el diseño del prototipo junto con su circuito de control, realizando las respectivas pruebas acordes a los resultados del modelo de simulación en parámetros distribuidos, así como los reportados por la literatura en el estado de la técnica (C.L. Hii, C.L. Law y M.C. law, 2013: Newton, Henderson & Pabis, Page, Logarítmico, de dos términos, Verma et al. Enfoque de digusión, Midili – Kucuk, Wang & Smith), resultados que se analizan para adquirir los conocimientos necesarios para la fabricación de secadoras circulares (silos redondos) u otro tipo de maquinarias del sector agroindustrial, con el fin de apoyar su desarrollo tecnológico, brindando soluciones a posibles problemas que se presentan en su fabricación, mediante la evaluación de su funcionamiento tanto de verificación como eficiencia llevando un registro consecutivo, que sirve como parámetros e indicadores en planes de mantenimiento preventivo y/o manuales técnicos, ayudando a mejorar los diferentes servicios ofrecidos por una empresa piloto del sector cacaotero a nivel local.

## 2. Desarrollo del Trabajo

Se inicia analizando el comportamiento de las variables en diferentes pruebas, de las cuales se obtuvieron las principales variables que afectan el proceso de secado artificial del cacao. Pruebas operativas con diferentes valores de “velocidad” tanto de tiempo como de temperatura (curvas de secado), entre otros; con el objetivo de determinar cual permite que el grano obtenga un mejor secado basado en la transferencia de masa energía principalmente.

Tabla 1. Programación de pruebas operativas representativas

		PRUEBA 1	PRUEBA 3
ETAPA 1	Temperatura °C	30	30
	Duración Minutos	60	60
	Intervalo agitación (encendido/apagado)	5 min /5 min	5 min /2 min
ETAPA 2	Temperatura °C	45	45
	Duración Minutos	60	60
	Intervalo agitación (encendido/apagado)	5 min /5 min	5 min /2 min
ETAPA 3	Temperatura °C	60	60
	Duración Minutos	150	270
	Intervalo agitación (encendido/apagado)	5 min /5 min	5 min /2 min

Fuente: Autores

Cada prueba se inicia con 2kg (aproximadamente) de cacao en baba.

Tabla 2. Variables características del Proceso de Secado de Cacao

VARIABLE	VALOR IDEAL	DESCRIPCIÓN
Temperatura de secado	50 a 60°C	Valor promedio al que se debe exponer el grano
Velocidad del aire caliente	0.3 m/s	Velocidad ideal para transferir el calor
Humedad del grano	Max 7%	Porcentaje de agua máximo permitido en el grano.

Fuente: Autores

## 2.1 Modelamiento de la función de transferencia

El tiempo de secado se determina con base en la curva de secado. A velocidad constante  $V_c$ , el tiempo  $t_c$  se establece como (Maupoey et al. 2001) (Parra, P. 2017):

$$t_c = \frac{m_s(x_o - x_c)}{am_w/dt} = (X_o - X_c)/V_c \quad (1)$$

Donde  $m_s$  es la masa del grano,  $X_o$  la humedad inicial,  $X_c$  la humedad en el punto crítico,  $m_w$  la masa de agua. Las humedades  $X$ , están expresadas en base seca.

### 2.1.1 Modelo en parámetros concentrados

Es importante mencionar que se realiza el análisis únicamente de la cámara de secado o cilindro giratorio. Se desprecian los fenómenos de difusión, radiación y conducción. Se desarrolla una transferencia de calor por efecto de convección, considerando constantes los coeficientes de transferencia de masa energía, así como el calor específico. Como referencia se toma un nivel de humedad del 56% al cacao fermentado.

La ecuación que representa la dinámica de la variación de la masa del cacao (parte sólida) es:

$$\frac{d(M_{so})}{dt} = F_{si} - F_{so} \quad (2)$$

Donde  $M_{so}$  es la masa de cacao a la salida en kg,  $F_{si}$  es el flujo másico de cacao a la entrada, y  $F_{so}$  el flujo másico de cacao a la salida, ambos en kg/s.

La dinámica del comportamiento del agua en el cacao se describe a través de:

$$\frac{d(M_{ao})}{dt} = F_{ai} - F_{ao} - W_o \quad (3)$$

$M_{ao}$  es la masa de agua contenida en el cacao,  $F_{ai}$  es el flujo másico de agua contenida en el sólido a la entrada,  $F_{ao}$  el del sólido a la salida, y  $W_o$  es el de agua evaporada.

De (Parra, P. 2017) se toma la ecuación de conservación de energía para la fase sólida:

$$\frac{d[(C_{ps} * M_{so} + C_{pa} * M_{ao}) * T_{so}]}{dt} = (F_{si} * C_{ps} + F_{ai} * C_{pa}) * T_{si} - (F_{so} * C_{ps} + F_{ao} * C_{pa}) * T_{so} - W_o * U_a * V * (T_{go} - T_{so}) \quad (4)$$

Donde  $C_{ps}$  es el calor específico del sólido y  $C_{pa}$  del agua en  $\text{kJ}/\text{kg } ^\circ\text{C}$ ,  $T_{so}$  la temperatura del cacao a la salida y  $T_{si}$  a la entrada,  $U_a$  coeficiente volumétrico de transmisión de calor en  $\text{kW}/\text{m}^3\text{ } ^\circ\text{C}$ , y  $V$  el volumen del cilindro en  $\text{m}^3$ .  $T_{go}$  es temperatura del gas a la salida.

Se establece la ecuación de humedad del sólido (cacao) en base seca  $X_o$  en función de las masas y de los flujos:

$$X_o = \frac{F_{ao}}{F_{so}} = \frac{M_{ao}}{M_{so}} \quad (5)$$

La relación entre la masa del sólido y el flujo del sólido se establece en la siguiente ecuación:

$$M_{so} = t_{paso} * F_{so} \quad (6)$$

Donde  $t_{paso}$  es el tiempo de paso en minutos del producto a través del cilindro.

Las ecuaciones (7) (8) representan la humedad  $H_o$  y densidad del cacao  $\rho_o$  a la salida del cilindro secador.

$$H_o = \frac{X_o}{1+X_o} \quad (7)$$

$$\rho_o = \frac{pmg * Pa}{R * (T_{go} + 273)} \quad (8)$$

$pmg$  es el peso molecular del gas de secado en  $\text{kg}/\text{kmol}$ ,  $Pa$  es la presión del gas en  $\text{Pa}$ , y  $R$  la constante de los gases ideales en  $\text{kJ}/(\text{kmol } ^\circ\text{C})$ .

(Friedman & Marshall, 1949) establecen una correlación para determinar el tiempo de paso del producto a través del cilindro, tomando en cuenta la granulometría, viscosidad y adherencia como características del sólido a secar (cacao).

$$t_{paso} = \frac{0.23 * L}{S * N^3 * D} - 9.84 * D_p^{-0.5} * \frac{L * G}{F} \quad (9)$$

Donde el tiempo de paso ( $t_{paso}$ ) está dado en minutos, la longitud del cilindro ( $L$ ) en metros, diámetro del cilindro ( $D$ ) en metros y la velocidad angular ( $N$ ) en r.p.m.  $S$  es la inclinación del cilindro en radianes, ( $G$ ) el flujo de gas, ( $F$ ) el flujo de sólido en ( $\text{kg}/\text{s}$ ) y ( $D_p$ ) el tamaño promedio de las partículas de sólido a secar en  $\mu\text{m}$ .

### 2.1.2 Modelo en Parámetros Distribuidos

Se toma en cuenta que las variables cambian en función del tiempo a través de la longitud del cilindro. No se consideran las pérdidas de energía causadas por la transferencia de calor. La temperatura del grano se considera homogénea. Se consideran dos únicas sustancias en el grano de cacao, agua y sólido (cacao seco). 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. La humedad total viene dada por la suma de las dos humedades parciales.

A continuación, se describen las ecuaciones de los balances de masa para el cacao diferenciando la parte seca de la parte húmeda. En las ecuaciones (10) (11) 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:

$$\frac{d(mc_{s,j})}{dt} = Wc_{s,j-1} - Wc_{s,j} \quad (10)$$

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

Para las variables de contorno se utilizan subíndices e y s para las entradas y salidas respectivamente.

En (12) (13) se representa la variación de humedad de cacao tomando en cuenta la humedad interna de los granos. Donde  $Wdif_j$  es el flujo de difusión debido a la pérdida de humedad desde la parte interna hacia la parte superficial del grano.

Balance de humedad interna del cacao:

$$\frac{d(mc_{s,j} * Xint_{s,j})}{dt} = Wc_{s,j-1} * Xint_{s,j-1} - Wc_{s,j} * Xint_{s,j} - Wdif_j \quad (12)$$

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

En (14) (15) se plantea la variación de la humedad del cacao, considerando solamente la parte superficial del grano. En este caso se resta el flujo de evaporación  $W_{evap}$  que sale desde la superficie del grano hacia el gas de secado.

Balance de humedad superficial del cacao:

$$\frac{d(mc_{s,j} * Xsup_{s,j})}{dt} = Wc_{s,j-1} * Xsup_{s,j-1} - Wc_{s,j} * Xsup_{s,j} + Wdif_j - W_{evap_j} \quad (14)$$

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

Los valores de entalpía para el caso húmedo  $Hch$ , son obtenidos por interpolación en función de la temperatura del grano  $Tc$  y la humedad con base seca  $X$  (Parra, P. 2017).

En (16) se establece la relación entre la masa de cacao húmedo  $mch$  y seco  $mc$ , en función de la humedad en base seca  $X$ , dada por el coeficiente 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:

$$X_{s,j} = X_{int_{s,j}} + X_{sup_{s,j}} \quad (17)$$

El flujo de evaporación de humedad desde la superficie del grano se determina en (18) en función del calor latente de evaporación del agua  $\lambda$  y de la diferencia de temperaturas entre el gas de secado y el cacao.

$$W_{evap_j} = \left( \frac{A_k \cdot hc_l}{\lambda} \right) * (T_{g_j} - T_{c_j}) * Sh_j \quad (18)$$

$A_k$  es el área en m<sup>2</sup> de transferencia de calor,  $hc_l$  el coeficiente de transmisión de calor entre el gas y el cacao húmedo y  $Sh$  es la relación entre superficie húmeda y superficie seca del cacao.

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.  $K_d$  es la constante de difusión, estimado en el proceso de validación.

$$W_{dif_j} = K_d * (X_{int_{s,j}} - X_{sup_{s,j}}) \quad (19)$$

Se establece la relación entre el flujo másico  $W_c$  y la velocidad del cacao  $V_c$ :

$$W_{c_{s,j}} = K_w * m_{c_j} * V_{c_j} \quad (20)$$

Se relaciona la velocidad del grano con la velocidad del gas de secado  $V_g$  y la velocidad de rotación del cilindro  $V_{rot}$ :

$$V_{c_j} = K_v * V_{g_j} * V_{rot} \quad (21)$$

La velocidad del gas de secado depende del flujo volumétrico de gas  $F_g$  y 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  $Secc$ , restando la superficie de grano que obstruye la circulación del mismo:

$$V_{g,j} = F_g / (Secc - m_{c,j} / (\rho_c * L/n)) \quad (22)$$

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

$$Y_{e[1]} = Y_a \quad (23)$$

## 2.2 Análisis experimental para la validación con el modelo

Se han obtenido resultados que permiten analizar el desempeño del modelo en su etapa transitoria además de constatar que todas las variables alcanzan el estado estacionario, manteniendo constantes todas las variables de entrada, excepto las variables de interés.

Los parámetros del modelo se estiman u obtienen de la literatura especializada, manuales o documentación referente (Parra, P. 2017) ejecutando además la simulación del modelo repetidamente, contrastando los resultados obtenidos desde la planta real, así como los parámetros obtenidos tanto desde la planta piloto como desde la simulación.

Para obtener el error total, se ha procedido a promediar los errores calculados en los puntos de muestra.

Para determinar de manera matemática las condiciones necesarias para la operación del secador de cacao, es necesario conocer las condiciones de operación, así como simular la interacción de las mismas en diferentes escenarios. Para lo cual se tuvieron en cuenta las siguientes variables:

Cilindro	Referencia	Real	Piloto	Cacao	Referencia	Real	Piloto
L/D	6	4	2	Densidad (kg/m3)	775	647	520
Área útil (m2)	0.28	0.20	0.12	Llenado	30%	16%	2%
Volumen (m3)	1.0178	0.5251	0.0324	Masa (kg)	236	180	125
S (rad)	0.0021	0.0010	0				

Temperatura de secado = 60°C

Humedad Inicial = 60%

Contenido de humedad inicial = 0.6

Contenido de humedad final = 0.07

Humedad final = 7%

Contenido de humedad de equilibrio = 0.0234

Contenido de humedad critica = 0.31

En la siguiente tabla se presentan algunos de los resultados más representativos de la simulación de la función de transferencia de secado del cacao variando la velocidad del aire utilizada como punto de partida en el secador. Se inicia la simulación con una velocidad de 0.5 m/s lo cual arroja como resultado que el tiempo total de secado es de 15.22 horas. Esta simulación se realiza con 1, 1.5, 2 y 3 m/s, observándose que a medida que la velocidad del aire del secador se aumenta, disminuye el tiempo total de secado. De acuerdo a estos resultados, la velocidad en el prototipo es de 3 m/s para obtener un tiempo total de secado de 7.84 horas.

Tabla 3. Función de transferencia del prototipo

Velocidad del aire (m/s)	Velocidad media del aire de secado G (kg/h m2)	Coefficiente de transmisión de calor por convección hc (kJ/m2 h°C)	Periodo de velocidad constante Rc (kg/h m2)	Tiempo de secado en periodo constante tc (h)	Tiempo de secado en periodo decreciente td (h)	Tiempo total de secado tt (h)
0.5	2160	71.94	0.89	5.45	9.78	15.22
1	4320	92.98	1.15	4.21	7.57	11.78
1.5	6480	108.03	1.33	3.63	6.51	10.14
2	8640	120.16	1.48	3.26	5.85	9.11
3	12960	139.61	1.72	2.81	5.04	7.84

Fuente: Autores

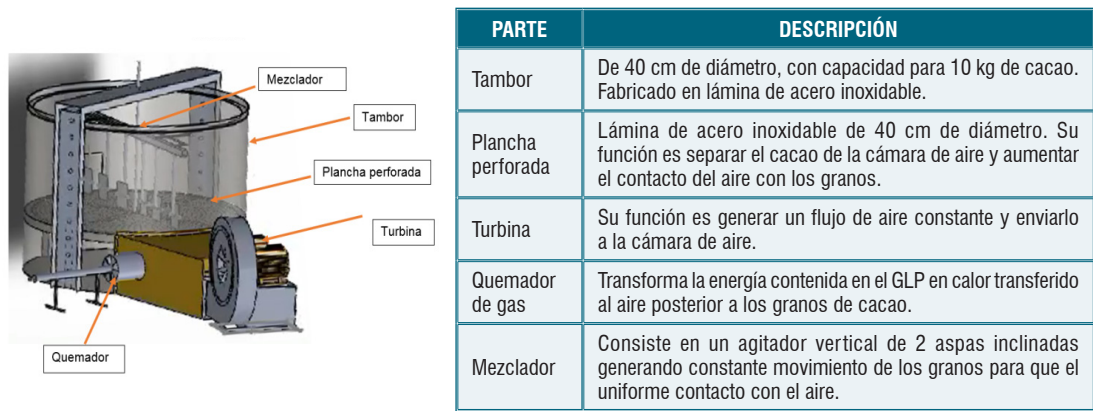


Figura 1. Componentes del prototipo de secador de cacao artificial  
Fuente: Adaptado de (Sandy et. al. 2015)

### 2.3 Diseño electromecánico del prototipo

El prototipo se diseñó para la capacidad de 10 kg de granos de cacao. Su estructura está fabricada en acero inoxidable el cual es resistente a la humedad, por lo que no contamina el grano de cacao ni altera sus propiedades. Cuenta con un mezclador fabricado en acero diseñado para mantener en constante movimiento los granos de cacao adquiriendo un secado uniforme, al girar a 1.5 r.p.m. velocidad ideal para no causar daño al grano.

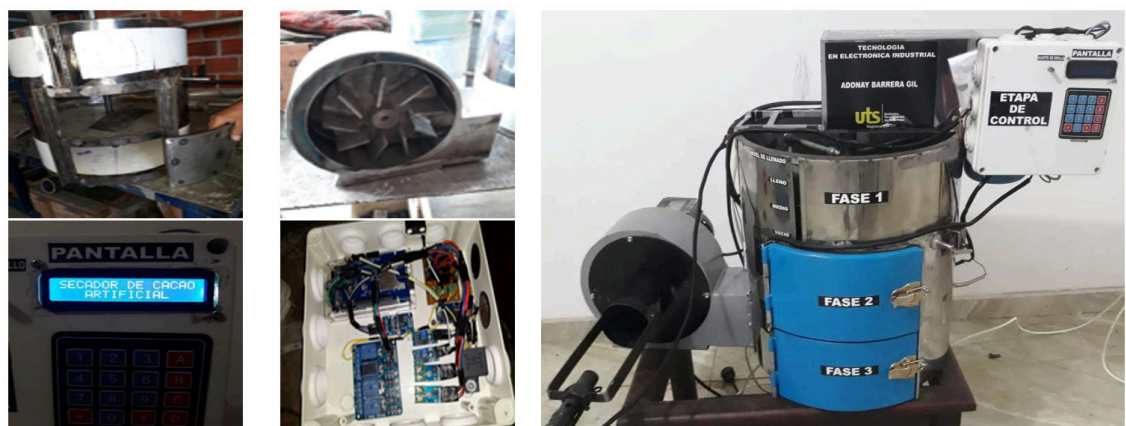


Figura 2: Proceso de ensamblaje del prototipo y circuito de control del secador de cacao  
Fuente: Autores

Como principal elemento se tiene el controlador a través del cual se ejecutan las ordenes a la vez que se recibe la información de los sensores. Se utilizó una pantalla LCD que permite visualizar lecturas en tiempo real tanto de temperatura como de humedad en cada uno de los tres niveles del equipo; permitiendo visualizar además el tiempo y estado del proceso. También se instaló un teclado, que permite modificar algunas variables del proceso como la temperatura en cada nivel, el tiempo de duración de la fase, tiempo de encendido y apagado del mezclador, apertura y cierre de la compuerta de paso del grano de la fase 1 a la 2, parada y puesta en marcha del equipo, entre otros.

### 3. Resultados

#### 3.1 Pruebas operativas de secado de cacao

##### 3.1.1 Pruebas con el modelo tradicional

Se consulta con los técnicos de la Federación Nacional de Cacao, quienes suministraron información del tiempo junto con los requerimientos estándar para secar cacao de manera artesanal, teniendo en cuenta una cantidad de 1 carga (125 kg). Es así que, para secar una carga de cacao, se requiere exponer el grano por lo menos 8 horas diarias con temperaturas que se encuentren entre 30 a 35°C y se debe repetir mínimo durante 3 días, para alcanzar el punto de humedad deseado. Durante el tiempo de exposición al sol, al grano debe realizársele volteo cada media hora para lograr un secado uniforme. De esta información se deduce que para secar de manera tradicional 125 kg de cacao, se requieren de 24 horas de exposición al sol, un trabajador de manera permanente y 5 metros cuadrados. Es así que para poder realizar un comparativo, los técnicos suministraron 1kg de cacao seco listo para almacenar, con las condiciones ideales tanto de humedad como de color.

##### 3.1.2 Pruebas con el modelo artificial

Se realizaron seis pruebas de secado del cacao en el prototipo propuesto con el objetivo de determinar cuál opción de operación es la que resulta más eficiente con mejores resultados en el grano. El procedimiento para las pruebas fue:

- Se pesan 2 kg de cacao en baba.
- Se programa tanto la curva de temperatura como la agitación deseada.
- Se registra cada hora el comportamiento del grano.
- Al finalizar el proceso, se pesa el cacao seco.

#### 3.2 Curva de Temperatura vs Tiempo programada

A continuación, se muestra la evolución del grano en algunas de las etapas más representativas del proceso:

Tabla 4: Curva de temperatura prueba 1

TIEMPO	TEMPERATURA	OPERACIÓN DEL AGITADOR	
Primer hora	30°C	Se programa el agitador para que opere por ciclos de 5 minutos, es decir, trabaja 5 minutos y se detiene por 5 minutos, permitiendo un secado homogéneo.	
Segunda hora	45°C		
Tercer hora	60°C		
Cuarta hora	60°C		
Quinta hora	60°C		

Fuente: Autores

Se observa que la superficie externa del grano de cacao se encuentra cubierta por baba, y la parte interna tiene una consistencia blanda, reflejando alto contenido de humedad. Dentro de los cambios que se presentaron al exponer los granos de cacao a diferentes temperaturas después de las 4 horas 10 minutos, se destaca un tono similar al grano de referencia, sin embargo, la textura es diferente y aun se siente blanda. Por lo cual se concluye que se requiere más tiempo para lograr un grano seco y adecuado para almacenar.

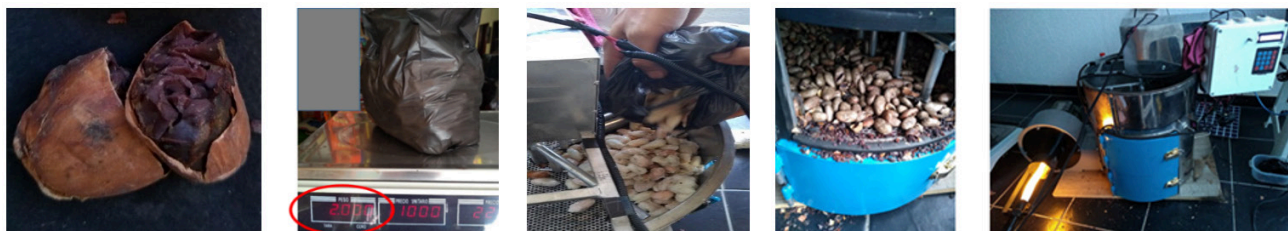


Figura 3: Grano seco de referencia junto con el peso de cacao en baba para la primera prueba

Fuente: Autores

El porcentaje de humedad promedio para el cacao en baba es cercano al 60%, por lo cual el proceso debería disminuir entre un 50 al 53 % la humedad del grano para poderlo almacenar de manera segura (Guehi et. al, 2010). Para determinar el porcentaje de humedad que se extrajo al cacao, se aplicó la fórmula:

$$\% \text{ humedad} = \left( \frac{PI - PF}{PI} \right) * 100 = \left( \frac{2000 - 1084}{2000} \right) * 100 = 45.8\% \quad (24)$$

Este resultado permite interpretar que se extrajo un 45.8% de la humedad, demostrando que no se completó el proceso de secado en esta prueba.

Para la prueba de secado número dos, se utilizaron 2095 g de cacao en baba. Esta curva se enfocó en acelerar desde el principio el proceso de secado del cacao. Se observa que la parte externa del cacao se seca de manera más rápida en comparación con la prueba 1. Después de 6 horas de proceso se aprecia que el grano ya tiene un color semejante al grano de referencia y su textura es dura, sin embargo, se decide completar el proceso programado, es decir, 7 horas. Al finalizar se observa que el grano está muy quemado presentando un tono oscuro mucho más fuerte que el de referencia, lo cual indica que superó el tiempo de secado ideal, causando daño físico al mismo, siendo el porcentaje de humedad del 57%.

Se utilizaron 1964 g de cacao en baba para la tercera prueba de secado más representativa, donde se observó que el iniciar con una temperatura baja, permitir que el secado inicial se haga de manera lenta y aumentar la temperatura de manera gradual; se presentan mejores resultados logrando un porcentaje de humedad del 51%, demostrando que la curva de tiempo vs temperatura seleccionados logró un resultado dentro de los estándares de calidad en cuanto a humedad se refiere.

Tabla 5: Curva de Temperatura prueba 3

TIEMPO	TEMPERATURA	OPERACIÓN DEL AGITADOR	
Primer hora	30°C	Se programa el agitador para que opere por 5 minutos encendido y 2 minutos apagado.	
Segunda hora	45°C		
Tercer hora	60°C		
Cuarta hora	60°C		
Quinta hora	60°C		
Sexta hora	60°C		
Séptima hora	60°C		

Fuente: Autores

### 3.3 Consumo de gas

El gas que se utilizó como combustible para el proceso de secado del cacao corresponde al Gas Licuado de Petróleo (GLP), almacenado en cilindro de 33 libras con un precio por m<sup>3</sup> de 3057.3 pesos colombianos. Para determinar la cantidad de gas que se consumió en cada prueba, se pesó el cilindro de gas tanto al inicio como al final de cada prueba.

Tabla 6: Consumo de gas durante las pruebas

Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
Peso inicial: 62.26 lb	Peso inicial: 60.47 lb	Peso inicial: 57.12 lb
Peso final: 60.47 lb	Peso final: 57.12 lb	Peso final: 54.04 lb
Consumo: 1.79 lb = 1.0024 m <sup>3</sup>	Consumo: 3.35 lb = 1.876 m <sup>3</sup>	Consumo: 3.08 lb = 1.725 m <sup>3</sup>
Costo: \$3064	Costo: \$5735	Costo: \$5273

Fuente: Autores

### 3.4 Consumo de energía eléctrica

El consumo de energía eléctrica es requerido para el movimiento de los motores eléctricos que componen el secador y los demás elementos de control requeridos para la operación. El precio por kWh se tomó de la factura de energía del lugar donde se realizaron las diferentes pruebas.

Tabla 7: Consumo de energía eléctrica durante las pruebas

Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
<b>Duración de la prueba: 4.5 horas</b>	<b>Duración de la prueba: 7 horas</b>	<b>Duración de la prueba: 6.5 horas</b>
<b>Costo de operación: 4.5 h x 0.84 kWh x 469.2 \$/kWh = \$ 1773.5</b>	<b>Costo de operación: 7 h x 0.84 kWh x 469.2 \$/kWh = \$ 2758.9</b>	<b>Costo de operación: 6,5 h x 0.84 kWh x 469.2 \$/kWh = \$ 2561.8</b>

Fuente: Autores

Al igual que el consumo de GLP, el consumo de energía eléctrica es proporcional al tiempo de duración de la prueba. El resultado de la prueba 3 tuvo un costo de \$2561,8, lo que representa un bajo costo de operación del equipo.

### 3.5 Costo total de operación

Para conocer el costo total CT en cada una de las pruebas realizadas, se suman los valores de costo de energía eléctrica E, costo por consumo de gas G, así como el costo de la mano de obra MO (equivalentes al valor del jornal hora de \$3750).

Tabla 8: Valor total de operación durante las pruebas

Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
CT = E + G + MO	CT = E + G + MO	CT = E + G + MO
CT = \$ 1773,5 + \$3064 + \$ 16875	CT = \$ 2758,9 + \$5735 + \$ 26250	CT = \$ 2561,8 + \$5273+ \$ 24375
CT = \$ 21712,5	CT = \$ 34743,9	CT = \$ 32209,8

Fuente: Autores

## 4. Escalabilidad del proyecto

Mediante la función de transferencia que se utilizó para diseñar el prototipo, se evalúa un modelo inicial a escala real que permita procesar 125 kg de cacao, que es la misma muestra con la que se calculó en el modelo tradicional, manteniendo los mismos valores de variables como temperatura del aire de secado, velocidad del aire, humedad inicial y final del grano, tipo de combustible, entre otros. Las condiciones que se modifican son área de exposición, consumo de gas, consumo de energía y cantidad de masa a procesar, principalmente.

Tabla 9: Función de transferencia modelo escala real

Velocidad del aire(m/s)	Velocidad del aire de secado G (kg/h m2)	Coefficiente de transmisión de calor hc (kJ/m2.h°C)	velocidad constante Rc (kg/h m2)	secado en periodo constante tc (h)	secado en periodo decreciente td (h)	Tiempo total de secado tt (h)
0.5	2160	71.94	0.89	8.34	14.96	23.30
1	4320	92.98	1.15	6.45	11.58	18.03
1.5	6480	108.03	1.33	5.55	9.97	15.52
2	8640	120.16	1.48	4.99	8.96	13.95
3	12960	139.61	1.72	4.30	7.71	12.01

Fuente: Autores

Se concluye que para procesar 125 kg de grano con humedad inicial de 60%, son necesarias 12 horas (2:1) a una temperatura máxima de 60°C con velocidad del aire de 3 m/s, en 5 metros cuadrados (46:1).

Para determinar los costos de operación del modelo del secador a escala real, se toma como valor de operación 12 horas continuas y se calcula el consumo de gas, energía y mano de obra con los valores nominales de fabricación expuestos.

Tabla 10: Costos de operación modelo de secador a escala real

INSUMO	CONSUMO POR HORA	COSTO UNITARIO	TIEMPO DE OPERACIÓN	COSTO TOTAL
GLP	0.74 m3	3057.3 \$/m3	12 horas	\$ 22804.95
Energía	7.9 kWh	469.2 \$/kWh	12 horas	\$ 44480
Mano de Obra	1 operario	5000 \$/hora	1.5 horas	\$ 7500
Costo total de operación				\$ 74784.95

Fuente: Autores

Secar 125 kg de cacao en un secador artificial, tiene un costo de \$ 74784.95 teniendo en cuenta 12 horas de consumo de energía eléctrica y de GLP. La mano de obra es muy baja, pues solo se requiere de un operador durante máximo un periodo 1 hora y media, que correspondería al tiempo de cargue del cacao al secador al inicio y el descargue al final del proceso.

Tabla 11: Comparativo de costos entre el modelo artificial y el tradicional

RECURSO	MODELO TRADICIONAL	MODELO ARTIFICIAL
Tiempo de operación	24 horas	12 horas
Cantidad de cacao procesado	125 KG	125 KG
GLP	\$ 0	\$ 22804
Energía	\$ 0	\$ 44480
Mano de obra	\$ 120000	\$ 7500
Total costos	\$ 120000	\$ 74784

Fuente: Autores

Por cada kg de cacao procesado con el modelo artificial, el producto se está ahorrando \$361 728 frente al modelo tradicional. Sin embargo, el ahorro es directamente proporcional a la cantidad de kg procesados, es decir a mayor cantidad de kg procesados, mayor será el ahorro.

#### 4.1 Aplicación en procesos industriales locales

Finalmente, en cuanto a la aplicación de los resultados obtenidos a procesos locales, se toma como piloto una empresa municipal cuya misión es producir, innovar y comercializar maquinaria agrícola industrial para el beneficio ecológico del cacao, teniendo como propósito llenar las expectativas de sus clientes con tecnología de punta, teniendo como prioridad la conservación del medio ambiente; basados en políticas que permitan mantener los productos y/o equipos en mejoramiento continuo ofreciendo mayor calidad con precios competitivos.

Es así, como en la empresa se inició con el perfeccionamiento de silos redondos para comparar su eficiencia en comparación con las secadoras cuadradas, desarrollando este tipo de máquinas en tres partes:

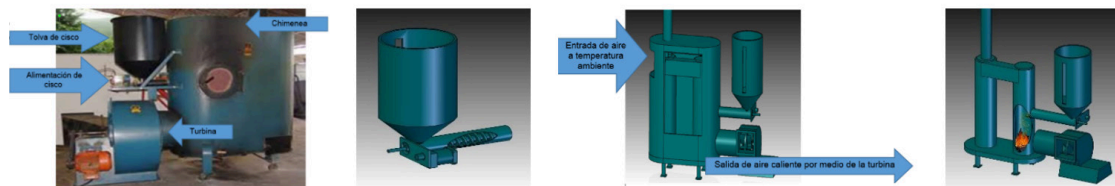


Figura 4. Quemador de cacao en tolva con su alimentación, motorreductor y unidad para la circulación de aire

Fuente: Autores

**Silo:** Fabricado en un 75% por acero inoxidable y el 25% en acero al carbono (lámina negra) el cual consta de cuatro pisos que son el de pre secado, el de descargue al pre secado, el de secado y el de descargue de secado.

**Quemador de cacao:** Antes tenían quemadores a gas propano el cual generaba un gasto excesivo en la compra de los cilindros, además de que alcanzaba a contaminar el cacao por sus componentes. A partir de esta problemática se crearon las unidades quemadoras de cacao. El cacao es altamente volátil por su muy bajo contenido de humedad, cuando se somete a un quemador puede alcanzar temperaturas hasta de 110°C, dando pie para crear este tipo de generadores de calor.

**Turbina de inyección de aire caliente:** Su funcionamiento principal es el de inyectar el aire caliente que adsorbe de la unidad de cacao; por la parte baja del silo o el primer piso. Esta turbina está compuesta por un caracol o esqueleto externo, además de su turbina que es la que adsorbe, expulsa el aire y su motor AC el cual la hace girar el rotor y por ende la turbina.

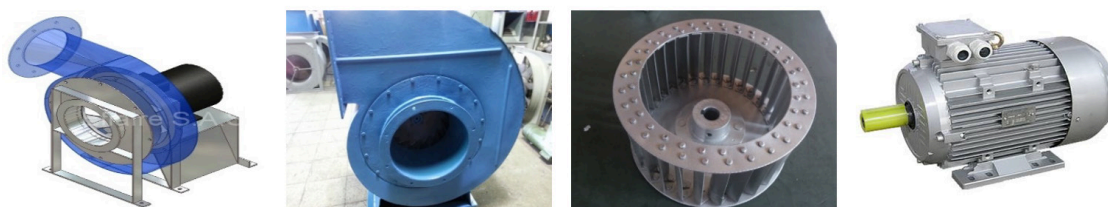


Figura 5. Sistema completo de la turbina de aire esqueleto (caracol) motor AC

Fuente: Autores

En el primer acercamiento se realiza la presentación en la empresa ante todo el personal que labora en ella, así como un reconocimiento de las instalaciones, con el propósito de explorar cada uno de los equipos y/o diferentes tipos de máquinas que se fabrican, efectuando además un diagnóstico de las herramientas e instrumentos de medición para verificar su funcionalidad, así como sus capacidades, los cuales permitieron realizar las diferentes tablas, registros o bitácoras que servirían para la validación en el desarrollo del periodo práctico.

En este proceso se adquirieron conocimientos complementarios básicos necesarios en la fabricación de la maquinaria para el apoyo a la empresa, además de poder brindar nuevas ideas y/o mejoras con base en los resultados previos obtenidos, debido a que dichos procesos son bastante manuales requiriendo con ello de bastante esfuerzo físico. Se implementan elevadores eléctricos (sistemas de izaje), además de la adecuación de nuevos puntos eléctricos de 110 – 220V.



Figura 6. Secadora circular con rotación 100% funcionando en sus pisos de pre secado, descargue y secado en el silo

Fuente: Autores

Se observa el modelo de secadora circular más significativo de la empresa el cual tiene mayor demanda debido a su gran capacidad de trabajo a la hora de entregar cacao, siendo entonces el foco central de las mejoras. Estas secadoras tienen una capacidad de 30 cargas de cacao que equivalen a 4 toneladas (equivalentes a 32 pruebas iniciales con el prototipo).

Este tipo de máquinas cuentan con dos sistemas de secado, un pre secado en el piso superior y otro de secado en el piso inferior, además de su descargue automático de cacao por medio de un tornillo sin fin en acero inoxidable. Así mismo una caja de control de transferencia automática de la red convencional a una planta generadora de electricidad, a la cual se le realiza una inspección por posibles fallas, y el cambio de piezas para garantizar el óptimo funcionamiento en la transferencia.



Figura 7: Controladores industriales para los equipos, sus respectivas cajas de control junto a la planta alterna de energía

Fuente: Autores

Se aprecia la planta con su respectiva transferencia junto con su caja de control, a la cual se le realizó un cambio de filtros de ACPM, encontrando en gran deterioro el sistema de control o suministro eléctrico, dejando en óptimo funcionamiento estos dos elementos tan importantes con el fin de no detener la producción (beneficiado) de cacao. Se incluye además un variador de frecuencia el cual tiene como función el reducir y/o aumentar la velocidad del motor para así poder controlar el descargue del cacao, de la mano con el sistema de encendido apagado. Se hace la instalación de un motor de trifásico con caja reductora de 120 r.p.m. de salida el cual va conectado a un sinfín encargado de sacar el cacao ya seco.

Se instala además una caja de contacto manual en acero inoxidable con sus respectivas medidas para la ubicación exacta de los controladores y contactos, según lo dictamina la norma.



Figura 8. Fabricación de las cajas de los controladores para el sistema de control mediante termocupla

Fuente: Autores

Para todas las pruebas realizadas en el transcurso del presente, se toma cada hora un grano de cacao el cual se parte por la mitad, registrándose para este, tiempo y temperatura de exposición principalmente, demostrando que el proceso de secado artificial es cerca de un 37 a 55% más económico que el modelo tradicional, puesto que por exposición al sol, el tiempo de secado varía entre cuatro a cinco días dependiendo del tipo de cacao y de las condiciones climáticas ambientales, consiguiéndose secar granos de cacao en tiempos que varían entre 8 a 14 horas con el sistema implementado, generando un ahorro considerable al productor.

## 5. Conclusiones

La variable más importante a tener en cuenta en el proceso de secado del cacao es la humedad, donde surgió una de las principales inquietudes relacionada con la medición en el grano, por lo que se optó por determinar en cada prueba, el peso de la masa al iniciar y finalizar el proceso, permitiendo determinar el porcentaje de humedad que se extrajo del grano.

Se recomienda optimizar el consumo de combustible instalado, teniendo en cuenta el sistema de encendido automático de la llama. Así mismo, implementar un quemador de gas adelante de la turbina para evitar que la llama genere un deterioro excesivo de la turbina y del motor por contacto directo, e instalar más señales visuales de encendido y/o falla,

una parada de emergencia que permita conocer el estado de los componentes como los motores, electroválvulas de combustible, compuertas, entre otros.

Las secadoras de cacao con agitación le dan un plus al proceso de beneficio del cacao, ya que gracias a estas las horas de trabajo se han reducido por mitad, la calidad del grano es muy superior en comparación con otros tipos de secado convencionales o artesanales, e igualmente el área de exposición se reduce de 34 a 46 veces.

El conocimiento de los métodos numéricos en áreas como: mecánica de sólidos, materiales y estructuras, sistemas dinámicos y control, fenómenos de transporte: fluidos, masa, calor y sus aplicaciones en procesos industriales locales; permiten ofrecer excelentes soluciones en diversas ramas de la industria, además del secado artificial de cacao.

Los controladores industriales son muy importantes a la hora de automatizar cualquier proceso de producción en masa con el fin de hacerlos más productivos sin recurrir a la mano de obra convencional, o sin depender en su mayoría de la misma. Es así que el desarrollo de sistemas de control ayuda a la solución de problemáticas que se puedan presentar en cualquier sector de productividad industrial no solo a pequeña escala local. Estos permiten que sean escalados desde su simulación, según aumenten progresivamente las diferentes condiciones a escala real.

Para la parte del mantenimiento preventivo y/o correctivo se puede adecuar un software en el cual se tomen todos los datos de los controladores, equipos eléctricos electrónicos, motores, variadores, entre otros; para poder tener un control sobre estos elementos y así saber en qué momento podrían llegar a fallar y el porqué de las causas y/o sus posibles soluciones, por mencionar algunos de los beneficios o expansiones más importantes.

El modelo de parámetros concentrado se implementó con el propósito de obtener una primera aproximación hacia la representación de la dinámica de la planta cilíndrica rotatoria, asumiendo que en su interior cada una de las variables tiene un mismo valor para cualquier punto geométrico, siendo este el punto de partida para la elaboración del modelo en parámetros distribuidos, el cual representa de manera más real la dinámica del sistema tomando los cambios que sufren las distintas variables a lo largo de la cámara cilíndrica en un rango de operación de la planta para diferentes valores de la temperatura del gas de secado, siendo de gran utilidad ante el comportamiento no lineal propio en el escalado progresivo de las dimensiones de la planta piloto.

## Referencias

- [1] Barragan, A., & Rey, L. C. 2004. Establecimiento de núcleos productivos de cacao (*Theobroma Cacao*) en torno a micro centrales de beneficio para mejorar la calidad del grano en la región del distrito agroindustrial del Magdalena Caldense. Proyecto de Especialización en Gestión de Proyectos de Desarrollo Agroindustrial, Universidad Nacional de Colombia, Caldas, Manizales.
- [2] Barrera Gil, A. Vargas Gómez, Yezid R. 2018. Sistema de secado artificial para cacao con ciclos de variación de tiempo para la optimización del proceso a través del control de temperatura. Unidades Tecnológicas de Santander, Facultad de Ciencias Naturales e Ingenierías. Programa de Electrónica Industrial.

- [3] Becerra, L. G. 2012. Secado de cacao y sistemas de riego con energías renovables. Así lo hacemos. Recuperado el 03 de diciembre de 2017, de [www.revistavirtualpro.com](http://www.revistavirtualpro.com): <https://www.revistavirtualpro.com/biblioteca/secado-de-cacao-y-sistemas-de-riego-con-energias-renovables>
- [4] Betancourt Castellanos, Carlos S. Castillo Sarzosa, Pablo A. s.f. Diseño y simulación de una máquina secadora de forrajes múltiples para la elaboración de harina y procesamiento de balanceado para ganado con capacidad de 400 kg/h para la empresa "ENSIFOR S.A." Ecuador.
- [5] Caja de Herramientas para el Cacao, 2013. GUÍA 8: Cosecha, fermentación y secado del cacao. Recuperado el 01 de diciembre de 2017, de <http://cacaomovil.com>: <http://cacaomovil.com/guia/8/contenido/secado/>
- [6] C.L. Hii, C.L. Law, M.C. Law, 2013. Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer. *Applied Thermal Engineering* 54 Elsevier. p. 264-271.
- [7] Compañía Nacional de Chocolates S.A.S., 2012. El cultivo de Cacao. Recuperado el 11 de diciembre de 2017, de <https://chocolates.com.co>: [https://chocolates.com.co/sites/default/files/default\\_images/paquete\\_tecnologico\\_cacao\\_cnch\\_enero\\_2012.pdf](https://chocolates.com.co/sites/default/files/default_images/paquete_tecnologico_cacao_cnch_enero_2012.pdf)
- [8] Departamento de Agricultura, 2017. Manual de manejo de poscosecha de granos a nivel rural. Recuperado el 06 de diciembre de 2017, de <http://www.fao.org>: <http://www.fao.org/docrep/X5027S/x5027S02.htm>
- [9] Duarte, J. Vargas, Y., 2019. Apoyo en el desarrollo de maquinaria industrial para la empresa MaqCafe ingeniería basada en la implementación de nuevas tecnologías para el beneficio ecológico del café. Programa de Electrónica Industrial. Unidades Tecnológicas de Santander, San Gil - Colombia.
- [10] Echeverry Ocampo, Dany A., 2010. Diseño y simulación de la automatización de un secador electromecánico de café. Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira Risaralda.
- [11] Egea Mejía, Luis A. Sarmiento Galeano, Jaime E., 2009. Modelo y controlador de temperatura para horno eléctrico doméstico, Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, Trabajo de Grado TG0867.
- [12] Eronini-Umez-Eronini, 2001. *Dinámica de Sistemas y Control*. Morgan State University, 1ª Edición, editorial Thomson Learning.
- [13] Fedecacao, 2016. Cadena de cacao. Indicadores e Instrumentos. (pág. 15). Bogotá.
- [14] Flores T. Antonio, 2009. *Linealización de Funciones No Lineales*.
- [15] Fundesyram, 2016. Descripción de la planta de cacao. Recuperado el 02 de diciembre de 2017, de Fundación para el Desarrollo Socioeconómico y Restauración Ambiental: <http://www.fundesyram.info/biblioteca.php?id=4413>
- [16] Guehi, S., Zahouli, I. B., Ban-Koffi, L., Fae, M. A., & Nemlin, J. G., 2010.) Performance of different drying methods and their effects on the chemical quality attributes of raw cocoa material. *International Journal of Food Science and Technology*, 8(45), 1564–1571.
- [17] Khalil K. Hassan, 2002. *Nonlinear Systems*. Prentice Hall, New Jersey, Tercera Edición.
- [18] Ministerio de Industria y Comercio, 2006. Reglamento Técnico para Cilindros y Tanques Estacionarios utilizados en la prestación del servicio público domiciliario de Gas Licuado del Petróleo, GLP, y sus procesos de mantenimiento. Recuperado el 1 de mayo de 2018, de [http://www.sic.gov.co/recursos\\_user/reglamentos\\_tecnicos/cilindros\\_tanques.pdf](http://www.sic.gov.co/recursos_user/reglamentos_tecnicos/cilindros_tanques.pdf)
- [19] Omron, Electronics S.A, 2009. *Curso de Control de Temperatura*.
- [20] Parra, P., 2017. Modelación de un proceso de secado de cacao utilizando una cámara rotatoria cilíndrica y flujo de aire caliente (Tesis doctoral en Ingeniería con Mención en Automatización, Control y Optimización de Procesos). Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Piura, Perú.
- [21] Reyes Sierra, Héctor I. Montaña Ortega, Manuel F., 2010. Modelamiento y control digital de temperatura para horno eléctrico. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Departamento de Electrónica. Bogotá D.C.
- [22] Rodríguez Alvarado, Lisaura W., 2011. Diseño del sistema de control difuso de una máquina secadora de café que emplea energía solar. México D. F. Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Unidad Azcapotzalco.
- [23] Romero Pérez, Claudia K. Martín Domínguez, Ignacio R., 2013. Simulación de un sistema de secado asistido con energía solar. Centro de Investigación en Materiales Avanzados, S.C. Miguel de Cervantes 120 Complejo Industrial Chihuahua. México.
- [24] Sandy, X., Reza, C., Espinoza, J. C., & Arellano, G., 2015. Control de fermentado y evaluación de un prototipo de secador con ambiente controlado para cacao. Larecaja - Bolivia: Wildlife Conservation Society.
- [25] Selectra. (2018) Factor de conversión de gas propano. Obtenido de <https://propanogas.com/faq/factor-conversion#conversion-metro-cubico>
- [26] SIRCA Maquinaria Agroindustrial, 2018. *sirca ecuador*.
- [27] S. Friedman and W. Marshall, 1949. "Studies in rotary drying Part II: Heat and mass transfer," *Chemical Engineering Progress*, vol. 45, pp. 573–588.
- [28] Torres, C. E., & Valencia, L. E., 2016. Automatización de un deshidratador de granos de cacao. Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Tecnología. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.

- [29] Torres, F. A., & Rodríguez, D. L., 2015. Análisis de la adopción de tecnología mejorada para la producción de cacao en el municipio de Rionegro - Santander. Tesis Pregrado, Universidad Santo Tomas Bucaramanga, División de ciencias económicas y administrativas. Facultad de Administración de Empresas Agropecuarias, Bucaramanga.
- [30] Urrutia, E., 2007. Diseño y simulación de un sistema de control automático, para el proceso de tostado, soplado y molido de cacao para la fábrica de chocolates Tungurahua. Escuela Politécnica del Ejército, Departamento de Eléctrica y Electrónica. Sangolqui - Ecuador: Escuela Politécnica del Ejército.
- [31] Valdés-González, H. Luis Salazar, J. Reyes-Bozo, L. Vyhmeister, E. Gómez-Varela, M. Cubillos Montecinos, F., 2011. Control basado en optimización de un secador rotatorio directo. Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile.
- [32] Vallejos, C., 2013. Modelación, simulación, control PID y control predictivo de un secador rota disco en la industria pesquera. Tesis de pregrado en Ingeniería Mecánico Eléctrica. Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería. Programa Académico de Ingeniería Mecánico Eléctrica. Piura, Perú.
- [33] WILPAC, 2017. Secadoras WILPAC. Recuperado el 02 de diciembre de 2017, de [www.induwilpac.com](http://www.induwilpac.com/#Productos): <http://www.induwilpac.com/#Productos>