



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

REPOSITORIO INSTITUCIONAL  
PIRHUA

# MODELACIÓN DE UN PROCESO DE SECADO DE CACAO UTILIZANDO UNA CÁMARA ROTATORIA CILÍNDRICA Y FLUJO DE AIRE CALIENTE

Pablo Parra-Rosero

Piura, diciembre de 2017

FACULTAD DE INGENIERÍA

Doctorado en Ingeniería con Mención en Automatización, Control y  
Optimización de Procesos

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.



Esta obra está bajo una licencia

[Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

[Repositorio institucional PIRHUA – Universidad de Piura](https://repositorio.institucional.pirhua.edu.pe/)

**UNIVERSIDAD DE PIURA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**



**Modelación de un proceso de secado de cacao utilizando una cámara rotatoria cilíndrica y flujo de aire caliente**

Tesis para optar el Grado de Doctor en Ingeniería con mención en Automatización, Control y Optimización de Procesos

**Pablo Parra Rosero**

**Asesor: Dr. Ing. William Ipanaqué Alama**

Piura, diciembre 2017





**UNIVERSIDAD DE PIURA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA

Tesis para optar el Grado de Doctor en Ingeniería con mención en  
Automatización, Control y Optimización de Procesos

**“MODELACIÓN DE UN PROCESO DE SECADO DE CACAO  
UTILIZANDO UNA CÁMARA ROTATORIA CILÍNDRICA Y  
FLUJO DE AIRE CALIENTE”**

Tesis de doctorado de

**Pablo Parra Rosero**

Miembros de El Jurado:

.....  
Dr. Daniel Marcelo  
Presidente

.....  
Dr. Luigi del Re  
Profesor

.....  
Dr. Edilberto Vásquez  
Secretario

.....  
Dr. William Ipanaqué Alama  
Asesor



A Dios,  
a mis padres, mis hermanos, de manera  
especial a mi esposa y a mis hijos,  
a mis amigos y compañeros de la UDEP,  
Al Dr. William Ipanaqué por su  
constante apoyo.



## **Prólogo**

Esta tesis presenta una propuesta alternativa para el secado forzado de cacao, como solución a varios inconvenientes suscitados por la utilización de la técnica de secado natural por parte de los productores a baja escala.

En su primera sección, este trabajo expone los aportes y avances que se han desarrollado en los últimos años alrededor de la temática del secado de cacao, además muestra datos de producción y su importancia dentro del ámbito financiero ecuatoriano.

Se dedica un capítulo para la descripción de la planta piloto implementada para realizar las pruebas de secado, calibración de parámetros, validación de un modelo e implementación de varios algoritmos de control.

El detalle, análisis y explicación sobre el planteamiento de un modelo en parámetros distribuidos es descrito en otra sección del presente trabajo. A continuación, se realiza la descripción del diseño e implementación de algoritmos de control basados en el modelo.

Finalmente se exponen y analizan los resultados obtenidos con la operación de la planta tanto en lazo abierto como en lazo cerrado. En la sección de anexos se pueden encontrar diferentes tablas de datos, diagramas esquemáticos y códigos de programación utilizados y obtenidos durante la ejecución de este trabajo de investigación.



## **Resumen**

En este trabajo se analiza una técnica alternativa para el secado de cacao, concretamente se plantea un secador forzado o artificial. Si bien es cierto, buenos resultados se consiguen empleando técnicas naturales y/o artesanales de secado, pero en épocas cuyas condiciones climáticas son poco favorables, el secado natural no resulta factible y esta situación genera pérdidas económicas por descomposición del producto.

En la actualidad existen diferentes tipos de secadores artificiales, en este trabajo se propone utilizar una cámara de secado rotatoria y cilíndrica, con un generador de aire caliente para producir el secado por efecto de la transferencia de calor por convección.

La investigación cubre aspectos como el dimensionamiento de la planta piloto, implementación, modelado matemático, validación del modelo, identificación y aplicación de varios algoritmos de control.

Durante el desarrollo del presente trabajo se ha podido evaluar la importancia que tiene la variable de temperatura en los procesos de fermentación y secado, consecuentemente se optó por diseñar e implementar los controladores, considerando a la temperatura de secado como la variable principal a controlar. El control de la temperatura del aire de secado se realiza manipulando una variable de flujo de combustible a la entrada de la sección de la cámara de combustión de la planta.

Luego de realizar varias pruebas de funcionamiento y experimentar con diferentes ajustes sobre la estructura de la planta piloto, se ha logrado secar cacao de acuerdo a los objetivos planteados, esto es, disminuir la humedad del grano hasta alcanzar niveles de alrededor del 7 u 8 %. El producto seco obtenido ha sido ofertado al mercado local de cacao y comercializado exitosamente sin ningún tipo de penalización. Las penalizaciones al costo de comercialización se aplican al producto que no ha sido secado satisfactoriamente.

El tiempo de residencia del grano de cacao dentro de la cámara de secado es de aproximadamente 10 horas, considerando la forma artesanal, el secado natural del cacao toma períodos aproximados de tiempo de entre tres y seis días y que tiene gran dependencia de las condiciones climáticas del ambiente, puede afirmarse con toda certeza que el secado forzado o artificial tiene la ventaja de disminución de tiempo y resultados con mayor homogeneidad en el contenido de humedad de los granos de cacao.

Uno de los aspectos más relevantes que han influido en el proceso de secado planteado en este trabajo, ha sido la etapa previa, es decir la fermentación del grano. Muchos de los problemas o inconvenientes que se enfrentan en el proceso de secado se deben a una deficiente calidad obtenida en la etapa de fermentación, debido a esto varios autores en la literatura especializada consideran a las etapas de fermentación y secado como una fase única, y la denominan como la etapa del beneficiado del grano. La tecnificación de la fermentación del cacao, queda planteada como un tema pendiente para su posterior investigación, con miras a conseguir un producto que cumpla con los estándares mínimos y apropiados, con la finalidad de facilitar y garantizar la correcta operación de la posterior fase de secado.

Los avances o resultados parciales de la presente investigación han sido sometidos a diferentes revistas y congresos internacionales y luego de ser analizados y aceptados se han publicado e indexado en LATINDEX, SCOPUS e ISI WoS.

## Índice

<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1 Técnicas naturales y artificiales para el secado de Cacao .....</b>	<b>3</b>
1.1. Antecedentes .....	3
1.2. Datos socioeconómicos.....	4
1.3. Descripción de la planta de cacao.....	4
1.4. Variedades de cacao.....	5
1.5. Procesamiento del cacao .....	5
1.5.1. Fermentación .....	6
1.5.2. Secado.....	9
1.6. Secado natural.....	10
1.7. Secado artificial.....	12
1.7.1. Transferencia de masa y de energía .....	14
1.7.2. Curva de secado .....	15
1.7.3. Velocidad de secado .....	16
1.7.4. Tiempo de secado .....	17

1.8.	Tipos de secadores artificiales .....	18
1.8.1.	Secadores directos .....	18
1.8.2.	Secadores indirectos .....	18
1.9.	Secado artificial de cacao .....	20

**Capítulo 2 Descripción de planta piloto para secado de cacao ..... 27**

2.1.	Antecedentes.....	27
2.2.	Componentes estructurales .....	28
2.3.	Dosificador de granos de cacao .....	30
2.4.	Generador de aire caliente .....	32
2.5.	Cámara de secado .....	34
2.6.	Receptor de granos secos.....	37

**Capítulo 3 Modelación de la planta para secado de cacao ..... 39**

3.1.	Introducción.....	39
3.2.	Modelo en parámetros concentrados .....	41
3.3.	Modelo en parámetros distribuidos .....	47
3.3.1.	Consideraciones para el modelado .....	49
3.3.2.	Nomenclatura .....	50
3.3.3.	Ecuaciones y relaciones.....	51
3.4.	Sobre los modelos.....	58

**Capítulo 4 Simulación y validación del modelo de parámetros distribuidos para la planta de secado de cacao ..... 61**

4.1.	Introducción.....	61
4.2.	Simulación del modelo .....	62
4.3.	Análisis experimental con el modelo.....	72
4.3.1.	Efectos de la variación de flujo másico de gas de secado .....	74
4.3.2.	Efectos de la variación de la humedad del cacao .....	76

4.3.3.	Efectos de la variación del flujo másico de cacao .....	78
4.4.	Validación del modelo .....	79
4.4.1.	Parametrización con optimización.....	81

**Capítulo 5 Identificación lineal y diseño de controladores para la planta de secado de cacao ..... 89**

5.1.	Introducción .....	89
5.2.	Identificación lineal.....	92
5.2.1.	Respuesta de la planta en lazo abierto .....	92
5.2.2.	Diseño de la PRBS.....	93
5.3.	Diseño del GPC.....	95
5.4.	Diseño del controlador PID .....	97
5.5.	Diseño del controlador NEPSAC.....	98

**Capítulo 6 Pruebas de funcionamiento en lazo cerrado sobre la planta para secado de cacao ..... 105**

6.1.	Introducción .....	105
6.2.	Pruebas en lazo abierto .....	105
6.3.	Pruebas en lazo cerrado.....	108

**Conclusiones..... 115**

**Bibliografía..... 117**

**Apéndices..... 125**

Apéndice 1.	Código para el modelo en parámetros distribuidos. ....	127
Apéndice 2.	Código para la validación del modelo en parámetros distribuidos .....	134
Apéndice 3.	Código para la implementación del controlador predictivo generalizado .....	147

Apéndice 4.	Código para la implementación del Controlador PID.....	150
Apéndice 5.	Código para la implementación del Controlador NEPSAC.....	153
Apéndice 6.	Código para la implementación del modelo en parámetros distribuidos.....	164
Apéndice 7.	Artículos o publicaciones.....	168
Apéndice 8.	Hoja de vida .....	205

## Índice de Tablas

Tabla 1. Modelos de secado de capa fina probados para el secado de cacao.....	24
Tabla 2. Características del sistema dosificador de cacao. ....	31
Tabla 3. Características del motor reductor (Sistema dosificador).....	31
Tabla 4. Características del generador de aire caliente.....	33
Tabla 5. Dimensiones de la cámara de secado.....	35
Tabla 6. Variables que intervienen en el sistema secador.....	42
Tabla 7. Valores considerados para el cálculo del tiempo de paso.....	46
Tabla 8. Características de la cámara de secado. ....	49
Tabla 9. Nomenclatura para el modelo en parámetros distribuidos.....	50
Tabla 10. Valores para experimento de simulación. ....	62
Tabla 11. Parámetros y constantes del modelo matemático. ....	85
Tabla 12. Límites para la estimación de parámetros. ....	86
Tabla 13. Estimación de parámetros – resultados.....	86
Tabla 14. Características de la señal PRBS. ....	94
Tabla 15. Características de la señal PRBS. ....	96
Tabla 16. Valores para experimento de secado en planta (lazo abierto).....	106



## Índice de Figuras

Figura 1.	Proceso de beneficiado del Cacao. ....	8
Figura 2.	Tipos de Secadores al natural de Cacao. ....	10
Figura 3.	Secador solar intermitente. ....	11
Figura 4.	Secadores adiabáticos. ....	13
Figura 5.	Descripción de los fenómenos de transferencia de calor y de masa. ....	14
Figura 6.	Curva típica de secado. ....	15
Figura 7.	Velocidad de secado. ....	16
Figura 8.	Clasificación de sistemas de secado para frutas y vegetales. ....	20
Figura 9.	Secador artificial de cacao por convección forzada. ....	21
Figura 10.	Diagrama esquemático del secador basado en bomba de calor. ....	24
Figura 11.	Diagrama de diseño ....	28
Figura 12.	Estructura general del sistema para secado de Cacao. ....	29
Figura 13.	Sistema dosificador de granos de cacao. ....	30
Figura 14.	Dimensiones. Dosificador de granos de cacao. ....	31
Figura 15.	Imagen de planta. Dosificador de granos de cacao. ....	32
Figura 16.	Imagen de planta. Generador de aire caliente. ....	33

Figura 17. Imagen de planta. Generador de aire frio.....	34
Figura 18. Imagen de planta. Cámara de secado. Sección interna. ....	36
Figura 19. Cámara de secado. Dimensiones.....	36
Figura 20. Imagen de planta. Cámara de secado. Vista externa.....	37
Figura 21. Receptor de grano seco. Dimensiones. ....	37
Figura 22. Planta piloto para secado de Cacao.....	38
Figura 23. Respuestas de modelo y del proceso real.....	40
Figura 24. Cámara de secado. Variables que intervienen en el proceso. ....	43
Figura 25. Planta secadora de cacao.....	48
Figura 26. Sección transversal de la cámara de secado. ....	48
Figura 27. Esquema de parámetros distribuidos.....	52
Figura 28. Esquema de variables para el grano de cacao. ....	52
Figura 29. Evolución de las variables de humedad y temperatura. Simulación con n=1.....	63
Figura 30. Evolución de las variables de humedad y temperatura. Simulación con n=2.....	63
Figura 31. Evolución de las variables de humedad y temperatura. Simulación con n=4.....	64
Figura 32. Evolución de las variables de humedad y temperatura. Simulación con n=10.....	65
Figura 33a. Variación de humedad del cacao durante el proceso de secado. Todas las etapas (n=10).....	66
Figura 34. Variación de humedad del gas de secado durante el proceso de secado. (n=10).....	67
Figura 35. Variación de temperatura del gas de secado durante el proceso. ....	67
Figura 36. Variación de temperatura del cacao durante el proceso de secado. ....	68
Figura 37. Relación de las humedades superficial y crítica del cacao.....	68
Figura 38. Variación de la humedad superficial del Cacao.....	69

Figura 39. Evolución de algunas variables de interés en el proceso de secado de cacao.....	69
Figura 40. Evolución la variable de humedad interna del Cacao.....	70
Figura 41. Izquierda: Velocidad del cacao. Derecha: Velocidad del gas de secado. ....	71
Figura 42. Superior: Humedad del cacao. Derecha: Humedad del gas de secado. ....	71
Figura 43. Superior: Temperatura del gas de secado. Inferior: Temperatura del cacao.....	72
Figura 44. Efecto de la variación de flujo másico de combustible sobre el proceso de secado de Cacao.....	74
Figura 45. Efecto de la variación de flujo másico de gas de secado sobre el proceso. ....	75
Figura 46. Efecto de la variación de flujo másico de gas de secado en las velocidades y flujos de Cacao. ....	76
Figura 47. Efecto de la variación de la humedad de entrada del cacao en las variables del proceso. ....	77
Figura 48. Efecto de la variación del flujo másico de entrada de cacao en las variables del proceso. ....	79
Figura 49. Secuencia de modelado y validación de un proceso.....	80
Figura 50. Efecto de la variación de un parámetro en el modelo.....	81
Figura 51. Error entre las salidas de la planta y del modelo. ....	83
Figura 52. Diagrama de bloques del proceso de estimación de parámetros. ....	83
Figura 53. Diagrama para la rutina de optimización.....	84
Figura 54. Curvas de Humedad obtenidas del modelo y de la planta de secado.....	88
Figura 55. Correlación existente entre las variables de humedad del cacao y la temperatura del gas de secado. ....	90
Figura 56. Efectos de la variación de Wcomb (flujo de combustible) sobre otras variables del proceso de secado. ....	91
Figura 57. Respuesta al escalón en lazo abierto.....	93

Figura 58. Respuestas de salida para el modelo identificado y para la planta. ....	94
Figura 59. Curva de reacción de Ziegler-Nichols. Planta de secado de cacao. ....	97
Figura 60. Respuesta de la planta de secado en Lazo abierto. ....	107
Figura 61. Respuesta de la planta a una señal de entrada tipo escalera. ....	108
Figura 62. Simulación del GPC actuando sobre el modelo identificado. ....	109
Figura 63. Respuesta de la planta alrededor del punto de operación nominal. ....	109
Figura 64. Respuesta de la planta para los controladores GPC y PID. ....	110
Figura 65. Señales de control GPC y PID. ....	110
Figura 66. Humedad del cacao. ....	111
Figura 67. Señales de respuesta. ....	112
Figura 68. Señal de respuesta del controlador NEPSAC. ....	112
Figura 69. Señales de Control PID, GPC y NEPSAC. ....	113

## Nomenclaturas

### Simbología de operadores y funciones

$\exp$	Función exponencial
$\int_a^b f(x)dx$	Integral definida de $f(x)$ de límites $a \leq x \leq b$
$\lim f(x)$	Límite de una función $f(x)$
$u(t)$	Función dependiente del tiempo
$\bar{u}$	Media temporal de la función $u(t)$
$u'(t)$	Derivada de la función $u(t)$
$\ln$	Función logaritmo natural
mín	Función mínimo
$\frac{\delta}{\delta x}$	Operador derivada parcial en $x$
$\delta$	Función delta de Dirac
$\nabla$	Operador divergente
$\nabla^2$	Operador Laplaciano
$\Sigma$	Operador Sumatoria
$\Pi$	Operador Producto

## Abreviaturas

ARX	Modelo auto regresivo
ARMAX	Modelo auto regresivo y de medias móviles
EPSAC	Control predictivo extendido y auto adaptativo
FIT	Medida de la bondad de ajuste del modelo
GLP	Gas licuado de petróleo
GPC	Control predictivo generalizado
HDL	Lenguaje de descripción de hardware
MPC	Control predictivo basado en modelo
MR	Humedad Relativa
NEPSAC	Control predictivo no lineal extendido y auto adaptativo
NMPC	Controlador no lineal predictivo basado en modelo
OE	Modelo de error de salida
pH	Medida de acidez o alcalinidad de una disolución
PID	Control predictivo integrativo y derivativo
PRBS	Señal binaria pseudo randómica

## **Introducción**

En la mayor parte de los países productores de cacao a nivel mundial, se utilizan actualmente técnicas naturales para el secado de este producto. Ecuador es el sexto productor de cacao convencional y el primer productor de cacao fino de aroma a nivel mundial, sin embargo, los pequeños productores enfrentan serias complicaciones en épocas de lluvia, puesto que el producto cosechado no puede ser secado de forma natural, es decir aprovechando la energía solar por simple exposición del grano y esto genera pérdidas económicas por descomposición del producto.

Existen sistemas de secado artificial que utilizan aire caliente obtenido a partir de la combustión de gas licuado de petróleo o de trozos de madera seca. Estos sistemas consisten en cabinas de hormigón que en su parte interna poseen una cama metálica con perforaciones que permiten la circulación del aire caliente. El cacao es dispuesto en una capa extendida a lo largo y ancho de la cama. El producto obtenido alcanza los niveles de humedad requeridos, alrededor del 8 % de humedad, pero las condiciones organolépticas no satisfacen a plenitud, debido a la contaminación de olores producidos por efectos de la combustión de la madera, perjudicando el aroma del cacao.

En el tipo de secador descrito en el párrafo anterior, el cacao debe ser removido manualmente, para evitar que la capa de cacao que está por debajo y pegada a la lámina metálica sufra quemaduras por efecto

de la transferencia de calor por conducción. Si el grano es expuesto durante mucho tiempo al efecto de conducción, la cascarilla o testa del mismo se reseca, es decir que se cierra prematuramente e impide la evaporación de la humedad interna del grano.

Por las razones expuestas anteriormente se plantea el presente trabajo de investigación, con miras a obtener una técnica de secado de cacao, que minimice los efectos de quemadura del grano por conducción de calor, ya que, al disponer de un cilindro rotatorio, el grano estará en movimiento constantemente. Se plantea realizar un control de la temperatura del aire caliente, para evitar el cierre prematuro de la cascarilla del grano y de esta forma obtener un grano seco con las cualidades organolépticas apropiadas para su posterior almacenamiento, transporte y procesamiento adecuado.

Los sistemas artificiales utilizados para el secado de cacao, tanto a nivel industrial como artesanal, son de carácter empírico, es decir que funcionan, pero no de forma óptima. Este trabajo pretende cubrir varias etapas, tales como el diseño y la implementación de una cámara cilíndrica rotatoria para secado por lotes, el diseño y la implementación de una cámara cilíndrica rotatoria para el secado continuo, pruebas de secado en lazo abierto, planteamiento del modelo matemático basado en principios fundamentales para las dos cámaras de secado, implementación de un modelo en parámetros distribuidos, identificación lineal de una de las plantas experimentales, validación de los modelos y finalmente el diseño e implementación de estrategias de control avanzado basadas en los modelos planteados.

# **Capítulo 1**

## **Técnicas naturales y artificiales para el secado de Cacao**

### **1.1. Antecedentes<sup>1</sup>**

En la literatura consultada se registran trabajos de investigación desarrollados alrededor del secado de cacao, a nivel de modelamiento de las curvas de secado y velocidad de secado para diferentes tipos de secadores artificiales. Todos los experimentos que se han registrado se los ha realizado en estufas u hornos en donde el grano de cacao permanece estático.

Se ha podido encontrar sistemas rotatorios para la deshidratación de cáscara de limón, secado de trozos de remolacha para la obtención de azúcar, secado de café, también se han encontrado sistemas rotatorios utilizados para el secado de piensos (alimentos balanceados para consumo animal) y cámaras cilíndricas rotatorias utilizadas para el secado de harina de pescado, todo esto a nivel de productos orgánicos. En el ámbito industrial también se registra la utilización de este tipo de cámaras para el secado de yesos, cementos y otro tipo de minerales granulados.

---

<sup>1</sup> Este apartado ha sido elaborado a partir de la publicación “Secado artificial de cacao. Estado del arte”, de autoría de Pablo Parra Rosero.

## 1.2. Datos socioeconómicos

Para el año 2013 la ICCO (Organización Internacional para la Comercialización del Cacao), ubica al Ecuador como el sexto productor de cacao a nivel mundial, con un volumen de 190000 toneladas métricas. Según la misma fuente para este año la producción de cacao a nivel mundial estará distribuida 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 un volumen de 1470 toneladas métricas [1]. ANECACAO (Asociación Nacional de Exportadores de Cacao de Ecuador), expone que 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, según el Banco central del Ecuador, 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].

## 1.3. Descripción de la planta de cacao

La palabra cacao proviene según G. Enríquez (2004) [4], de los vocablos mayas “Kaj” y “Kab” que en castellano quieren decir amargo y jugo respectivamente. Sobre el lugar o las culturas que dieron origen a la utilización o cultivo del cacao no existe un consenso, algunas referencias bibliográficas apuntan hacia América del Sur, en la zona amazónica como el lugar de origen de esta planta; lo cierto es que actualmente este producto es conocido y consumido en la mayoría de países del mundo.

El naturalista sueco Carl von Linneo dio el nombre de *Theobroma* a la planta de cacao en 1737, este género está conformado por 22 especies, de estas el *Theobroma cacao* L. es la de mayor importancia. Una especie de menor importancia producida en Brasil es la *Glandiflorum* [5]. El *Theobroma Cacao* L. es una planta perteneciente a la familia Malvaceae, subfamilia Byttnerioideae (Alverson et al., 1999) [6], Sousa y Figueira, 2005) [7].

#### **1.4. Variedades de cacao**

Se conocen tres grupos genéticos de cacao; Criollo, Forastero y Trinitario que vendría a ser una mezcla de las dos variedades anteriores. En Ecuador se cultiva tradicionalmente la variedad “Nacional” que debido a sus características genéticas y morfológicas se asemeja mucho al cacao Criollo. (G. Enríquez 2004) [4]. Este tipo de cacao es el denominado fino o de aroma y es el más apreciado en el mercado internacional por sus excelentes cualidades organolépticas, sin embargo, se sabe que este genotipo de cacao hoy en día es muy escaso y se realizan grandes esfuerzos para evitar su desaparición.

En los últimos años en Ecuador se ha venido experimentando con combinaciones o cruzamientos de material genético nacional-forastero y nacional-trinitario, lo cual ha marcado una disminución en la calidad del producto. (G. Enríquez 2004) [4].

#### **1.5. Procesamiento del cacao**

El grano de cacao requiere cumplir con una cadena de procesos muy particulares antes de convertirse en la materia prima básica para la elaboración del chocolate. Las etapas fundamentales de este proceso son: beneficiado del cacao, tostado, molido, prensado y conchado.

Se conoce como beneficiado del grano de cacao a las etapas de: cosecha, fermentación, secado, limpieza, selección y almacenamiento del grano.

La cosecha consiste en la selección de mazorcas maduras, posteriormente se ejecuta la recolección, partida y desgranada de dichas mazorcas.

Las etapas de fermentación y secado son las más críticas dentro de la cadena del proceso, de ellas depende las cualidades organolépticas adquiridas por el grano.

La limpieza y selección de las almendras de cacao se ejecutan luego del secado, con la finalidad de eliminar elementos extraños o almendras dañadas. En esta etapa se clasifican los granos de acuerdo a

ciertos estándares de calidad que tienen que ver con el color, tamaño y variedad o genotipo.

El almacenamiento del grano seco, limpio y clasificado, se lo realiza en sacas de yute y en pilas de no más de seis sacas de altura. Siendo el cacao un material higroscópico, se almacena el grano una vez que se ha enfriado luego del proceso de secado, en lugares libres de humedad ambiental.

### **1.5.1. Fermentación**

La fermentación es una etapa imprescindible dentro de la cadena de procesamiento del grano, ya que en esta se producen fenómenos de reacción bioquímica y de oxidación que a su vez permiten la disminución del grado de amargura y de astringencia en el sabor cacao. Esta etapa es la responsable de las cualidades de aroma y sabor del cacao, ya que durante este proceso actúan microorganismos tales como bacterias y levaduras, permitiendo que los azúcares de la pulpa formen ácidos que penetran en el cotiledón y produzcan la muerte del embrión, así como la formación de precursores de las cualidades organolépticas.

Según Portillo, Graziani y Cros (2006) [8], la fermentación involucra dos fenómenos distintos, pero, no independientes: la fermentación microbiana que es la que genera la eliminación de la pulpa mucilaginosa de las almendras o granos de cacao y las reacciones bioquímicas responsables de la modificación de la composición química al interior de las almendras, en los llamados cotiledones. En la fermentación existe una migración de ácido acético desde la pulpa hacia la almendra.

De igual manera Rosa Pérez Piza (2009) [9], identifica claramente dos fases dentro del proceso de fermentación. La fase anaeróbica, que se realiza sin la presencia del aire, una vez abiertas las mazorcas 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.

La fermentación es una acción combinada y balanceada de ácidos, alcoholes, humedad, pH y temperatura, conducente a la disminución del sabor amargo y la pérdida de teobromina. La fermentación facilita el proceso de secado y la separación de la testa o cáscara de los cotiledones. (Ramos, 2004) [10].

Varios factores influyen dentro del proceso de fermentación, el tipo o variedad del cacao (Braudeau, 1970) [11]; el tiempo de almacenamiento posterior a la cosecha y previo a la apertura de las mazorcas (Torres *et al.*, 2004) [12]; la técnica de fermentación utilizada (Nogales *et al.*, 2006) [13]; la frecuencia de remoción del grano en fermentación y el tiempo de duración de esta etapa (Puziah *et al.*, 1998) [14].

(Ligia Ortiz de Bertorelli *et al.*, 2009) [15], expone los resultados del análisis experimental realizado con distintas variedades de cacao, con y sin remoción de la masa fermentante, con y sin tiempo de almacenamiento posterior a la cosecha, para determinar las características físicas y químicas del cacao bajo diferentes condiciones de fermentado. En los resultados obtenidos puede apreciarse que efectivamente se consiguen diferentes niveles de pH, color, acidez, taninos, humedad, grasas y proteínas según la variedad y condiciones establecidas para el proceso.

Dependiendo de la variedad de cacao, podría iniciarse el proceso de fermentación inmediatamente después de la cosecha o almacenar las mazorcas durante algunos días previos al inicio de la fermentación. La remoción del grano depende de la técnica a utilizarse, puesto que podría optarse por el amontonamiento del grano o el uso de cajones perforados de madera, en dónde es factible la remoción; para el caso del fermentado en sacas, la remoción del grano no es factible.

La remoción o volteo de las almendras o granos de cacao se lo realiza para homogenizar la fermentación, la ausencia de volteo genera masas de caco mal fermentado. El volteo debe realizarse cada 24 horas en el caso de la variedad Criollo y cada 48 horas en el caso de las variedades Forastero y Trinitario. (Saltos, Sánchez y Anzules, 2006) [16].

En la Figura 1, se muestra la secuencia del proceso de beneficiado en imágenes que muestran: la mata de cacao, vaina o mazorca de caco en el proceso de cosecha, mazorca abierta, grano extraído de la vaina, proceso de fermentación en cajas perforadas de madera, grano de cacao fermentado en su etapa final, en donde se aprecia que el mucílago ha desaparecido en su totalidad; finalmente aparecen las imágenes correspondientes al secado natural del grano por efecto de exposición directa al sol y el cacao debidamente almacenado en sacas de yute.

Un cacao correctamente fermentado presentará ciertas características tales como: aroma agradable, sabor ligeramente amargo, color marrón achocolatado en su cáscara o testa, la almendra toma un aspecto inflado o hinchado debido a la humedad adquirida y la cáscara puede separarse del cotiledón con relativa facilidad. Cuando las almendras no han sido correctamente fermentadas adquieren las siguientes características: sabor muy amargo o astringente, aroma desagradable, el color de la testa es blanco, las almendras se quedan aplanadas y la cáscara se encuentra muy adherida al cotiledón.



Figura 1. Proceso de beneficiado del Cacao.  
Fuente: Elaboración propia

### 1.5.2. Secado

El proceso de secado del grano de cacao se lo puede realizar de forma natural o artificial. 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 y el sabor del cacao. En esta etapa además se desarrolla la pigmentación de color marrón a partir de los compuestos fenólicos. (Cros y Jeanjean, 1995) [17].

Según (Enríquez 1993) [18], el objetivo principal del proceso de secado es que el cacao termine de desarrollar el sabor a chocolate que inició durante la fermentación y las almendras adquieren el color marrón o pardo típico del caco correctamente fermentado y secado.

Para Rincón (1999) [19], de nada sirve que se haya realizado una buena fermentación si el secado no se hace de una forma adecuada ya que el cacao mal secado no alcanzará el aroma y sabor adecuados. Según el mismo autor, durante el secado se eliminará el exceso de humedad y de acidez de las almendras recién fermentadas desde un aproximado del 55% hasta el 7%, valor de humedad que garantiza su posterior almacenaje y comercialización.

Un exitoso proceso de secado permite alcanzar al cacao un pH óptimo de 5.1 a 5.4, cualquier muestra de almendras con un pH inferior a 5.0 revela la presencia de ácidos no volátiles, lo cual genera aromas desagradables, disminuyendo la calidad del chocolate. (Armijos, 2002) [20].

El secado debe hacerse de forma lenta y gradual (Jiménez 2000) [21], el proceso de secado violento no permite lograr un secado homogéneo e interrumpe la hidrólisis enzimática, generando almendras de color púrpura con sabor astringente. El secado violento además produce un endurecimiento rápido de la testa o cascarilla, lo cual impide la salida o difusión de los ácidos volátiles generando almendras con sabor ácido. (Ramos, 2000) [37].

## 1.6. Secado natural

Se denomina secado natural del cacao al proceso de secado por exposición al sol y consiste en aprovechar el calor generado por los rayos solares para secar lenta y paulatinamente las almendras de cacao. Según Enríquez (2004) [4], con esta técnica de secado las almendras completan satisfactoriamente los cambios bioquímicos internos, logrando buenas características organolépticas. El mismo autor expone que este tipo de secado se lo puede realizar utilizando tendales, los mismos que pueden ser construidos de varias formas, utilizando madera, bambú, cemento u otros materiales refractarios. En el secado natural se realizan volteos del grano con poca frecuencia durante los primeros días y con mayor frecuencia durante los últimos días de secado. Según las horas de sol y la intensidad de los rayos solares, el proceso puede durar entre 3 y 12 o hasta quince días.

Realmente no existe un consenso en la bibliografía revisada sobre el tiempo que dura el secado de cacao, esto se debe a que, al tratarse de un proceso empírico y además fuertemente dependiente de las condiciones climáticas ambientales, el tiempo de exposición del grano no está determinado de forma precisa. En la Figura 2 se muestran algunos sistemas de secado natural, a) Tendales de exposición directa en patios o plataformas de cemento, b) Secador en plataforma flotante con cubierta transparente, c) Secador de plataforma flotante con exposición directa y d) Secador de plataforma o de techo móvil.



Figura 2. Tipos de Secadores al natural de Cacao.

Fuente: Elaboración propia

Según Rosa Pérez Piza (2009) [9], en el secado natural deben aprovecharse los rayos del sol durante el día esparciendo las

almendras de cacao en el tendal y apilándolos durante la noche. Para lograr mejores resultados, la misma autora recomienda secar en capa gruesa durante el primer día, e ir disminuyendo el grosor de la capa de almendras durante los días siguientes.

En el año de 2009 los autores: A. O. Fagunwa, O. A. Koya y M.O. Faborode [22], presentaron su trabajo sobre el desarrollo de un secador solar intermitente para granos de cacao. El sistema cuenta con almacenamiento de energía térmica y combina los mecanismos de calentamiento por convección y por radiación.

En la Figura 3 se muestra el diagrama para el secador. La presencia de una cámara para almacenamiento de calor es la que permite que el proceso de secado continúe por la noche o en aquellos períodos de ausencia de sol, por ello el nombre de intermitente.

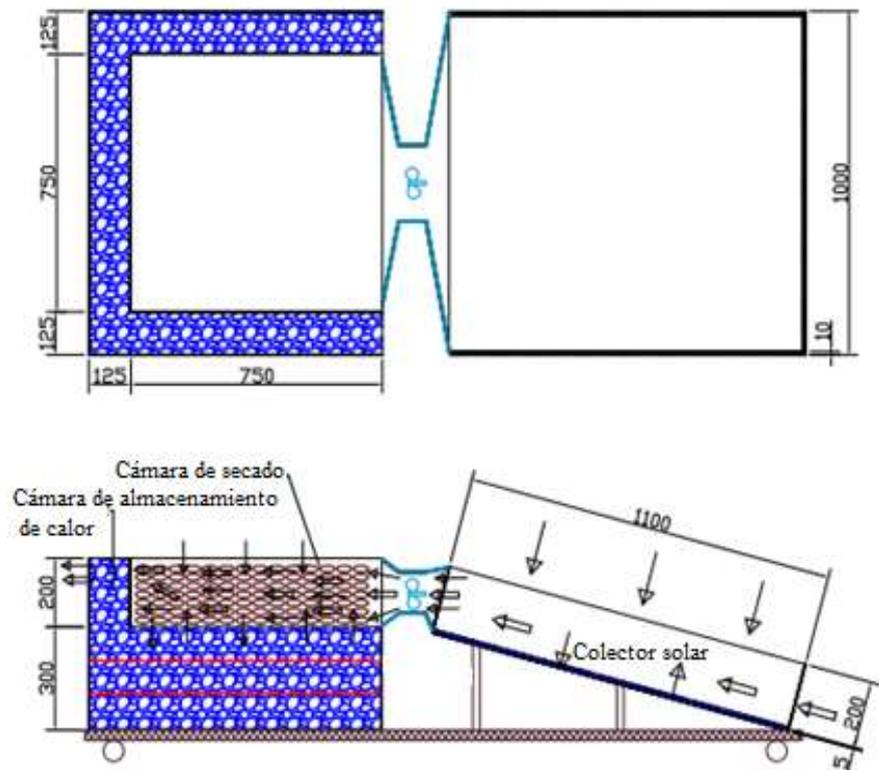


Figura 3. Secador solar intermitente.  
Fuente: A.O. Fagunwa. O.A. Koya y M.O [22].

## 1.7. Secado artificial

El nivel de humedad contenido varía de un producto a otro, la sal de mesa por ejemplo tiene un 0.5% de humedad, el cacao fermentado tiene un 55% de humedad, el maíz un 20%. El secado es un término relativo, se refiere realmente a un proceso de disminución de líquido contenido en un sólido. De igual manera los productos a secar tienen formas diferentes, escamas, gránulos, cristales, polvo, etc., además poseen propiedades físico-químicas diferentes. El líquido contenido puede estar concentrado en la superficie del sólido, en su parte interna o en ambas partes. La temperatura que puede soportar un sólido en el proceso de secado varía de un producto a otro y los cambios de temperatura también dependen de la cinética de secado de cada sólido. Estas razones argumentan el hecho que en el mercado industrial existan una gran variedad de tipos de secadores y sus diferencias radican esencialmente en la forma en que se mueven los sólidos a través de la zona de secado y en la forma en que se realiza la transferencia de calor. (Warren L. McCabe. et al. 2007) [23].

Dentro de la teoría de operaciones unitarias, los procesos de secado son clasificados como directos o adiabáticos e indirectos o no adiabáticos.

Los secadores adiabáticos son aquellos que exponen el sólido a un gas caliente, generalmente aire. Dentro de este tipo de secadores de pueden identificar:

Secadores con circulación superficial, en donde el gas circula sobre el lecho o la superficie del sólido a secar.

Secadores con circulación a través, utilizado para el secado de sólidos granulares gruesos, colocados sobre una rejilla.

Secadores descendentes, cuyo funcionamiento consiste en formar una lluvia de sólidos a través de un flujo de gases calientes, esto da lugar al arrastre no deseado de partículas finas.

Secadores de lecho fluidizado, en donde el gas caliente pasa a través de los sólidos con una velocidad suficiente para fluidizar el lecho.

Secadores de mezcla y separación, arrastrando los sólidos con un flujo de gas a altas velocidades y transportándolos neumáticamente desde un dispositivo de mezcla hacia un separador mecánico. En la Figura 4 se puede apreciar los distintos tipos de secadores adiabáticos. En a) se aprecia el secado por circulación tangencial de aire caliente; en b) se observa un sistema de secado con circulación transversal de aire caliente; en c) se muestra un secador rotatorio con circulación transversal; en d) secador de material agitado y en e) se observa un secador tipo spray.

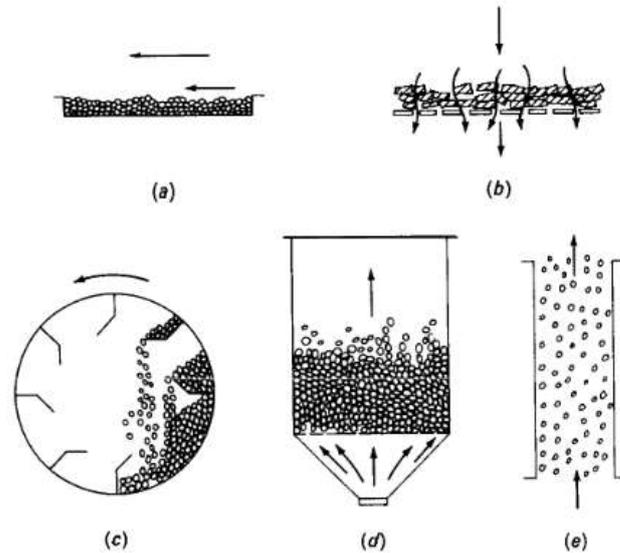


Figura 4. Secadores adiabáticos.

Fuente: Manual de Operaciones Unitarias de Perry [42].

En los secadores no adiabáticos la transferencia de calor se la puede realizar de las siguientes maneras:

Esparciendo los sólidos sobre una superficie horizontal que es calentada eléctricamente o utilizando vapor de agua o agua caliente. Puede utilizarse opcionalmente una fuente de calor radiante situada en la parte superior del sólido.

Removiendo los sólidos sobre una superficie caliente de forma cilíndrica, utilizando para el efecto, agitadores o transportadores de tipo pala o tornillo.

Deslizando el sólido por efecto de gravedad sobre una superficie caliente e inclinada.

### 1.7.1. Transferencia de masa y de energía

Todos los procesos de secado tienen como función esencial la eliminación de sustancias volátiles (humedad) a partir de una mezcla para producir un producto sólido. La Figura 5 proporciona una representación detallada del fenómeno de transferencia de calor y de masa entre el material a secarse y el entorno que lo rodea. [24].

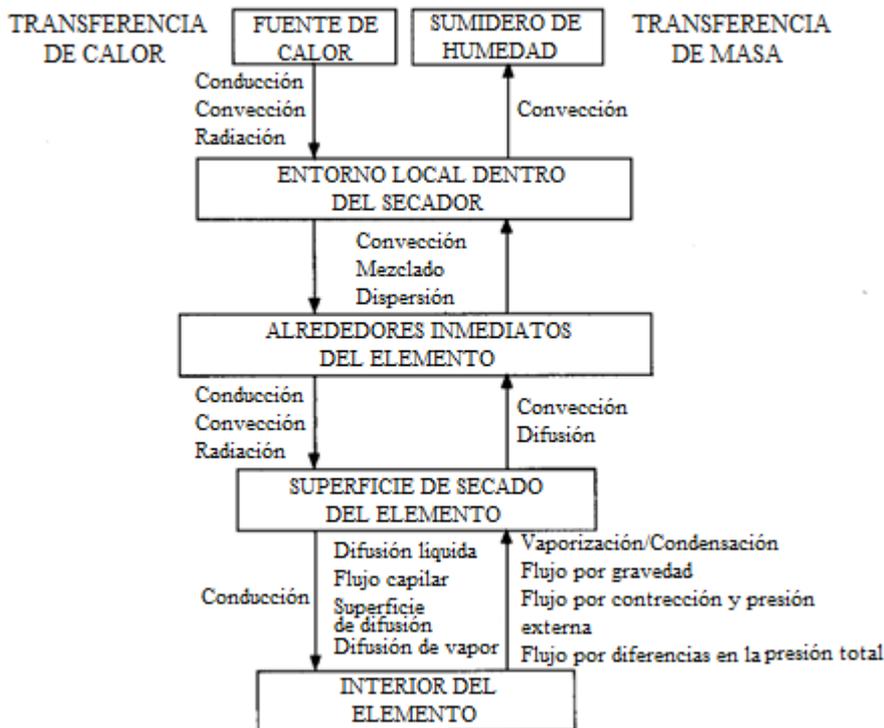


Figura 5. Descripción de los fenómenos de transferencia de calor y de masa. Fuente: Bruin, S. and Luyben, [38].

En general, el proceso de secado implica la utilización de técnicas térmicas, consecuentemente la aplicación de calor, comúnmente por convección a partir de una corriente de aire. Durante el secado por convección de sólidos, se producen dos

procesos simultáneamente, a saber: la transferencia de energía desde el ambiente circundante; y la transferencia de humedad desde la parte interna del sólido. Por lo tanto, la operación de secado puede ser considerada como un proceso simultáneo de transferencia de calor y de masa. Por otra parte, la velocidad a la que se lleva a cabo el secado depende de magnitud relativa de los dos procesos.

### 1.7.2. Curva de secado

Pedro Fito Maupoey [25], en su obra “Introducción al secado de alimentos por aire caliente” argumenta que, en un experimento de secado, manteniendo constantes todas las variables del proceso de secado y obteniendo periódicamente el valor de humedad del sólido, entonces puede graficarse la curva de la humedad  $X_w$  en función del tiempo, obteniéndose la curva de secado, la misma que representa el comportamiento de la humedad en un fenómeno de secado de alimentos de forma general. En la Figura 6 se muestra la curva típica de secado.  $X_w$ , representa la humedad;  $t$  el tiempo;  $X_{wo}$ , la humedad inicial del sólido;  $X_{wc}$ , el valor de humedad crítica y  $X_{we}$ , la humedad de equilibrio.

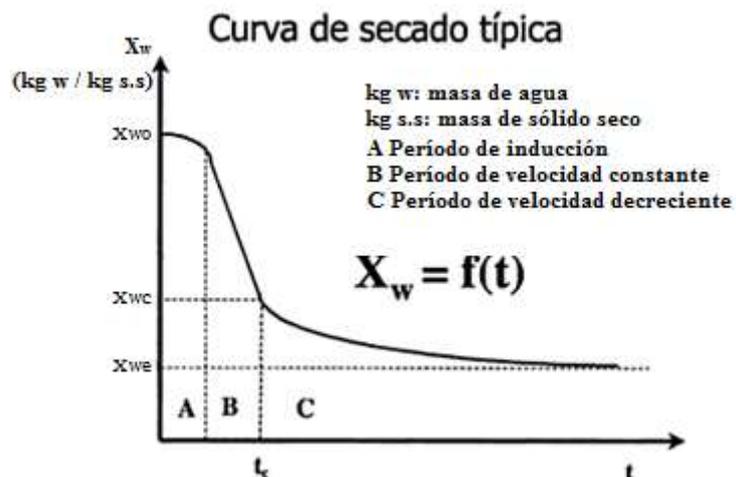


Figura 6. Curva típica de secado.  
Fuente: Pedro Fito, [25].

Se conoce como humedad crítica de un sólido al punto en el que la velocidad de secado deja de ser constante y empieza a ser

decreciente, a estos períodos de secado se los llama antecrítico y postcrítico.

La humedad de equilibrio se refiere al valor de humedad que se alcanza cuando un sólido húmedo se pone en contacto con aire a ciertos valores de temperatura y humedad constantes. Cuando la presión parcial del agua contenida en el sólido húmedo es igual a la presión de vapor del agua contenida en el aire, se alcanzan las condiciones de equilibrio.

### 1.7.3. Velocidad de secado

En (1) se establece la variación de humedad con respecto al tiempo, es decir la velocidad de secado. La rapidez con la que disminuye el contenido de humedad de los sólidos se conoce como velocidad de secado. (P.F. Maupoey et al. 2001) [25]. En la Figura 7, se observa el comportamiento de la velocidad de secado.

$$V_s = -d(X_w)/dt \quad (1)$$

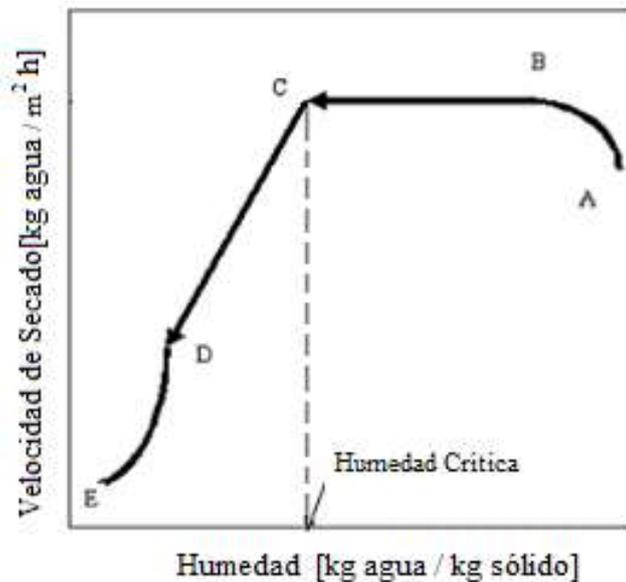


Figura 7. Velocidad de secado.  
Fuente: Elaboración propia

La pendiente de la curva  $d(X_w)/dt$  representa el valor de la velocidad de secado. La velocidad de secado no es la misma durante todo el proceso. La eliminación de humedad se realiza en una serie de etapas en las que la velocidad de secado es diferente. A es el punto de partida del proceso. Durante el tramo AB, el sólido y el agua contenida se van calentando lentamente, en el tramo BC se produce una gran disminución del contenido de agua, manteniéndose constante la velocidad de secado. Al alcanzar el valor de humedad crítica, punto C, se produce un cambio brusco, el proceso de extracción de humedad se vuelve lento, decreciendo la velocidad de secado en la fase CD.

#### 1.7.4. Tiempo de secado

El tiempo de secado se puede determinar considerando las dos etapas más importantes de la curva de secado. Cuando el proceso está en la zona de secado a velocidad constante  $V_c$ , entonces el tiempo para esta zona se establece en (2). (P.F. Maupoey et al. 2001) [25].

$$t_c = \frac{m_s(X_0 - X_c)}{\frac{d(m_w)}{dt}} = (X_0 - X_c)/V_c \quad (2)$$

En dónde  $t_c$  es el tiempo de secado a velocidad constante,  $m_s$  es la masa del sólido a secar,  $X_0$  es la humedad inicial,  $X_c$  es la humedad en el punto crítico,  $m_w$  es la masa de agua y  $V_c$  es la velocidad de secado constante.

Cuando el proceso está en la fase de secado a velocidad decreciente, entonces el tiempo se calcula según (3). (P.F. Maupoey et al. 2001) [25].

$$t_d = (X_c/V_c) \ln(X_c/V_c) \quad (3)$$

Para las dos ecuaciones, las humedades  $X$ , están expresadas en base seca.

## **1.8. Tipos de secadores artificiales**

En la industria de los alimentos se utilizan diferentes tipos de secadores artificiales, entre los más importantes se pueden identificar a los secadores directos y a los secadores indirectos. A continuación, se expone la clasificación realizada por (P.F. Maupoey et al. 2001) [25].

### **1.8.1. Secadores directos**

Este tipo de secadores utilizan la transmisión de calor por convección, a través de corrientes de gases calientes que entran en contacto con el producto a secar y arrastran fuera del secador los flujos evaporados desde el sólido húmedo.

Los gases calientes utilizados para el secado de alimentos pueden ser:

- Aire calentado por vapor de agua
- Productos de combustión
- Gases inertes
- Vapor recalentado
- Aire calentado por radiación solar.

### **1.8.2. Secadores indirectos**

Este tipo de secadores aprovechan la transmisión de calor por conducción, utilizando normalmente una pared metálica para el efecto.

Las fuentes de calor pueden ser:

- Vapor condensado.
- Agua caliente.
- Aceites térmicos.
- Gases de combustión.
- Resistencia eléctrica.

Según los mismos autores, los secadores directos e indirectos pueden trabajar en régimen continuo o intermitente. Además, los secadores indirectos permiten la recuperación del disolvente y son sistemas apropiados para el secado a bajas presiones y en atmósferas inertes, pudiendo ser utilizados para deshidratar productos termolábiles o fácilmente oxidables. Los secadores por radiación son sistemas que utilizan energía radiante para extraer la humedad del producto. La energía radiante se la obtiene eléctricamente por medio de infrarrojos o por medio de refractarios calentados con gas. El costo de la energía necesaria para su operación es considerablemente mayor que el costo del combustible utilizado por los sistemas directos o indirectos. Los secadores dieléctricos generan calor al interior del sólido a secar, utilizando un campo eléctrico de alta frecuencia, el cual produce fricción molecular que a su vez genera el calor necesario para la evaporación. Este tipo de secadores son muy poco utilizados por su alto costo de operación.

La Figura 8 presenta una clasificación para sistemas de secado de alimentos establecida en base a las condiciones físicas de calor y a la eliminación de vapor de agua. La selección de un secador apropiado para un proceso particular de secado resulta ser un problema complejo, por lo que muchos factores tienen que ser tomados en cuenta. Sin embargo, en última instancia, la selección general y el diseño de un sistema de secado para un material en particular está sujeto a la conjugación de condiciones favorables de la calidad del producto y el costo del sistema. [24].

A nivel industrial se utilizan varios tipos de secadores, los rotatorios son ampliamente aplicados, algunos de ellos han sido tratados en la literatura científica: (Savaresi et. al., 2000) [26], describe una aplicación para un secador rotatorio de azúcar; (Iguaz et. al., 2002) [27], presenta un modelo aplicado a desechos vegetales; (Merino A., 2003) [28], plantea el modelo de un secador rotatorio para pulpa de remolacha, en este trabajo se presentan además los resultados de la simulación realizada en base al modelo planteado. (Castaño *et al*,2009) [29], presenta un modelo matemático para un secador rotatorio de arena con flujo de aire en isocorriente.

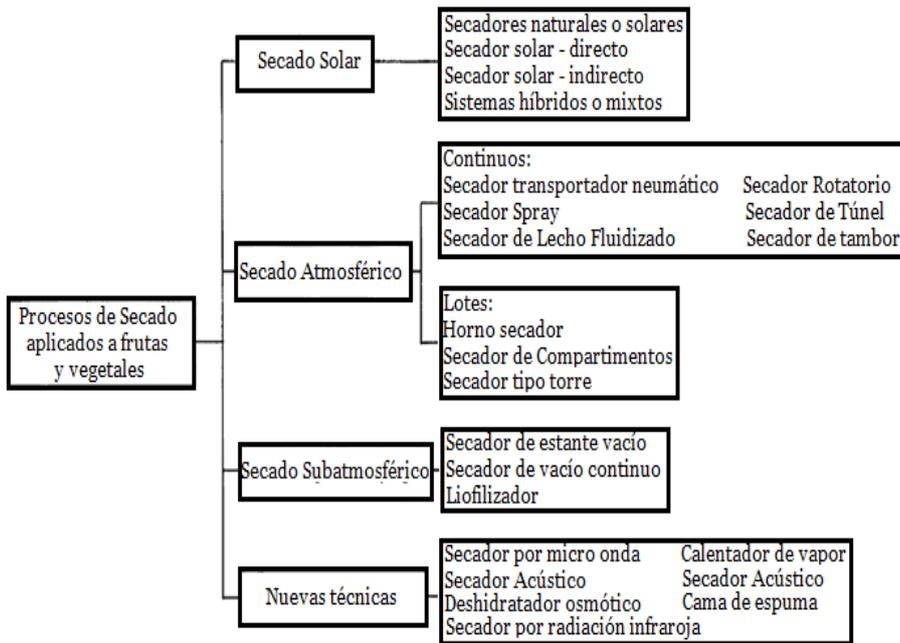


Figura 8. Clasificación de sistemas de secado para frutas y vegetales.

Fuente: Jayaraman, K.S. and Das Gupta, D.K. [30].

## 1.9. Secado artificial de cacao

Para el secado artificial 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 del cacao en Ecuador se utilizan mayoritariamente secadores artificiales estacionarios. Enríquez (2004) [4], menciona algunos tipos de secadores artificiales: estufas, secadoras con leña, secadoras de combustión, secadoras eléctricas y la secadora de cacao tipo Samoa. Según el mismo autor, 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.

En Brasil, primer país en la lista de productores en América y quinto a nivel mundial, todas las haciendas productoras de cacao están

equipadas con secadores de leña, para reemplazar al secado natural cuando las condiciones climáticas lo demandan. (G. Enríquez, 2004) [4].

La secadora tipo Samoa consiste en un tubo de metal, en cuyo interior se pone la fuente de calor, la misma que puede ser leña, carbón vegetal, diésel, etc. Sobre el tubo y a una distancia aproximada de 1,20 metros se coloca una cama, plancha o plataforma perforada, sobre la cual se tenderá una capa fina de granos de cacao. La parte inferior, debajo de la plataforma debe estar totalmente cerrada, constituyéndose de esta forma en una cámara de aire caliente. Si no se tienen las debidas precauciones, suelen ocurrir contaminaciones con humos de combustión, pero de manera general el secador tipo Samoa es adecuado para sustituir al secado natural por exposición directa al sol en épocas cuyas condiciones ambientales son adversas al proceso de secado. (G. Enríquez, 1987) [31]. Una variación del secador tipo Samoa, consiste en una cámara de aire caliente totalmente cerrada, cuyo techo está constituido por una plancha perforada en donde se coloca el cacao. La diferencia con el secador tradicional tipo Samoa está en que no se utiliza el tubo interno, simplemente el aire caliente es alimentado desde una fuente de calor externa utilizando un ventilador. En la Figura 9 se ilustra un sistema de secado con convección forzada. El secador tipo Samoa utiliza convección natural, es decir que el flujo de aire sucede por diferencia de densidades entre el aire caliente y el aire frío o a temperatura ambiental.



Figura 9. Secador artificial de cacao por convección forzada.  
Fuente: Elaboración propia

Tinoco y Ospina (2010) [32], realizaron un análisis del proceso de deshidratación del cacao con miras a la disminución del tiempo de secado. En este trabajo realizaron dos pruebas experimentales de secado y análisis computacional basado en elementos finitos. Para la primera prueba se utilizó un horno de gas con bandejas perforadas dispuestas verticalmente y una muestra de cacao con una masa de 13kg aproximadamente. Para el segundo experimento se utilizó un horno con flujo de aire a la entrada y un extractor de aire y una temperatura de 55 °C. Luego de analizar las simulaciones realizadas a nivel computacional y 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. Recomiendan no remover grandes cantidades de vapor de agua del aire ya que el aire seco deshidrata la superficie de los granos, provocando quemaduras.

Los autores (C.L. Hii et al. 2011) [33], realizaron una investigación para estudiar la cinética de secado de las capas individuales del grano de cacao, estas son la testa o cascarilla 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 un 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 del contenido de humedad 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, 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 el cotiledón.

En el año 2010, P. Parra et al, presentan un trabajo orientado al modelado y simulación de una cámara para secado de cacao, la investigación se desarrolla para un sistema de secado que consiste en un

cilindro rotatorio con convección forzada de aire y flujo paralelo, en este caso el sistema trabaja por lotes.

Dentro del ámbito del modelado también se encuentran referencias bibliográficas para el área de secado artificial de cacao. En el año 2008, los autores: C.L. Hii, C.L. Law y M. Cloke [35], publican un trabajo de 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 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  $\chi^2$  y error cuadrático medio RMSE, entre los valores de predicción de los modelos y los valores obtenidos experimentalmente. Los modelos utilizados son semi teóricos o empíricos están basados en el modelo teórico de secado planteado 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 a una temperatura de 60 °C y un secador solar.

C.L. Hii, C.L. Law y M. Cloke [35], utilizaron los modelos expuestos en la Tabla 1. Los autores concluyen que el nuevo modelo describe de mejor manera la cinética de secado del cacao en capas finas, para las técnicas natural y artificial de secado.

El último aporte registrado en torno al secado artificial de cacao fue publicado por C.L. Hii, C.L. Law y M.C. Law en el año 2013 [36], en su investigación sobre la simulación de la transferencia de calor y de masa en el proceso de secado de cacao, utilizando una bomba de calor. En la Figura 10, se observa un esquema del sistema utilizado.

Tabla 1. Modelos de secado de capa fina probados para el secado de cacao

MODELO	ECUACIÓN
Newton	$MR = \exp(-kt)$
Henderson y Pabis	$MR = a \exp(-kt)$
Page	$MR = \exp(-kt^n)$
Logarítmico	$MR = a \exp(-kt) + c$
Modelo de dos términos	$MR = a \exp(-kt) + c \exp(-gt)$
Verma et al.	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-gt)$
Enfoque de Difusión	$MR = a \exp(-kt) + (1 - a) \exp(-kgt)$
Midili - Kucuk	$MR = a \exp(-kt^n) + bt$
Wang y Smith	$MR = 1 + at + bt^2$
Modelo Nuevo	$MR = a \exp(-kt^n) + c \exp(-gt^n)$

Fuente: C.L. Hii et al, 2013 [36].

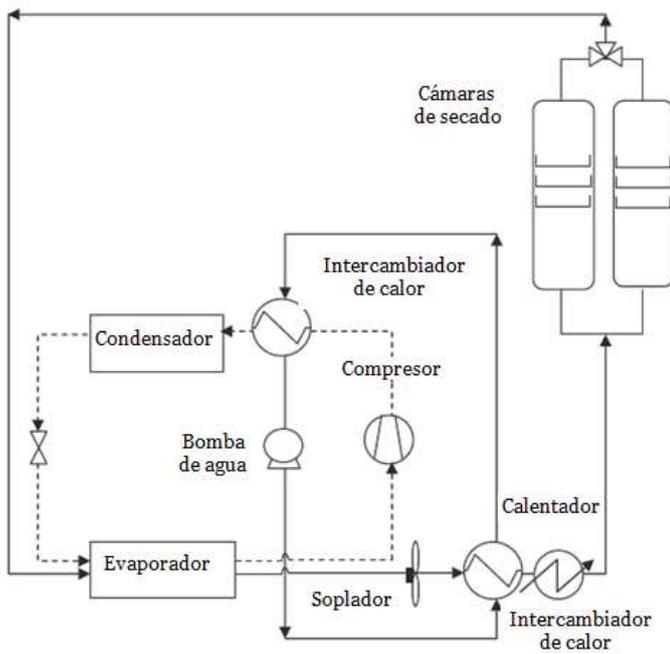


Figura 10. Diagrama esquemático del secador basado en bomba de calor.  
Fuente: C.L. Hii, C.L. Law y M.C. Law en el año 2013 [36].

El secador utilizado para la experimentación, es un prototipo constituido por la bomba de calor, intercambiador de calor, cámaras de secado y ductos para el flujo de aire. La bomba de calor está conformada por: compresor, bomba de agua, condensador y ventilador. Para la simulación se asumió que el grano de cacao tiene forma elipsoidal y se trabajó con un modelo matemático basado en el modelo de conducción de Fourier para el caso de la transferencia de energía; y en el modelo de difusividad de Fick para el caso de la transferencia de masa. Los autores concluyen haber notado una gran concordancia entre los datos experimentales y las predicciones arrojadas por el modelo en la relación a la humedad y a los perfiles de temperatura de las almendras de cacao. No observaron una mejoría significativa al incorporar un factor de encogimiento al modelo. Finalmente plantean la posibilidad a futuro de considerar la mejora del modelo de difusividad e incluir la testa y las distintas capas del cotiledón en el modelo.

De acuerdo a la bibliografía consultada, el proceso de secado de cacao mayoritariamente es de tipo natural. Con respecto al secado artificial del cacao, básicamente se encuentra información de sistemas estacionarios que aprovechan el mecanismo de convección natural o convección forzada de aire.

A la fecha no se encuentra en la bibliografía especializada ninguna investigación que haga referencia al secado artificial de cacao en donde además de utilizar la convección forzada, también se ponga en movimiento continuo a la masa de grano a secar.

Frente a los antecedentes expuestos, se puede afirmar que:

Existe suficiente información sobre trabajos de investigación desarrollados en torno a los sistemas de secado artificial utilizados a nivel industrial de manera general, menor es el número de trabajos enfocados al secado artificial de alimentos y muy escasas son las investigaciones centradas en el secado artificial de cacao.

Se ha encontrado literatura especializada que describe sistemas de secado artificial, que utilizan el flujo de aire caliente como agente de secado, manteniendo al grano de cacao estático con remociones periódicas y que trabajan u operan por lotes.

En los últimos años se han estudiado varios modelos matemáticos para el secado de cacao y se los ha validado con datos experimentales obtenidos a nivel de laboratorio, se registran dos trabajos científicos en los cuales se plantea un modelo matemático de un sistema secador artificial e industrial específicamente diseñado para granos de cacao [39]; dicho modelo en el segundo trabajo se utiliza para el diseño e implementación de controladores predictivos basados en modelo [40].

Se sugiere realizar una futura investigación con miras a plantear un modelo paramétrico para un secador artificial de cacao, que utilice el fenómeno de convección con flujo de aire caliente y que incorpore como novedad el movimiento rotacional del grano, así como un flujo de alimentación continuo.

El diseño y construcción de una planta industrial piloto, integrada por una cámara de combustión para generar aire caliente y un cilindro rotatorio para secar granos de cacao podría ser útil para la obtención de datos experimentales que permitan la validación del modelo planteado.

## **Capítulo 2**

### **Descripción de planta piloto para secado de cacao**

#### **2.1. Antecedentes**

En la industria ecuatoriana del cacao se utilizan básicamente sistemas estáticos de secado, en las zonas agrícolas dedicadas al cultivo de cacao la única opción es la utilización del secado natural. En esta investigación se busca implementar un sistema de secado alternativo, el cual permita procesar grano húmedo y previamente fermentado y que además de forma permanente el cacao sea expuesto a una corriente de aire caliente. La utilización de una cámara o cilindro rotatorio, un generador de aire caliente y un sistema de alimentación de recolección de grano hace factible una nueva forma alternativa para el secado de cacao.

En esta sección se proporcionan datos generales sobre la implementación de la planta piloto para secado de cacao, no está dentro de los objetivos de esta investigación proporcionar un riguroso detalle mecánico del sistema, los criterios básicos para la implementación se han tomado de [41], [43] y [44].

El buen funcionamiento de un secador reviste gran importancia, debe tenerse en cuenta la calidad del producto final, el cual debe poseer las características óptimas para su posterior utilización. [45].

## 2.2. Componentes estructurales

Los parámetros a tener en consideración en la implementación de la cámara cilíndrica de secado, según Orduz [42] son:

- Relación L/D, en donde L es la longitud del cilindro y D representa el diámetro.
- Inclinación, se recomienda implementar un pequeño grado de inclinación a favor del sentido de descarga o avance del producto.
- Velocidad de rotación. En este caso se requiere establecer un tiempo de residencia alto, por lo tanto, la velocidad de rotación será muy baja, alrededor de 1 rpm.
- Tiempo de residencia del material. Se refiere al tiempo que el material a secar debe permanecer dentro de la cámara de secado para garantizar la disminución del nivel de humedad requerida.
- Desplazamiento del material. Dependiendo del tipo de material a secar, se debe diseñar una estructura interna en el cilindro de tal forma que garantice el avance del producto en la dirección apropiada.
- Cantidad de producto. El dimensionamiento de la cámara responde fundamentalmente al tipo y a la cantidad de producto a secar.

Para la implementación de la planta piloto de secado, se consideró un esquema utilizado para cilindros rotatorios en general. En la Figura 11 se presenta el diagrama de flujo para el secador de cacao.



Figura 11. Diagrama de diseño  
Fuente: Santiago Orduz. [42]

En la Figura 12, se muestra una imagen con la estructura general del sistema de secado para cacao. Como una alternativa que permita disminuir el efecto de quemaduras en el grano por efecto del secado desarrollado con transferencia de calor por conductividad, se plantea la utilización de una cámara cilíndrica rotatoria. Este sistema permitirá mantener al cacao en constante movimiento, permitiendo que el efecto de transferencia de calor entre la cámara y el grano sea mínimo y a la vez que la transferencia de calor por convección se ejecute con relativa facilidad.

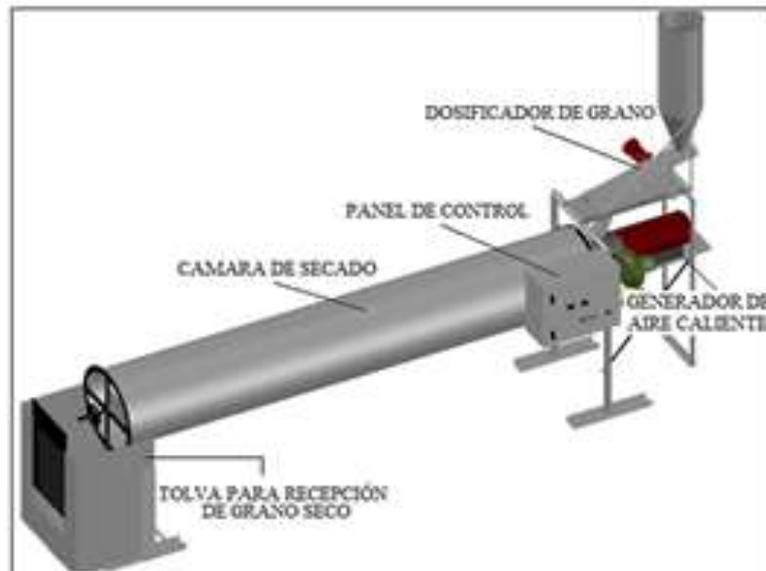


Figura 12. Estructura general del sistema para secado de Cacao.  
Fuente: P. Parra Rosero. [40].

Se pueden apreciar las partes o componentes principales como son: Dosificador de grano, generador de aire caliente, gabinete o panel de control, cámara cilíndrica de secado y la tolva para recolección de producto seco. Se utilizan dos motores de corriente alterna, uno para el sistema de alimentación o dosificación de grano y otro que hace factible la rotación de la cámara de secado. El dimensionamiento de la planta de secado obedece a la propuesta de obtener un sistema “prototipo”, es decir que sea útil para el desarrollo de pruebas experimentales y que además tenga la capacidad operativa para el secado de cosechas provenientes de productores a baja escala. Toda la estructura está construida con láminas,

tubos, varillas y ángulos de hierro dulce, la cámara de secado está pintada con varias capas de pintura para soportar temperaturas de hasta 200 °C.

### 2.3. Dosificador de granos de cacao

El sistema o etapa de dosificación está compuesto de una tolva estática que almacena cacao fermentado con una humedad promedio del 35%, en su parte inferior el grano descende por efecto de gravedad y es recibido por un canal vibratorio. La vibración del canal es efectuada con un motor de corriente alterna, el canal conecta la salida de la tolva con el ducto de alimentación de grano dispuesto a la entrada del cilindro rotatorio. En la figura 13 se muestra el esquema del sistema de dosificación planteado.

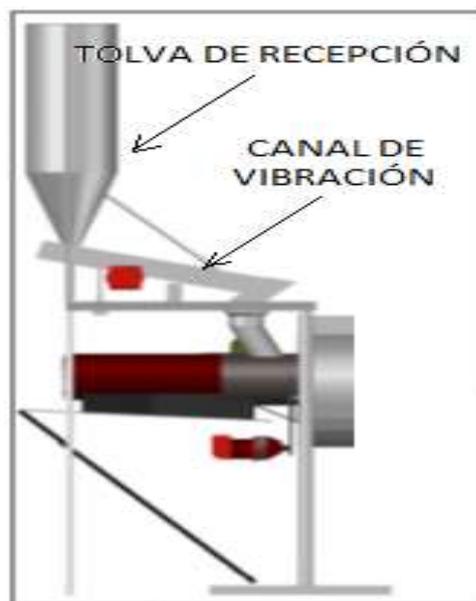


Figura 13. Sistema dosificador de granos de cacao.  
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 2 se muestran las principales características del sistema de dosificación. El material de construcción de esta sección es hierro de 0.0015 m de espesor.

Tabla 2. Características del sistema dosificador de cacao.

Característica	Dimensión
Diámetro superior	0.31 [m]
Diámetro inferior	0.1 [m]
Altura	0.97 [m]
Capacidad	50 [kg]
Longitud canal vibración	0.8 [m]
Potencia variador de frecuencia	0.746 [kW]
Capacidad de dosificación	0.0005-0.010 [kg/s]

Fuente: Elaboración propia

Un sistema motor reductor trifásico se utiliza para proporcionar el movimiento al canal de vibración, el cual es acoplado a través de un bocín de fibra de nylon y de eje descentrado. Las características específicas del motor reductor se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Características del motor reductor (Sistema dosificador).

Característica	Dimensión
Alimentación	220 [V]
Velocidad angular	1650 [rpm]
Corriente	2.5 [A]
Potencia	0.55 [kW]

Fuente: Elaboración propia

El dimensionamiento del sistema está expuesto en la Figura 14 a través de una vista frontal y una vista lateral del dosificador de grano.

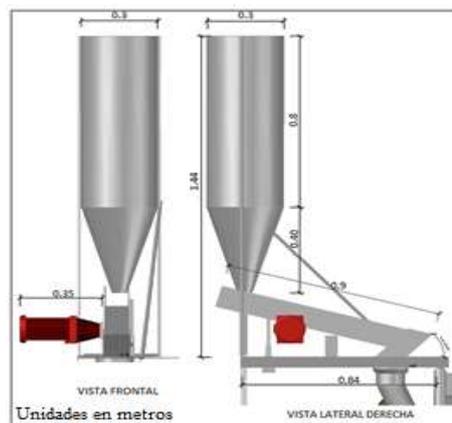


Figura 14. Dimensiones. Dosificador de granos de cacao.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 15 se puede apreciar una fotografía del sistema de dosificación implementado.



Figura 15. Imagen de planta. Dosificador de granos de cacao.  
Fuente: Elaboración propia

## 2.4. Generador de aire caliente

Para la extracción forzada de humedad del cacao se utiliza aire caliente, el mismo que es obtenido tomando aire a temperatura ambiente y calentándolo en una cámara de combustión que funciona con gas licuado de petróleo.

Se realizó la selección de un equipo comercial para la etapa de generación de aire caliente, considerando el consumo de combustible, el flujo másico de aire y el rango de temperatura de trabajo como características fundamentales. En el comercio local se pudo ubicar un equipo que básicamente es un kit integrado que incluye la hélice de absorción de aire y el quemador de GLP instalados en una cámara cilíndrica portátil. La marca del equipo es Munters Sial y cuenta con un sistema de encendido electrónico directo, en la Figura 16 se puede observar la imagen real del equipo descrito en esta sección.



Figura 16. Imagen de planta. Generador de aire caliente.  
Fuente: Elaboración propia

La caracterización del generador de aire caliente se lo muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Características del generador de aire caliente.

<b>Característica</b>	<b>Dimensión / Tipo</b>
Alimentación	110 [V]
Corriente	0.81 [A]
Potencia	0.093 [kW]
Combustible	GLP
Presión máxima	250 [PSI]
Presión mínima	40 [PSI]
Rango de temperatura	40 – 120 [ °C]

Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de proveer un mayor flujo másico de aire caliente se implementó una toma auxiliar de aire frío (temperatura ambiente), integrada por un soplador comercial de 0.186 [kW] de potencia. El soplador o generador de aire frío es activado por un motor monofásico de 110 [V] y cuenta con una regulación mecánica para el flujo de aire. En la Figura 17, se muestra la imagen del sistema descrito en este párrafo.



Figura 17. Imagen de planta. Generador de aire frío.  
Fuente: Elaboración propia

## 2.5. Cámara de secado

La cámara de secado está constituida por un cilindro rotatorio construido con láminas de hierro negro; esta cámara tiene la capacidad de recibir el flujo másico de cacao proporcionado por el sistema de dosificación, mantener en movimiento lineal y rotacional a los granos de cacao durante un tiempo de residencia apropiado y permitir el contacto entre el flujo de aire caliente y los granos de cacao. En la Tabla 5 se exponen los valores correspondientes a las dimensiones de la cámara de secado.

La parte más importante de la cámara de secado lo constituye su estructura interna, un juego de vuelos a aletas diseñados y dispuestos de tal forma que se pueda aprovechar la rotación del cilindro para recolectar el grano depositado en la base o cama y elevarlo hasta la parte superior para dejarlo caer en forma de cortina. Longitudinalmente fluye una corriente de aire caliente, el mismo que es proporcionado por el generador que está conectado a la entrada de la cámara.

El flujo másico de aire caliente es paralelo a la dirección de avance del grano de cacao, de hecho, el avance o movimiento del grano obedece al flujo de aire caliente.

Tabla 5. Dimensiones de la cámara de secado

<b>DIMENSIONES DEL CILINDRO</b>		<b>Lámina de Acero A.36</b>	
Diámetro útil	0,6 [m]	Espesor	0,004 [m]
Ralación L/D	6	Largo	3,6 [m]
Longitud	3,6 [m]	Ancho	1,88 [m]
Área útil	0,28274 [m <sup>2</sup> ]	Densidad	7850 [ kg/m <sup>3</sup> ]
Volumen	1,0178 [m <sup>3</sup> ]	Volumen	0,027072 [m <sup>3</sup> ]
		Masa	212,51 [kg]
<b>CACAO</b>		<b>GASES DE COMBUSTIÓN - AIRE</b>	
Densidad	775 [ kg/m <sup>3</sup> ]	Densidad	1,14 [ kg/m <sup>3</sup> ]
Llenado	30%	Presencia	70%
Área ocupada	0,084822 [m <sup>2</sup> ]	Volumen	0,7125 [m <sup>3</sup> ]
Volumen ocupado	0,305 [m <sup>3</sup> ]	Masa	0,81225 [kg]
Masa	236,65 [kg]		
<b>Cargas estructurales sobre el sistema</b>			
Cacao	2319,17 [N]	Carga distribuida Viga	1225,57 [N/m]
Acero	2082,64 [N]	Carga distribuida Medio cilindro	651,9 [N/m <sup>2</sup> ]
Gases/Aire	10,246 [N]		
<b>Total</b>	4412,064 [N]		

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 18 se muestra una imagen real de la estructura interna de la cámara de secado. Luego de probar varias opciones para la estructura interna del cilindro se consiguió transportar el grano de manera apropiada, utilizando vuelos o aletas tipo “z” dispuestas longitudinalmente en inclinadas a favor y en contra del flujo de cacao de forma alternada. En la entrada del cilindro se encuentra un juego de aletas montadas con una inclinación a favor de la dirección del flujo del grano, esto permite evitar la acumulación de grano, evento que produciría la obstaculización al canal de ingreso de aire caliente.



Figura 18. Imagen de planta. Cámara de secado. Sección interna.  
Fuente: Elaboración propia

Además, se fija otro juego de aletas, cuya inclinación está en contra de la dirección de avance del grano, esto tiene la finalidad de disminuir la velocidad de avance y consecuentemente garantizar un tiempo mínimo de residencia para que el grano llegue a la salida del cilindro con un nivel de humedad apropiado. En la Figura 19 se ilustra un diagrama con las dimensiones del cilindro.

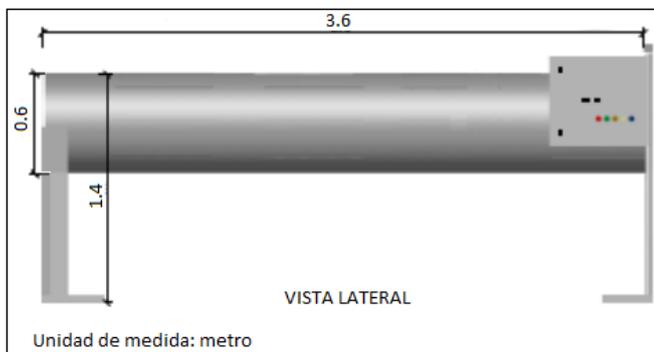


Figura 19. Cámara de secado. Dimensiones.  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 20 se puede apreciar una imagen real que muestra la cámara de secado.



Figura 20. Imagen de planta. Cámara de secado. Vista externa.  
Fuente: Elaboración propia

## 2.6. Receptor de granos secos

Una vez que el grano de cacao alcanza la parte final de la cámara de secado, esto luego de permanecer rotando y avanzando lentamente durante el tiempo de residencia, sale hacia un sistema de recepción o recolección simple.

El receptor de granos secos consiste en una caja rectangular de 0.50 x 0.70 m de sección transversal y 1.0 m de altura. A la salida del sistema secador existe una tapa circular perforada, la misma que permite la circulación del flujo de aire caliente; en esta tapa están dispuestas dos ventanas para la salida del grano de cacao.

En la Figura 21, se puede observar el esquema dimensionado para el receptor de grano seco.

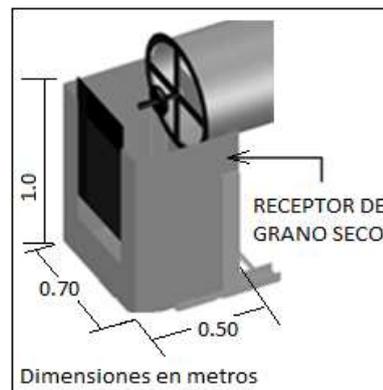


Figura 21. Receptor de grano seco. Dimensiones.  
Fuente: Elaboración propia

Una compuerta deslizante permite la descarga del grano contenido hacia el exterior.

Finalmente se puede apreciar en la Figura 22, al sistema de secado completo, totalmente ensamblado.



Figura 22. Planta piloto para secado de Cacao.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 22 se aprecia de izquierda a derecha la cámara de secado, el panel de control, el alimentador de aire a temperatura ambiente, el generador de aire caliente y en la parte superior derecha se puede apreciar parte del sistema de dosificación de granos de cacao.

## **Capítulo 3**

### **Modelación de la planta para secado de cacao**

#### **3.1. Introducción**

Un proceso industrial es básicamente un sistema, el cual está constituido por varias partes o elementos que interactúan entre sí y con su entorno con la finalidad de cumplir un objetivo determinado, siguiendo una serie de reglas o leyes que gobiernan su funcionamiento. Desde este punto de vista, pueden obtenerse varios esquemas o representaciones que muestran el comportamiento del sistema, a través de las técnicas de modelado.

Existen varias definiciones para modelo, sin embargo, todas coinciden en que un modelo es la abstracción de la realidad, la representación simplificada de la realidad o la relación existente entre acciones y efectos de un sistema. Un modelo es un conjunto de ecuaciones que relacionan las variables de interés del proceso y representan adecuadamente su comportamiento. Existen distintas formulaciones para distintos objetivos y tipos de procesos, obtenidas a partir de un conjunto de hipótesis y suposiciones. Debe considerarse el compromiso entre facilidad de uso en una aplicación y la exactitud de la representación del mundo real. En la Figura 23, se representan las salidas o respuestas de un proceso real y del modelo de dicho proceso.

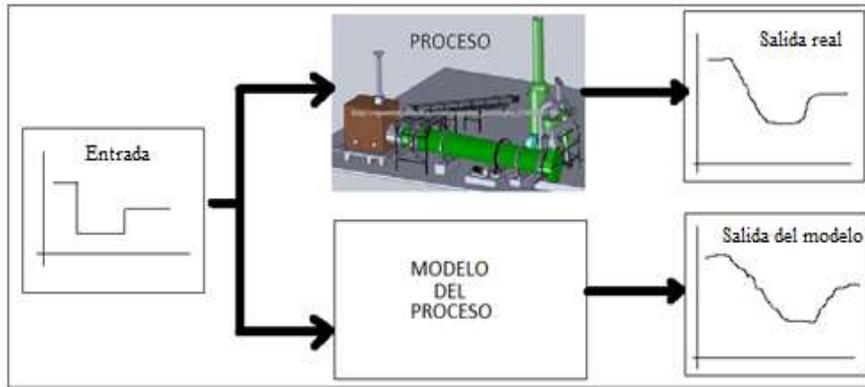


Figura 23. Respuestas de modelo y del proceso real.

Fuente: Elaboración propia

Hay consenso en torno a la idea de que todo modelo es una representación abstracta del conjunto de interacciones que conceptual y metodológicamente se delimitan como objeto de conocimiento. Se han establecido clasificaciones de los modelos que van desde taxones tales como los matemáticos y físicos, hasta aquellas que los ubican como icónicos, simbólicos y analógicos. (R. Gallego Badillo, 2004) [46].

Pueden establecerse modelos para diferentes procesos a través de planos, diagramas, maquetas, ecuaciones, descripciones en HDL (lenguaje de descripción de hardware), programas, etc. Estos modelos están basados en reglas y son denominados modelos formales.

Los modelos matemáticos establecen el comportamiento del sistema a través de relaciones entre las distintas variables del proceso, cuya resolución puede ser analítica o mediante simulación. Las soluciones analíticas, dependiendo del grado de complejidad del modelo, son difíciles de obtener; por otro lado, la simulación de los modelos permite aprovechar la potencialidad de las plataformas informáticas para facilitar el análisis, prueba y validación de los mismos.

Un modelo matemático es un conjunto de ecuaciones y relaciones algebraicas y/o diferenciales, que caracterizan la evolución de las variables de estado. Cuando se pretende modelar un sistema físico, son las leyes físicas precisamente las que definen las relaciones entre las magnitudes fundamentales del proceso.

Según William L. Luyben [47], el resultado más importante del desarrollo de un modelo matemático es la comprensión que se alcanza sobre lo que realmente hace el proceso, la visión alcanzada permite alejar los factores de confusión extraños y llegar a la esencia del sistema percibiendo claramente las relaciones causa efecto de las distintas variables.

Cuando se utilizan modelos matemáticos para representar procesos o sistemas reales a veces se asume que los valores que determinan las características físicas de los objetos se encuentran concentrados en un punto, esto no siempre es real y reciben el nombre de elementos de parámetros concentrados. Estos modelos se caracterizan por la utilización de ecuaciones diferenciales ordinarias.

Cuando se modela teniendo en cuenta que las características físicas de un proceso o sistema no están concentradas en un punto, se denomina modelado con parámetros distribuidos y las relaciones matemáticas están descritas básicamente con ecuaciones diferenciales parciales.

En este caso de estudio, el proceso de secado de cacao en un cilindro rotatorio, constituye un sistema dinámico no lineal, de alimentación continua con flujo de aire caliente en isocorriente. Considerando estas características se plantean dos modelos, un modelo matemático de parámetros globales o concentrados y otro modelo matemático en parámetros distribuidos, ambos de carácter dinámico y determinístico.

### **3.2. Modelo en parámetros concentrados**

El modelo matemático del secador de cacao se plantea bajo las siguientes consideraciones:

Se realiza el análisis únicamente de la cámara de secado. El presente estudio no toma en cuenta la cámara de combustión o generador de aire caliente.

La cámara de secado es un cilindro giratorio con flujo de aire a favor de la corriente. El cilindro tiene una ligera inclinación no mayor a 3%.

Se desprecian los fenómenos de difusión, radiación y conducción. En el proceso se desarrolla una transferencia de calor predominantemente por efecto de convección.

Se consideran constantes a los coeficientes de transferencia de masa y de energía.

El calor específico del cacao es constante. Se toma este valor con referencia al cacao fermentado con un nivel de humedad del 56%.

El cilindro rota con una velocidad constante, lo que implica un avance del cacao a velocidad constante.

El generador de aire caliente (cámara de combustión), hace circular gas (aire caliente) a velocidad constante a través del cilindro (cámara de secado).

En la Tabla 6, se presenta la nomenclatura utilizada para las constantes y variables que intervienen en el proceso con sus respectivas unidades.

Tabla 6. Variables que intervienen en el sistema secador

Abrev.	Descripción	Unidades
Tgi	Temperatura del gas a la entrada.	°C
Fgi	Flujo másico de gas a la entrada.	kg/s
Fvi	Flujo de vapor contenido en el gas a la entrada.	kg/s
Tsi	Temperatura del cacao a la entrada	°C
Fai	Flujo másico de agua contenida en el sólido a la entrada.	kg/s
Fsi	Flujo másico de cacao a la entrada	kg/s
Mg	Masa de gas	kg
Mv	Masa de vapor contenida en el gas	kg
Ma	Masa de agua contenida en el cacao	kg
Ms	Masa de cacao	kg
Tgo	Temperatura del gas a la salida.	°C
Fgo	Flujo másico de gas a la salida.	kg/s
Fvo	Flujo de vapor contenido en el gas a la salida.	kg/s
Tso	Temperatura del cacao a la salida.	°C
Fao	Flujo másico de agua contenida en el sólido a la salida.	kg/s
Fso	Flujo másico de cacao a la salida.	kg/s
H	Humedad del cacao en base húmeda	
Yo	Humedad del gas en base seca	

Abrev.	Descripción	Unidades
Wo	Flujo másico de agua evaporada	kg/s
Xo	Humedad del sólido en base seca	
V	Volumen del cilindro	m <sup>3</sup>
Ua	Coefficiente volumétrico de transmisión de calor.	kW/ m <sup>3</sup> °C
Pa	Presión del gas	Pa
Cpa	Calor específico del agua	kJ/ Kg °C
Cpg	Calor específico a presión constante del gas seco.	kJ/ Kg °C
Cpv	Calor específico a presión constante del vapor de agua.	kJ/ Kg °C

Un esquema de las variables que se consideran en la cámara de secado se muestra en la figura 24. Básicamente intervienen flujo másico, temperatura, masa y humedad tanto para el sólido como para el gas.

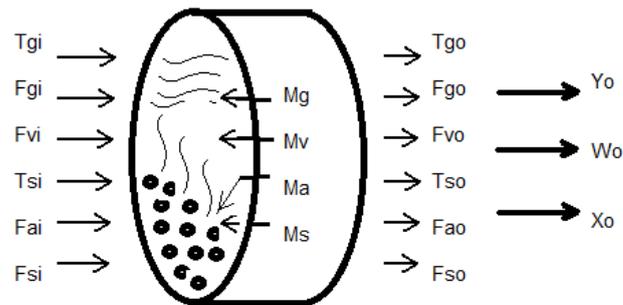


Figura 24. Cámara de secado. Variables que intervienen en el proceso.  
Fuente: Elaboración propia

A la entrada del cilindro ingresa cacao húmedo, el mismo que contiene una parte sólida y una parte de agua. Las ecuaciones de conservación de masa se expresan como:

La ecuación (4) representa la dinámica de la variación de la masa del cacao (parte sólida).

$$\frac{d(M_{so})}{dt} = F_{si} - F_{so} \quad (4)$$

La dinámica del comportamiento del agua se describe a través de la ecuación (5).

$$\frac{d(M_{ao})}{dt} = F_{ai} - F_{ao} - W_o \quad (5)$$

La ecuación (6) representa el balance de masa del gas seco.

$$\frac{d(Mgo)}{dt} = Fgi - Fgo \quad (6)$$

La ecuación (7) describe el balance de masa de vapor de agua.

$$\frac{d(Mvo)}{dt} = Fvi - Fvo + Wo \quad (7)$$

Se plantean 2 ecuaciones de conservación de energía, una para la fase sólida y otra para la fase gaseosa.

La ecuación (8) corresponde a la fase sólida:

$$\begin{aligned} \frac{d[(Cps * Mso + Cpa * Mao) * Tso]}{dt} = & (Fsi * Cps + Fai * Cpa) * Tsi - \\ & -(Fso * Cps + Fao * Cpa) * Tso - \\ & -Wo * +Ua * V * (Tgo - Tso) \end{aligned} \quad (8)$$

La ecuación (9) corresponde a la fase gaseosa:

$$\begin{aligned} \frac{d[(Cpv * Mvo + Cpg * Mgo) * Tgo]}{dt} = & \\ (Fgi * Cpg + Fvi * Cpv) * Tgi + & +(Fgo * Cpg + Fvo * Cpv) * Tgo + \\ +Wo * (Cpa * Tso + \lambda) - & Ua * V * (Tgo - Tso) \end{aligned} \quad (9)$$

Se establecen las ecuaciones de humedad en base seca y en función de las masas y de los flujos, tanto para el sólido (cacao) como para el vapor de agua contenido en el gas (aire caliente) que circula dentro de la cámara.

En función de los flujos másicos, para el cacao se plantea la ecuación (10).

$$Xo = \frac{Fao}{Fso} \quad (10)$$

En la ecuación (11) se representa la humedad en función de los flujos para el vapor.

$$Y_o = \frac{F_{vo}}{F_{go}} \quad (11)$$

Las ecuaciones (12) y (13) expresan la humedad en base seca en función de las masas, para el cacao y para el vapor, respectivamente.

$$X_o = \frac{M_{ao}}{M_{so}} \quad (12)$$

$$Y_o = \frac{M_{vo}}{M_{go}} \quad (13)$$

La relación entre la masa de gas seco contenida en el cilindro con la temperatura y la masa del gas está dada por la ecuación (14).

$$M_{go} = \left( V - \frac{M_{so}}{\rho_s} \right) * \left( \frac{p_{mg} * p_{ma}}{p_{mg} * Y_o + p_{ma}} \right) * \left( \frac{Pa}{R(T_{go} + 273)} \right) \quad (14)$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad del cacao (sólido seco),  $p_{mg}$  es el peso molecular del gas (aire caliente),  $p_{ma}$  es el peso molecular del agua y  $R$  es la constante universal de los gases. La relación entre la masa del sólido y el flujo del sólido se establece en la ecuación número (15).

$$M_{so} = t_{paso} * F_{so} \quad (15)$$

La ecuación (16) muestra la relación del flujo de evaporación  $W_o$ .

$$W_o = V_{evap} * M_{so} \quad (16)$$

Las ecuaciones (17), (18) y (19) representan la humedad, la velocidad del gas y la densidad del cacao a la salida del cilindro secador.

$$H_o = \frac{X_o}{1 + X_o} \quad (17)$$

$$V_{go} = \frac{F_{go}}{\rho_o * area_o} \quad (18)$$

$$\rho_o = \frac{p_{mg} * Pa}{R * (T_{go} + 273)} \quad (19)$$

(Friedman y Marshall, 1949) en sus estudios de secadores rotatorios establecen una correlación para determinar el tiempo de paso del producto a través del cilindro. Esta correlación considera la longitud, velocidad angular, inclinación, diámetro, forma de los vuelos o aletas interiores del cilindro (20). Además, se toman en cuenta la granulometría, viscosidad y adherencia como características del sólido a secar, en este caso del cacao.

$$t_{paso} = \frac{0.23 * L}{S * N^3 * D} - 9.84 * Dp^{-0.5} * \frac{L * G}{F} \quad (20)$$

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 rpm. S es la inclinación del cilindro en radianes, (G) el flujo de gas, (F) el flujo de sólido y (Dp) el tamaño promedio de las partículas de sólido a secar.

En la Tabla 7 se detallan los valores considerados y obtenidos en la aplicación de la correlación de Friedman y Marshall.

Tabla 7. Valores considerados para el cálculo del tiempo de paso.

<b>Abr</b>	<b>Valor</b>	<b>Unid.</b>
L	3.6	m
S	0.0021	rad
Dp	15000	$\mu\text{m}$
N	1	rpm
D	0.6	m
G	0.2	kg/s
F	0.002	kg/s
$t_{paso}$	37061	s

El valor obtenido aplicando la ecuación (20) para  $t_{paso}$ , es de 617.7 minutos, o su equivalente a 10.29 horas.

Para la determinación del coeficiente volumétrico de transmisión de calor se han considerado fuentes bibliográficas como (Friedman y Marshall, 1949)[48]; (McCormicK, 1962)[49]; (Perry et al., 1992)[43].

Mediante análisis estadísticos Friedman y Marshall, establecen la correlación (21).

$$Ua = K * \frac{G^n}{D} \quad (21)$$

Donde K es una constante de proporcionalidad, G representa el flujo másico del gas de secado por unidad de área transversal y D el diámetro del cilindro y n constante. El valor de Ua dependerá de la geometría del cilindro, las constantes K y n serán especificadas para cada caso.

McCormick [49], realizó un aporte estableciendo que se debería tomar en cuenta la geometría de los vuelos y la velocidad de rotación del cilindro para la determinación del valor K. De sus análisis estadísticos sugiere utilizar valores de n ente 0.46 y 0.67.

Para el presente trabajo no se ha contado con una planta experimental o industrial para poder determinar mediante ensayos los valores de K y n, por lo tanto, se ha considerado factible utilizar los valores propuestos por (Perry et al. 1992)[43], para secadores rotatorios comerciales.  $K = 0.8254$  y  $n = 0.67$ .

Considerando que el flujo másico de aire caliente es de 0.5 kg/s y que el área transversal útil del cilindro es de 0.1963 m<sup>2</sup>, se calcula un valor de  $Ua = 0.20706 \text{ kW/m}^3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### 3.3. Modelo en parámetros distribuidos

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 figura 25 se muestra una imagen del sistema de secado.

En el sistema de dosificación, cuyas características se describen en la Tabla 1, se deposita en la tolva de alimentación cacao fermentado con una humedad media de 0.55 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.

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.



Figura 25. Planta secadora de cacao.  
Fuente: Elaboración propia

El cilindro rotatorio (cámara de secado), recibe los flujos 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 0.08 en base seca; valor que permite el almacenamiento, transporte y posterior procesado.

En la Figura 26 se muestra un esquema de la sección transversal del cilindro y en la Tabla 8 se detallan las características de la cámara de secado.



Figura 26. Sección transversal de la cámara de secado.  
Fuente: Elaboración propia

Tabla 8. Características de la cámara de secado.

	mínimo	máximo	Tipo
Velocidad de rotación	0.5 rpm	4.0 rpm	Cilíndrica
Longitud		3.60 m	
Diámetro	0.6 m		

Fuente: Elaboración propia

La planta está dimensionada para procesar una media diaria de 200 kg con un consumo promedio de 20 kg de gas combustible. Esta producción se alcanzaría con un flujo másico de cacao húmedo de 0.0023 [kg/s] durante una jornada de 24 horas de operación en estado estacionario. Se debe tener en cuenta que estos datos corresponden a la capacidad de la planta, luego dentro de los rangos de operación del sistema, se podrán obtener diferentes niveles de producción, por ejemplo, cuando el secador opera con un flujo másico de entrada de cacao húmedo igual a 0.001 [kg/s] durante 24 horas en estado estacionario, se producirán 86.4 [kg] de cacao seco.

### 3.3.1. Consideraciones para el modelado

Para el modelo se toma en cuenta que las variables 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 es homogénea.

Se consideran dos únicas sustancias en el grano de cacao, agua y sólido (cacao seco).

Al interior del grano se asume la presencia 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.

### 3.3.2. Nomenclatura

En la Tabla 9, se detalla la nomenclatura utilizada para el planteamiento del modelo.

Tabla 9. Nomenclatura para el modelo en parámetros distribuidos.

Parámetro	Descripción	Unidades
$A_k$	Área de transferencia de calor.	$m^2$
$\lambda$	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.	$kJ/(kg^\circ C)$
$\rho_c$	Densidad del cacao.	$kg/m^3$
$\rho_g$	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.	
$H_{ch}$	Entalpía del cacao húmedo	$kJ$
$H_{gh}$	Entalpía del gas húmedo	$kJ$
$H_{pn}$	Poder calorífico del gas combustible GLP	$kJ/kg$
$K_d$	Constante de difusión.	$kg\ agua/s$
$K_v$	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.	$m$
$m_c$	Masa de cacao.	$kg$
$m_g$	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.	$kJ/(kmol^\circ C)$

Parámetro	Descripción	Unidades
Secc	Sección de transferencia de calor.	m <sup>2</sup>
Sh	Relación entre superficie húmeda y superficie seca del cacao.	
Ta	Temperatura del aire ambiente	°C
Tc	Temperatura del cacao a la entrada.	°C
Tg	Temperatura del gas entrada cámara de secado - salida cámara de combustión.	°C
u	Eficiencia de la combustión.	
Vc	Velocidad de avance del cacao.	m/s
Vrot	Constante de ajuste velocidad rotacional del cilindro.	s <sup>-1</sup>
Wc	Flujo másico de cacao seco.	kg/s
Wcomb	Flujo de combustible GLP.	kg/s
Wch	Flujo másico de cacao húmedo.	kg/s
Wg	Flujo másico de gas seco, aire de secado.	kg/s
Wga	Flujo másico de aire, entrada cámara combustión.	kg/s
Wgh	Flujo másico de gas húmedo, aire de secado.	kg/s
Wdif	Flujo de difusión.	kg/s
Wevap	Flujo de evaporación.	kg/s
X	Humedad del cacao en base seca.	kg agua/(kg sustancia seca)
X <sub>c</sub>	Humedad crítica del cacao en base seca.	kg agua/(kg sustancia seca)
Xint	Humedad interna del cacao en base seca.	kg agua/(kg sustancia seca)
Xsup	Humedad superficial del cacao en base seca.	kg agua/(kg sustancia seca)
Y	Humedad del gas en base seca.	kg agua/(kg sustancia seca)
Ya	Humedad del aire, entrada cámara de combustión en base seca.	kg agua/(kg sustancia seca)

Fuente: Elaboración propia

### 3.3.3. Ecuaciones y relaciones

En la Figura 27, se puede observar el planteamiento para el manejo de variables del sistema de parámetros distribuidos, siguiendo el método de las líneas. La longitud total del cilindro se divide en n partes. Para este caso se realizó la simulación para n igual a 2, 4 y 10. Se utiliza “j” como índice de variación desde la etapa j= 1 hasta la etapa j=n.

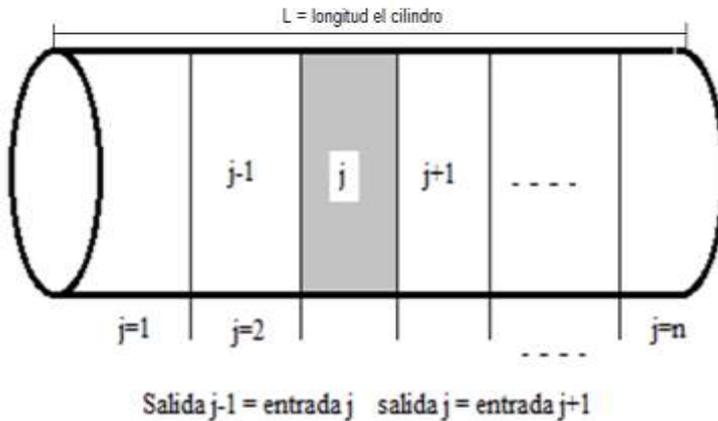


Figura 27. Esquema de parámetros distribuidos.  
Fuente: Elaboración propia

Se ilustran en la Figura 28, 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.

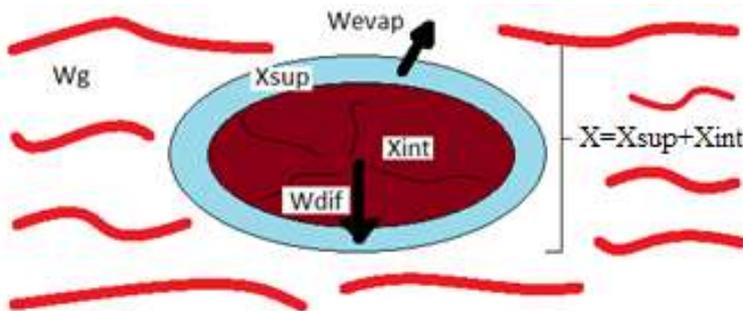


Figura 28. Esquema de variables para el grano de cacao.  
Fuente: Elaboración propia

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  $[j-1]$   $W_{c,s,j-1}$  es igual al flujo de cacao a la entrada de la etapa  $[j]$ ,  $W_{c,e,j}$ .

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 (22) y (23) 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:

$$d(mc_{s,j})/dt = Wc_{s,j-1} - Wc_{s,j} \quad (22)$$

$$Wc_{s,j-1} = Wc_{e,j} \quad (23)$$

En (24) y (25) 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 a la humedad interna del cacao:

$$d(mc_{s,j} * Xint_{s,j})/dt = Wc_{s,j-1} * Xint_{s,j-1} - Wc_{s,j} * Xint_{s,j} - Wdif_j \quad (24)$$

$$Xint_{s,j-1} = Xint_{e,j} \quad (25)$$

La variación de la humedad del cacao, considerando solamente la parte superficial del grano se plantea en (26) y (27). 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 a la humedad superficial del cacao:

$$d(mc_{s,j} * Xsup_{s,j})/dt = Wc_{s,j-1} * Xsup_{s,j-1} - Wc_{s,j} * Xsup_{s,j} + Wdif_j - Wevap_j \quad (26)$$

$$Xsup_{s,j-1} = Xsup_{e,j} \quad (27)$$

En las ecuaciones (28) y (29) 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:

$$d(mg_j)/dt = Wg_{s,j-1} - Wg_{s,j} \quad (28)$$

$$Wg_{s,j-1} = Wg_{e,j} \quad (29)$$

El flujo de gas en base seca  $Wg$  se mantiene constante a lo largo de todo el cilindro (30). El flujo de gas húmedo varía debido al aporte del flujo de evaporación proveniente del cacao.

$$Wg_{e,j} = Wg_{e,[1]} \quad (30)$$

La humedad contenida en el gas varía en dependencia de la diferencia de flujos de entrada y salida y del flujo de evaporación  $W_{evap}$ , extraído al cacao durante el proceso de secado, como se representa en (31) y (32).

Balance a la humedad del gas:

$$d(mg_j * Y_{s,j})/dt = Wg_{s,j-1} * Y_{s,j-1} - Wg_{s,j} * Y_{s,j} + W_{evap_j} \quad (31)$$

$$Y_{s,j-1} = Y_{e,j} \quad (32)$$

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 (33) y (34) se representa la variación de energía como la diferencia de las entalpías 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 al cacao:

$$\begin{aligned} d(mch_j * Hch_{s,j})/dt = & Wc_{s,j-1} * (1 + X_{s,j-1}) * Hch_{s,j-1} - Wc_{s,j} * \\ & (1 + X_{s,j}) * Hch_{s,j} + Q_j - Wevap_j * (\lambda + Hag) \end{aligned} \quad (33)$$

$$Hch_{s,j-1} = Hch_{e,j} \quad (34)$$

Los valores de entalpía para el cacao húmedo Hch, son obtenidos por interpolación desde una tabla que contiene estos datos en función de la temperatura del grano Tc y la humedad en base seca X.

Para el balance de energía del gas se resta el calor Qj y se suma la energía aportada a través del flujo de evaporación que se integra al gas de secado. Nótese en (35), que los factores antes citados tienen signos contrarios a los encontrados en (33). En (36) se establece el enlace entre dos etapas contiguas.

Balance de energía al gas:

$$\begin{aligned} d(mgh_j * Hgh_{s,j})/dt = & Wg_{s,j-1} * (1 + Y_{s,j-1}) * Hgh_{s,j-1} - Wg_{s,j} * (1 + Y_{s,j}) * \\ & Hgh_{s,j} - Q_j + Wevap_j * (\lambda + Hag) \end{aligned} \quad (35)$$

$$Hgh_{s,j-1} = Hgh_{e,j} \quad (36)$$

En (37) 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.

$$mch_j = mc_j * (1 + X_{s,j}) \quad (37)$$

La suma de las humedades parciales es igual a la humedad total X del cacao (38).

$$X_{s,j} = X_{int,s,j} + X_{sup,s,j} \quad (38)$$

En la ecuación (39) 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 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.

$$Q_j = h_{c1} * A_k * (T_{g_j} - T_{c_j}) * Sh_j + h_{c2} * A_k * (T_{g_j} - T_{c_j}) * (1 - Sh_j) \quad (39)$$

El flujo de evaporación de humedad desde la superficie del grano se determina en (40), en función del calor latente de evaporación del agua  $\lambda$  y de la diferencia de temperaturas entre el gas de secado y el cacao.

$$W_{evap_j} = ((A_k * h_{c1})/\lambda) * (T_{g_j} - T_{c_j}) * Sh_j \quad (40)$$

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 (41),  $K_d$  es la constante de difusión, este parámetro es estimado en el proceso de validación del modelo.

$$W_{dif_j} = K_d * (X_{int,s,j} - X_{sup,s,j}) \quad (41)$$

En (42), se establece la relación entre el flujo másico  $W_c$  y la velocidad del cacao  $V_c$ . En (43) se relaciona la velocidad del grano con la velocidad del gas de secado  $V_g$  y la velocidad de rotación del cilindro  $V_{rot}$ .

La velocidad del gas de secado depende del flujo volumétrico de gas  $F_g$  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  $Secc$ , restando la superficie de grano que obstruye la circulación del mismo. Véase (44).

$$Wc_{s,j} = K_w * mc_j * Vc_j \quad (42)$$

$$Vc_j = K_v * Vg_j * Vrot \quad (43)$$

$$Vg_{,j} = Fg / (Secc - m_{c,j} / (\rho_c * L/n)) \quad (44)$$

En (45) se relaciona el flujo másico de gas seco  $Wg_{s,[1]}$  con el flujo volumétrico de gas  $Fg_{[1]}$ .

$$Fg_{[1]} = Wg_{s,[1]} * (1 + Y_{s[1]}) / \rho_g \quad (45)$$

La relación planteada en (46), permite establecer una diferencia entre la condición en la cual la humedad superficial  $Xsup$  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  $Xsup$  es menor que  $Xc$ , 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.

$$Sh_j = \min(1, Xsup_{s,j} / Xc) \quad (46)$$

En (47) se relaciona el flujo de evaporación  $Wevap$  con la velocidad de evaporación  $V_{evap}$ .

$$Wevap_j = V_{evap,j} * mc_j \quad (47)$$

Para la cámara de combustión, en (48) 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:

$$Wgh_{e[1]} = Wga + Wcomb \quad (48)$$

En la ecuación (49) se plantea el balance de energía para la cámara de combustión.

$$Wga * Cpga * Ta + Wcomb * Hpn * u = Cpg * Tge[1] * Wgh_e[1] \quad (49)$$

Como se trata al gas de secado como gas ideal, se plantea la ecuación (50).

$$Wgh_e[1] = Fg_e[1] * pmg * Pat / (R * (Tge[1] + 273)) \quad (50)$$

En la cámara de combustión se asume que en el proceso de calentamiento el aire no pierde ni gana humedad. (51).

$$Ye[1] = Ya \quad (51)$$

Para la cámara de secado, se escriben dos ecuaciones complementarias que permiten relacionar los valores de entalpía, temperatura y humedad, tanto para el cacao húmedo como para el gas de secado.

En (52) se establece la relación de interpolación para valores de entalpía del cacao en función de temperatura y humedad:

$$Hch_{s[1]} = entalp\_cacao(Tc_{s[1]}, 1/(1 + X_{s[1]})) \quad (52)$$

En (53) se plantea la temperatura del gas en función de la entalpía de una mezcla de aire y vapor de agua:

$$Tg_{s[1]} = (Hgh_{s[1]} - Y_{s[1]} * 2501) / (1 + 1.82 * Y_{s[1]}) \quad (53)$$

### 3.4. Sobre los modelos

El modelo de parámetros concentrados se desarrolló con la finalidad de obtener una primera aproximación hacia la representación de la dinámica de una planta cilíndrica rotatoria. Como pudo observarse en la sección anterior, la estructura de este modelo no contempla los cambios que las diferentes variables sufren a lo largo de la cámara cilíndrica, se asume que, en el interior de la misma, cada una de las variables tiene un mismo valor para cualquier punto geométrico. Con el modelo de parámetros concentrados se ejecutaron varias simulaciones con la intención de analizar la factibilidad del uso de una cámara

cilíndrica y rotatoria para el secado de cacao. El modelo de parámetros concentrados fue el punto de partida para la elaboración del modelo en parámetros distribuidos, puesto que se consideraron los balances de masa y de energía, y se insertaron consideraciones adicionales, como el hecho de identificar la parte seca y la parte húmeda en el grano de cacao y en el gas de secado.

El modelo de parámetros distribuidos representa de manera más real a la dinámica del sistema en estudio y toma en cuenta los cambios que sufren las distintas variables a lo largo de la cámara cilíndrica, por esta razón en el siguiente capítulo de esta tesis, se desarrolla la simulación y validación de este modelo.

Además, para el diseño y configuración de los controladores, también se utiliza el modelo de parámetros distribuidos y un modelo obtenido por identificación lineal.



## **Capítulo 4**

### **Simulación y validación del modelo de parámetros distribuidos para la planta de secado de cacao**

#### **4.1. Introducción**

Con la finalidad de validar el modelo planteado, se implementa una serie de experimentos de simulación que permiten observar y analizar las respuestas del modelo frente a diferentes cambios efectuados en las variables de entrada. La plataforma de software seleccionada para la evaluación del modelo es EcosimPro<sup>®</sup>, la misma que brinda una gran flexibilidad para el procesamiento de modelos matemáticos planteados en parámetros fundamentales o con primeros principios. Además, la citada plataforma permite una eficiente estructuración del modelo en parámetros distribuidos.

En este capítulo se presenta el resultado de varios experimentos ejecutados con el modelo. Inicialmente se manipulan los distintos parámetros para conseguir que la simulación alcance el estado estacionario, a continuación, se procede a realizar un análisis de sensibilidad para determinar los parámetros frente a los cuales el modelo es más sensible.

Una vez identificados los parámetros de mayor interés se procede a plantear un experimento basado en una rutina de optimización con la finalidad de obtener los valores óptimos de los parámetros, los mismos que permiten una mínima diferencia entre las respuestas de la planta real

(piloto) y del modelo frente a unas mismas condiciones de entrada. Para el experimento de optimización se deben obtener datos de respuesta de la planta piloto.

## 4.2. Simulación del modelo

Se plantea un experimento de simulación para variar “n”, el número de secciones del modelo distribuido. En la Figura 29 con una simulación en  $n=1$ , se observa que el sistema alcanza el estado estacionario de forma instantánea, en la figura 30 se puede apreciar la evolución de las variables de humedad y temperatura para un valor de  $n=2$ , gracias a la discretización del modelo, resulta factible apreciar la variación de las variables tanto en función del tiempo como en función de la sección o etapa de la cámara de secado.

Para los experimentos de simulación, variando  $n=1$ ,  $n=2$ ,  $n=4$  y  $n=10$ , se trabajaron con los valores expuestos en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores para experimento de simulación.

VARIABLE	VALOR	UNIDADES
Wch_e	0.0023	[ kg / s]
Wg_e	0.2	[ kg / s]
Wcomb	0.00015	[ kg / s]
Ta	29	°C
Tc	29	°C
Xc_e	0.35	[kg agua/kg cacao seco]
Y_e	0.011	[kg agua/kg gas seco]

Fuente: Elaboración propia

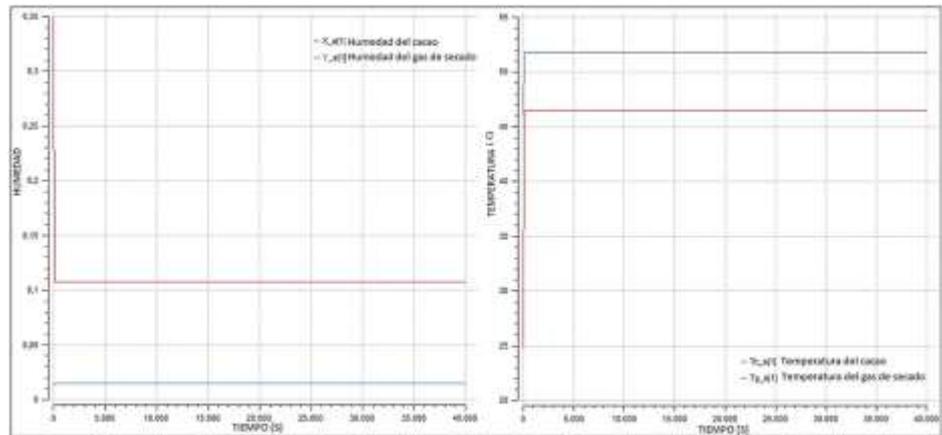


Figura 29. Evolución de las variables de humedad y temperatura. Simulación con  $n=1$ .

Fuente: Elaboración propia

Deben interpretarse las variables  $X_s$  e  $Y_s$  como los valores de humedad para el cacao y el gas de secado respectivamente; de la misma manera  $Tc_s$  y  $Tg_s$  representan las temperaturas del cacao y del gas de secado respectivamente. Ver Figura 30.

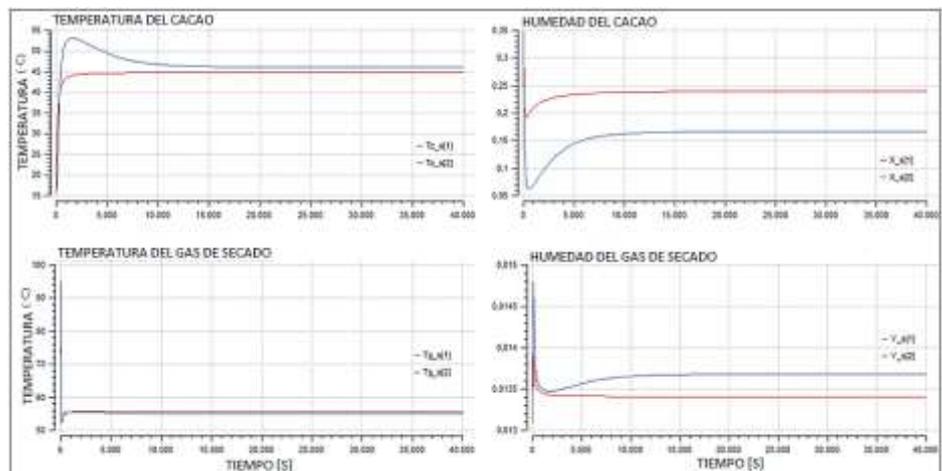


Figura 30. Evolución de las variables de humedad y temperatura. Simulación con  $n=2$ .

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se ejecutan simulaciones con valores de  $n=4$  y  $n=10$ . La humedad registra una disminución de 0.35 a 0.11 y la humedad del gas de secado se incrementa desde 0.014 hasta 0.01479, fenómeno

esperado puesto que toda la humedad extraída desde los granos de cacao será depositada en la corriente de aire caliente o gas de secado. El incremento de humedad en el gas es menor que el decremento de humedad en el cacao debido a que el flujo másico de gas de secado es mucho mayor que el flujo másico de cacao. En la simulación con  $n=4$  se puede apreciar la evolución del sistema en mayor detalle. En la Figura 31 se aprecia la dinámica de evolución de las variables de temperatura y de humedad para  $n=4$ .

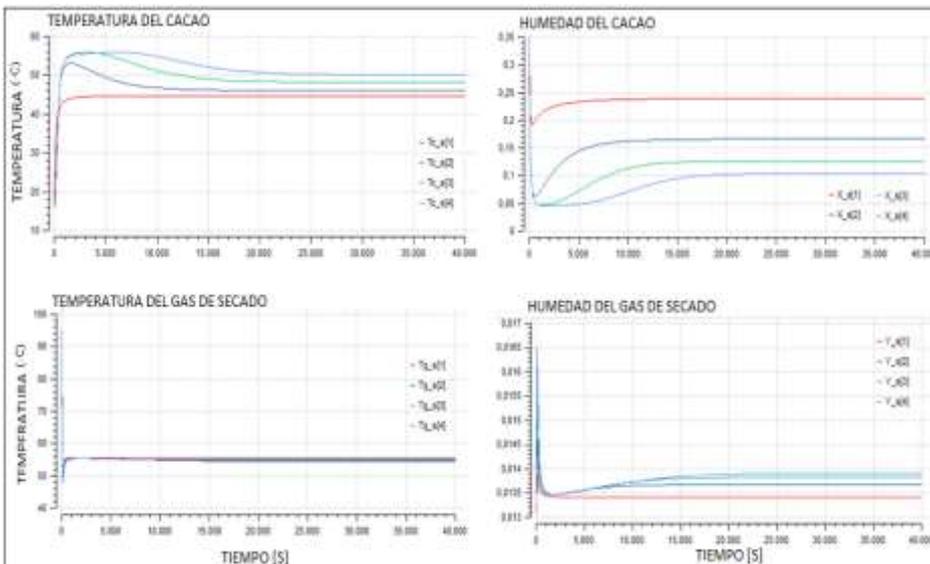


Figura 31. Evolución de las variables de humedad y temperatura. Simulación con  $n=4$ .

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, al incrementar el valor de  $n$  se puede notar que para valores mayores que 10 ya no se ve cambios significativos en los valores de las variables de salida del modelo, bajo esta consideración, se decide parametrizar el modelo final con  $n=10$ . En la Figura 32 se aprecian los resultados obtenidos para la simulación del modelo con  $n=10$ .

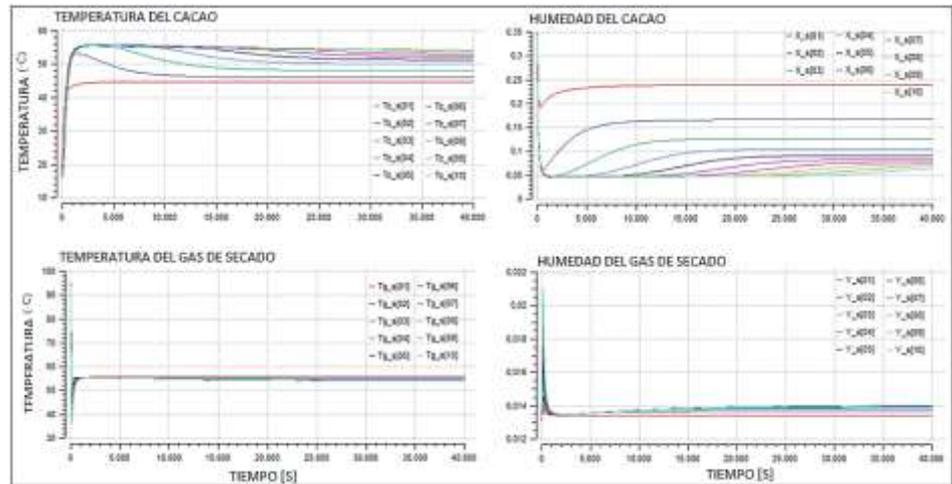


Figura 32. Evolución de las variables de humedad y temperatura. Simulación con  $n=10$ .

Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de analizar el comportamiento de las variables de humedad y temperatura en el grano de cacao y en el gas de secado se diseña un experimento de simulación con las condiciones planteadas en la Tabla 10, los valores detallados en esta tabla corresponden a valores de operación del proceso (planta piloto). La dinámica de evolución de la variable “X”, que representa el contenido de humedad total en el sólido (cacao), puede apreciarse en la Figura 33. Se observan los distintos valores de humedad\* a lo largo del cilindro de secado, representados por  $Xc\_s[1] \dots Xc\_s[n]$ , para este experimento  $n$  toma el valor de 10.

Durante el inicio del proceso se alcanza la mayor velocidad de secado con una razón de cambio constante, esto sucede hasta alcanzar el valor crítico de humedad contenida en el grano. Cuando se alcanza el punto crítico de humedad la velocidad de secado decrece notablemente, resulta mucho más difícil extraer la humedad del grano, puede observarse en Figura 33b, que la pendiente de tiende a cero. En la Figura 33a, se aprecia la dinámica del proceso en estado transitorio, en donde se observan valores pico que no responden a la realidad del proceso sino estrictamente al modelo matemático planteado. En la Figura 33b, se muestra el comportamiento de la humedad del cacao en la etapa  $j=10$  o etapa de salida. En esta gráfica se observa un comportamiento de la curva se secado muy similar al comportamiento teórico detallado en las secciones anteriores del presente trabajo.

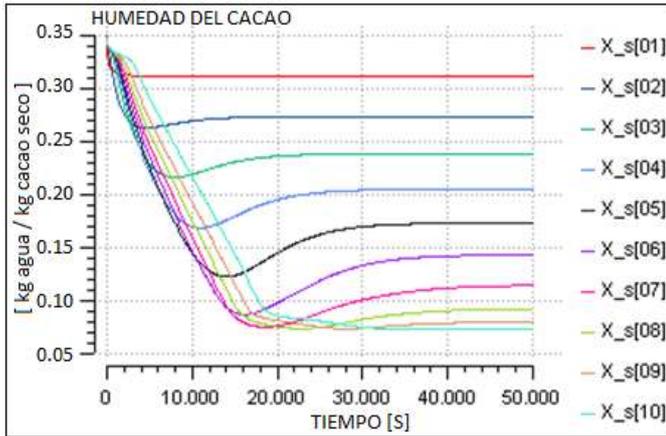


Figura 33a. Variación de humedad del cacao durante el proceso de secado. Todas las etapas (n=10)  
 Fuente: Elaboración propia

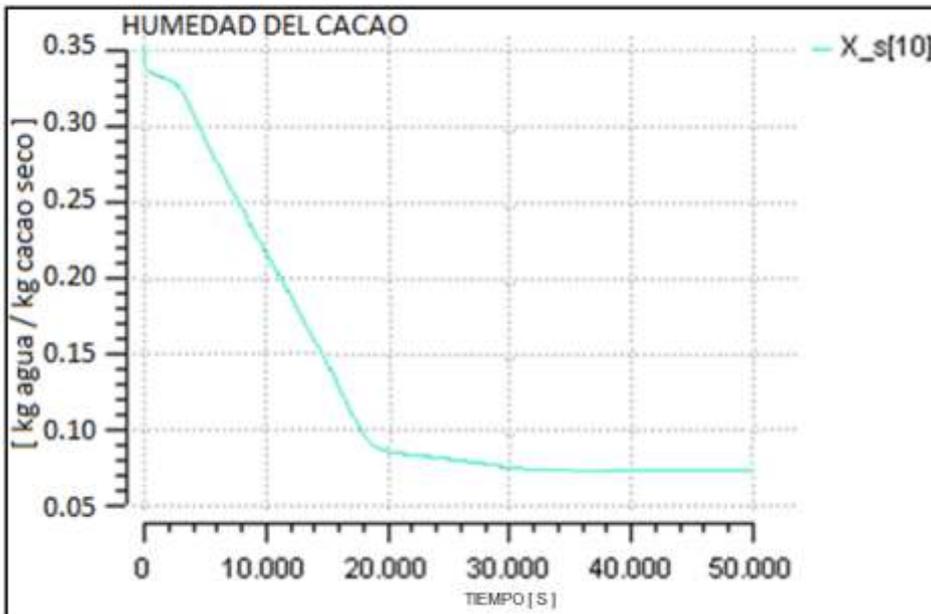


Figura 33b. Variación de humedad del cacao durante el proceso de secado. Etapa de salida (n=10)  
 Fuente: Elaboración propia

Mientras el cacao va perdiendo humedad, se transfiere el contenido de agua del grano hacia el flujo de gas de secado (aire caliente), por esta razón el contenido de humedad de gas “Y” se incrementa mientras se decrementa la humedad del grano. Este fenómeno se registra en la Figura

34. Se observan los distintos valores de humedad a lo largo del cilindro de secado, representados por  $Y_s[1] \dots Y_s[n]$ , para este experimento  $n$  toma el valor de 10.

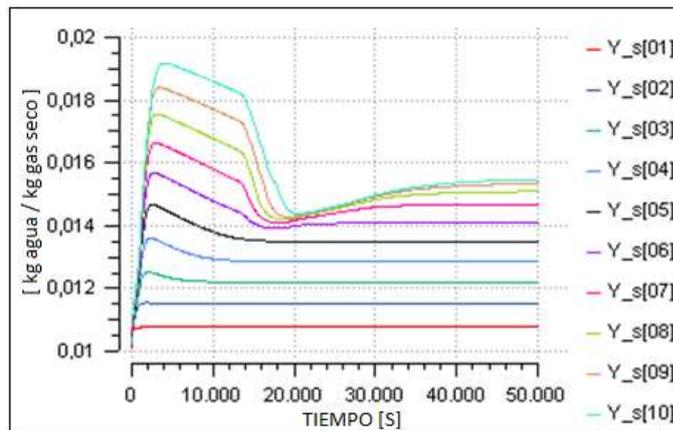


Figura 34. Variación de humedad del gas de secado durante el proceso de secado. ( $n=10$ )

Fuente: Elaboración propia

El comportamiento de las variables de temperatura tanto para el gas de secado ( $T_g$ ) como para el Cacao ( $T_c$ ) se puede apreciar en las Figura 35, Figura 36 respectivamente. A través del tiempo y a lo largo de la cámara de secado la temperatura del gas descende, mientras que en el Cacao se va incrementando la temperatura.

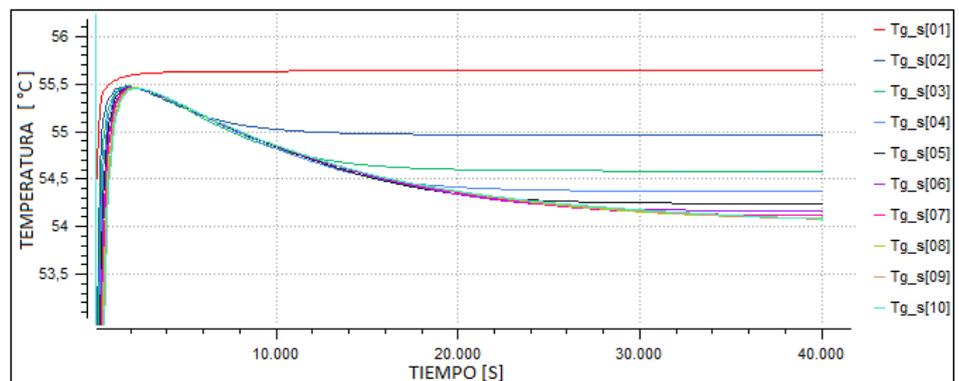


Figura 35. Variación de temperatura del gas de secado durante el proceso.

Fuente: Elaboración propia

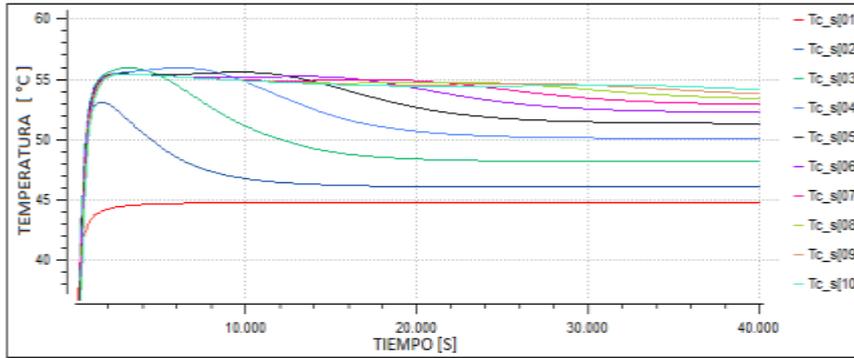


Figura 36. Variación de temperatura del cacao durante el proceso de secado.  
Fuente: Elaboración propia

Existe una relación entre la humedad superficial del grano y la humedad crítica del mismo, dicha relación marca el grado de presencia de una superficie húmeda en la testa del grano. Mientras la humedad superficial sea mayor que la humedad crítica, la velocidad de secado permanecerá constante, cuando el valor de humedad superficial iguale o sea menor a la humedad crítica, la velocidad de secado decrece de forma no lineal. En las figuras 37 y 38 se observan las variables  $Sh$  y  $X_{sup}$ .

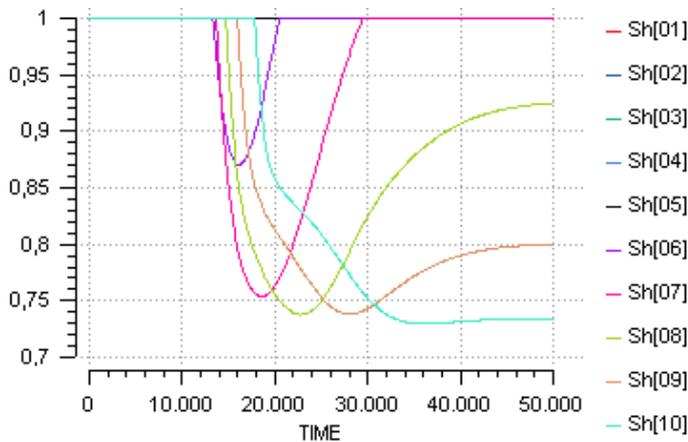


Figura 37. Relación de las humedades superficial y crítica del cacao.  
Fuente: Elaboración propia

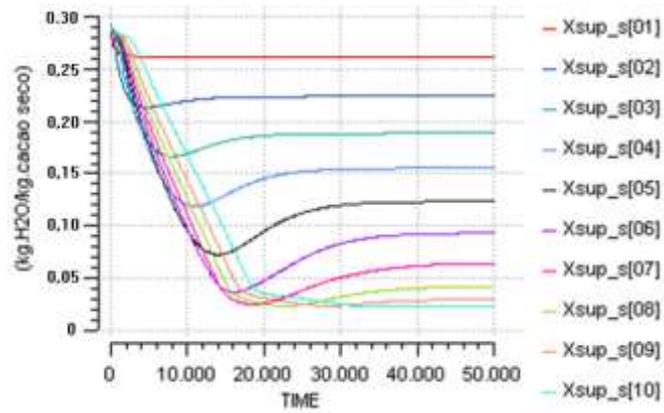


Figura 38. Variación de la humedad superficial del Cacao.  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 39 se muestra la evolución de las variables de flujo másico de cacao húmedo ( $W_{ch}$ ), flujo másico de gas de secado ( $W_g$ ), velocidad del gas de secado ( $V_g$ ), flujo másico de evaporación ( $W_{evap}$ ) de humedad, flujo másico de difusión ( $W_{dif}$ ) y velocidad de avance del grano de cacao ( $V_c$ ).

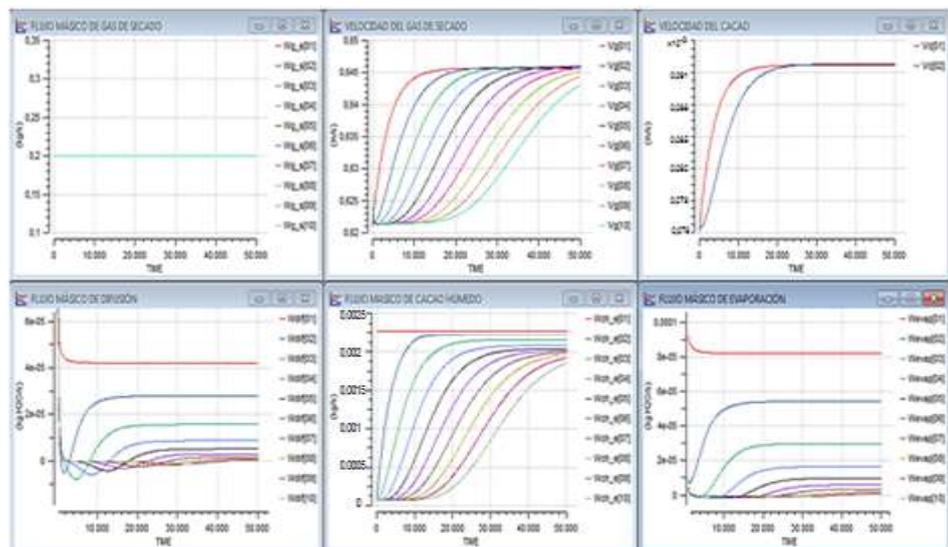


Figura 39. Evolución de algunas variables de interés en el proceso de secado de cacao.  
Fuente: Elaboración propia

El flujo de gas seco se mantiene constante, puesto que es el flujo de gas húmedo el que se incrementa debido a que va adquiriendo el flujo de

evaporación proveniente del cacao, al mismo tiempo el flujo de cacao húmedo decrece por efecto del secado, el cacao sede el flujo de evaporación ( $W_{\text{evap}}$ ).

En el grano de cacao se han considerado tres variables para la humedad, la humedad interna ( $X_{\text{int}}$ ), la humedad superficial ( $X_{\text{sup}}$ ) y la humedad total ( $X$ ) que es la sumatoria de las dos anteriores. Por diferencia de humedades en el grano, entre la parte interna y la parte superficial se produce un flujo de difusión ( $W_{\text{dif}}$ ), esto es el flujo de agua desde el centro hacia la superficie del grano. Desde la superficie del grano se produce el flujo de evaporación ( $W_{\text{evap}}$ ). El comportamiento de la humedad interna se ilustra en la Figura 40. La humedad interna del grano de cacao es la más difícil de extraer, mientras que la humedad superficial es extraída con mayor facilidad por efecto de convección.

Se puede observar en la Figura 40, que para la etapa  $j=1$ , es decir a la entrada de la cámara de secado  $X_{\text{int\_s}}[01]=0.09$  aproximadamente, mientras que la humedad superficial registrada en la Figura 38, para la misma etapa  $X_{\text{sup\_s}}[01]$ , registra un valor de 0.26 aproximadamente, sumando un total de 0.35 que es la humedad inicial total del cacao. Para la etapa final, se registran valores de 0.04 en  $X_{\text{int\_s}}[10]$  (Figura 40) y de 0.03 aproximadamente, para  $X_{\text{sup\_s}}[10]$  en la Figura 38, dando un valor de humedad total de 0.07 en  $X_{\text{s}}[10]$ , Figura 33b.

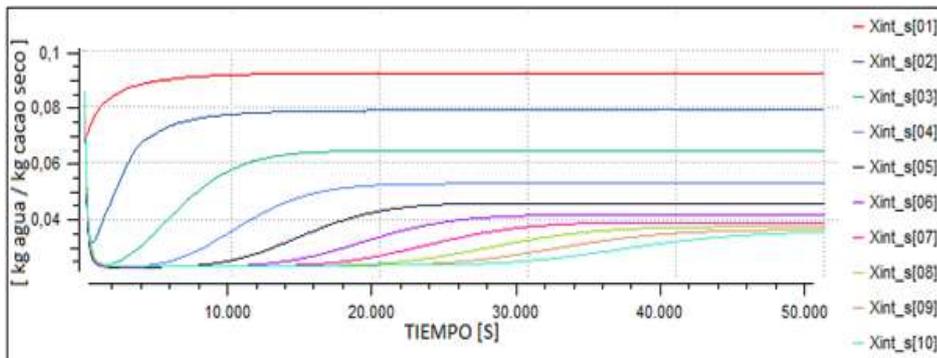


Figura 40. Evolución la variable de humedad interna del Cacao.

Fuente: Elaboración propia

Las velocidades del gas de secado ( $V_g$ ) y del cacao ( $V_c$ ) registran un incremento en el transitorio hasta alcanzar el estacionario, para cada una de las etapas se alcanza el mismo valor, es decir que estas variables

en estado estacionario mantendrán su valor prácticamente constante a lo largo de toda la cámara, su evolución se muestra en la Figura 41.

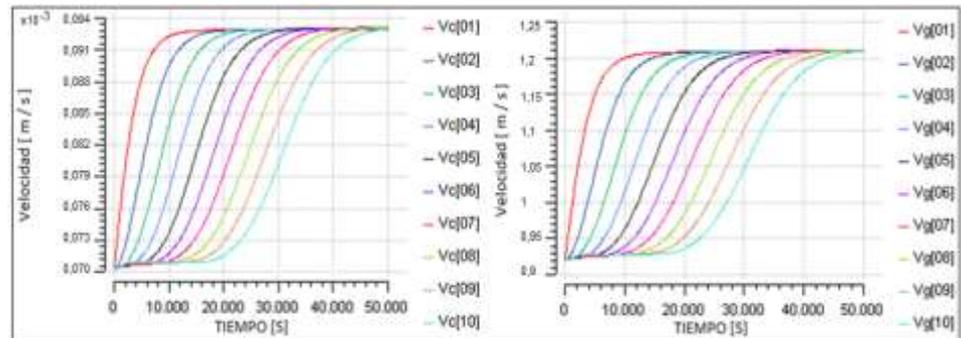


Figura 41. Izquierda: Velocidad del cacao. Derecha: Velocidad del gas de secado.  
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 41 se aprecia la evolución de las variables de velocidad del cacao y del gas de secado en función del espacio, es decir, los valores que toman las variables en cada etapa o sección del cilindro discretizado (cámara de secado), en este caso desde la sección 1 hasta la sección 10. En la Figura 42 se evidencia esta relación de disminución y de aumento en las variables de humedad del gas de secado y humedad del cacao respectivamente.

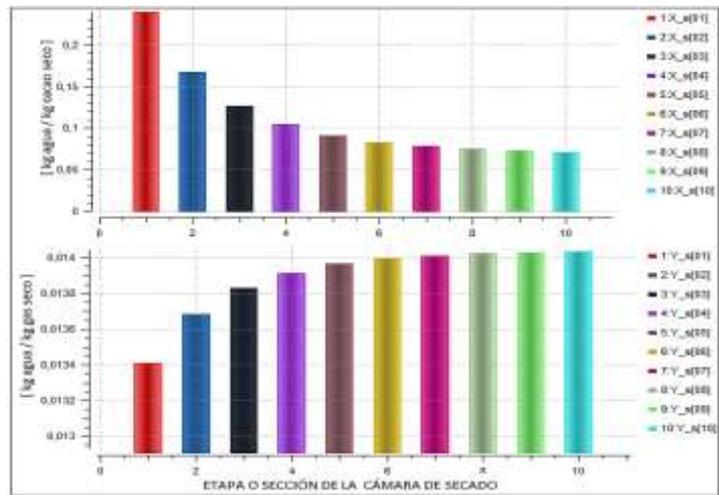


Figura 42. Superior: Humedad del cacao. Derecha: Humedad del gas de secado.

Fuente: Elaboración propia

El esquema de barras de las variables de temperatura, tanto para el gas de secado como para el Cacao se puede observar en la Figura 43; debe notarse en primer lugar, que en cada una de las secciones la temperatura del gas de secado siempre es mayor que la temperatura que adquiere el cacao y luego también se evidencia un notorio incremento en la temperatura del cacao en las últimas etapas, esto se explica por que al disminuir la velocidad de secado, la transferencia de calor desde el gas de secado hacia el grano se invierte en mayor grado para el calentamiento de la superficie del grano que para la evaporación de la humedad del mismo.

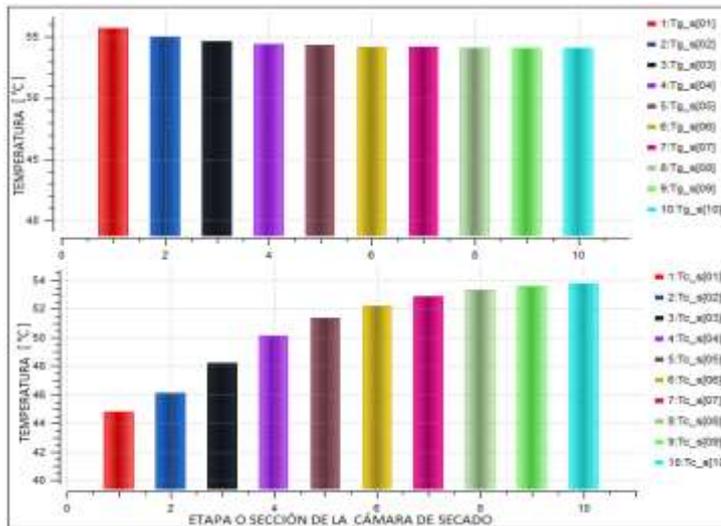


Figura 43. Superior: Temperatura del gas de secado. Inferior: Temperatura del cacao.

Fuente: Elaboración propia

### 4.3. Análisis experimental con el modelo

En la sección anterior de simulación se han obtenido resultados que permiten analizar el desempeño del modelo en su etapa transitoria y además permiten constatar que todas las variables de estado alcanzan el estado estacionario. El estado transitorio dura aproximadamente 10 horas, tiempo en el cual las variables de estado como la humedad del cacao, alcanza un valor aproximado de 8%; la temperatura del grano de cacao llega a los 53 [°C].

Resulta importante analizar el comportamiento del modelo partiendo del estado estacionario y provocando cambios en las variables de entrada, de esta forma podremos contrastar los resultados obtenidos con los primeros principios utilizados en el planteamiento del modelo.

Para este análisis se utilizó la plataforma Ecosimpro, sobre la cual se ejecutó el modelo de parámetros distribuidos, bajo distintos escenarios, a cada uno de estos escenarios se los ha llamado experimentos.

Para estos experimentos, se mantienen constantes todas las variables de entrada, excepto la variable de interés. Una de las variables más importantes o de mayor interés en el proceso de secado forzado de cacao, obviamente es la de flujo de combustible por el costo generado debido a su consumo. En la Figura 44 se observa el efecto directo que ejerce el incremento del flujo de combustible “Wcomb” en las principales variables de salida del proceso.

Las condiciones de operación para la simulación en estado estacionario son:  $W_{ch\_e}=0.0023$  [kg/s],  $W_{g\_e}=0.2$  [kg/s],  $W_{comb}=0.00015$  [kg/s],  $T_a=29$  [°C],  $T_c=29$  [°C],  $X_{c\_e}=0.35$  [kg agua/kg cacao seco] y  $Y_e=0.011$  [kg agua/kg gas seco].

Es evidente el efecto que la variación de flujo másico de combustible (de 0.00015 a 0.00017 kg/s) ejerce sobre la temperatura del gas de secado, se registra un aumento de 4 °C aproximadamente y consecuentemente se incrementa el valor de la temperatura del cacao y debido a la mayor inversión de energía calorífica se observa una disminución en el nivel de humedad del cacao en un aproximado de 2 puntos porcentuales.

Para el período comprendido entre 120000 y 160000 segundos, cuando se disminuye el flujo másico de combustible, se puede observar el efecto contrario con respecto a la fase anterior, es decir, se produce una disminución de temperatura y consecuentemente un incremento en la humedad del grano de cacao.

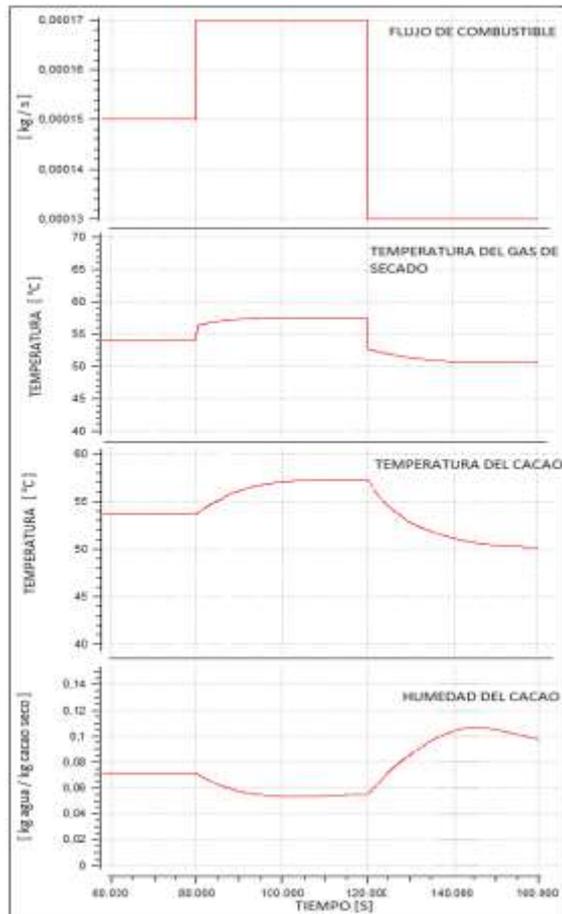


Figura 44. Efecto de la variación de flujo másico de combustible sobre el proceso de secado de Cacao.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.3.1. Efectos de la variación de flujo másico de gas de secado

El flujo volumétrico de gas de secado “ $W_{ga}$ ” es una variable importante también dentro del proceso de secado, como se puede observar en la Figura 47.

Al variar los valores de flujo de gas se generan cambios en las respuestas del sistema. Los efectos de esta variación son opuestos o contrarios a los efectos de la variación de flujo de combustible, puesto que teniendo en cuenta que las otras variables

de entrada permanecen constantes durante el experimento y que además el modelo es ejecutado en lazo abierto, las respuestas guardan absoluta coherencia con los principios fundamentales del modelo. Al producirse un incremento en el flujo de aire y mantener la misma cantidad de combustible, entonces la temperatura del gas de secado va a disminuir, consecuentemente el nivel de humedad contenida en el grano de cacao va a subir, este efecto se puede observar en la Figura 45 en el intervalo de tiempo que va desde los 80000 s. hasta los 120000 s; se produce un incremento de 0.2 a 0.22 kg/s en el flujo de aire y se obtiene una disminución de 2°C aproximadamente en el gas y un incremento aproximado de 2 puntos porcentuales en la humedad del grano.

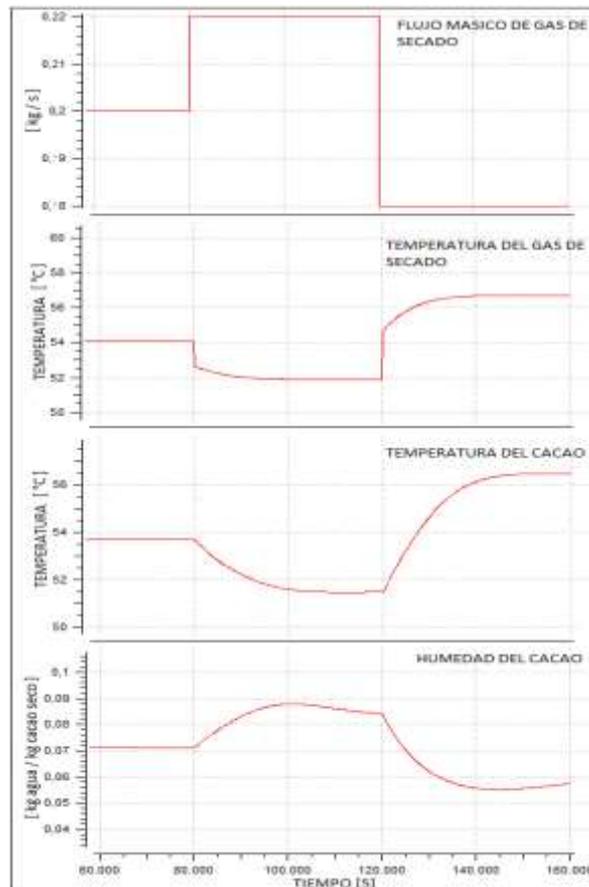


Figura 45. Efecto de la variación de flujo másico de gas de secado sobre el proceso.

Fuente: Elaboración propia

Los flujos máxicos y las velocidades tanto del cacao como del gas de secado también sufren incrementos y esto se debe basicamente al efecto que tiene la variación de temperatura sobre la humedad del gas. Al haber mayor humedad en el gas de secado, aunque el flujo de gas seco se mantenga constante, el flujo de gas húmedo “Fg” se incrementa y hace efecto sobre las demás variables del proceso. En la Figura 46 se dispone de manera global las diferentes variables de flujo y de velocidad. El incremento del flujo volumétrico de gas “Fg” ocasiona un aumento en la velocidad del gas ya que estas dos variables son directamente proporcionales. Debido al Incremento en la velocidad del gas, se producirá un aumento en la velocidad del Cacao (Vc).

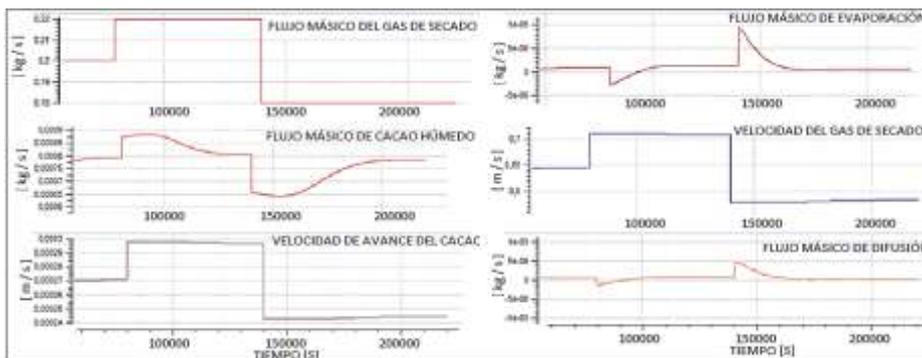


Figura 46. Efecto de la variación de flujo máxico de gas de secado en las velocidades y flujos de Cacao.

Fuente: Elaboración propia

En el caso de los flujos de difusión “Wdif” y de evaporación “Wevap”, se puede observar en la Figura 41 que se produce una variación de los dos flujos por efecto del incremento de temperatura en el gas de secado. En las últimas etapas hay un ligero descenso en estos flujos debido a que la humedad superficial del cacao en estas etapas ya es inferior a la humedad crítica del grano, cuando esto sucede la superficie húmeda decrece y el secado del grano se torna más lento y complejo.

#### 4.3.2. Efectos de la variación de la humedad del cacao

Analizando la Figura 42 podrán notarse los cambios producidos en las variables de humedad y temperatura del proceso

debido a un decremento de 0.35 a 0.30 en el primer ciclo y aumento de 0.30 a 0.40 en el índice de humedad en base seca del cacao para el segundo ciclo .

En este experimento se puede notar que la variación humedad inicial del grano de cacao “ $X_e$ ”, tiene un efecto inversamente proporcional en el nivel de humedad del grano a salida de la cámara de secado, este fenómeno se explica porque mientras se acerque el nivel de humedad superficial al valor crítico de humedad del grano es más lento o difícil el proceso de extracción de humedad; nótese en la figura 47 que a menor valor de  $X_e$  el sistema responde con mayor nivel de humedad contenida en el grano y a mayor valor de  $X_e$  sucede el efecto contrario; a pesar que las las variaciones en la temperatura del gas de secado son directamente proporcionales a la variación de la humedad del cacao, estas variaciones son mínimas, prácticamente despreciables, ya que están en un rango inferior a 1 °C.

La humedad del gas de secado se comporta según la variación de humedad de los granos de cacao, es decir que mientras más humedad sea extraída, todo ese flujo de evaporación se va a sumar al flujo de gas de secado, esto implica un incremento en el nivel de humedad del gas de secado.

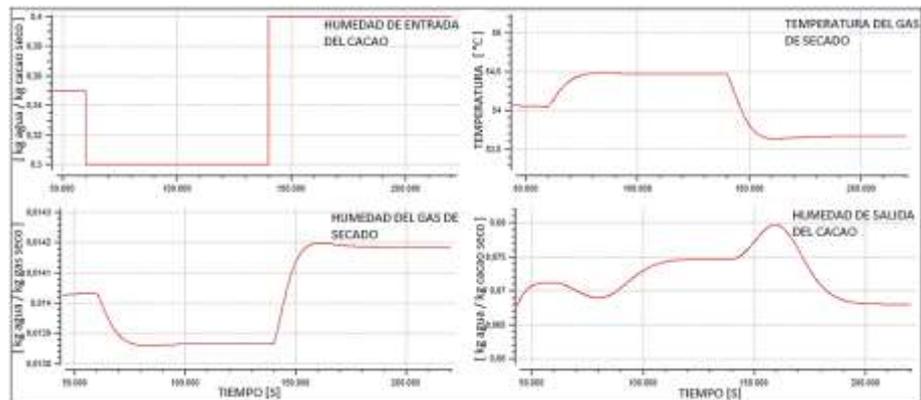


Figura 47. Efecto de la variación de la humedad de entrada del cacao en las variables del proceso.

Fuente: Elaboración propia

### 4.3.3. Efectos de la variación del flujo másico de cacao

Se realiza una simulación ejecutando una variación en el flujo de cacao húmedo a la entrada de la cámara de secado “Wch\_e”, con valores que van de 0.001 a 0.0015 [kg/s] para el primer ciclo y de 0.0015 a 0.0005 para el segundo ciclo.

El efecto inmediato frente a un cambio en el flujo de entrada de cacao es la disminución en los valores de la velocidad del gas y de la velocidad del cacao en todas las etapas del cilindro. Al fluir una menor cantidad de cacao a través del cilindro, el área de sección transversal libre para que circule el gas aumenta, lo que permite el incremento de la velocidad del gas y consecuentemente el aumento en la velocidad del cacao.

En la Figura 48 se puede apreciar que frente a un incremento en el flujo másico de cacao a la entrada de la cámara, se produce una disminución en el nivel de temperatura del gas de secado, por esta razón se genera un aumento en el nivel de humedad contenida en los granos de cacao. Debe notarse que a pesar del incremento en el nivel de humedad del cacao, se produce también un incremento en el nivel de humedad del gas de secado, esto se explica por el hecho de existir una mayor cantidad de cacao entregando humedad al gas de secado. Además se puede observar que para cuando se disminuye el flujo de cacao húmedo a la entrada del sistema, se produce un efecto totalmente contrario al descrito anteriormente.

El objetivo de esta sección es la de demostrar la pertinencia matemática del modelo planteado para el proceso de secado del cacao, por esta razón se han descrito varios experimentos orientados a demostrar que las salidas del proceso obedecen efectivamente a los principios fundamentales considerados en el modelo y además guardan plena coherencia con la teoría descrita para el secado de cacao.

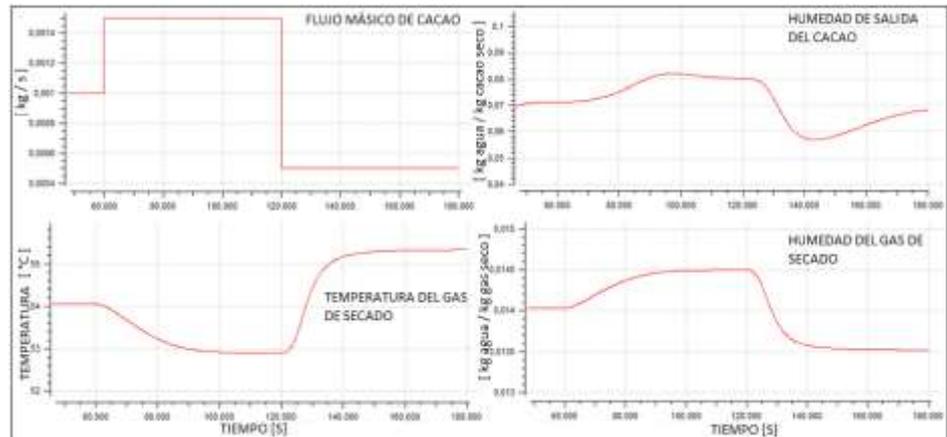


Figura 48. Efecto de la variación del flujo másico de entrada de cacao en las variables del proceso.

Fuente: Elaboración propia

#### 4.4. Validación del modelo

Dentro del el proceso de modelado y validación del modelo, se ejecutan una serie de etapas en el orden ilustrado en la figura 49. En la etapa de hipótesis se deben considerar las condiciones de funcionamiento, la precisión y el objetivo mismo del modelo. En la etapa de modelado se conjugan conocimiento teórico y experimentación sobre el proceso a representar. Resulta factible seleccionar de entre varias estructuras posibles que pueden satisfacer los requerimientos del modelo; si se modela a través de la formulación basada en principios fundamentales, en la estructura del modelo aparecerán ciertos parámetros, cuyos valores deberán ser determinados en la etapa de parametrización. Los parámetros del modelo pueden obtenerse desde la bibliografía especializada, manuales o documentación referente al proceso, sin embargo, existen parámetros cuyo valor no puede ser calculado o determinado de forma exacta y sencilla, en estos casos estos parámetros deben ser estimados.

En la etapa de codificación, luego de haber seleccionado la plataforma o software que cumple con los requerimientos de simulación, se procede con la implementación de la formulación. Para realizar la estimación de parámetros y el ajuste de la formulación se ejecuta la simulación del modelo, la misma que será repetida cuantas veces sea

necesaria incluyendo en la etapa de experimentación, que es aquella fase en donde se contrastan los resultados obtenidos desde la planta real y desde la simulación, bajo las mismas condiciones de operación. Todas las fases o etapas descritas anteriormente deben ser validadas.

Para realizar la validación de un modelo se debe tener presente que el “modelo” es una representación aproximada de la realidad, dado que es una abstracción que incluye solo aquellos aspectos o variables que resultan relevantes para el objetivo del modelo. Según el objetivo o la necesidad un mismo proceso puede ser representado por varios modelos diferentes, por ejemplo, pueden implementarse modelos para diseño, para entrenamiento o capacitación, para toma de decisiones, etc.

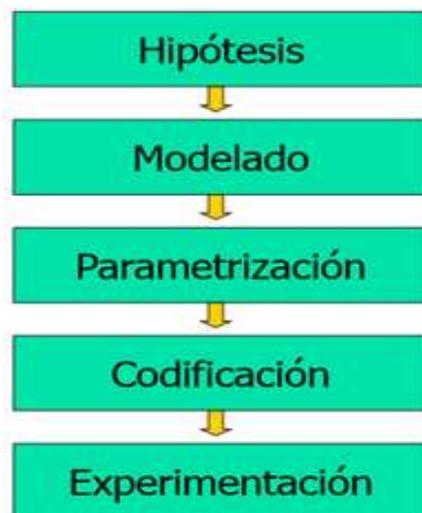


Figura 49. Secuencia de modelado y validación de un proceso.  
Fuente: Elaboración propia

Un proceso de validación de un modelo matemático o paramétrico consiste en simular el modelo con cualquier valor para los parámetros insertados o utilizados en el planteamiento del modelo, estos parámetros son básicamente valores constantes que permiten establecer o modelar una relación entre algunas variables del proceso. En la Figura 50 se puede apreciar la variación de la salida de un proceso cualquiera frente a un mismo estímulo de entrada, este resultado es el efecto de variar el valor de un parámetro “h” en el modelo. La variación en la salida del modelo puede resultar poco significativa, es decir que si al ejecutar varios experimentos con diferentes valores del parámetro “h” se obtienen

salidas muy cercanas y parecidas en forma y valor, debería descartarse ese “h” del proceso de parametrización.

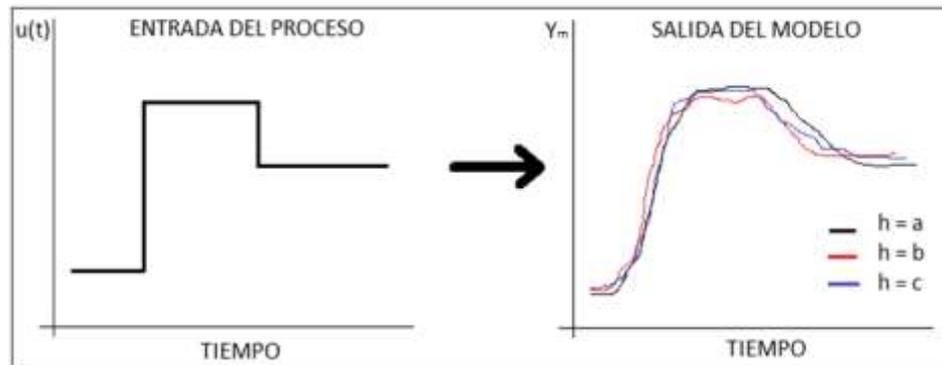


Figura 50. Efecto de la variación de un parámetro en el modelo.  
Fuente: Elaboración propia

Debe tenerse en cuenta que el proceso de validación de un modelo implica obtener cierto grado de confianza con respecto al objetivo del modelo, entonces, se entiende que no se puede afirmar la existencia de una validación en un sentido global o general. El grado de confianza del modelo se lo determina con una serie de experimentos o pruebas que pueden arrojar resultados positivos o negativos. El conjunto de resultados positivos y negativos generan el rango de validez del modelo; los resultados que corroboran las hipótesis del modelo son los que se consideran positivos. En situaciones específicas la existencia de un solo resultado negativo podría generar la pérdida de validez de un modelo.

#### 4.4.1. Parametrización con optimización

Para aplicar un proceso de optimización se puede considerar un procedimiento descrito a continuación.

- a) Obtención de datos experimentales, los cuales son leídos desde la planta operando en estado estacionario, una porción de estos datos, se utilizan para la calibración del modelo y otra para la validación del mismo.
- b) Análisis y depuración de los datos obtenidos. Deben filtrarse o separarse los datos que son producto de errores técnicos en el proceso de lectura.

- c) Análisis de sensibilidad, efectuado con los distintos parámetros del modelo, se realiza el análisis de la identificabilidad estructural y luego la selección los parámetros a estimar.
- d) Linealizar la estimación, en caso de ser necesario se debe ejecutar una reparametrización del modelo.
- e) Establecer los valores iniciales para los parámetros y sus respectivos rangos de valores.
- f) Plantear la función de costo.
- g) Realizar la estimación de los parámetros por optimización. Además, se pueden estimar la región de confianza de los parámetros y los estimar los residuos.

La expresión J, se formula para representar una función de error existente entre las diferentes salidas del modelo  $Y_m$  (para diferentes valores del parámetro “h”) y la respuesta leída experimentalmente desde la planta. J en este caso es la función de costo. Ver ecuaciones (54) y (55).

$$J = \frac{1}{N} \sum_{T=1}^N e(t)^2 \quad (54)$$

$$J = \frac{1}{N} \sum_{T=1}^N [Y(t) - Y_m(u, h, t)]^2 \quad (55)$$

En donde N es el número de valores experimentales de la salida,  $Y_m$  representa la salida del modelo, Y es la salida de la planta, e(t) representa el error, u es la entrada del proceso aplicada al modelo y a la planta y h es el parámetro a estimarse. En la Figura 51 se aprecia el error entre la salida de la planta y las salidas del modelo para distintos valores del parámetro h.

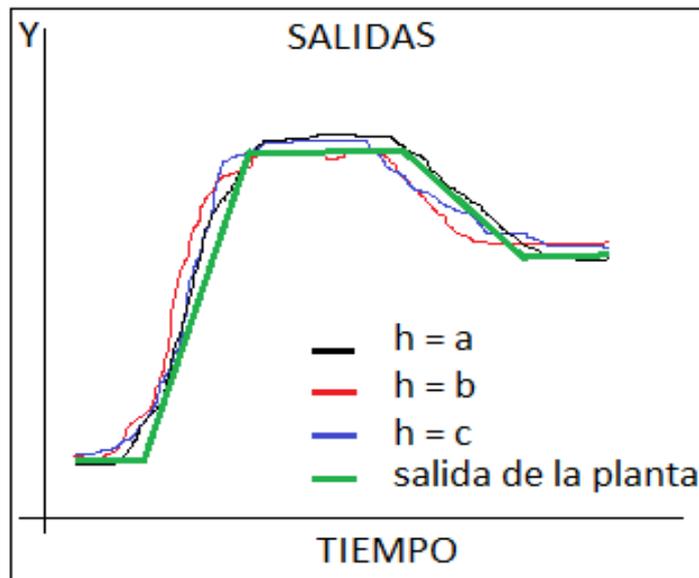


Figura 51. Error entre las salidas de la planta y del modelo.  
Fuente: Elaboración propia

Considerar que las diferentes salidas del modelo son obtenidas para el mismo valor de entrada  $u$ , en la Figura 52 se representa el diagrama de bloques del proceso.



Figura 52. Diagrama de bloques del proceso de estimación de parámetros.  
Fuente: Elaboración propia

Las salidas del modelo se obtienen ejecutando experimentos de simulación con el modelo implementado. Para la selección de los parámetros óptimos, es decir para escoger los valores de “ $h$ ” que permiten obtener un valor mínimo en el error entre las salidas del modelo y de la planta se puede implementar una rutina de optimización de acuerdo al diagrama de bloques mostrado en la Figura 53.

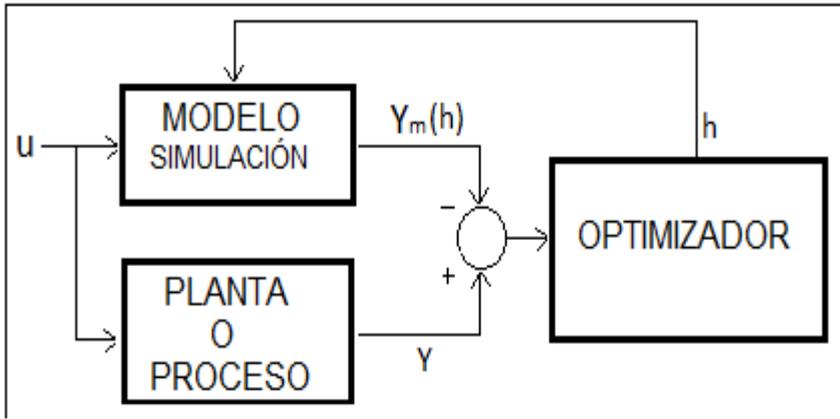


Figura 53. Diagrama para la rutina de optimización.  
Fuente: Elaboración propia

El optimizador en este caso es una secuencia programada para minimizar el error, por lo tanto la expresión matemática se representa en (56).

$$\min_h J = \min_h \frac{1}{N} \sum_{T=1}^N [Y(t) - Y_m(u, h, t)]^2 \quad (56)$$

Dentro del proceso de optimización, además de los parámetros del modelo a estimar, denominados “h” en este documento, se pueden incluir entradas no medibles y estados iniciales desconocidos.

En el caso del modelo desarrollado para la planta piloto de secado de cacao, objeto de esta investigación, se establecieron 8 parámetros y constantes para realizar el análisis de sensibilidad, estos aparecen detallados en la Tabla 11.

Tabla 11. Parámetros y constantes del modelo matemático.

Parámetro	Descripción
$A_k$	Sección de transferencia de calor
$k_d$	Coefficiente de transferencia de masa
$h_{c1}$	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
Secc	Sección transversal libre para circulación del flujo de gas de secado
$k_v$	Constante de ajuste para la relación entre la velocidad del gas y la velocidad del cacao
m	Número de discretización
$k_w$	constante de ajuste para la relación entre el flujo másico y la velocidad del cacao

Fuente: Elaboración propia

Para la validación del modelo propuesto se procedió a realizar un análisis de las respuestas del modelo en función de los parámetros utilizados en su planteamiento. Se ajustaron los valores de los parámetros, es decir se ejecutó la calibración, 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 12.

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 de la planta.

Tabla 12. Límites para la estimación de parámetros.

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

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 13 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.

Tabla 13. Estimación de parámetros – resultados.

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

Fuente: Elaboración propia

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 Figura 54 se observan las gráficas de humedad del cacao  $X_c$  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.

La toma de muestras se ha realizado durante 40000 s, incluyendo la etapa de transitorio, es decir, desde el momento de arranque de la máquina. Se puede observar en la figura 54 que durante el transitorio el error absoluto (calculado punto a punto) es mayor que en la etapa final, en donde se aprecia un error bastante bajo. Para la primera etapa encontramos errores de 0.07 como máximo y en la etapa final el error es menor a 0.01.

El cálculo del error se ha realizado considerando los 40 puntos de muestra, valores que se han determinado con una balanza científica calibrada y utilizando la relación

$\text{error} = \text{ABS}(X_{c\_p} - X_{c\_m})$ ; en donde  $X_{c\_p}$  es el valor humedad del cacao tomado desde la planta y  $X_{c\_m}$ , es el valor de humedad registrado por la simulación del modelo.

Para obtener el error total, se ha procedido a promediar los errores calculados en los 40 puntos de muestra y se ha obtenido un valor de:

$$\text{error} = 0.019725$$

Este valor de error promedio, implica que los valores de humedad de cacao leídos a la salida de la planta difieren en promedio en 1.9% con los valores generados en la simulación del modelo para la misma variable.

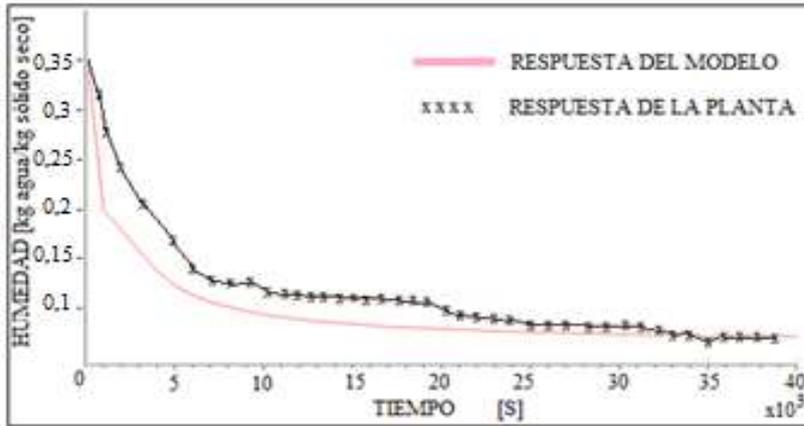


Figura 54. Curvas de Humedad obtenidas del modelo y de la planta de secado.

Fuente: Elaboración propia

Se ha realizado el cálculo de la desviación estándar del error y se obtuvo un valor de 0.01820818. El intervalo de confianza para la media del error calculado es de 0.00564267. Esto implica que el modelo maneja un intervalo de confianza para el error de medio punto porcentual con respecto a los valores medidos en la planta para la variable de humedad del cacao.

## **Capítulo 5**

### **Identificación lineal y diseño de controladores para la planta de secado de cacao**

#### **5.1. Introducción**

Para diseñar el controlador de la planta es necesario conocer la dinámica de la misma. En este caso se plantea utilizar una estrategia de control predictivo basado en modelo, por lo tanto, resulta necesario realizar el modelamiento de la planta, para lo cual se ha decidido recurrir al proceso de identificación lineal. Si bien es cierto, el proceso de secado de cacao objeto de este estudio resulta ser no lineal, se realizará la identificación la planta alrededor del punto de operación en el cual el proceso permanece estable y garantiza la obtención de granos de cacao con un nivel óptimo de humedad, esto es alrededor de 0.07 en base seca. Se conoce que los mejores resultados dentro del proceso de secado se obtienen en el proceso natural de secado, con temperaturas que oscilan entre 30 y 40 °C. En este caso de secado artificial, se trabaja con temperaturas entre 50 °C y 75 °C.

En este capítulo se plantea el diseño de varios controladores, tales como PID, GPC y NEPSAC, para lo cual resulta necesario considerar uno o varios modelos del proceso de secado. En los capítulos anteriores se describieron un modelo de parámetros concentrados y otro de parámetros distribuidos; a ellos se agregan 2 modelos más, uno obtenido como respuesta a una señal escalón y otro obtenido por identificación. Los controladores se harán considerando a la variable de flujo de

combustible a la entrada de la planta (variable de control o variable manipulada) y a la temperatura del gas de secado en la salida de la planta. El proceso no cuenta con un sistema sensor de humedad en línea para el cacao, por tal motivo, luego de establecer la existencia de una correlación entre la humedad del cacao y la temperatura del gas de secado, se toma la opción de controlar esta variable de temperatura para garantizar el nivel de humedad requerido a salida de la planta. En la Figura 55, se observan las curvas de humedad del cacao y temperatura del gas de secado, las mismas que se han obtenido con 40 muestras tomadas desde la planta. El tiempo de muestreo fue de 1000 segundos. El coeficiente de correlación lineal entre las dos variables es de 0.914.

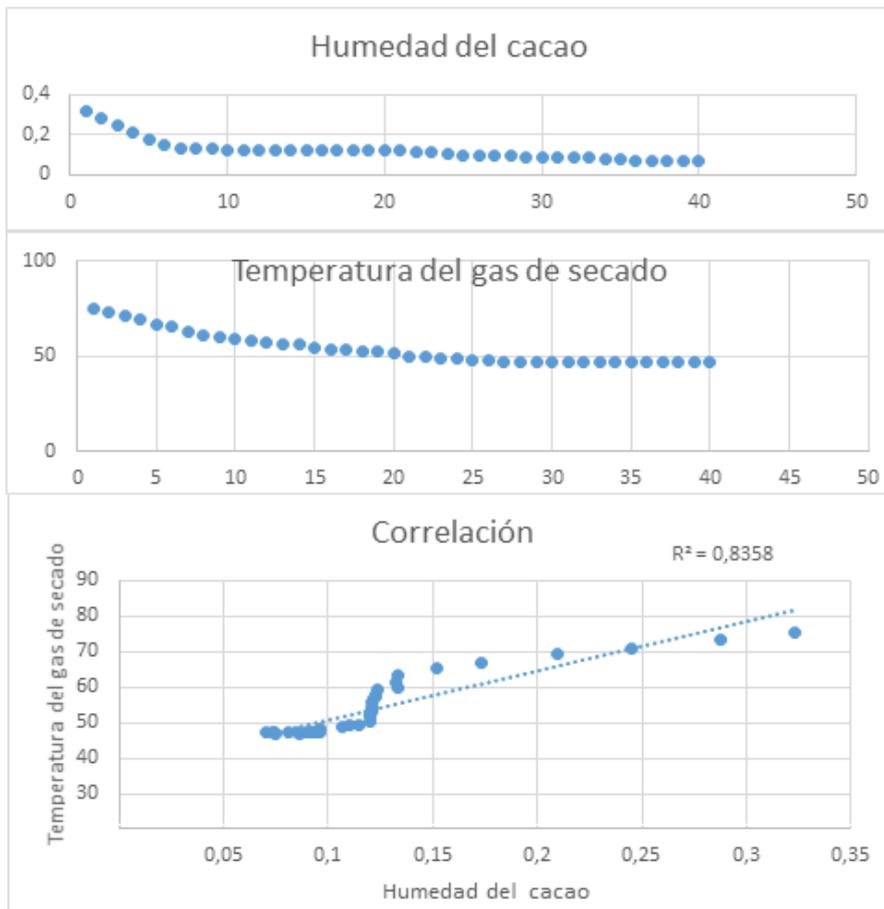


Figura 55. Correlación existente entre las variables de humedad del cacao y la temperatura del gas de secado.

Fuente: Elaboración propia

Los controladores expuestos en esta sección, están configurados para para operar en estado estacionario del proceso de secado, ya que han sido calculados en base a modelos obtenidos por identificación lineal y respuesta al escalón. El controlador NEPSAC es el único que funciona en base al modelo de parámetros distribuidos.

En la Figura 56 se muestra el efecto que tiene la variable de flujo másico de combustible  $W_{comb}$ , sobre las variables del secador. Para el tramo de 0 a 40000 s, se arranca el proceso con un valor de  $W_{comb} = 0.00025$  kg/s. Para el siguiente tramo en el instante  $t=40000$ s, se decrementa el flujo de combustible a  $W_{comb} = 0.00025$  kg/s y se observa una disminución en los valores de temperatura del aire de secado  $T_{g\_s}$ , consecuentemente la temperatura del cacao  $T_{c\_s}$  también presenta una disminución. Las humedades del aire de secado  $Y\_s$  y del cacao  $X\_s$ , también varían, aumentando y disminuyendo respectivamente. En el instante  $t = 120000$ s, se produce un incremento en el flujo másico de combustible  $W_{comb} = 0.00030$  kg/s y esto genera los cambios en sentido contrario al obtenido en los tramos anteriores sobre las cuatro variables.

Este análisis ratifica el resultado obtenido con el índice de correlación entre la variable de temperatura del aire de secado y la humedad del cacao, puesto que, los cambios de temperatura en el aire de secado son directamente proporcionales a las variaciones de flujo másico de combustible.

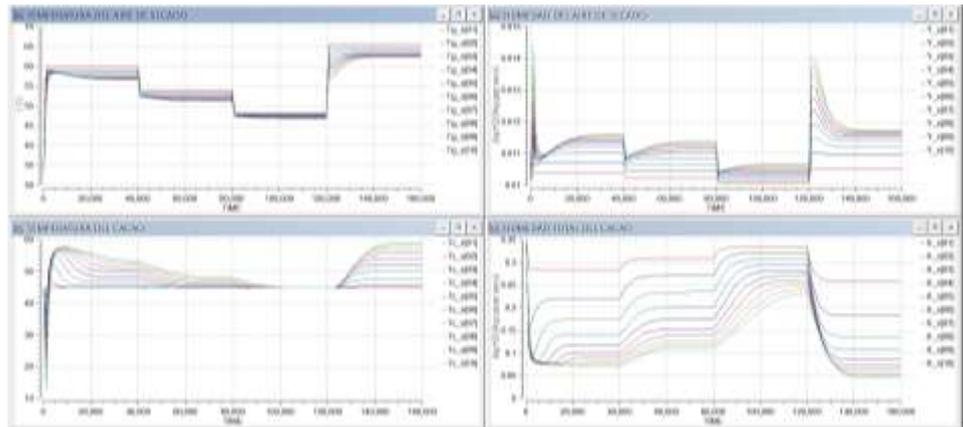


Figura 56. Efectos de la variación de  $W_{comb}$  (flujo de combustible) sobre otras variables del proceso de secado.

Fuente: Elaboración propia

## 5.2. Identificación lineal

Al iniciar este trabajo de investigación, la planta de secado de cacao no contaba con un circuito controlador de temperatura, es decir, que su operación se desarrollaba en lazo abierto.

La variable de flujo másico de combustible, para este caso, gas licuado de petróleo GLP, genera un alto nivel de sensibilidad en la temperatura del gas de secado al interior del cilindro rotatorio. De esta temperatura del aire caliente, depende el éxito de la operación de extracción de humedad del cacao; temperaturas muy elevadas, superiores a los 80 °C producen el desecamiento prematuro de la testa del grano y por consiguiente el cierre de los poros de la misma. Al bloquearse la testa del grano de cacao, se interrumpe el proceso de transferencia de masa entre el cotiledón y la testa, a pesar de seguir vigente el proceso de transferencia de energía entre el gas de secado y el grano.

El punto de operación nominal de la planta es de 0.00015 kg/s de flujo másico de combustible (GLP - C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), valor con el cual se consigue establecer una temperatura del gas de secado en el interior de la cámara de 54.85 °C bajo condiciones ambientales de 70% de humedad relativa y temperatura de 30 °C. Durante el día la temperatura ambiental varía algunos grados centígrados. Si la planta opera a lazo abierto, dicha variación genera cambios en el nivel de temperatura del gas de secado dentro de la cámara.

### 5.2.1. Respuesta de la planta en lazo abierto

En lazo abierto, varios procesos que involucran a la variable de temperatura pueden definirse según la siguiente función de transferencia descrita en (57).

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau}}{1+\gamma s} \quad (57)$$

Donde los coeficientes  $K_0$ ,  $\tau$  y  $\gamma$  se obtienen de la respuesta del sistema en lazo abierto a una entrada escalón. Se parte del sistema estabilizado en  $y(t) = y_0$  para  $u(t) = u_0$ . Se aplica una

entrada escalón de  $u_0$  a  $u_1$ , El valor del escalón debe estar entre un 10% y un 20% del valor nominal, frente a esta señal, se registra la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación [50].

En la Figura 57 se muestra la gráfica obtenida experimentalmente sobre la planta de secado de cacao durante la prueba en lazo abierto. A la señal de entrada, para este caso flujo másico de combustible, se le produjo un escalón de 15 a 17 en el nivel de apertura de la válvula (0 – 100), registrándose un incremento de temperatura en el gas de secado desde 53.1 °C hasta 55.5°C. Las condiciones de operación para la máquina de secado son:  $W_{ch\_e}=0.0023$  [kg/s],  $W_{g\_e}=0.2$  [kg/s],  $W_{comb}=0.00015$  [kg/s],  $T_a=29$  [°C],  $T_c=29$  [°C],  $X_{c\_e}=0.35$  [kg agua/kg cacao seco] y  $Y_e=0.011$  [kg agua/kg gas seco].

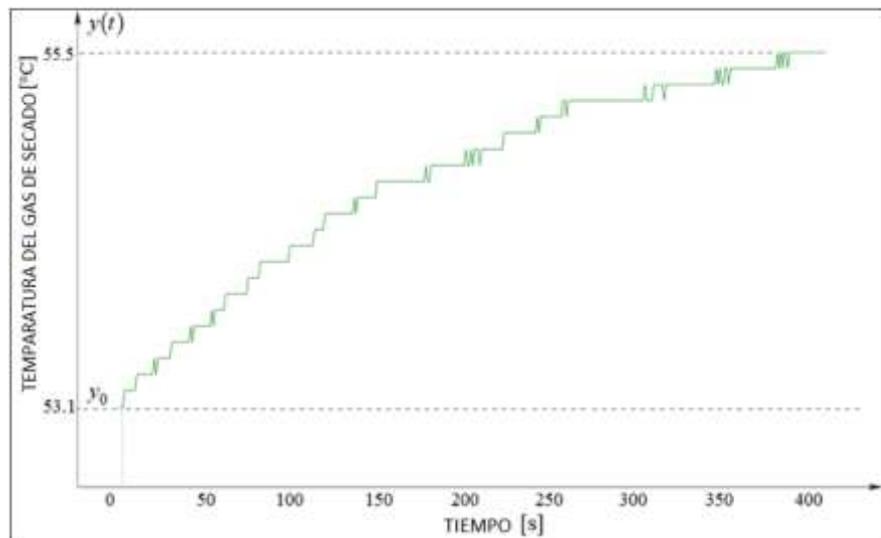


Figura 57. Respuesta al escalón en lazo abierto.  
Fuente: Elaboración propia

### 5.2.2. Diseño de la PRBS

Para el diseño de la PRBS (señal binaria pseudo ramdómica), se tomó en cuenta la dinámica del proceso, obtenida con la respuesta en lazo abierto. En la Tabla 14 se tabulan los datos para la generación de la señal.

Tabla 14. Características de la señal PRBS.

Parámetro	Valor
Flujo nominal (variable manipulable)	15
Tiempo de muestreo	1 s.
Tiempo de simulación	11400 s.
Tiempo mínimo de conmutación de la señal	300 s.
Variación de la señal	+/- 10 %

Fuente: Elaboración propia

Para este proceso se generó un total de 11400 muestras. En la Figura 58 se pueden observar las respuestas de temperatura del gas de secado, proporcionadas por la planta y por el modelo obtenido por identificación. Se seleccionó el modelo ARX (2 1 1) con un FIT del 90.76%, tasa superior a las obtenidas con los modelos ARMAX y OE.

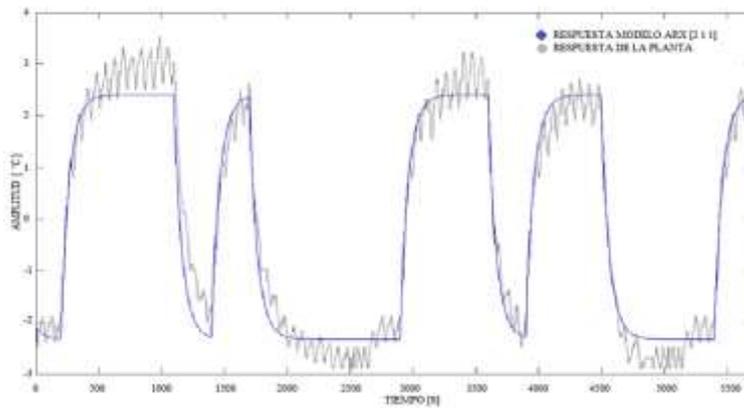


Figura 58. Respuestas de salida para el modelo identificado y para la planta.

Fuente: Elaboración propia

En (58) y (59) se representa la estructura matemática en tiempo discreto para el modelo identificado ARX.

$$A(Z) = 1 - 1.038 Z^{-1} + 0.05276 Z^{-2} \quad (58)$$

$$B(Z) = 0.00578 \quad (59)$$

### 5.3. Diseño del GPC

El algoritmo básico de control predictivo generalizado (GPC) fue propuesto por Clarke *et al.* [51] en el año 1987. En la actualidad este método es muy utilizado en los ámbitos académico e industrial. Con esta estrategia predictiva se calcula una secuencia de futuras acciones de control, minimizando una función de costo. Se minimiza una función cuadrática que por un lado mide la distancia entre la salida predicha del sistema y la trayectoria de referencia dentro del horizonte de predicción, y por otro lado mide el esfuerzo de control necesario para obtener dicha salida [52]. A diferencia de otras estrategias de control predictivo, el GPC puede proporcionar soluciones explícitas en ausencia de restricciones, además puede trabajar con procesos inestables o de fase no mínima.

Para los procesos SISO (de una sola entrada y una sola salida), al ser linealizados en torno a un determinado punto de trabajo, se puede utilizar un modelo de control auto regresivo, integrado y con medias móviles (CARIMA), como se describe en la ecuación (60).

$$A(Z^{-1})y(t) = Z^{-d}B(Z^{-1})u(t-1) + B(Z^{-1})\frac{e(t)}{\Delta} \quad (60)$$

Con  $\Delta = 1 - Z^{-1}$ , en donde, A, B y C son los polinomios siguientes en el operador hacia atrás ( $Z^{-1}$ );  $y(t)$  representa la salida del proceso,  $u(t)$  la señal de control, “d” el tiempo muerto y con  $e(t)$  se representa un ruido blanco con valor de media igual a cero.

La función de costo para esta estrategia de control viene dada por la ecuación (61).

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (61)$$

En donde  $[\hat{y}(t+j|t)]$  representa la predicción futura óptima en  $j$  pasos hacia delante de la salida, en función de los datos conocidos hasta el instante  $t$ . Los horizontes mínimo y máximo de la función de costo, con datos conocidos hasta el instante  $t$ , son  $N_1$  y  $N_2$ .  $N_u$  representa el horizonte de control.  $w(t+j)$  es la trayectoria de referencia futura, mientras  $\delta(j)$  y  $\lambda(j)$  son las secuencias de ponderación de calidad y

energía. [52]. Para el cálculo del GPC de la planta de cacao, objeto de este estudio, se consideran los datos mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15. Características de la señal PRBS.

Parámetro	Comentario
C=1	Polinomio asociado al ruido
d=5	Retardo o tiempo muerto
$\lambda=0.8$	Ponderación
$N_1=1$	Horizonte mínimo Función Costo
$N_2= d+N$	Horizonte máximo Función Costo
$N=N_u=3$	Horizonte de control

Fuente: Elaboración propia

Las señales de control  $u(t)$ ,  $u(t+1)$ ,... $u(t+N)$ , tendrán valores que minimizan la función de costo de la ecuación (5). La salida  $y(t)$ , será afectada solamente por  $u(t)$ , después del instante  $t_0$  ( $d+1$ ), ya que el proceso tiene un retardo o tiempo muerto “ $d$ ” = 5.

Resolviendo el algoritmo para las condiciones de la planta de secado, se obtienen los siguientes valores:

$$R = 1$$

$$S = [1.7020 \quad -1.5221 \quad 0.0767]$$

$$T = 0.2566$$

En dónde R, S y T son los valores con los que se pueden implementar el controlador predictivo generalizado. Otra opción para el cálculo del controlador, utilizando el mismo algoritmo, es obtener la ley de control, como se muestra en la ecuación (62).

$$\begin{aligned}
 u(t) = & u(t-1) - 1.7020y(t) + 1.5221y(t-1) - 0.0767y(t-2) + \\
 & 0.0072w(t+1) + 0.0147w(t+2) + 0.0221w(t+3) + \\
 & 0,0289w(t+4) + 0,0358w(t+5) + 0,0427w(t+6) + \\
 & 0,0494w(t+7) + 0,056w(t+8)
 \end{aligned} \tag{62}$$

## 5.4. Diseño del controlador PID

La estrategia de control PID es la más utilizada en los procesos industriales de forma general, sin embargo, los controladores predictivos son los más utilizados en las secciones económicamente más importantes dentro del ámbito industrial [53]. El nivel de aceptación de los controladores predictivos actualmente es bastante alto, prueba de aquello constituye la aplicación desarrollada para MATLAB® en [54], denominada Model Predictive Control Toolbox™. Esta herramienta permite el diseño y simulación de controladores predictivos basados en modelo, incluyendo en problema de optimización que trata de minimizar el error entre la variable medida y el valor deseado a la salida del proceso.

Varias aplicaciones de tipo industrial se pueden encontrar en bibliografía especializada, desarrolladas con control predictivo, por ejemplo, control predictivo basado en redes neuronales de un intercambiador de calor [55], rediseño e implementación de un prototipo para la medición y control de nivel y caudal de agua [56], control predictivo basado en modelo para un horno industrial [57].

Para calcular el controlador PID, se escogió el método de la curva de reacción de Ziegler - Nichols. En la figura 59 se muestra la gráfica con los datos obtenidos experimentalmente en la planta de cacao.

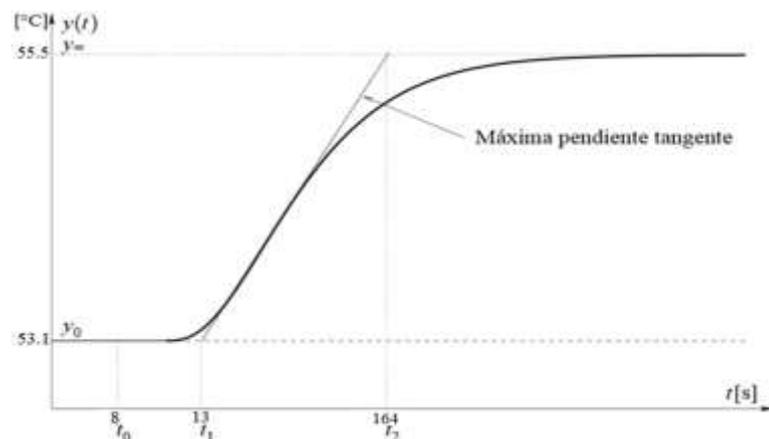


Figura 59. Curva de reacción de Ziegler-Nichols. Planta de secado de cacao.  
Fuente: Elaboración propia

Se procede a calcular las constantes  $k_0$ ,  $\tau_0$  y  $\gamma_0$ , con las ecuaciones (63), (64) y (65).

$$k_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0} = \frac{55.5 - 53.1}{17 - 15} = 1.2 \quad (63)$$

$$\tau_0 = t_1 - t_0 = 13 - 8 = 5 \quad (64)$$

$$\gamma_0 = t_2 - t_1 = 164 - 13 = 151 \quad (65)$$

Los parámetros del controlador PID propuestos por Ziegler y Nichols a partir de la curva de reacción se los calcula con las ecuaciones (66), (67) y (68).

$$k_p = \frac{1.2 \gamma_0}{k_0 \tau_0} = \frac{1.2(151)}{1.2(5)} = 30.2 \quad (66)$$

$$T_i = 2\tau_0 = 2(5) = 10 \quad (67)$$

$$T_d = 0.5\tau_0 = 0.5(5) = 2.5 \quad (68)$$

## 5.5. Diseño del controlador NEPSAC

Didriksen (2002) [58], aplicó un modelo de control predictivo (MPC) para una planta de secado de trozos de remolacha en una fábrica de azúcar en Dinamarca, el modelo desarrollado para las predicciones está diseñado para tomar datos de planta y muestra una buena respuesta frente en las variaciones futuras y a los disturbios.

El controlador MPC se compara con el control de realimentación tradicional, donde el MPC es superior. Petersen et al. (2015) [59], presentan un controlador predictivo no lineal del modelo económico optimizando (E-NMPC) para una planta de secado por aspersión, utilizando el filtro de Kalman para la estimación del estado inicial y el método de los mínimos cuadrados (ALS) para la estimación de covarianza de ruido, logrando demostrar que el E -NMPC permite una mejora en el secado en un 17% en comparación con PI convencional. En el trabajo de Normey-Rico et al. (2015) [60], estudian el efecto de la robustez de los controladores MPC, cuando el proceso aparece un tiempo muerto; proponen una estructura predictiva derivativa del Predictor de

Smith que simplifica la puesta a punto y mejora la robustez, la separación de la predicción del cálculo de control óptimo y la disminución de la amplitud de la perturbación.

En esta sección se describe la aplicación del Controlador No Lineal Predictivo Extendido y Auto ajustable (NEPSAC), en una planta de secado de cacao. El NEPSAC es la versión no lineal del Controlador de Predicción Extendido y Autoadaptable (EPSAC). De Keyser et al. (2009) [61], han trabajado en el diseño de un controlador predictivo no lineal con compensador de tiempo muerto, aplicado a una planta solar de generación. Ipanaqué et al. (2013) [62], diseñaron este tipo de controlador para un sistema evaporador dentro de la industria del bioetanol. P.Parra et al. (2015) [63], implementaron un controlador predictivo basado en modelo para un sistema secador de cacao. El modelo de control predictivo se ha popularizado como estrategia de control en muchos procesos, ya que puede manejar grandes sistemas multivariados sujetos a restricciones duras [64]; además, el control predictivo basado en modelo es importante debido a que considera el factor económico en su formulación, [65].

En la literatura especializada hay varias industriales y de control MPC, tales como: planta de energía solar, horno industrial, el sistema servo de la placa giratoria, [66]; el sistema de bus eléctrico híbrido, [67]; confort térmico, [68] y así sucesivamente, sin embargo, no hay ninguna aplicación específica desarrollada para un secador cilindro rotativo para el secado de granos de cacao, la contribución de este estudio está presente en el análisis completo de la aplicación de los controladores PID, GPC y NEPSAC de una planta piloto desarrollada para secado de cacao. El algoritmo NEPSAC fue desarrollado basado en las ideas de predicción de control extendido auto-adaptativo (EPSAC). Esa estrategia de control predictivo fue formulada por De Keyser y Van Cauwenberghe, [69].

La estrategia EPSAC considera el modelo de proceso, de acuerdo a la ecuación (69).

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (69)$$

En donde  $y(t)$  representa la señal medida a la salida del proceso,  $x(t)$  es la salida del modelo de proceso y  $n(t)$  es el modelo de proceso de

perturbación. El control requiere la predicción de la salida del proceso. Los valores de predicción se calculan de acuerdo a la ecuación (70):

$$y(t+k|t) = x(t+k|t) + n(t+k|t) \quad (70)$$

En el algoritmo EPSAC, las salidas futuras son el resultado la suma de dos efectos,  $y_{base}(t+k|t)$  es el efecto de las salidas anteriores, de  $U_{Base}(t+k|t)$  y de las perturbaciones del proceso; por otra parte  $y_{opt}(t+k|t)$  es el efecto de las acciones de control  $U(t+k|t) = u(t+k|t) - u_{base}(t+k|t)$ , como se plantea en la ecuación (71).

$$y(t+k|t) = y_{base}(t+k|t) + y_{opt}(t+k|t) \quad (71)$$

En la ecuación (72) se representa el modelo para las perturbaciones del proceso.

$$n(t) \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} \xi(t) \quad (72)$$

En donde  $\xi(t)$  es un ruido blanco y los polinomios C y D están representados en (73) y (74).

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} + \dots + c_cq^{-c} \quad (73)$$

$$D(q^{-1}) = 1 + d_1q^{-1} + d_2q^{-2} + \dots + d_dq^{-d} \quad (74)$$

La expresión matricial para  $y_{opt}(t+k|t)$  se plantea en (75).

$$Y_{opt} = GU \quad (75)$$

En donde:

$$Y_{opt} = [y_{opt}(t+N_1|t), \dots, y_{opt}(t+N_2|t)]^T \quad (76)$$

$$U = [\delta u(t|t), \dots, \delta u(t+N_u-1|t)]^T \quad (77)$$

$$G = \begin{bmatrix} h_{N_1} & h_{N_1-1} & h_{N_1-2} & \dots & h_{N_1-N_u+2} & g_{N_1-N_u+2} \\ h_{N_1+1} & h_{N_1} & h_{N_1-1} & \dots & h_{N_1-N_u+3} & g_{N_1-N_u+3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ h_{N_2} & h_{N_2+1} & h_{N_1+2} & \dots & h_{N_2-N_u+2} & g_{N_2-N_u+2} \end{bmatrix} \quad (78)$$

La respuesta futura está representada en la ecuación (61).

$$Y = \bar{Y} + GU \quad (79)$$

En donde:

$$Y = [y(t + N_1|t), \dots, y(t + N_2|t)]^T \quad (80)$$

$$\bar{Y} = [y_{base}(t + N_1|t), \dots, y_{base}(t + N_2|t)]^T \quad (81)$$

Minimizando la función de costo J, se obtiene (64).

$$\min J = \min \sum_{k=N_1}^{N_2} [r(t + k|t) - y(t + k|t)]^2 + \sum_{k=0}^{H_u-1} \lambda [u(t + k|t)]^2 \quad (82)$$

En donde  $\lambda$  es un parámetro de sintonía y  $r(t + k|t)$  es la referencia. Resolviendo el problema de minimización planteado, se obtiene la entrada (U) del proceso en (83).

$$U = [G^T G - \lambda I]^{-1} G^T [R - \bar{Y}] \quad (84)$$

En donde:

$$R = \begin{bmatrix} r(t + N_1|t) \\ \vdots \\ r(t + N_2|t) \end{bmatrix} \quad (85)$$

En el Anexo 5 se detalla el código para la implementación del algoritmo de control NEPSAC, en el cuál se utiliza el modelo de parámetros distribuidos ejecutándose en línea, es decir que uno de los objetivos fundamentales del desarrollo de este modelo, fue justamente su aplicación en este tipo de controlador.

A continuación se muestran los datos de configuración del algoritmo NEPSAC, utilizados para la implementación del controlador.

Ts=1; tiempo de muestreo

Tsim=Ts\*1600; % tiempo de simulación

Tk=Tsim/Ts+1; % pasos de la simulación

%N=10; % horizonte de predicción

N=50;

%Nu=2; % horizonte de control

Nu=1;

lam=0.2 ; % penalización de la variable de manipulable

salto=0.00001; % de salto para respuesta impulso escalón

%% Trayectoria de referencia

%% datos correspondientes a la implementación de la consigna

ref=53.0\*ones(Tk+N,1);

ref(1:400)=53.0;

ref(401:800)=51.0;

ref(801:1200)=53.0;

ref(1201:end)=55.0;

%% Simulación del modelo

% datos para ejecutar la simulación del modelo en parámetros distribuidos

$H_{ch\_e} = 30;$

$W_{ga}=0.2;$

$W_{comb}=ue(k-1);$

$T_a=29;$

$Y_a=0.013;$

$W_{c\_e} = 0.0023;$

$X\_e = 0.35;$

$X_{sup\_e} = 0.26;$

Para la implementación de este controlador se utiliza un computador que contiene el algoritmo NEPSAC codificado en MATLAB, además el computador está conectado a la planta, a través de una tarjeta ARDUINO, la misma que permite escribir la señal de control sobre la electroválvula que regula el flujo de combustible que ingresa a la planta y a través de esta misma tarjeta se leen los valores del sensor de temperatura del gas de secado, ubicado a la salida de la cámara de secado.



## **Capítulo 6**

### **Pruebas de funcionamiento en lazo cerrado sobre la planta para secado de cacao**

#### **6.1. Introducción**

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos con la operación de la planta de secado de cacao implementada como prototipo experimental durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Se parte con las curvas de respuesta en lazo cerrado, teniendo en cuenta que no ha sido factible la lectura de medidas de humedad en el grano de cacao durante el proceso de secado, se opta por trabajar con la variable fundamental del sistema que es la temperatura del gas de secado.

Luego se muestran los resultados obtenidos del proceso en régimen estacionario y en lazo cerrado, para lo cual se procedió con la implementación de distintos algoritmos de control. En la sección de anexos se puede encontrar las distintas tablas de datos y secciones de códigos de programación utilizados para la implementación de los diferentes algoritmos de control.

#### **6.2. Pruebas en lazo abierto**

Para la ejecución de estas pruebas se procedió a configurar la planta bajo las condiciones de operación descritas en la Tabla 16. Luego de realizar varios experimentos de secado en lazo abierto, se pudo notar

la importante influencia que los cambios de temperatura ambiental ejercen sobre el proceso de secado, también fue notoria la perturbación generada por la obstrucción involuntaria producida en repetidas ocasiones a la entrada del flujo de aire en la cámara de combustión.

Cabe anotar que durante las pruebas de operación en lazo cerrado se produjeron serios inconvenientes con la variable de flujo másico de cacao húmedo en la entrada de la cámara o cilindro de secado, esto debido fundamentalmente a las condiciones de fermentación previa del lote de grano de cacao a secar. Inicialmente se intentó trabajar con cacao fermentado, cuyo nivel de humedad promediaba un valor de 50% en base seca, esto ocasionó que los granos de cacao en la sección de dosificación se pegaran entre sí, ocasionando la formación de grandes bolas o pelotas de cacao, las mismas que producían dificultades en la sección de dosificación. Además, bajo las circunstancias descritas anteriormente, se produjeron errores o fallas en el proceso de secado, obteniéndose al final del experimento un producto mal secado, debido a la salida de un producto no granulado y con un nivel de humedad superficial bajo, alrededor del 7%, pero con una humedad interna superior al 20%.

Tabla 16. Valores para experimento de secado en planta (lazo abierto).

<b>VARIABLE</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDADES</b>
Wch_e	0.0023	[kg / s]
Wg_e	0.2	[kg / s]
Wcomb	0.00027-0.00033	[kg / s]
Ta	29	°C
Tc	29	°C
Xc_e	0.35	[kg agua/kg cacao seco]
Y_e	0.011	[ kg agua/kg gas seco]

Fuente: Elaboración propia

En la figura 60 se muestra la respuesta en lazo abierto para la planta de secado de cacao, los cambios de temperatura en el gas de secado obedece a cambios en el flujo másico de combustible en la entrada de la cámara de combustión.

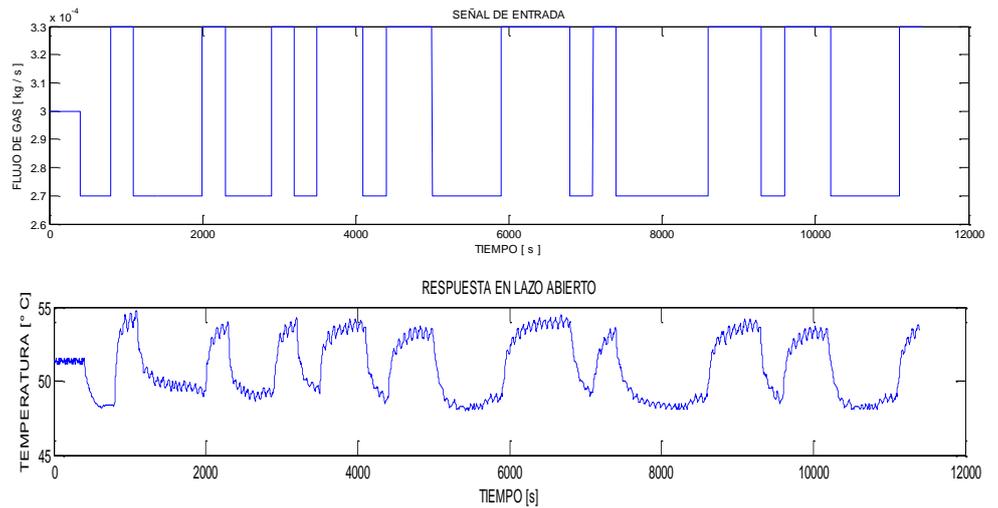
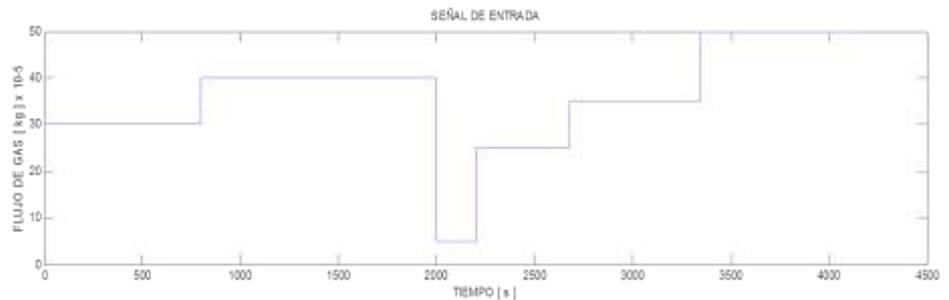


Figura 60. Respuesta de la planta de secado en Lazo abierto.  
Fuente: Elaboración propia

La curva ilustrada en la Figura 61, muestra el resultado de la planta frente a una variación de tipo escalera en el flujo másico de combustible. En función de esta respuesta se puede obtener una medida de la no linealidad del proceso, en la Tabla 14 se muestran los valores de entrada salida de la planta para las variables de flujo másico de combustible y temperatura del gas de secado respectivamente.



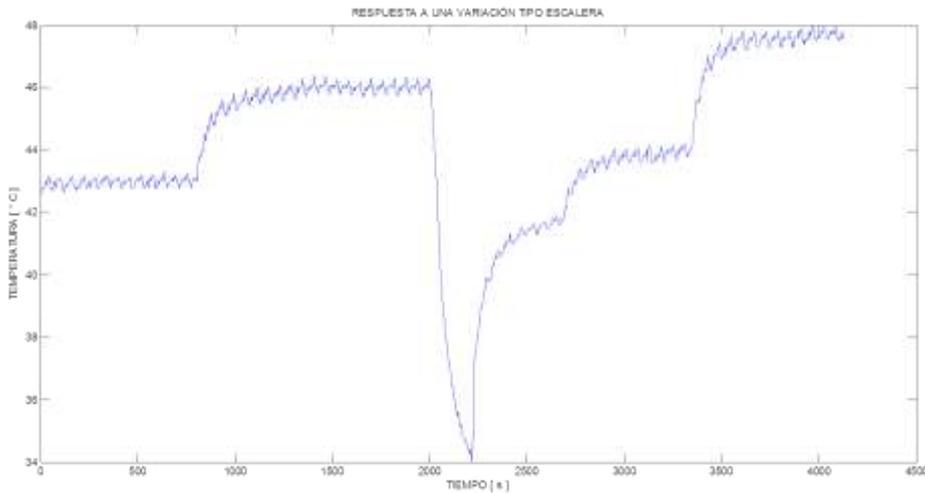


Figura 61. Respuesta de la planta a una señal de entrada tipo escalera  
Fuente: Elaboración propia

### 6.3. Pruebas en lazo cerrado

Una vez determinada y analizada la dinámica de comportamiento de la planta en lazo abierto se procedió a diseñar e implementar diferentes circuitos de control en lazo cerrado. En el capítulo 5 de este documento se describen los detalles de diseño correspondientes a los controladores PID, GPC, EPSAC y NEPSAC.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con cada uno de los algoritmos y su respectiva comparación entre ellos, con la finalidad de analizar el rendimiento, ventajas y desventajas de su aplicación.

En la Figura 62, se ilustra la respuesta de la planta, operando bajo un algoritmo de control predictivo generalizado GPC, bajo la plataforma de simulación.

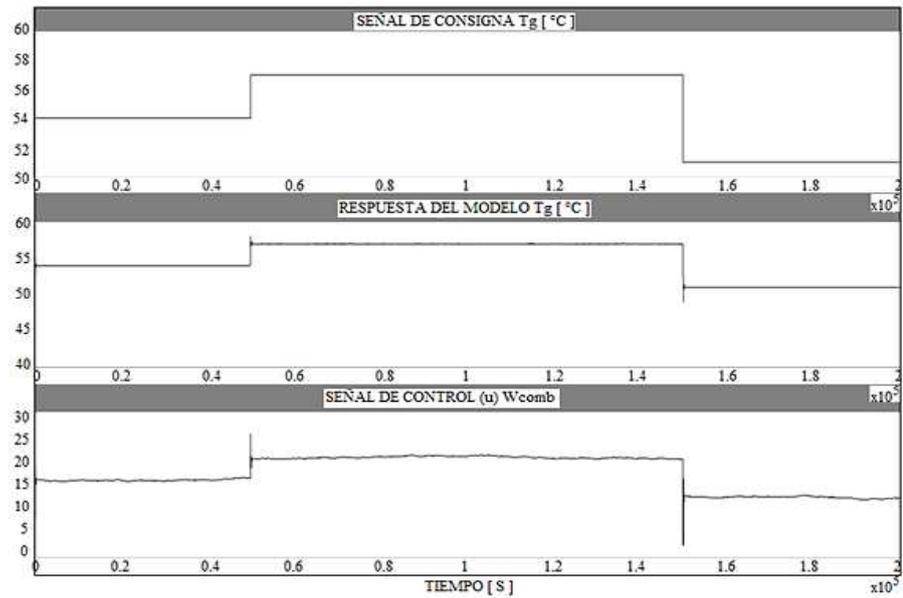


Figura 62. Simulación del GPC actuando sobre el modelo identificado.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 63, se observa el comportamiento de la planta de secado, trabajando alrededor del punto de operación sobre el cual fue linealizado. El tiempo de muestreo es de 1 segundo.

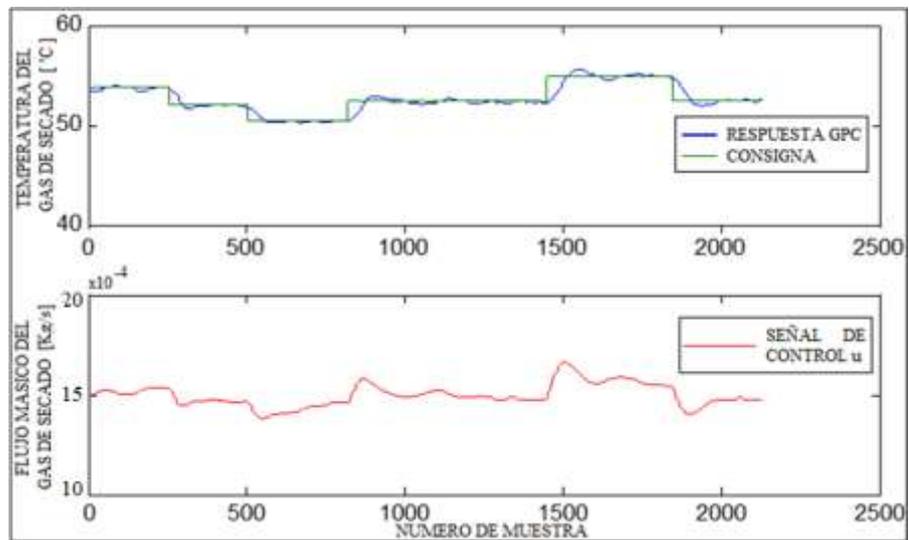


Figura 63. Respuesta de la planta alrededor del punto de operación nominal.

Fuente: Elaboración propia

Con la finalidad de contrastar la respuesta de la planta bajo los efectos de los controladores PID y GPC, se realizó un experimento para registrar el comportamiento de la variable de temperatura del gas de secado para una misma señal de consigna.

En la Figura 64, se aprecian las respuestas de la planta frente a la consigna establecida y en la Figura 65, se muestran las acciones de control generadas por los controladores GPC y PID.

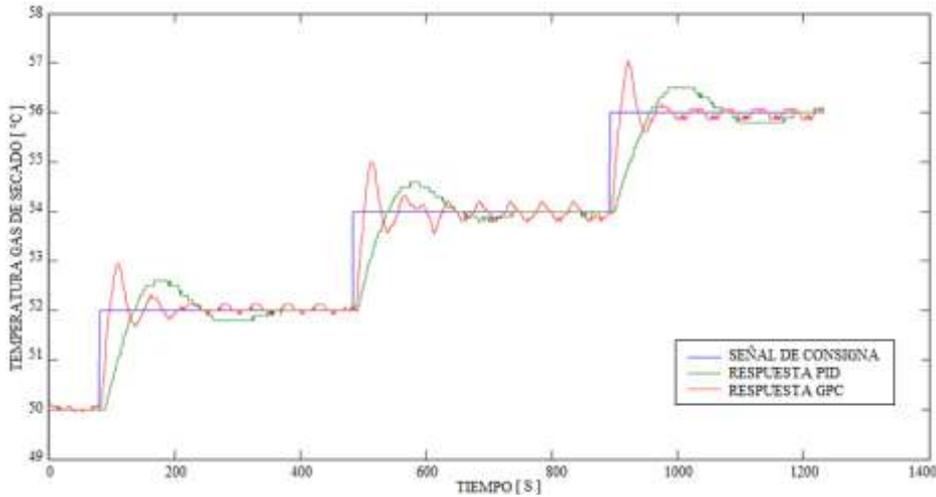


Figura 64. Respuesta de la planta para los controladores GPC y PID.  
Fuente: Elaboración propia

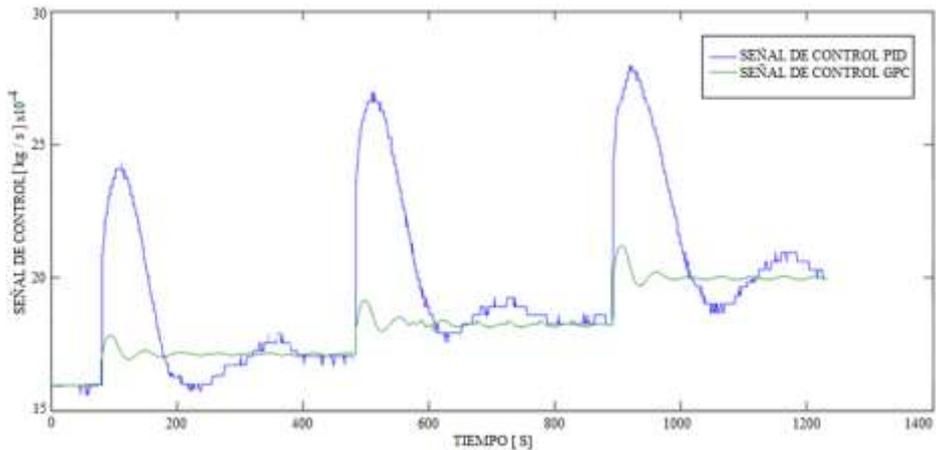


Figura 65. Señales de control GPC y PID.  
Fuente: Elaboración propia

La estrategia de control predictivo GPC, implementada en la planta permite disminuir el uso de combustible y alargar el tiempo de vida útil del actuador utilizado para la dosificación de combustible; esto comparando su rendimiento con respecto al del controlador PID.

Los resultados de humedad de los granos de cacao sometidos al proceso de secado controlado con la estrategia de control GPC, se exponen en la Figura 66. Las muestras se tomaron, extrayendo granos del proceso cada 30 minutos. El análisis de humedad se realizó con un equipo de laboratorio OHAUS MB – 45.

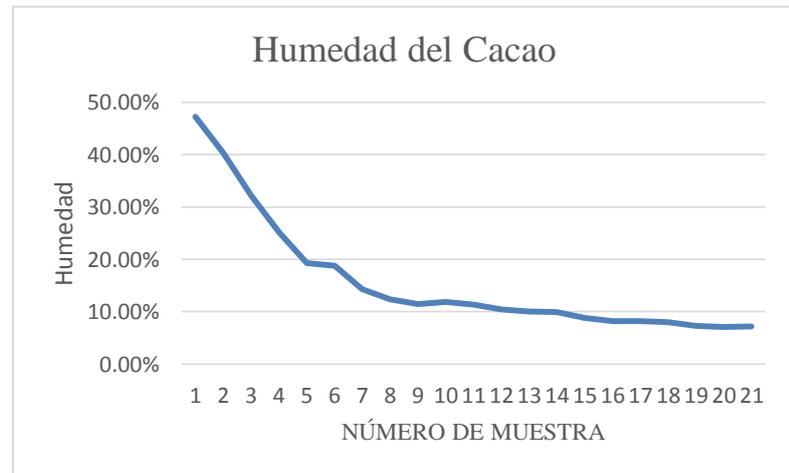


Figura 66. Humedad del cacao.  
Fuente: Elaboración propia

La planta es conducida a un punto de operación nominal hasta que alcanza un valor de estado estacionario de 0,00015 [kg /s], para el flujo de combustible y de 54.85 [° C] para la temperatura del gas de secado, Se han implementado tres controladores en la misma plataforma embebida (MATLAB + ARDUINO), el actuador es una electroválvula comandada con una señal PWM, la señal de referencia varía entre 50 y 55 [° C].

La Figura 67 ilustra las actuaciones de los controladores Como respuesta a las pruebas experimentales de cambio de nivel en la señal de referencia.

En la misma figura se puede observar que, en el controlador PID: hay una señal lo suficientemente cerca de la temperatura de referencia, es

decir un mejor seguimiento con respecto a los otros dos controladores; en el controlador GPC: La señal de temperatura sigue la referencia, pero su rendimiento es menor con respecto al PID y al NEPSAC.

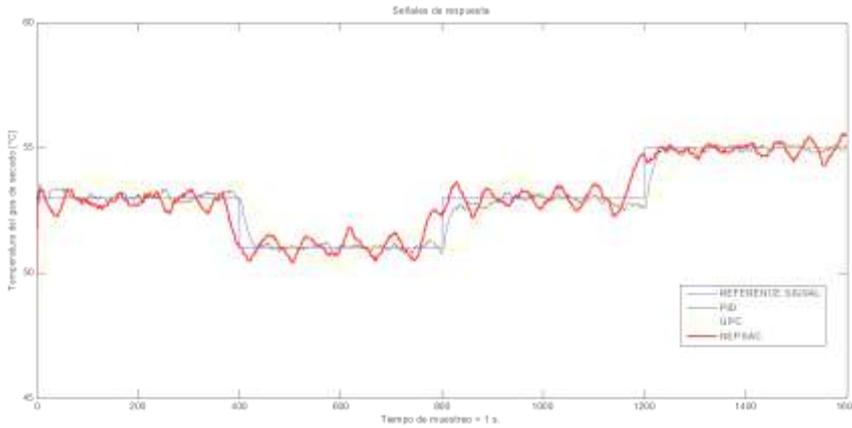


Figura 67. Señales de respuesta.  
Fuente: Elaboración propia

En el controlador NEPSAC: la temperatura tiene una variación de +/- 0,5 grados Celsius y una anticipación pronunciada a los cambios de referencia, lo cual es bueno, ya que reduce el tiempo de establecimiento de la señal en el siguiente valor de consigna. Ver la Figura 68.

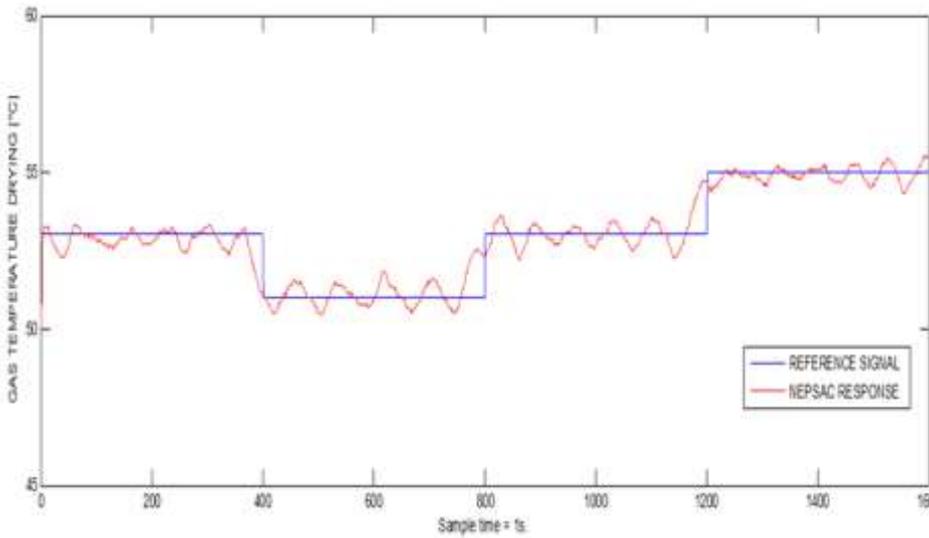


Figura 68. Señal de respuesta del controlador NEPSAC.  
Fuente: Elaboración propia

Se puede afirmar que los tres controladores presentan de forma general un buen desempeño con respecto a los cambios en el punto de ajuste, sin embargo, en la Figura 69, se puede notar que en el controlador PID, en general la respuesta es bastante estable, pero tiene pequeñas oscilaciones con una frecuencia relativamente alta, sustancialmente igual a la frecuencia de muestreo (1 Hz), lo que implica que el actuador cambia de posición (de apertura-cierre) en cada instante de muestreo, provocando una disminución de la vida útil del actuador.

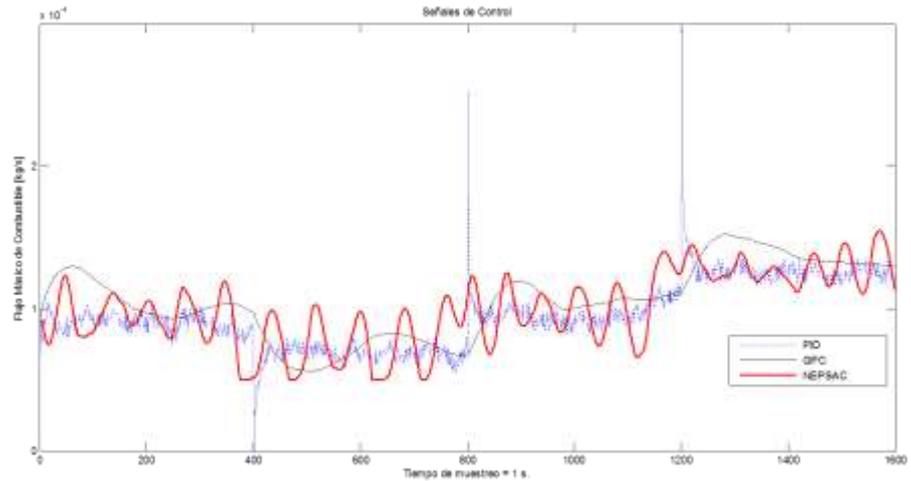


Figura 69. Señales de Control PID, GPC y NEPSAC

Fuente: Elaboración propia

En el controlador GPC: no hay fluctuaciones recurrentes pero cambia drásticamente; en controlador NEPSAC: está en constante oscilaciones más amplias, pero con mucha menor frecuencia, lo que da una señal más suave para el actuador. Desde el punto de vista del consumo de energía, NEPSAC tendría un consumo similar o inferior al PID y GPC respectivamente.

En esta última sección se ha presentado la aplicación de un control predictivo modelo no lineal, NEPSAC, para el secado de cacao, en una planta real; pasando por los análisis realizados a nivel de simulación y utilizando un modelo no lineal en parámetros distribuidos para la implementación del controlador.

Finalmente, se ha comparado el rendimiento de un controlador NEPSAC con los controladores PID y GPC, en donde se ha podido notar la ventaja del NEPSAC, sobre todo en cuanto tiene que ver con el comportamiento de la variable manipulada, esto hace que sea factible un ahorro de consumo de combustible.

## **Conclusiones**

Con el desarrollo del presente trabajo de tesis doctoral, se ha logrado cumplir los objetivos planteados en la propuesta inicial de la misma. Al culminar esta investigación, con base en los fundamentos y principios teóricos expuestos y de acuerdo a los resultados experimentales obtenidos con la ayuda de las plataformas de simulación y de las pruebas ejecutadas con la planta de secado piloto, se emiten las siguientes conclusiones:

- Resulta totalmente factible, secar granos de cacao de manera forzada o artificial, utilizando un cilindro rotatorio y un flujo de aire caliente; Actualmente queda implementada una planta piloto para secado de cacao con estas características. Las pruebas experimentales han permitido obtener granos de cacao con niveles de alrededor del 7% de humedad en base seca, conservando la integridad física del grano.
- Reducir el tiempo de secado de los granos de cacao. Por exposición al sol, el tiempo de secado varía entre 4 y seis días dependiendo del tipo de cacao y de las condiciones climáticas ambientales. Con el sistema planteado, analizado, desarrollado e implementado en esta investigación se ha conseguido secar granos de cacao en tiempos que varían entre 10 y 12 horas. Esta situación es uno de los logros más importantes y destacables dentro de los resultados de la presente tesis doctoral.

- Los modelos matemáticos obtenidos para representar la dinámica de la planta piloto construida para fines experimentales, han podido ser validados satisfactoriamente. Se utilizó la técnica de identificación lineal en un caso, la parametrización global como segundo caso y finalmente un modelo basado parámetros distribuidos, el mismo que resultó ser de gran ayuda para la implementación del controlador predictivo basado en modelo.
- Al tener la planta piloto implementada un comportamiento No Lineal, resultó de gran utilidad el modelo en parámetros distribuidos, ya que este logró representar la dinámica del sistema a lo largo de un gran rango de operación de la planta, esto es entre los 30 y 80 [ ° C] para la temperatura del gas de secado, sin problema alguno.
- Se ha conseguido implementar algoritmos de control PID, GPC y NEPSAC, exitosamente. El control en lazo cerrado para planta en particular funciona satisfactoriamente para cualquiera de los algoritmos antes mencionado.
- En lo que tiene que ver con el hardware del sistema de estudio, se concluye que los algoritmos de control utilizados en esta investigación han sido implementados satisfactoriamente sobre sistemas embebidos. Las tarjetas de desarrollo utilizadas para la implementación de los controladores permiten trabajar con sistemas operativos de código abierto como lo es Linux y con plataformas de desarrollo también de código abierto como lo es Scilab.
- Siendo la Fermentación una etapa de gran importancia y además previa a la etapa de secado, se sugiere emprender con futuros trabajos de investigación tendientes a mejorar este proceso, de manera particular, en cuanto tiene que ver con los tiempos utilizados para la ejecución de esta fase y con la regulación de la temperatura del evento. Esto permitirá alcanzar un proceso de beneficiado, totalmente controlado, obteniendo beneficios de disminución de tiempo, garantía en los niveles de humedad y obviamente reducción de costos en esta etapa de producción.

## Bibliografía

- [1] ICCO Quarterly Bulletin of Cocoa Statistics, Vol. XXXIX, No. 4, Cocoa year 2012/13. Published: 02-12-2013.
- [2] PORTAL OFICIAL DE ANECACAO. Estadísticas comerciales del cacao ecuatoriano. Disponible en: <http://www.anecacao.com/es/cacao-nacional/>
- [3] Banco Central del Ecuador (BCE) Dirección de Inteligencia Comercial e Inversiones PRO ECUADOR 2013.
- [4] Enríquez G. A. Cacao Orgánico. Guía para Productores Ecuatorianos. Instituto Nacional Autónomo de investigaciones Agropecuarias. INIAP. (2004). Ecuador.
- [5] Moreno, M. (2004) El Cultivo del Cacaotero. Ediciones de la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora. Colección Docencia Universitaria. Barinas, Venezuela.
- [6] Alverson, W., B. A. Whitlock, R. Nyffeler, C. Bayer y D. A. Baum. (1999) Phylogeny of the core Malvales: evidence from ndhF sequence data. American Journal of Botany 86(10), p. 1474–1486.
- [7] Sousa Silva, C y A. Figueira (2005). Phylogenetic analysis of Theobroma (Sterculiaceae) based on kunitz-like trypsin inhibitor sequence. 250, p. 93-104.
- [8] Portillo, E; Graziani L. y Cros E. 2006. Efectos de algunos factores post-cosecha sobre la calidad sensorial del cacao criollo porcelana (*Theobroma cacao* L.). Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ). Vol. 23, p. 49-57. Venezuela.

- [9] 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. (2009).
- [10] Ramos. La fermentación, el Secado y Almacenamiento del Cacao. Taller Internacional de Calidad Integral de Cacao. Memorias INIAP. 2004. Quevedo, Ecuador, p. 1- 8.
- [11] Braudeau J. El Cacao. Técnicas Agrícolas y Producciones Tropicales. Primera edición. Barcelona, España. Editorial Blume. P. 297.
- [12] Torres, O., L. Graziani de Fariñas, L. Ortiz de Bertorelli y A. Trujillo. 2004. Efecto del tiempo transcurrido entre la cosecha y el desgrane de la mazorca del cacao tipo forastero de Cuyagua sobre características del grano en fermentación. *Agronomía Tropical*. 54-4, p. 481-495.
- [13] Nogales, J., L. Graziani de Fariñas y L. Ortiz de Bertorelli. 2006. Cambios físicos y químicos durante el secado al sol del grano de cacao fermentado en dos diseños de cajones de madera. *Agronomía Tropical* 56-1, p. 5-20.
- [14] Puziah, H., S. Jinap, M. Kharidah and A. Asbi. 1998. Effect of mass and turning time on free amino acid, peptide-N, sugar and pyrazine concentration during cocoa fermentation. *J. Sci. Food Agric.* 78, p. 543-550.
- [15] Ligia Ortiz de Bertorelli, Lucía Graziani de Fariñas y Gervaise Rovedas L. Influencia de Varios Factores sobre Características del Grano de Cacao Fermentado y Secado al Sol. *Agronomía Tropical*. (2009), 59(2), p. 119-127.
- [16] Saltos, A; Sánchez V; Anzules A. 2006. Beneficio del Cacao. In Taller de entrenamiento en calidad física y organoléptica de cacao (20-24 de marzo/2006, Quevedo-Ecuador). Memorias INIAP. Quevedo Ecuador. p. 7
- [17] Cros, E. Jeanjean, N. Cocoa quality: effect of fermentation and drying. *Plantations, research, development*. (1995), 24 p. 25-27.
- [18] Enríquez G. A. Control de calidades durante un proceso productivo, *Revista INIAP Quito, Ecuador*. (1993). 2. (1): 37-42.
- [19] Rincón, S.O. 1999. Manual del Cacaotero. Bogotá Colombia., Cenicafé p. 78 – 80.

- [20] Armijos, A. Caracterización de acidez como parámetro químico de calidad en muestras de cacao (*Theobroma cacao* L.) fino y ordinario de producción Nacional durante la fermentación. Tesis de Licenciatura En Química, Quito, Ecuador, 2002, Pontificia Universidad Católica p. 103.
- [21] Jiménez, J.C. Efectos de dos Métodos de fermentación sobre la calidad de tres grupos de cacao (*Theobroma cacao* L.) cultivados en la zona de Quevedo, Provincia de los Ríos. Tesis Ingeniería Agronómica, Guaranda Ecuador, 200, Universidad Estatal de Bolívar, p. 57.
- [22] A. O. Fagunwa, O. A. Koya y M.O. Development of an Intermittent Solar Dryer for Cocoa Beans. *Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal*. Manuscript number 1292. Vol. XI. July, 2009.
- [23] Warren L. McCabe. et al (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. McGraw-Hill / Interamericana de México.
- [24] W. A. M. McMINN, T. R. A. MAGEE. *Institution of Chemical Engineers Trans IChemE*, Vol 77, Part C, September 1999.
- [25] Pedro Fito Maupoey, Andrés Grau, Ana María Albors Sorolla y José Manuel Barat Baviera. (2001). *Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente*. PF Maupoey, AMA Grau, AMA Sorolla, JMB Baviera - 2001 - Disponible en: <http://www.books.google.com>.
- [26] Savaresi SergioM. Bitmead Robert R. Pierce Robert. *On Modelling and Control of a Rotary Sugar Dryer*. *Control Engineering Practice* 9 (2001) p. 249-266.
- [27] 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, p. 151-160.
- [28] Merino Gómez, Alejandro. *Modelado y simulación de un secadero de pulpa*. 2ª Reunión de Usuarios de EcosimPro, UNED, Madrid 24-25 de febrero del 2003. [http://www.ecosimpro.com/download/articles/C02\\_02\\_es.pdf](http://www.ecosimpro.com/download/articles/C02_02_es.pdf).
- [29] Castaño, F.; Rubio, F.R.; Ortega, M.G. *Modelado de Secadores Rotatorios en Isocorriente*, RIAI, Vol. 6, Núm. 4, (2009), p. 32-43.

- [30] Jayaraman, K.S. and Das Gupta, D.K., 1995, Drying of fruits and vegetables, in Handbook of Industrial Drying, Mujumdar, A.S. (ed) (Marcel Dekker Inc, New York) p. 643 –690.\*
- [31] Enríquez G. A. Manual del Cacao para agricultores. CATIE, ACRI, UNED. (1987). San José-Costa Rica.
- [32] Héctor A. Tinoco, Diana Yomali Ospina. 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.
- [33] 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).
- [34] Parra Rosero P., Saavedra R., Ipanaqué Alama W. (2012). Modelación y Simulación en Ambiente Ecosimpro de una Cámara de Secado para Cacao. Revista INGENIUS, Número 8, (2012), p. 54-60.
- [35] 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) p. 1 – 10
- [36] 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 Elsevier. (2013), p. 264-271.
- [37] Ramos, G.; Ramos, P. y Azocar, A., Beneficio del Cacao, In Manual del Productor de cacao, Mérida Venezuela, (2000), p. 58-69.
- [38] Bruin, S. and Luyben. Drying of food materials: a review of recent developments (1980).
- [39] P.P. Rosero. Modeling and simulation in distributed parameters for a dryer of cocoa beans. 2015 Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies. Pages: 41-47, DOI: 10.1109/Chilecon.2015.7400350.
- [40] P.P. Rosero; W. I. Alama; J. M. Silupu. Design and Implementation of a Temperature Predictive Controller for a Dryer Plant of Cocoa Beans. Computer Aided System Engineering (APCASE), 2015 Asia-Pacific Conference on Pages: 202 - 207, DOI: 10.1109/APCASE.2015.43.

- [41] G. Nonhebel; A.A.H. Moss. El secado de sólidos en la industria química. Editorial Reverté, (2002). Barcelona, p. 4.
- [42] S. Orduz Aladino Diseño Mecánico de un Horno Rotatorio de Funcionamiento Horizontal. Tesis de grado, Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle. Santiago de Cali Colombia, (2012), p.26-27.
- [43] Perry R., Maloney J. y Green D. Manual del Ingeniero Químico. 4Ed. McGraw - Hill. 2001.
- [44] Torres D. Diseño mecánico de un horno rotatorio. Trabajo de grado Ingeniería Mecánica. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Cali.
- [45] Lenis J. y Londoño F. Rediseño y construcción de un horno rotatorio para procesos minerales de alta temperatura. Planta piloto. Trabajo de grado de Ingeniería Mecánica. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. Cali.
- [46] RG Badillo. Un concepto epistemológico de modelo para la didáctica de las ciencias experimentales. Revista electrónica de enseñanza de las ciencias, 2004.
- [47] William L, Luyben. Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers Second Edition.
- [48] S. Friedman and W. Marshall, "Studies in rotary drying Part II: Heat and mass transfer," Chemical Engineering Progress, vol. 45, pp. 573–588, 1949.
- [49] P. Y. McCormick, Gas velocity effects on heat transfer in direct heat rotary dryers, Chemical Engineering Progress, vol. 58, no. 6, pp. 57–61, 1962.
- [50] Ogata, K. Modern Control Engineering (5th Edition). Respuesta al escalón. p. 136. 2007.
- [51] Clark, DW. Mohtadi, C., Tuffs, PS. Generalized predictive control. Part I. The basic algorithm. Automatica 23 (2), 137-148, 1987. 3869, 1987.
- [52] Camacho, EF. Bordoms, C. Model Predictive. Control. Second Edition. Springer-Verlag New York, Inc. pp. 48 – 53. 1997.
- [53] De Keyser, R. A 'Gent'le Approach to PREDICTIVE CONTROL.UNESCO Encyclopaedia of Life Support Systems (EoLSS). Eolss Publishers Co Ltd, Oxford, 2003.
- [54] Bemporad A, Morari M, Lawrence Ricker N. Model Predictive Control ToolboxTM.2005.

- [55] Jalili, M, Araabi, B. Neural Network based Predictive Control of a Heat Exchanger Nonlinear Process, *Journal Of Electrical & Electronics Engineering*, 4(2), 1219 – 1226. (2004).
- [56] Ramírez, J, Londoño, C. Rediseño e implementación de un prototipo para la medición y control de nivel y caudal de agua, *Tecno Lógicas*, 1(1), 171-185. (2007).
- [57] Rodríguez, M. A, León, J. Control Predictivo basado en Modelo de un horno industrial, *Revista Colombiana de Física*, 34(1), 245 – 249 (2002).
- [58] Didriksen, H. “Model based predictive control of a rotary dryer”. *Chemical Engineering Journal*. ELSEVIER. Denmark, 53 - 60, 2002.
- [59] Petersen, L. N., Jorgensen, J. B., Rawlings, J. B. “Economic Optimization of Spray Dryer Operation using Nonlinear Model Predictive Control with state Estimation”. *ScienceDirect*, ELSEVIER, Denmark. Volume 48, Issue 8, Pages 507-513, 2015.
- [60] Normey-Rico, J. E., Lima, D. M., Santos, L. M. “Robustness of Nonlinear MPC for Dead-time Processes”. *5th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control NMPC 2015* Volume 48, Issue 23, Pages 332-341 2015.
- [61] De Keyser, R. Gálvez-Carrillo, M., Ionescu, C. “Nonlinear predictive control with dead time compensator: Application to a solar power plant”. *Solar Energy*, ScienceDirect, ELSEVIER, Volume 83, Issue 5 ,pp. 743–752 Belgium. 2009.
- [62] Ipanaque, W., Oliden, J., Manrique, J., Hernandez, A., Dutta, A., De Keyser, R. (2013). “Nonlinear Predictive Control of an Evaporator for Bioethanol production”. *Control European Conference (ECC)*. p. 2573-2578. INSPEC Accession Number: 13936400. Publisher IEEE. Zurich, Switzerland. 2013.
- [63] Parra, P. “Modeling and simulation in distributed parameters for a dryer of cocoa beans”. *CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)* . pp 41 – 47, 2015.
- [64] Angeli, D., Rawlings, N. B., Cuyler, N. B. “Fundamentals of Economic Model Predictive Control”. *51st IEEE conference on Decision and Control*, p. 3851 – 3861. Maui, Hawaii, USA. 2012.

- [65] De Keyser, R., "Approach to Predictive Control" .UNESCO Encyclopedia of Life Support Systems (EoLSS). EoLSS publisher Co Ltd. Oxford. 2003.
- [66] Zhang, Q., Wang, Q., Li, G. "Nonlinear modeling and predictive functional control of Hammerstein system with application to the turntable servo system". Mechanical Systems and signal Processing. ScienceDirect. ELSEVIER. Vol. 72-73, p. 383-394. 2015.
- [67] Li, L., Zhang, Y., Yang, C. Yan, B., Martinez, C. M. "Model Predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus". Energy Conversion and Management. Sciencedirect. ELSEVIER. Vol. 111, p. 299-314. 2015.
- [68] Chen, X., Wang, Q., Srebric, J. "Occupant feedback based model predictive control for thermal confort and energy optimization: A chamber experimental evaluation". AppliedEnergy, ScienceDirect. ELSEVIER. 2015.
- [69] De Keyser, R. M. C. and Van Cauwenberghe, A. R. "Self-tuning predictive control" Journal A, pp. 22, 167-174. 1981.
- [70] F. Castaño, F. R. Rubio, and M. G. Ortega, "Modelado de secadores rotatorios en iso-corriente," RIAI, vol. 6, no. 4, pp. 32-43, 2009.
- [71] S. Savaresi, R. Bitmead, and R. Peirce, "On modeling and control of a rotary sugar dryer," Control Engineering Practice, vol. 9, no. 3, pp. 249-266, 2001.
- [72] A. Iguaz, A. Esnoz, G. Martínez, A. López, and P. Vírveda, "Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer," Journal of food engineering, vol. 59, no. 2, pp. 151-160, 2003.
- [73] J. Nganhou, "Heat and mass transfer through a thick bed of cocoa beans during drying," Heat and mass transfer, vol. 40, no. 9, pp. 727-735, 2004.
- [74] R. H. Perry, D. W. Green, and J. O. Maloney, Manual del ingeniero químico. McGraw-Hill, 1992.
- [75] H. Tinoco and D. Ospina, "Análisis del proceso de deshidratación del cacao para la disminución del tiempo de secado," EIA, no. 13, pp. 53-63, 2010.
- [76] Y. Cengel and M. Boles, Termodinámica. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2003.

- [77] 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*. (2011).
- [78] Adriana C. Reis Ferreira. Beneficiamento de cacau de qualidade. Instituto Cabruca Bahia – Brasil 2013.
- [79] Disney Ribero Diaz. Potential applications of cocoa wastes. Universidad Federal de Lavras. Brasil 2017.
- [80] Rosane Freitas Shwan. Quality of fermented cocoa beans. Brasil 2013.

## **Apéndices**



## Apéndice 1. Código para el modelo en parámetros distribuidos.

Ecosimpro

--Autor: Pablo Parra Rosero

--Universidad de Piura

```

-----
USE CONTROL
USE PORTS_LIB
USE MATH
FUNCTION REAL entalp_cacao(IN REAL T,IN REAL Sseca)
DECLS
REAL Hc
CONST TABLE_2D H_T_P = {{10.,20.,30.,40.,50.,60.,70.,80.,90.,100.},
--Temperatura °C
{0.,0.08,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.}, --Humedad
{4.200e+01, 3.950e+01, 3.890e+01, 3.750e+01, 3.260e+01,
2.940e+01,2.630e+01, 2.310e+01, 2.000e+01, 1.680e+01, 1.370e+01,
1.050e+01},
{8.390e+01, 7.890e+01, 7.760e+01, 7.130e+01, 6.500e+01, 5.870e+01,
5.250e+01, 4.620e+01, 3.990e+01, 3.360e+01, 2.730e+01, 2.100e+01},
{1.257e+02, 1.184e+02, 1.166e+02, 1.075e+02, 9.830e+01, 8.920e+01,
8.010e+01, 7.100e+01, 6.190e+01, 5.270e+01, 4.360e+01, 3.450e+01},
{1.675e+02, 1.580e+02, 1.556e+02, 1.437e+02, 1.318e+02, 1.199e+02,
1.080e+02, 9.610e+01, 8.420e+01, 7.230e+01, 6.040e+01, 4.850e+01},
{2.093e+02, 1.977e+02, 1.948e+02, 1.802e+02, 1.657e+02, 1.512e+02,
1.367e+02, 1.221e+02, 1.076e+02, 9.310e+01, 7.850e+01, 6.400e+01},
{2.511e+02, 2.378e+02, 2.344e+02, 2.178e+02, 2.011e+02, 1.845e+02,
1.678e+02, 1.511e+02, 1.345e+02, 1.178e+02, 1.012e+02, 8.450e+01},
{2.930e+02, 2.779e+02, 2.742e+02, 2.553e+02, 2.365e+02, 2.176e+02,
1.988e+02, 1.800e+02, 1.611e+02, 1.423e+02, 1.234e+02, 1.046e+02},
{3.349e+02, 3.182e+02, 3.141e+02, 2.932e+02, 2.724e+02, 2.515e+02,
2.307e+02, 2.099e+02, 1.890e+02, 1.682e+02, 1.473e+02, 1.265e+02},
{3.769e+02, 3.576e+02, 3.528e+02, 3.286e+02, 3.045e+02, 2.804e+02,
2.562e+02, 2.321e+02, 2.080e+02, 1.839e+02, 1.597e+02, 1.356e+02},
{4.191e+02, 3.975e+02, 3.922e+02, 3.652e+02, 3.283e+02, 3.113e+02,
2.844e+02, 2.574e+02, 2.305e+02, 2.035e+02, 1.766e+02, 1.496e+02}}}
```

## BODY

Hc = linearInterp2D(H\_T\_P, T,Sseca)

RETURN Hc

END FUNCTION

COMPONENT cacaofull (INTEGER m=10)

DATA

REAL Xc=0.10 "Humedad Crítica (kg agua/kg sol.seco)"

REAL Secc=0.2747743 " Sección cilindro (m2)"

REAL dc=705 "dendidad del cacao (kg/m3)"

REAL dg=1.19 "densidad del gas (kg/m3)"

REAL Kv=0.004 "constante ajuste vel.cacao (s)"

REAL Vrot=0.10471975 "constante de ajuste vel.rot.cilindro (s-1)"

REAL Kw=1.0 "constante rel flujo másico cacao-velocidad (m-1)"

REAL KD=0.006 "constante de difusión(kg agua/s)"

REAL Ak=0.14184 "área de transferencia de calor gas-cacao (m2)"

REAL hc1=0.12 "coeficiente de transmisión de calor gas-cacao húmedo"

REAL hc2=0.01 "coeficiente de transmisión de calor gas-cacao seco"

REAL L=2.0 "longitud del cilindro (m)"

REAL cl=2260 "calor latente de evaporación del agua (kJ/kg)"

REAL Cpa=4.1844 "Calor específico del agua(kJ/kg·C)"

--CAMARA DE COMBUSTION:

REAL Cpg=1.006 "Calor específico del gas de saecado(kJ/kg·C)"

REAL Cpga=1.006 "Calor específico del aire(kJ/kg·C)"

REAL Hpn=39083 "poder calorífico del gas combustible GLP (kJ/kg)"

REAL Pat=100000 "Presión atmosférica(Pa)"

REAL pmg=29 "Peso molecular del gas de secado (kg/kmol)"

REAL R=8.314 "constante de los gases ideales (kJ/kmol·C)"

REAL u=0.95 "eficiencia de la combustión"

-----

DECLS

REAL mc[m] "masa de cacao (kg)"

REAL Wc\_e[1] "flujo másico de cacao a la entrada (kg/s)"

REAL Wc\_s[m] "flujo másico de cacao a la salida (kg/s)"

REAL Vc[m] "velocidad del cacao (m/s)"

REAL Vg[m] "velocidad del gas (m/s)"

REAL Wg\_e[1] "flujo másico de gas a la entrada (kg/s)"

REAL Wg\_s[m] "flujo másico de gas a la salida (kg/s)"

REAL Fg[m] "flujo volumétrico de gas húmedo (m3/s)"

REAL Wch\_e[m] "flujo másico de cacao húmedo de entrada (kg/s)"

REAL X\_e[1] "humedad de cacao a la entrada en base seca  
 (kg.H2O/kg.cacao seco)"  
 REAL Y\_e[1] "humedad del gas a la entrada en base seca  
 (kg.H2O/kg.gas seco)"  
 REAL Y\_s[m] "humedad del gas a la salida en base seca (kg.H2O/kg.gas  
 seco)"  
 REAL Wgh\_e[m] "flujo másico de gas húmedo de entrada (kg/s)"  
 REAL mg[m] "masa de gas (kg)"  
 REAL Wevap[m] "flujo másico de evaporación (kg.H2O/s)"  
 REAL Xint\_s[m] "Humedad interna del cacao en base seca  
 (kg.H2O/kg.cacao seco)"  
 REAL Wdif[m] "flujo másico de difusión (kg.H2O/s)"  
 REAL Xsup\_s[m] "Humedad superficial del cacao a la entrada en base  
 seca (kg.H2O/kg.cacao seco)"  
 REAL X\_s[m] "humedad de cacao a la salida en base seca  
 (kg.H2O/kg.cacao seco)"  
 REAL Xsup\_e[1] "Humedad superficial del cacao a la salida en base  
 seca (kg.H2O/kg.cacao seco)"  
 REAL Tc\_s[m] "temperatura del cacao(·C)"  
 REAL Tg\_s[m] "temperatura del gas(·C)"  
 REAL Q[m] "calor transferido del gas hacia la superficie del cacao (kJ)"  
 REAL Sh[m] "relación de superficie húmeda-superficie seca"  
 REAL Hch\_s[m] "Entalpía del cacao húmedo a la salida (kJ)"  
 REAL Hch\_e[1] "Entalpía del cacao húmedo a la entrada (kJ)"  
 REAL Hgh\_s[m] "Entalpía del gas húmedo a la salida (kJ)"  
 REAL Hgh\_e[1] "Entalpía del gas húmedo a la entrada (kJ)"  
 --CAMARA DE COMBUSTION:  
 REAL Wga "Flujo masico de aire a la entrada de la cámara de  
 combustión (kg/s)"  
 REAL Wcomb "Flujo masico de gas combustible a la entrada de la  
 cámara de combustión (kg/s)"  
 REAL Ta "temperatura del gas a la entrada de la cámara de combustión-  
 ambiente (·C)"  
 REAL Tg\_e[1] "temperatura del gas de secado a la entrada de la cámara  
 de secado-salida camara de combustión (·C)"  
 REAL Fg\_e[1] "flujo volúmetrico de gas húmedo de secado a la entrada  
 de la cámara de secado (m3/s)"  
 REAL Ya "humedad del aire a la entrada de la cámara de combustión en  
 base seca (kg.H2O/kg.aire seco)"

-----

```

--inicialización de las variables de estado
INIT
//RESTORE_STATE("cacaoestacionario.txt")
FOR(i IN 1,m)
mc[i] = 0.1 + i*0.001
mg[i] = 1.0
Y_s[i] = 0.01 +i*0.0001
X_s[i] = 0.7 -i*0.001
Xsup_s[i] = 0.34-i*0.0005
Hch_s[i] = 150-i*0.1
Hgh_s[i] = 90-i*0.01
END FOR
CONTINUOUS
//manejo de puertos de comunicación
Wcomb=s_in_1.signal[1]
X_s[10]=s_out_1.signal[1]
--CAMARA DE COMBUSTION:
Wgh_e[1]=Wga +Wcomb
Wga*Cpga*Ta + Wcomb*Hpn*u = Cpg*Tg_e[1]*Wgh_e[1]
Wgh_e[1] = Fg_e[1]*pmg*Pat / (R*(Tg_e[1]+273))
Y_e[1]=Ya
Tg_e[1]= (Hgh_e[1]- Y_e[1]* 2501)/(1+1.82*Y_e[1])
-----
--CAMARA DE SECADO:
--BALANCE DE MASA para el cacao
mc[1]'=Wc_e[1]-Wc_s[1]
--relación entre el flujo de cacao y la velocidad del cacao
Wc_s[1]=Kw*mc[1]*Vc[1]
--Velocidad del cacao en función de la velocidad del gas y la velocidad
de rotación del cilindro
Vc[1]=Kv*Vg[1]*Vrot
--Velocidad del gas en función del flujo de gas y la sección transversal
libre
Vg[1]=Fg[1]/(Secc-mc[1]/(dc*L/m))
--Flujo volumétrico de gas en función del flujo másico de gas húmedo y
la densidad del gas
Fg[1]=Wg_s[1]*(1+Y_s[1])/dg
--Flujo de gas seco constante
Wg_s[1]= Wg_e[1]

```

--Relación de flujos de gas seco y húmedo  
 $Wg_e[1]=Wgh_e[1]/(1+Y_e[1])$

--Relación de flujos de cacao seco y húmedo  
 $Wc_e[1]=Wch_e[1]/(1+X_e[1])$

--BALANCE DE MASA para el gas  
 $mg[1]'=Wg_e[1]-Wg_s[1]$

--BALANCE DE MASA A LA HUMEDAD del gas  
 $mg[1]*Y_s[1] + mg[1]*Y_s[1]'=Wg_e[1]*Y_e[1]-$   
 $Wg_s[1]*Y_s[1]+Wevap[1]$

--BALANCE DE MASA A LA HUMEDAD TOTAL del cacao  
 $Wc_e[1]*X_s[1] + mc[1]*X_s[1]'=Wc_e[1]*X_e[1]-Wevap[1]$

--BALANCE DE MASA A LA HUMEDAD SUPERFICIAL del cacao  
 $Wc_e[1]*Xsup_s[1] + mc[1]*Xsup_s[1]'=Wc_e[1]*Xsup_e[1]-$   
 $Wevap[1] + Wdif[1]$

--Ecuación de difusión en función de la diferencia de humedades  
 $Wdif[1]=KD*(Xint_s[1]-Xsup_s[1])/Sh[1]$

--Relación humedad total-superficial-interna  
 $X_s[1]=Xint_s[1]+Xsup_s[1]$

--Ecuación de evaporación en función de la diferencia de temperatura  
 gas-cacao  
 $Wevap[1]=(Ak*hc1/cl)*(Tg_s[1]-Tc_s[1])*Sh[1]$

--Relación de Calor transferido hacia parte húmeda y hacia parte seca del  
 cacao  
 $Q[1]=hc1*Ak*(Tg_s[1]-Tc_s[1])*Sh[1] + hc2*Ak*(Tg_s[1]-$   
 $Tc_s[1])*(1-Sh[1])$

--Relación Superficie húmeda-Superficie seca del cacao  
 $Sh[1]=min(1, Xsup_s[1]/Xc)$

--BALANCE GLOBAL DE ENERGÍA al cacao húmedo  
 $(Wc_e[1]+Wc_e[1]*X_s[1]+mc[1]*X_s[1]')*Hch_s[1] +$   
 $Hch_s[1]*mc[1]*(1+X_s[1]) = Wc_e[1]*(1+X_e[1])*Hch_e[1]+Q[1]-$   
 $Wevap[1]*(Cpa*Tc_s[1]+cl)$

-- BALANCE GLOBAL DE ENERGÍA al gas húmedo  
 $mg[1]*Y_s[1]*Hgh_s[1] + Hgh_s[1]*mg[1]*(1+Y_s[1]) =$   
 $Wg_e[1]*(1+Y_e[1])*Hgh_e[1]-Wg_s[1]*(1+Y_s[1])*Hgh_s[1]-$   
 $Q[1]+Wevap[1]*(Cpa*Tc_s[1]+cl)$

--Interpolación para valores de entalpía del cacao en función de  
 temperatura y humedad  
 $Hch_s[1]=entalp_cacao(Tc_s[1],1/(1+X_s[1]))$

--temperatura del gas en función de la entalpía de una mezcla aire vapor  
 de agua

```

Tg_s[1]=(Hgh_s[1]- Y_s[1]* 2501)/(1+1.82*Y_s[1])
--expansión del sistema de ecuaciones para n etapas
EXPAND_BLOCK ( j IN 2,m )
mc[j]'=Wc_s[j-1]-Wc_s[j]
Wc_s[j]=Kw*mc[j]*Vc[j]
Vc[j]=Kv*Vg[j]*Vrot
Vg[j]=Fg[j]/(Secc-mc[j]/(dc*L/m))
Fg[j]=Wg_s[j]*(1+Y_s[j])/dg
Wg_s[j]= Wg_e[1]
Wg_s[j-1]=Wgh_e[j]/(1+Y_s[j-1])
Wc_s[j-1]=Wch_e[j]/(1+X_s[j-1])
mg[j]'=Wg_s[j-1]-Wg_s[j]
mg[j]*Y_s[j] + mg[j]*Y_s[j]'=Wg_s[j-1]*Y_s[j-1]-
Wg_s[j]*Y_s[j]+Wevap[j]
Wc_s[j-1]*X_s[j] + mc[1]*X_s[j]'=Wc_s[j-1]*X_s[j-1]-Wevap[j]
Wc_s[j-1]*Xsup_s[j] + mc[j]*Xsup_s[j]'=Wc_s[j-1]*Xsup_s[j-1]-
Wevap[j] +Wdif[j]
Wdif[j]=KD*(Xint_s[j]-Xsup_s[j])/Sh[j]
X_s[j]=Xint_s[j]+Xsup_s[j]
Wevap[j]=(Ak*hc1/cl)*(Tg_s[j]-Tc_s[j])*Sh[j]
Q[j]=hc1*Ak*(Tg_s[j]-Tc_s[j])*Sh[j]+hc2*Ak*(Tg_s[j]-Tc_s[j])*(1-
Sh[j])
Sh[j]=min(1, Xsup_s[j]/Xc)
(Wc_s[j-1]+Wc_s[j-1]*X_s[j]+mc[j]*X_s[j]')*Hch_s[j] +
Hch_s[j]*mc[j]*(1+X_s[j]) = Wc_s[j-1]*(1+X_s[j-1])*Hch_s[j-1]+Q[j]-
Wevap[j]*(Cpa*Tc_s[j]+cl)
mg[j]*Y_s[j]*Hgh_s[j] + Hgh_s[j]*mg[j]*(1+Y_s[j]) = Wg_s[j-
1]*(1+Y_s[j-1])*Hgh_s[j-1]-Wg_s[j]*(1+Y_s[j])*Hgh_s[j]-
Q[j]+Wevap[j]*(Cpa*Tc_s[j]+cl)
Hch_s[j]=entalp_cacao(Tc_s[j],1/(1+X_s[j]))
Tg_s[j]=(Hgh_s[j]- Y_s[j]* 2501)/(1+1.82*Y_s[j])
END EXPAND_BLOCK
END COMPONENT

```

### CÓDIGO DE EXPERIMENTO PARA SIMULACIÓN:

```

--Autor: Pablo Parra Rosero
--Universidad de Piura

```

---

```

EXPERIMENT exp4 ON cacaofull.default

```

```
DECLS
OBJECTS
INIT
-- initial values for state variables
-- initial values for algebraics
Tc_s[01] = 65
Tc_s[02] = 64.5
Tc_s[03] = 64
Tc_s[04] = 63.5
Tc_s[05] = 63
Tc_s[06] = 62.5
Tc_s[07] = 62
Tc_s[08] = 61.5
Tc_s[09] = 61
Tc_s[10] = 60.5
BOUNDS
-- Set equations for boundaries: boundVar = f(TIME;...)
Hch_e[1] = 70
Ta = 30
Wch_e[01] = 0.005
Wga = 0.3
X_e[1] = 0.3
Xsup_e[1] = 0.14
Ya = 0.01
s_in_1.signal[1] = 0.0003
BODY
-- report results in file reportAll.rpt
REPORT_TABLE("reportAll.rpt", "*")
-- Set the tolerances (relative and absolute);
REL_ERROR = 1e-006
ABS_ERROR = 1e-006
-- Integrate the model
TIME = 0
TSTOP = 36000
CINT = 1000
INTEG()
END EXPERIMENT
```

## Apéndice 2. Código para la validación del modelo en parámetros distribuidos

Ecosimpro.

--Autor: Pablo Parra Rosero

--Universidad de Piura

USE MATH

FUNCTION REAL entalp\_cacao(IN REAL T,IN REAL Sseca)

DECLS

REAL Hc

CONST TABLE\_2D H\_T\_P ={{ 10.,20.,30.,40.,50.,60.,70.,80.,90.,100.},

--Temperatura °C

{0.,0.08,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.}, --Humedad

{{4.200e+01, 3.950e+01, 3.890e+01, 3.750e+01, 3.260e+01,

2.940e+01,2.630e+01, 2.310e+01, 2.000e+01, 1.680e+01, 1.370e+01,

1.050e+01},

{8.390e+01, 7.890e+01, 7.760e+01, 7.130e+01, 6.500e+01, 5.870e+01,

5.250e+01, 4.620e+01, 3.990e+01, 3.360e+01, 2.730e+01, 2.100e+01},

{1.257e+02, 1.184e+02, 1.166e+02, 1.075e+02, 9.830e+01, 8.920e+01,

8.010e+01, 7.100e+01, 6.190e+01, 5.270e+01, 4.360e+01, 3.450e+01},

{1.675e+02, 1.580e+02, 1.556e+02, 1.437e+02, 1.318e+02, 1.199e+02,

1.080e+02, 9.610e+01, 8.420e+01, 7.230e+01, 6.040e+01, 4.850e+01},

{2.093e+02, 1.977e+02, 1.948e+02, 1.802e+02, 1.657e+02, 1.512e+02,

1.367e+02, 1.221e+02, 1.076e+02, 9.310e+01, 7.850e+01, 6.400e+01},

{2.511e+02, 2.378e+02, 2.344e+02, 2.178e+02, 2.011e+02, 1.845e+02,

1.678e+02, 1.511e+02, 1.345e+02, 1.178e+02, 1.012e+02, 8.450e+01},

{2.930e+02, 2.779e+02, 2.742e+02, 2.553e+02, 2.365e+02, 2.176e+02,

1.988e+02, 1.800e+02, 1.611e+02, 1.423e+02, 1.234e+02, 1.046e+02},

{3.349e+02, 3.182e+02, 3.141e+02, 2.932e+02, 2.724e+02, 2.515e+02,

2.307e+02, 2.099e+02, 1.890e+02, 1.682e+02, 1.473e+02, 1.265e+02},

{3.769e+02, 3.576e+02, 3.528e+02, 3.286e+02, 3.045e+02, 2.804e+02,

2.562e+02, 2.321e+02, 2.080e+02, 1.839e+02, 1.597e+02, 1.356e+02},

{4.191e+02, 3.975e+02, 3.922e+02, 3.652e+02, 3.283e+02, 3.113e+02,

2.844e+02, 2.574e+02, 2.305e+02, 2.035e+02, 1.766e+02, 1.496e+02}}}

BODY

Hc = linearInterp2D(H\_T\_P, T,Sseca)

RETURN Hc

END FUNCTION

```

COMPONENT cacao_estim_param (INTEGER nent =2, INTEGER nsal
= 2,INTEGER n = 10)
DATA
REAL dg=1.19 "densidad del gas (kg/m3)"
REAL dc=705 "dendidad del cacao (kg/m3)"
REAL Xc=0.10 "Humedad Crítica (kg agua/kg sol.seco)"
REAL cl=2260 "calor latente de evaporación del agua (kJ/kg)"
REAL Cpa=4.1844 "Calor específico del agua(kJ/kg·C)"
REAL Ak=0.14184 "área de transferencia de calor gas-cacao (m2)"
-- Parámetros a estimar sin escalar
REAL Kv=0.004 "constante ajuste vel.cacao (s)"
REAL Vrot=0.10471975 "constante de ajuste vel.rot.cilindro (s-1)"
REAL Kw=1.0 "constante rel flujo másico cacao-velocidad (m-1)"
REAL KD=0.006 "constante de difusión(kg agua/s)"
REAL Secc=0.2747743 " Sección cilindro (m2)"
REAL hc1=0.12 "coeficiente de transmisión de calor gas-cacao húmedo"
REAL hc2=0.01 "coeficiente de transmisión de calor gas-cacao seco"
REAL L=2.0 "longitud del cilindro (m)"
REAL tsamp = 720 -- Periodo de muestreo de recogida de datos (s)
INTEGER N1 = 1 -- Inicio horizonte de estimación
INTEGER NE = 203 -- Número de muestras, datos reales tomados
-- Pesos en el coste para las diferencias entre predicciones y datos reales
REAL pesos[2] = { 1.0, 100.0 } -- pesos[nsal]
-- Valores medios de los datos experimentales, factor de escala
REAL media[2] = {0.116063089, 53.19170693} -- Humedad Cacao,
Temperatura gas
REAL LiminfT = 0
REAL LimsupT = 100
REAL Liminfh = 0
REAL Limsuph = 0.7
DECLS
REAL mc[n] "masa de cacao (kg)"
REAL Wc_e[1] "flujo másico de cacao a la entrada (kg/s)"
REAL Wc_s[n] "flujo másico de cacao a la salida (kg/s)"
REAL Vc[n] "velocidad del cacao (m/s)"
REAL Vg[n] "velocidad del gas (m/s)"
REAL Wg_e[1] "flujo másico de gas a la entrada (kg/s)"
REAL Wg_s[n] "flujo másico de gas a la salida (kg/s)"
REAL Fg[n] "flujo volúmetrico de gas húmedo (m3/s)"
REAL Wch_e[n] "flujo másico de cacao húmedo de entrada (kg/s)"

```

```

REAL X_e[1] "humedad de cacao a la entrada en base seca
(kg.H2O/kg.cacao seco)"
REAL Y_e[1] "humedad del gas a la entrada en base seca
(kg.H2O/kg.gas seco)"
REAL Y_s[n] "humedad del gas a la salida en base seca (kg.H2O/kg.gas
seco)"
REAL Wgh_e[n] "flujo másico de gas húmedo de entrada (kg/s)"
REAL mg[n] "masa de gas (kg)"
REAL Wevap[n] "flujo másico de evaporación (kg.H2O/s)"
REAL Xint_s[n] "Humedad interna del cacao en base seca
(kg.H2O/kg.cacao seco)"
REAL Wdif[n] "flujo másico de difusión (kg.H2O/s)"
REAL Xsup_s[n] "Humedad superficial del cacao a la entrada en base
seca (kg.H2O/kg.cacao seco)"
REAL X_s[n] "humedad de cacao a la salida en base seca
(kg.H2O/kg.cacao seco)"
REAL Xsup_e[1] "Humedad superficial del cacao a la salida en base
seca (kg.H2O/kg.cacao seco)"
REAL Tc_s[n] "temperatura del cacao(·C)"
REAL Tg_s[n] "temperatura del gas(·C)"
REAL Q[n] "calor transferido del gas hacia la superficie del cacao (kJ)"
REAL Sh[n] "relación de superficie húmeda-superficie seca"
REAL Hch_s[n] "Entalpía del cacao húmedo a la salida (kJ)"
REAL Hch_e[1] "Entalpía del cacao húmedo a la entrada (kJ)"
REAL Hgh_s[n] "Entalpía del gas húmedo a la salida (kJ)"
REAL Hgh_e[1] "Entalpía del gas húmedo a la entrada (kJ)"
REAL y_modelo[nsal] -- Salidas del modelo
REAL y_real[nsal] -- Salidas muestreadas experimentales
REAL u_real[nent] -- Entradas experimentales
REAL coef = 0 -- Coeficiente que activa la función de coste
DISCR REAL J1 -- Subtotal del índice de coste
DISCR REAL J2 -- Subtotal del índice de coste
BOOLEAN Sample = TRUE -- Variable bucles
-- Tablas correspondientes a los datos experimentales
TABLE_1D tab1, tab2, tab3, tab4
-- El índice que se minimiza
DISCR REAL J_costo
-- Vector de las restricciones no lineales
REAL val_rest[4]
-- Variable auxiliar para el calculo de maximos y minimos de

```

```

temperatura
REAL Tmin, Tmax
-- Variable auxiliar para el calculo de maximos y minimos de humedad
REAL hmin, hmax
/*
-- Variables manipuladas
REAL V "voltaje aplicado a la resistencia eléctrica (V)"
REAL qe "caudal de entrada al depósito (m**3/h)"
-- Salidas medidas del proceso
REAL h "nivel de líquido en el depósito (m)"
REAL T "temperatura del depósito (°C)"
REAL y_modelo[nsal] -- Salidas del modelo
REAL y_real[nsal] -- Salidas muestreadas experimentales
REAL u_real[nent] -- Entradas experimentales
REAL coef = 0 -- Coeficiente que activa la función de coste
DISCR REAL J1 -- Subtotal del índice de coste
DISCR REAL J2 -- Subtotal del índice de coste
BOOLEAN Sample = TRUE -- Variable bucles
-- Tablas correspondientes a los datos experimentales
TABLE_1D tab1, tab2, tab3, tab4
-- El índice que se minimiza
DISCR REAL J_costo
-- Vector de las restricciones no lineales
REAL val_rest[4]
-- Variable auxiliar para el calculo de maximos y minimos de
temperatura
REAL Tmin, Tmax
-- Variable auxiliar para el calculo de maximos y minimos de nivel
REAL hmin, hmax
*/
INIT
FOR(i IN 1,n)
mc[i] = 0.1 + i*0.001
mg[i] = 1.0
Y_s[i] = 0.01 +i*0.0001
X_s[i] = 0.7 -i*0.001
Xsup_s[i] = 0.34-i*0.0005
Hch_s[i] = 150-i*0.1
Hgh_s[i] = 90-i*0.01
END FOR

```

```

Tc_s[01] = 65
Tc_s[02] = 64.5
Tc_s[03] = 64
Tc_s[04] = 63.5
Tc_s[05] = 63
Tc_s[06] = 62.5
Tc_s[07] = 62
Tc_s[08] = 61.5
Tc_s[09] = 61
Tc_s[10] = 60.5
J_costo = 0.0
J1 = 0.0
J2 = 0.0
-- Entradas
readTableCols1D ("datos_entalpia_gas.txt",1,2,tab1)
u_real[1] = linearInterp1D (tab1, TIME)
Hgh_e[1] = u_real[1]
readTableCols1D ("datos_flujo_gas.txt",1,2,tab2)
u_real[2] = linearInterp1D (tab2, TIME)
Wgh_e[1] = u_real[2]
-- Salidas
readTableCols1D ("datos_humedad_cacao.txt",1,2,tab3)
y_real[1] = linearInterp1D (tab3, TIME) -- valor real, leído de planta
X_s[10] = y_real[1]
y_modelo[1] = y_real[1] -- valor del modelo
readTableCols1D ("datos_temperatura_gas.txt",1,2,tab4)
y_real[2] = linearInterp1D (tab4, TIME) -- valor real, leído de planta
Tg_s[10] = y_real[2]
y_modelo[2] = y_real[2] -- valor del modelo
-- coeficiente que activa el índice de coste
coef = 1 AFTER N1*tsamp
Tmin = Tg_s[10]
Tmax = Tg_s[10]
hmin = X_s[10]
hmax = X_s[10]
-- calculo de la funcion de costo a minimizar
DISCRETE
WHEN (Sample) THEN
-- Subtotales del índice de coste
J1 += coef*(pesos[1]*((y_modelo[1] - y_real[1])/media[1])**2)

```

```

J2 += coef*(pesos[2]*((y_modelo[2] - y_real[2])/media[2])**2)
J_costo = J1 + J2
Sample = FALSE
Sample = TRUE AFTER tsamp
END WHEN
CONTINUOUS
-- Entradas medibles
u_real[1] = linearInterp1D (tab1, TIME)
Hgh_e[1] = u_real[1] -- entalpia del gas humedo a la entrada
u_real[2] = linearInterp1D (tab2, TIME)
Wgh_e[1] = u_real[2] -- flujo de gas humedo a la entrada
-- Salidas medibles
y_real[1] = linearInterp1D (tab3, TIME) -- humedad del cacao
y_real[2] = linearInterp1D (tab4, TIME) -- Temperatura del gas
--BALANCE DE MASA para el cacao
mc[1]'=Wc_e[1]-Wc_s[1]
--relación entre el flujo de cacao y la velocidad del cacao
Wc_s[1]=Kw*mc[1]*Vc[1]
--Velocidad del cacao en función de la velocidad del gas y la velocidad
de rotación del cilindro
Vc[1]=Kv*Vg[1]*Vrot
--Velocidad del gas en función del flujo de gas y la sección transversal
libre
Vg[1]=Fg[1]/(Secc-mc[1]/(dc*L/n))
--Flujo volumétrico de gas en función del flujo másico de gas húmedo y
la densidad del gas
Fg[1]=Wg_s[1]*(1+Y_s[1])/dg
--Flujo de gas seco constante
Wg_s[1]= Wg_e[1]
--Relación de flujos de gas seco y húmedo
Wg_e[1]=Wgh_e[1]/(1+Y_e[1])
--Relación de flujos de cacao seco y húmedo
Wc_e[1]=Wch_e[1]/(1+X_e[1])
--BALANCE DE MASA para el gas
mg[1]'=Wg_e[1]-Wg_s[1]
--BALANCE DE MASA A LA HUMEDAD del gas
mg[1]*Y_s[1] + mg[1]*Y_s[1]'=Wg_e[1]*Y_e[1]-
Wg_s[1]*Y_s[1]+Wevap[1]
--BALANCE DE MASA A LA HUMEDAD TOTAL del cacao
Wc_e[1]*X_s[1] + mc[1]*X_s[1]'=Wc_e[1]*X_e[1]-Wevap[1]

```

--BALANCE DE MASA A LA HUMEDAD SUPERFICIAL del cacao  
 $Wc\_e[1]*Xsup\_s[1] + mc[1]*Xsup\_s[1]'=Wc\_e[1]*Xsup\_e[1]-$   
 $Wevap[1] + Wdif[1]$

--Ecuación de difusión en función de la diferencia de humedades  
 $Wdif[1]=KD*(Xint\_s[1]-Xsup\_s[1])/Sh[1]$

--Relación humedad total-superficial-interna

$X\_s[1]=Xint\_s[1]+Xsup\_s[1]$

--Ecuación de evaporación en función de la diferencia de temperatura  
 gas-cacao

$Wevap[1]=(Ak*hc1/cl)*(Tg\_s[1]-Tc\_s[1])*Sh[1]$

--Relación de Calor transferido hacia parte húmeda y hacia parte seca del  
 cacao

$Q[1]=hc1*Ak*(Tg\_s[1]-Tc\_s[1])*Sh[1] + hc2*Ak*(Tg\_s[1]-$   
 $Tc\_s[1])*(1-Sh[1])$

--Relación Superficie húmeda-Superficie seca del cacao

$Sh[1]=min(1, Xsup\_s[1]/Xc)$

--BALANCE GLOBAL DE ENERGÍA al cacao húmedo

$(Wc\_e[1]+Wc\_e[1]*X\_s[1]+mc[1]*X\_s[1])*Hch\_s[1] +$   
 $Hch\_s[1]*mc[1]*(1+X\_s[1]) = Wc\_e[1]*(1+X\_e[1])*Hch\_e[1]+Q[1]-$   
 $Wevap[1]*(Cpa*Tc\_s[1]+cl)$

-- BALANCE GLOBAL DE ENERGÍA al gas húmedo

$mg[1]*Y\_s[1]*Hgh\_s[1] + Hgh\_s[1]*mg[1]*(1+Y\_s[1]) =$   
 $Wg\_e[1]*(1+Y\_e[1])*Hgh\_e[1]-Wg\_s[1]*(1+Y\_s[1])*Hgh\_s[1]-$   
 $Q[1]+Wevap[1]*(Cpa*Tc\_s[1]+cl)$

--Interpolación para valores de entalpía del cacao en función de  
 temperatura y humedad

$Hch\_s[1]=entalp\_cacao(Tc\_s[1],1/(1+X\_s[1]))$

--temperatura del gas en función de la entalpía de una mezcla aire vapor  
 de agua

$Tg\_s[1]= (Hgh\_s[1]- Y\_s[1]* 2501)/(1+1.82*Y\_s[1])$

--expansión del sistema de ecuaciones para n etapas

EXPAND\_BLOCK ( j IN 2,n )

$mc[j]'=Wc\_s[j-1]-Wc\_s[j]$

$Wc\_s[j]=Kw*mc[j]*Vc[j]$

$Vc[j]=Kv*Vg[j]*Vrot$

$Vg[j]=Fg[j]/(Secc-mc[j]/(dc*L/n))$

$Fg[j]=Wg\_s[j]*(1+Y\_s[j])/dg$

$Wg\_s[j]= Wg\_e[1]$

$Wg\_s[j-1]=Wgh\_e[j]/(1+Y\_s[j-1])$

$Wc\_s[j-1]=Wch\_e[j]/(1+X\_s[j-1])$

```

mg[j]'=Wg_s[j-1]-Wg_s[j]
mg[j]*Y_s[j] + mg[j]*Y_s[j]'=Wg_s[j-1]*Y_s[j-1]-
Wg_s[j]*Y_s[j]+Wevap[j]
Wc_s[j-1]*X_s[j] + mc[1]*X_s[j]'=Wc_s[j-1]*X_s[j-1]-Wevap[j]
Wc_s[j-1]*Xsup_s[j] + mc[j]*Xsup_s[j]'=Wc_s[j-1]*Xsup_s[j-1]-
Wevap[j] +Wdif[j]
Wdif[j]=KD*(Xint_s[j]-Xsup_s[j])/Sh[j]
X_s[j]=Xint_s[j]+Xsup_s[j]
Wevap[j]=(Ak*hc1/cl)*(Tg_s[j]-Tc_s[j])*Sh[j]
Q[j]=hc1 *Ak*(Tg_s[j]-Tc_s[j])*Sh[j]+hc2*Ak*(Tg_s[j]-Tc_s[j])*(1-
Sh[j])
Sh[j]=min(1, Xsup_s[j]/Xc)
(Wc_s[j-1]+Wc_s[j-1]*X_s[j]+mc[j]*X_s[j]')*Hch_s[j] +
Hch_s[j]*mc[j]*(1+X_s[j]) = Wc_s[j-1]*(1+X_s[j-1])*Hch_s[j-1]+Q[j]-
Wevap[j]*(Cpa*Tc_s[j]+cl)
mg[j]*Y_s[j]*Hgh_s[j] + Hgh_s[j]*mg[j]*(1+Y_s[j]) = Wg_s[j]-
1)*(1+Y_s[j-1])*Hgh_s[j-1]-Wg_s[j]*(1+Y_s[j])*Hgh_s[j]-
Q[j]+Wevap[j]*(Cpa*Tc_s[j]+cl)
Hch_s[j]=entalp_cacao(Tc_s[j],1/(1+X_s[j]))
Tg_s[j]=(Hgh_s[j]- Y_s[j]* 2501)/(1+1.82*Y_s[j])
END EXPAND_BLOCK
/* ECUACIONES DIFERENCIALES DEL MODELO (mezcla perfecta)
-- Balance de materia
A*h' = qe - k*sqrt(h)
-- Balance de energía
A*h*rho*cp*T' = qe*rho*cp*(Te-T) + (3600*V*V/R) - 3600*Uamb*(T-
Tamb)
*/
-- calcular las restricciones no lineales (expresiones 0 >= c(x))
val_rest[1] = LiminfT - minabs(Tg_s[10], Tmin)
val_rest[2] = maxabs(Tg_s[10], Tmax) - LimsupT
val_rest[3] = Liminfh - minabs(X_s[10], hmin)
val_rest[4] = maxabs(X_s[10], hmax) - Limsuph
-- Asignación de valores del modelo
y_modelo[1] = X_s[10]
y_modelo[2] = Tg_s[10]
END COMPONENT

```

## CÓDIGO UTILIZADO PARA EXPERIMENTO DE VALIDACIÓN:

--Autor: Pablo Parra Rosero

--Universidad de Piura

---

```
USE OPTIMIZATION
USE MATH
FUNCTION NO_TYPE objetivo (IN INTEGER n_est, IN REAL
var_est[], IN REAL func_res[])
BODY
RESET_VARIABLES()
hc1 = var_est[1]
hc2 = var_est[2]
KD = var_est[3]
Kv = var_est[4]
Kw = var_est[5]
Secc = var_est[6]
Vrot = var_est[7]
L = var_est[8]
SET_INIT_ACTIVE(TRUE)
TIME=0
TSTOP = 144000
CINT = 144000
INTEG()
func_res[1] = J_costo
func_res[2] = val_rest[1]
func_res[3] = val_rest[2]
func_res[4] = val_rest[3]
func_res[5] = val_rest[4]
WRITE("j_COSTO = %g\n", J_costo)
END FUNCTION
FUNCTION NO_TYPE print_results()
BODY
WRITE("\n")
WRITE("*****")
WRITE("\n")
WRITE("La solución obtenida es:")
WRITE("\n")
WRITE("\n")
```

```

WRITE("hc1 = %g\n", hc1)
WRITE("hc2 = %g\n", hc2)
WRITE("KD = %g\n", KD)
WRITE("Kv = %g\n", Kv)
WRITE("Kw = %g\n", Kw)
WRITE("Secc = %g\n", Secc)
WRITE("Vrot = %g\n", Vrot)
WRITE("L = %g\n", L)
WRITE("\n")
WRITE("*****")
WRITE("\n")
-- Other interesting variables
WRITE("\n")
WRITE("Otras variables que interesan:")
WRITE("\n")
WRITE("J_costo = %g\n", J_costo)
WRITE("res_1 = %g\n", val_rest[1])
WRITE("res_2 = %g\n", val_rest[2])
WRITE("res_3 = %g\n", val_rest[3])
WRITE("res_4 = %g\n", val_rest[4])
WRITE("\n")
WRITE("*****")
WRITE("\n")
END FUNCTION
EXPERIMENT exp2 ON cacao_estim_param.prueba
DECLS
REAL val_objetivo -- valor de la funcion objetivo J
REAL param_estim[8] -- vector de variables a optimizar
REAL L_est_inf[8] -- limite inferior de las variables de decision
REAL L_est_sup[8] -- limite superior de las variables de decision
REAL nr_incog = 8 -- número variables de decisión
REAL nr_restric = 4 -- número de restricciones de tipo  $g(x) \leq 0$ 
-- La precisión que se va usar en el algoritmo de optimización
-- Este parámetro debería reflejar la precisión relativa cuando el valor
-- absoluto de J es grande o la precisión absoluta cuando J es pequeño.
-- tiene que ser de por lo menos dos ordenes mayor
-- que la precisión de Ecosim (RDIGITS)
REAL f_prec = 1.0e-7
INIT -- set initial values for variables
-- Dynamic variables

```

```

-- initial values for algebraics
BOUNDS -- set expressions for boundary variables: v = f(t,...)
Hch_e[01] = 70
Wch_e[01] = 0.005
X_e[01] = 0.7
Xsup_e[01] = 0.34
Y_e[01] = 0.01
coef = 1
BODY
-- Número de dígitos de precisión con la que trabaja Ecosim
-- por defecto es igual a 9
RDIGITS = 9
SET_INIT_ACTIVE(TRUE)
-- Inicializaciones
hc1 = 0.10
hc2 = 0.015
KD = 0.005
Kv = 0.002
Kw = 0.8
Secc = 0.45
Vrot = 0.25
L = 3.8
/*
hc1 = 0.12
hc2 = 0.01
KD = 0.006
Kv = 0.004
Kw = 1.0
Secc = 0.2747743
Vrot = 0.10471975
L = 2
*/
-- Formar vector de variables de decisión
param_estim[1] = hc1
param_estim[2] = hc2
param_estim[3] = KD
param_estim[4] = Kv
param_estim[5] = Kw
param_estim[6] = Secc
param_estim[7] = Vrot

```

```

param_estim[8] = L
-- Limites de las variables de decision
-- hc1
L_est_inf[1] = 0.01
L_est_sup[1] = 0.13
-- hc2
L_est_inf[2] = 0.01
L_est_sup[2] = 0.1
-- KD
L_est_inf[3] = 0.001
L_est_sup[3] = 0.01
-- Kv
L_est_inf[4] = 0.001
L_est_sup[4] = 0.005
-- Kw
L_est_inf[5] = 0.9
L_est_sup[5] = 1.2
-- Secc
L_est_inf[6] = 0.27
L_est_sup[6] = 0.28
-- Vrot
L_est_inf[7] = 0.052359865 //0.5 rpm
L_est_sup[7] = 0.31415919 //3 rpm
-- L
L_est_inf[8] = 2.0
L_est_sup[8] = 2.1
--Optimization extern routine call
setSilentMode(TRUE)
SET_REPORT_ACTIVE("#MONITOR",FALSE)
DEBUG_LEVEL = 3
-- Llamar a la rutina de optimización de NAG
optim_Nag (objetivo, nr_incog, nr_restric, param_estim, L_est_inf,
L_est_sup, f_prec)
setSilentMode(FALSE)
SET_REPORT_ACTIVE("#MONITOR",TRUE)
hc1 = param_estim[1]
hc2 = param_estim[2]
KD = param_estim[3]
Kv = param_estim[4]
Kw = param_estim[5]

```

```
Secc= param_estim[6]
Vrot= param_estim[7]
L = param_estim[8]
SET_INIT_ACTIVE(TRUE)
-- REPORT_TABLE("reportAll", " * ")
TIME = 0
TSTOP = 144000
CINT = 720
INTEG()
DEFAULT_LIB.print_results()
END EXPERIMENT
```

### Apéndice 3. Código para la implementación del controlador predictivo generalizado

```

Matlab - Arduino.
%controlador predictivo generalizado
%Pablo Parra Rosero
%Universidad de Piura
%-----
clc; close all;clear all;
min=0;
max=60;
yT=53;
yT_1=53;
yT_2=53;
uT_1=10;
uT=10;
muestras=1600;
%Abrir el puerto serial
delete(instrfind({'Port'},{'COM5'}));
puerto_serial=serial('COM5');
puerto_serial.BaudRate=9600;
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
fopen(puerto_serial);
%lazo de control
for k=1:muestras
    if k>=0 && i<400
        rT=53;
    end;
    if k>=401 && i<800
        rT=51;
    end;
    if k>=801 && i<1200
        rT=53;
    end;
    if k>=1201 && i<1600
        rT=55;
    end;
%leer valor de temperatura actual

```

```

temp=fscanf(puerto_serial,'%c') %% valor de temperatura en caracter
yT = str2double(temp) %convierte de caracter a doble entero
pause(0.2)

uT = uT_1 - 0.1498*yT + 0.1113*yT_1 - 0.0055*yT_2 + 0.044*rT;

yT_2=yT_1;
yT_1=yT;
uT_1=uT;
% se limita el valor de u de control
if uT>max
    uT=max;
else
    if uT<min
        uT=min;
    end
end

uT

    control=uT*(180/60)
    fwrite(puerto_serial,control,'uint8');
    pause(0.2)
pause(0.1); %Periodo de muestreo T=0.1s

%para graficar
ref(k)=rT;
motor(k)=control;
    tempPlanta(k)= yT;
    subplot(3,1,1)
    plot(ref,'b');
    axis([0 muestras 40 65]);
    hold on;
    plot(tempPlanta,'r');
    axis([0 muestras 40 65]);
    hold off;
    subplot(3,1,2)
    plot(motor,'b');
    axis([0 muestras -0.00003 200]);
    Ucontrol(k)= uT;

```

```
subplot(3,1,3)
plot(Ucontrol,'b');% señal de control
axis([0 muestras 0 60]);
end
```

#### Apéndice 4. Código para la implementación del Controlador PID.

Matlab - Arduino.

```
%controlador PID
%Pablo Parra Rosero
%Universidad de Piura
%-----
clc; close all;clear all;
min=0;
max=60;
uT=10;
iT0=0.0;
eT0=0.0;
a= 0.3 %0.1243;
b= 0.005 %0.0062;
c= 0.6 %0.6215;
muestras=1600;
%Abro el puerto serial
delete(instrfind({'Port'},{'COM5'}));
puerto_serial=serial('COM5');
puerto_serial.BaudRate=9600;
warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
fopen(puerto_serial);
%lazo de control
for k=1:muestras
    if k>=0 &&i<400
        rT=53;
        end;
    if k>=401 &&i<800
        rT=51;
        end;
    if k>=801 &&i<1200
        rT=53;
        end;
    if k>=1201 &&i<1600
        rT=55;
        end;
%leo valor de temperatura actual
```

```

temp=fscanf(puerto_serial,'%c') %% valor de temperatura en caracter
yT = str2double(temp) %convierte de caracter a doble entero
pause(0.2)
eT=rT-yT; %Calcular senal de error e(kT)
iT=b*eT+iT0; %Calcular termino integrativo i(kT)
dT=c*(eT-eT0); %Calcular termino derivativo d(kT)
uT=iT+a*eT+dT; %Calcular senal de control u(kT)

% se limita el valor de u de control
if uT>max
uT=max;
else
if uT<min
uT=min;
end
end

uT;
control=uT*(180/60)
fwrite(puerto_serial,control,'uint8');
pause(0.2)
iT0=iT;
eT0=eT;
pause(0.1); %Periodo de muestreo T=0.1s

%para graficar
ref(k)=rT;
motor(k)=control;
tempPlanta(k)= yT;
subplot(3,1,1)
plot(ref,'b');
axis([0 muestras 40 65]);
hold on;
plot(tempPlanta,'r');
axis([0 muestras 40 65]);
hold off;
subplot(3,1,2)
plot(motor,'b');
axis([0 muestras -0.00003 200]);

```

```
Ucontrol(k)= uT;
```

```
subplot(3,1,3)
```

```
plot(Ucontrol,'b');% señal de control
```

```
axis([0 muestras 0 60]);
```

```
end
```

## Apéndice 5. Código para la implementación del Controlador NEPSAC

Matlab - Arduino.

```
%controlador NEPSAC
%Pablo Parra Rosero
%Universidad de Piura
%-----
clear all;
clc;

%prueba algoritmo NEPSAC restricciones salida, entrada y variacion de
la
%entrada. con perturbaciones. caso planta distinta al modelo. Se pueden
%cambiar las entradas no controladas de la planta.
%modelo de disturbio 1/(1 -q)
%% parámetros para controlador
% Ym=tf(1,[1 1]); % modelo
% Yp=Ym; %modelo de la planta
% Ts=60; % tiempo de muestreo
% ar = arduino('COM3');
    delete(instrfind({'Port'},{'COM3'}));
    puerto_serial=serial('COM3');
    puerto_serial.BaudRate=9600;
    warning('off','MATLAB:serial:fscanf:unsuccessfulRead');
    %Abro el puerto serial
    fopen(puerto_serial);
Ts=1;
Tsim=Ts*1600; % tiempo de simulacion
Tk=Tsim/Ts+1; % pasos de la simulacion
%N=10; % horizonte de prediccion
N=50;
%Nu=2; % horizonte de control
Nu=1;
lam=0.2 ; % penalizacion del la variable de manipulable
salto=0.00001; %salto para respuesta impulso escalon
```

```

%% inicilizacion de vectores y matrices

ybase=zeros(N,1); % y base
w=ones(N,1); % referencia
ubase=5*ones(N,1); % u base
f2=zeros(Nu,1); % vector auxilir paso de du a u
D=zeros(Nu,Nu); % matriz auxilir paso de du a u
f1=zeros(N,1); % vector auxiliar funcion de costo
X0=0; %estado inicial
Yaux1=zeros(N,1);
ym=zeros(Tk,1);ym(1)=50;% salida del modelo
ymp=zeros(Tk,1);ymp(1)=50;%salida del modelo de la planta
ue=zeros(Tk,1); ue(1)=0.00018;% entrada

% inicializacion de estados y variaciones
xmp=zeros(Tk,7);%estados
xmp(1,:)=[0.0010;0.0153;7.4563;0.1181;0.0418;52.6269;90.1042];
%estados
Y0m=xmp(1,:);%estados
Y0mp=Y0m; %estados
Yp0mp=[0;0;0;0;0;0;0]; % variacion de estados
Yp0m=[0;0;0;0;0;0;0];% variacion estados
xm=zeros(Tk,7);
xm(1,:)=[0.0010;0.0153;7.4563;0.1181;0.0418;52.6269;90.1042];%estad
os

nf=zeros(Tk,1);% vector de ruido
n=zeros(Tk,1);% vector n
nfspan=zeros(N,1); % span de ruido
nspan=zeros(N,1); % span de n
du=zeros(Tk,1); % variacion de la entrada

G=zeros(N,Nu); % matriz del proceso
UU=0.1*ones(Nu,1);% vector solucion
tt=zeros(Tk,1);
br=zeros(Tk,1);
e=0.00001;% error maximo de UU

% vectores auxiliares de la entada.
Uc =zeros(1,Tk);

```

```

Uc= repmat([0.00015],1,Tk);
Ucmp= repmat([0.00015],1,Tk);
UbaseC= repmat(Uc(:,1),1,N);

%escoger algoritmo de la programacion cuadratica
if Nu>1
    options=optimoptions('quadprog','Algorithm','active-set');
end
if Nu==1
    options=optimoptions('quadprog','Algorithm','active-set');
end

%% Trayectoria de referencia

ref=53.0*ones(Tk+N,1);
ref(1:400)=53.0;
ref(401:800)=51.0;
ref(801:1200)=53.0;
ref(1201:end)=55.0;

%% restricciones
ymax=1000*ones(N,1);
ymin=25*ones(N,1);
umax= 0.0007*ones(Nu,1);
umin= 0.0001*ones(Nu,1);
dumax= 0.0003*ones(Nu,1);
dumin=-0.0003*ones(Nu,1);

%% calculo de D vector auxiliar de las restricciones
D=diag(ones(Nu,1));
for j=1:Nu-1
    D(j+1,j)=-1;
end

%% simulacion

for k=2:Tk
    k
    %bucle de simulacion,

```

```

%k es instante de muestreo
%% simulacion del modelo de la planta
tspan=[0:1:Ts];
Hch_e = 30;
Wga=0.2;
Wcomb=ue(k-1);
Ta=35;
%Ta=29;
Ya=0.013;
Wc_e = 0.002;
X_e = 0.35;
Xsup_e = 0.17;

Planta_secador_CACAO; %

ymp1 = Tg_s(end); % variable obtenida de la planta
xmp1(k,:)=y15i(end,:);
xpmp1(k,:)=y15i(end,:)-y15i(end-1,:);% aproximación de la derivada.

Y0mp= xmp1(k,:);
Yp0mp= xpmp1(k,:);

%[Tmp,xmp1] = ode45(@(t_p,x_p)eva_planta(t_p,x_p,Ucmp(:,k-1)),[0
Ts*1],xmp(k-1,:));% modelo de la planta

%% Simulacion del modelo
tspan=[0:1:Ts];
Hch_e = 30;
Wga=0.2;
Wcomb=ue(k-1);
Ta=29;
Ya=0.013;
Wc_e = 0.002;
X_e = 0.35;
Xsup_e = 0.17;

Planta_secador_CACAO;
%modelo_secador_CACAO

ym1 = Tg_s(end);% valor de salida del modelo

```

```

xm1(k,:)=y15i(end,:);
xpm1(k,:)=y15i(end,:)-y15i(end-1,:);%proximación de la derivada.

Y0m= xm1(k,:);
Yp0m= xpm1(k,:);

%[Tm,xm1] = ode45(@(t_i,x_i)eva_modelo(t_i,x_i,Uc(:,k-1)),[0
Ts*1],xm(k-1,:));

%%

%ymp(k)=ymp1+random('norm',0,0.001);% Agrega ruido a la señal de
salida de la planta
    %ymp(k)=xmp1(end,2)+random('norm',0,0.001);%0.0083

%temp=ar.readVoltage(2);
%ymp(k)= temp*100

    temp=fscanf(puerto_serial,'%c') %% valor de temperatura en
caracter
    ymp(k) = str2double(temp); %convierte de caracter a doble entero
    pause(0.01);

ym(k)=ym1;
xmp(k,:)=xmp1(end,:); % revisar configuracio en serie o serie-paralelo
xm(k,:)=xm1(end,:);

% calculo de n(k) y nf(k) polinomios para calculo del modelo de error
n(k)=ymp(k)-ym(k);
nf(k)=n(k)-n(k-1);

% calculo de nspan y nfspan polinomios para calculo del modelo de
error
nspan(1)=n(k)+nfspan(1);
for j=2:N
    nspan(j)=nspan(j-1)+nfspan(j);
end

%calculo ubase inicial de cada tiempo de muestreo

```

```

ubase=ue(k-1)*ones(N,1); % ubase igual el valor anterior
UbaseC(1,:)=ubase';
for jj=1:100

% bucle para el calculo de la entrada
% jj es el numero de iteraciones.
%% calculo de ybase

tspan=[0:Ts:N*Ts];
Hch_e = 30;
Wga=0.2;
Wcomb=ue(k-1);
Ta=29;
Ya=0.013;
Wc_e = 0.002;
X_e = 0.35;
Xsup_e = 0.17;

Planta_secador_CACAO;
% modelo_secador_CACAO

% xm1(k,:)=y15i(end,:);
ybase=Tg_s(2:end);

% [Tm1,xm1] = ode45(@(t_i,x_i)eva_modelo(t_i,x_i,[UbaseC(:,1)
UbaseC]),[0:Ts:Ts*N],xm(k,:));% modelo

%% correccion del salto
if ymp(k)>ref(k)
    salto=-0.00001 ;
else
    salto=0.00001;
end
%% calculo de G

% respuesta impulso

```

```

Uaux1=Uc(:,k-1); Uaux1(1)=Uaux1(1)+salto;

tspan=[0:Ts];
Hch_e = 30;
Wga=0.2;
Wcomb=ue(k-1)+salto;
Ta=29;
Ya=0.013;
Wc_e = 0.002;
X_e = 0.35;
Xsup_e = 0.17;

Planta_secador_CACAO;
%modelo_secador_CACAO

X01=y15i(end,:);
Xp01=y15i(end,:)-y15i(end-1,:);%aproximación de la derivada.
Yaux1(1)=Tg_s(end);

% [T,X] =
ode45(@(t_i,x_i)eva_modelo(t_i,x_i,repmat(Uaux1,1,2)),[0
Ts],xm(k,:));%modelo
% X01=X(end,:);
% Yaux1(1)=X(end,2);

Y0m=X01';
Yp0m=Xp01';
Wcomb=ue(k-1);

tspan=[0:Ts:N*Ts];
Planta_secador_CACAO;
%modelo_secador_CACAO

Yaux1(2:end)=Tg_s(3:end);
% Uaux2=Uc(:,k-1);
% [Ti,Xi] =
ode45(@(t_i,x_i)eva_modelo(t_i,x_i,repmat(Uaux2,1,N)),[0:Ts:Ts*(N-
1)],X01);%modelo

```

```

%   Yaux1(2:end)=Xi(2:end,2);

% respuesta escalon

Y0m=y15i(end,:);
Yp0m=y15i(end,:)-y15i(end-1,:);%aproximación de la derivada.

Wcomb=ue(k-1)+salto;

Planta_secador_CACAO;
%modelo_secador_CACAO

Yaux2=Tg_s(2:end);

%   [Tsa,Xsa] =
ode45(@(t_i,x_i)eva_modelo(t_i,x_i,repmat(Uaux1,1,N+1)),[0:Ts:Ts*(N
)],xm(k,:));%modelo
%   Yaux2=Xsa(2:end,2);

% calculo
for i=1:Nu
    if i==Nu
        G(i:end,i)=(Yaux2(1:end-i+1)-ybase(i:end))/salto;
    else
        G(i:end,i)=(Yaux1(1:end-i+1)-ybase(1:end-i+1))/salto;
    end
end

%% calculo de delta U
% actualizacion de matrices para programacion cuadratica.
w=ref(k+1:k+N);
H=2*(G'*G+lamb*diag(ones(Nu,1)));
f=(2*((ybase+nspan-w)'*G))';
f0=(ybase+nspan-w)*(ybase+nspan-w);
A=[G;-G;D;-D;diag(ones(Nu,1));-diag(ones(Nu,1))];
f2(1)=ue(k-1);
b=[ymax-ybase-nspan;-(ymin-ybase-nspan);dumax-
D*ubase(1:Nu)+f2;-(dumin-D*ubase(1:Nu)+f2);umax-ubase(1:Nu);-
(uamin-ubase(1:Nu))];

```

```

tic;
% programa para solucion de problema de programcion cuadratica.
UU = quadprog(H,f,A,b,[],[],[],[],UU,options);
tt(k)=toc;
%%%%%%%%%%

[PP,PP1,VV]=svd(H);

%calculo de nuevo ubase para iteracion
if UU(1)<=e % condicion para terminar el calculo de la entrada
    br(k)=jj;
    break;
end
ubase=UU(1)+ubase;% actualización de Ubase
UbaseC(4,:)=ubase';

end
%% calculo de la entrada para el proximo instante de muestreo
ue(k)=UU(1)+ubase(1);
% c = ue(k)*10000
% pause(0.25)
% writePWMMVoltage(ar,13,c)
    motor(k)=ue(k)*(180/10)*10000;
    fwrite(puerto_serial,motor(k),'uint8');
    %pause(0.1);
du(k)=ue(k)-ue(k-1);
Uc(1,k)=ue(k);
Ucmp(1,k)=ue(k);

%% graficas
%tiempo=[0:1:Tk-1]'; % minutos
%drawnow
subplot(3,1,1)
plot(ref(1:Tk),'b');% referencia
axis([0 1600 40 65]);
hold on;
plot(ymp,'r');
axis([0 1600 40 65]);

```

```

ylabel('Y salida');
title('Control NEPSAC con restricciones en y, u y du. N=10,
Nu=1,lambda=0.1');
hold off;
subplot(3,1,2)
plot(motor);
axis([0 1600 0 200]);
ylabel('u de entrada');
subplot(3,1,3)
plot(du);
axis([0 1600 -0.00003 0.00003]);
ylabel('du de entrada');
xlabel('tiempo (min)');

    %drawnow
    %hold on

%% guardar vectores graficados con otro nombre

% ymp_r=ymp;ref_r=ref(1:Tk);u_r=ue;du_r=du;
% save ymp_r;
% save ref_r;
% save u_r;
% save du_r;
%

end

%% graficas
% tiempo=[0:1:Tk-1]'; % minutos
% subplot(3,1,1)
% plot(tiempo,ymp,'r');hold on% salida
% plot(tiempo,ref(1:Tk),'b')% referencia
% ylabel('Y salida');
% title('Control NEPSAC con restricciones en y, u y du. N=10,
Nu=1,lambda=0.1');
% grid on;
% axis([0 600 40 65]);

```

```
% subplot(3,1,2)
% stairs(ue)%entrada
% ylabel('u de entrada');
% grid on;
% axis([0 600 0 0.0003]);
% subplot(3,1,3)
% stairs(du) %variacion de la entrada
% ylabel('du de entrada');
% xlabel('tiempo (min)');
% grid on;
% axis([0 600 -0.0001 0.0001]);
%
% %% guardar vectores graficados con otro nombre
%
ymp_r=ymp;ref_r=ref(1:Tk);u_r=ue;du_r=du;
save ymp_r;
save ref_r;
save u_r;
save du_r;

% FIN
```

## Apéndice 6. Código para la implementación del modelo en parámetros distribuidos

Matlab.

```
%controlador PID
%Pablo Parra Rosero
%Universidad de Piura
%-----
%declaración de constantes:

Xc=0.10; % "Humedad Crítica (kg agua/kg sol.seco)"
Secc=0.2747743;% " Sección cilindro (m2)"
dc=705;% "dendidad del cacao (kg/m3)"
dg=1.19;% "densidad del gas (kg/m3)"
Kv=0.004;% "constante ajuste vel.cacao (s)"
Vrot=0.10471975;% "constante de ajuste vel.rot.cilindro (s-1)"
Kw=1.0;% "constante rel flujo másico cacao-velocidad (m-1)"
KD=0.006;% "constante de difusión(kg agua/s)"
Ak=3.2;% "área de transferencia de calor gas-cacao (m2)"
hc1=0.12;% "coeficiente de transmisión de calor gas-cacao húmedo"
hc2=0.01;% "coeficiente de transmisión de calor gas-cacao seco"
L=3.6;% "longitud del cilindro (m)"
cl=2260;% "calor latente de evaporación del agua (kJ/kg)"
Cpa=4.1844;% "Calor específico del agua(kJ/kg·C)"
ke = 1.2;% "Valor de ajuste de relación entre entalpía y temperatura del cacao"

% para CAMARA DE COMBUSTION:

Cpg=1.006;% "Calor específico del gas de saecado(kJ/kg·C)"
Cpga=1.006;% "Calor específico del aire(kJ/kg·C)"
Hpn=39083;% "poder calorífico del gas combustible GLP (kJ/kg)"
Pat=100000;% "Presión atmosférica(Pa)"
pmg=29;% "Peso molecular del gas de secado (kg/kmol)"
R=8.314;% "constante de los gases ideales (kJ/kmol*C)"
u=0.95;% "eficiencia de la combustión"
%-----
```

```

-----

% VALORES DE ENTRADA
% Hch_e = 30;
% Wga=0.2;
% Wcomb=0.00015;%%%%%%%%
% Ta=29;
% Ya=0.013;
% Wc_e = 0.002;
% X_e = 0.35;
% Xsup_e = 0.17;

%-----

% ECUACIONES PARA CAMARA DE COMBUSTION:

Wg_e = Wga +Wcomb;
Tg_e = (Wga*Cpga*Ta + Wcomb*Hpn*u)/(Cpg*Wg_e) ;
Y_e = Ya;
Hgh_e = Tg_e*(1+1.82*Y_e)+ Y_e * 2501;
%-----
-----

% ECUACIONES PARA CAMARA DE SECADO:

Wg_s = Wg_e;

% configuración para sistema de ecuaciones diferenciales:
% tspan=[0:1:Ts];
% yp0 = [0;0;0;0;0;0;0];
% y0 = [0.001;0.013;0.001;0.35;0.17;30;90];
% yp(1)==mg'
% yp(2)==Y_s'
% yp(3)==mc'
% yp(4)==X_s'
% yp(5)==Xsup_s'
% yp(6)==Hch_s'
% yp(7)==Hgh_s'
f1 = @(t, y, yp) [yp(1)*y(2)+ y(1)*yp(2)- Wg_e*Y_e + Wg_s*y(2)-
((Ak*hc1/cl)*(((y(7) - y(2)* 2501)/(1+1.82*y(2)))-(y(6)/ke)))*(min(1,

```

```

y(5)/Xc))) ...
      ;yp(1)- Wg_e+ Wg_s ...
      ;yp(3)- Wc_e + Kw*y(3)*(Kv*((Wg_s*(1+y(2))/dg)/(Secc-
y(3)/(dc*L)))*Vrot) ...
      ;Wc_e*y(4) + y(3)*yp(4) - Wc_e*X_e + ((Ak*hc1/cl)*((y(7) -
y(2)* 2501)/(1+1.82*y(2)))-(y(6)/ke))*(min(1, y(5)/Xc))) ...
      ;Wc_e*y(5) + y(3)*yp(5) - Wc_e*Xsup_e + ((Ak*hc1/cl)*((y(7)
- y(2)* 2501)/(1+1.82*y(2)))-(y(6)/ke))*(min(1, y(5)/Xc))) - KD*((y(4) -
y(5)) - y(5)) ...
      ;(Wc_e + Wc_e*y(4) + y(3)*yp(4))*y(6)+ yp(6)*y(3)*(1+y(4)) -
Wc_e*(1+X_e)*Hch_e - (hc1*Ak*(((y(7) - y(2)* 2501)/(1+1.82*y(2)))-
(y(6)/ke))*(min(1, y(5)/Xc)) + hc2*Ak*(((y(7) - y(2)*
2501)/(1+1.82*y(2)))-(y(6)/ke))*(1- min(1, y(5)/Xc))) +
((Ak*hc1/cl)*(((y(7) - y(2)* 2501)/(1+1.82*y(2)))-(y(6)/ke))*(min(1,
y(5)/Xc)))*(Cpa*(y(6)/ke)+cl) ...
      ;y(1)*yp(2)*y(7) + yp(7)*y(1)*(1+y(2)) - Wg_e*(1+Y_e)*Hgh_e
+ Wg_s*(1+y(2))*y(7) + (hc1*Ak*(((y(7) - y(2)* 2501)/(1+1.82*y(2)))-
(y(6)/ke))*(min(1, y(5)/Xc)) + hc2*Ak*(((y(7) - y(2)*
2501)/(1+1.82*y(2)))-(y(6)/ke))*(1- min(1, y(5)/Xc))) -
((Ak*hc1/cl)*(((y(7) - y(2)* 2501)/(1+1.82*y(2)))-(y(6)/ke))*(min(1,
y(5)/Xc)))*(Cpa*(y(6)/ke)+cl)];

```

```
[t15i,y15i] = ode15i(f1,tspan, Y0mp, Yp0mp);
```

```
%obtención de los vectores para las variables:
```

```

mg=y15i(:,1);
Y_s=y15i(:,2);
mc=y15i(:,3);
X_s=y15i(:,4);
Xsup_s=y15i(:,5);
Hch_s=y15i(:,6);
Hgh_s=y15i(:,7);

```

```
%ecuaciones para distintos parámetros:
```

```

Fg = Wg_s*(1+Y_s)/dg;
Vg =Fg ./((Secc-mc)/(dc*L));
Vc = Kv*Vg*Vrot;
Wc_s = Kw*(mc.*Vc);

```

```
Wch_e = Wc_e*(1+X_e);  
Wgh_e = Wg_e*(1+Y_e);  
Xint_s =(X_s - Xsup_s);  
Wdif = KD*(Xint_s-Xsup_s);  
Sh = min(1, Xsup_s/Xc);  
Tc_s = (Hch_s/ke);  
Tg_s = ((Hgh_s - Y_s* 2501)./(1+1.82*Y_s));  
Q = hc1*Ak*(Tg_s-Tc_s).*Sh + hc2*Ak*(Tg_s-Tc_s).*(1-Sh);  
Wevap = ((Ak*hc1/cl)*(Tg_s-Tc_s).*Sh);  
  
%FIN
```

## Artificial Drying of Cocoa Beans Based on a Continuous Flow Revolving System

P. Parra, *Member, IEEE*, W. Ipanaqué, *Member, IEEE* and J. Manrique

**Abstract**— This paper presents an alternative technique for the artificial drying of cocoa. The proposal is based on the use of a drying cylindrical and rotating type, the same that uses a flow of hot air to produce the convective heat transfer, in this way is achieved remove moisture contained in the cocoa beans. Normally artificial drying systems cocoa, working in batches; this research the feasibility of obtaining good results operating with a continuous flow of cocoa is shown. This article also includes design data, simulation and experimentation with two different control algorithms.

**Keywords**— Artificial drying, heat transfer, identification, natural drying, predictive control.

### I. INTRODUCCIÓN

EN Ecuador, como en el resto de los principales países productores de cacao a nivel mundial, se le presta primordial atención al proceso de beneficiado del grano. Se conoce como beneficiado a las etapas de: cosecha, fermentación, secado, limpieza, selección y almacenamiento del grano de cacao. La cosecha consiste en la selección de mazorcas maduras, posteriormente se ejecuta la recolección, partida y desgranada de dichas mazorcas. Las etapas de fermentación y secado son las más críticas dentro de la cadena de proceso, de ellas depende las cualidades organolépticas adquiridas por el grano.

El proceso de secado de cacao se lo puede realizar de forma natural o artificial. En la etapa de secado continúa el proceso de oxidación iniciado en la etapa de fermentación y se completa la formación de aquellos compuestos que determinan las cualidades organolépticas, como el aroma y el sabor del cacao. En esta etapa además se desarrolla la pigmentación de color marrón a partir de los compuestos fenólicos [1].

En [2], el objetivo principal del proceso de secado es que el cacao termine de desarrollar el sabor a chocolate que inició durante la fermentación y que las almendras adquieran el color marrón o pardo típico del cacao correctamente fermentado y secado.

Esta investigación fue desarrollada con el apoyo económico de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador y la tutoría científica de la Universidad de Pinar – Perú.

P. Parra, Área de Ciencia y Tecnología, Universidad Politécnica Salesiana, Grupo de Investigación de Procesos Industriales (GPI), pparra@ups.edu.ec

W. Ipanaqué, Facultad de Electricidad y Mecánica, Universidad de Pinar, Grupo de Investigación de Sistemas Automatización y Control (SAC), william.ipanaque@udep.pe

J. Manrique, Facultad de Electricidad y Mecánica, Universidad de Pinar, Grupo de Investigación de Sistemas Automatización y Control (SAC), jose.manrique@udep.pe

Según el trabajo desarrollado en [3], de nada sirve que se haya realizado una buena fermentación si el secado no se hace de una forma adecuada ya que el cacao mal secado no alcanzará el aroma y sabor adecuados. Según el mismo autor, durante el proceso de secado se eliminará el exceso de humedad y de acidez de las almendras recién fermentadas desde un aproximado del 55% hasta el 7%, valor de humedad que garantiza su posterior almacenaje, transporte y comercialización.

Un exitoso proceso de secado permite alcanzar al cacao un pH óptimo que oscila entre valores que van de 5.1 a 5.4, cualquier muestra de almendras con un pH inferior a 5.0 revela la presencia de ácidos no volátiles, lo cual genera aromas desagradables, disminuyendo la calidad del chocolate. [4].

El secado debe hacerse de forma lenta y gradual [5], el proceso de secado violento no permite lograr un secado homogéneo e interrumpe la hidrólisis enzimática, generando almendras de color púrpura con sabor astringente. El secado violento además produce endurecimiento rápido de la testa o cascarrilla, lo cual impide la salida o difusión de los ácidos volátiles generando almendras con sabor ácido. [6].

#### 1.1 Secado Natural de Cacao

Se denomina secado natural del cacao al proceso de secado por exposición al sol y consiste en aprovechar el calor generado por los rayos solares para secar lenta y paulatinamente las almendras de cacao. Según [7], con esta técnica de secado las almendras completan satisfactoriamente los cambios bioquímicos internos, logrando buenas características organolépticas. Utilizando esta técnica de secado no se puede realizar regulación o control alguno de la temperatura a la que es sometido el lote de grano.

Las temperaturas ambientales de la zona ecuatorial, en donde se cosecha cacao, oscilan entre 24 y 38 °C durante el día; el grano de cacao es sometido a este rango de temperaturas en intervalos de tiempo variables, esto es 2 horas durante el primer día, 4 horas al segundo día y 8 horas durante los días restantes.

En el año de 2006 los autores de [8], presentaron su trabajo sobre el desarrollo de un secador solar intermitente para granos de cacao. El sistema cuenta con almacenamiento de energía térmica y combina los mecanismos de calentamiento por convección y por radiación, manteniendo la idea del secado natural.

#### 1.2 Secado Artificial de Cacao

Para el secado artificial de 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 artificiales estacionarios. En [7], se menciona

algunos tipos de secadores artificiales: estufas, secadoras con leña, secadoras de combustión, secadoras eléctricas y la secadora de cacao tipo Samoa. Según el mismo autor, la mayor parte de la producción de cacao a nivel mundial, proviene de países en donde el secado es predominantemente natural, sin embargo en algunas regiones geográficas los periodos de cosecha coinciden con épocas de lluvia y humedad alta, en cuyo caso inevitablemente se recurre al secado artificial.

En [9], realizaron un análisis del proceso de deshidratación del cacao con miras a la disminución del tiempo de secado. En este trabajo realizaron dos pruebas experimentales de secado y análisis computacional basado en elementos finitos. Para la primera prueba se utilizó un horno de gas con bandejas perforadas dispuestas verticalmente y una muestra de cacao con una masa de 13kg aproximadamente. Para el segundo experimento se utilizó un horno con flujo de aire a la entrada y un extractor de aire a una temperatura de 55 °C. Luego de analizar las simulaciones realizadas a nivel computacional y 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. Recomiendan no remover grandes cantidades de vapor de agua del aire ya que el aire seco deshidrata la superficie de los granos, provocando quemaduras.

En el trabajo desarrollado por [10], realizaron una investigación 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 fueron secados 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. Pudieron 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 registraron un mayor contenido de humedad en la testa con respecto al cotiledón. Finalmente se encontraron mayor humedad en la testa que en el cotiledón, demostrando la migración del contenido de humedad 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, en este caso demostraron 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 del cotiledón.

En el presente trabajo, se muestran los resultados de la identificación de una planta secadora de cacao, la misma que se encuentra instalada en el campus centenario de la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador

En los siguientes apartados del artículo, se realiza la descripción de la planta a controlarse, se muestran los resultados de la modelación y simulación de la planta en lazo abierto y finalmente se detalla el diseño e implementación de un controlador predictivo para la variable de temperatura del gas de secado. Además se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos utilizando el controlador predictivo frente a los resultados alcanzados aplicando un controlador PID.

En este trabajo se presenta un aporte significativo para el secado de cacao. Se demuestra la factibilidad de implementar una técnica artificial de secado utilizando un cilindro rotatorio y la transferencia de calor por convección, como alternativa al proceso de secado natural, basado en técnicas artesanales.

Las técnicas de secado artesanales no son controladas y el éxito del proceso depende únicamente de observaciones y análisis empíricos. El trabajo de investigación desarrollado en torno a la implementación de un algoritmo de control para la planta piloto de secado artificial, garantiza la obtención granos de cacao con un nivel óptimo de humedad, sin dependencia directa de las condiciones climáticas de la época de cosecha.

## II. SISTEMA SECADOR DE COCAO

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 el sistema de dosificación, cuyas características se describen en la TABLA I, se deposita cacao fermentado con una humedad de 0.35 en base seca, equivalente a 35% de humedad. En la parte inferior del dosificador 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.

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 (GLP - C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), 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 de dosificación	0.002 kg/s	0.020 kg/s	Vibrador
Capacidad de almacenamiento		100 kg.	Tolva

TABLA II  
CARACTERÍSTICAS DEL GENERADOR DE AIRE CALIENTE

	mínimo	máximo	Tipo
Diámetro		0.28 m	
Longitud		0.53 m	
Potencia	12.4kW	31.2 kW	
Flujo de aire	0.1 kg/s	0.8 kg/s	
Consumo de combustible	0.0001 kg/s	0.0007 kg/s	GLP
Temperatura de salida	40 °C	120 °C	

El cilindro rotatorio (cámara de secado), recibe los flujos 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 0.08 en base seca; valor que permite el almacenamiento, transporte y posterior procesamiento.

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.

### III. CONTROL DE LA PLANTA DE SECADO

La estrategia de control PID es la más utilizada en los procesos industriales de forma general, sin embargo los controladores predictivos son los más utilizados en las secciones económicamente más importantes dentro del ámbito industrial [14]. El nivel de aceptación de los controladores predictivos actualmente es bastante alto, prueba de aquello constituye la tool box desarrollada para MATLAB® [15], denominada Model Predictive Control Toolbox™. Esta herramienta permite el diseño y simulación de controladores predictivos basados en modelo, incluyendo en problema de optimización que trata de minimizar el error entre la variable medida y el valor deseado a la salida del proceso.

Varias aplicaciones de tipo industrial se pueden encontrar en bibliografía especializada, desarrolladas con control predictivo, por ejemplo, control predictivo basado en redes neuronales de un intercambiador de calor [16], rediseño e implementación de un prototipo para la medición y control de nivel y caudal de agua [17], control predictivo basado en modelo para un horno industrial [18].

En las bases de datos indexadas no se ha podido encontrar la solución explícita de la aplicación de un algoritmo de control para una planta secadora de cacao de tipo rotatoria y de flujo continuo. Desde esta realidad, en este artículo se detalla el análisis completo realizado para la implementación de un controlador a la planta piloto objeto de esta investigación. Debe tenerse en cuenta que este tipo de planta no es comúnmente utilizada para el secado de cacao y que el diseño interior del cilindro rotatorio es inédito. La distribución y ubicación de las paletas permiten que los granos de cacao se mantengan siempre en movimiento y en contacto pleno con la corriente de aire de secado durante un tiempo de residencia apropiado para la obtención de cacao seco.

Para diseñar el controlador de una planta es necesario conocer la dinámica de la misma. En este caso se plantea utilizar una estrategia de control predictivo basado en modelo, por lo tanto resulta necesario realizar el modelamiento de la planta, para lo cual se ha decidido recurrir al proceso de identificación lineal. Si bien es cierto, el proceso de secado de cacao objeto de este estudio resulta ser no lineal, se realizará la identificación la planta alrededor del punto de operación en el cual el proceso permanece estable y garantiza la obtención de granos de cacao con un nivel óptimo de humedad, esto es alrededor de 0.08 en base seca. Se conoce que los mejores resultados dentro del proceso de secado se obtienen en el proceso natural de secado, con temperaturas que oscilan entre 30 y 40 °C. En este caso de secado artificial, se trabaja con temperaturas entre 50 °C y 70 °C

### 3.1 Identificación.

Al iniciar este trabajo de investigación, la planta de secado de cacao no contaba con un circuito controlador de temperatura, es decir, que su operación se desarrollaba en lazo abierto.

La variable de flujo másico de combustible, para este caso, gas licuado de petróleo GLP, genera un alto nivel de sensibilidad en la temperatura del gas de secado al interior del cilindro rotatorio. De esta temperatura del aire caliente, depende el éxito de la operación de extracción de humedad del cacao; temperaturas muy elevadas, superiores a los 80 °C producen el desecamiento prematuro de la testa del grano y por consiguiente el cierre de los poros de la misma. Al bloquearse la testa del grano de cacao, se interrumpe el proceso de transferencia de masa entre el cotiledón y la testa, a pesar de seguir vigente el proceso de transferencia de energía entre el gas de secado y el grano.

El punto de operación nominal de la planta es de 0.00015 kg/s de flujo másico de combustible (GLP - C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), valor con el cual se consigue establecer una temperatura del gas de secado en el interior de la cámara de 54.85 °C bajo condiciones ambientales de 70% de humedad relativa y temperatura de 30 °C. Durante el día la temperatura ambiental varía algunos grados centígrados. Si la planta opera a lazo abierto, dicha variación genera cambios en el nivel de temperatura del gas de secado dentro de la cámara.

#### 3.1.2 Respuesta de la Planta en Lazo Abierto.

En lazo abierto, varios procesos que involucran a la variable de temperatura pueden definirse según la siguiente función de transferencia descrita en (1).

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-\tau s}}{1 + \gamma s} \quad (1)$$

Donde los coeficientes  $K_0$ ,  $\tau$  y  $\gamma$  se obtienen de la respuesta del sistema en lazo abierto a una entrada escalón. Se parte del sistema estabilizado en  $y(t) = y_0$  para  $u(t) = u_0$ . Se aplica una entrada escalón de  $u_0$  a  $u_1$ . El valor del escalón debe estar entre un 10% y un 20% del valor nominal, frente a esta señal, se registra la respuesta de la salida hasta que se establece en el nuevo punto de operación [11].

A la señal de entrada, para este caso flujo másico de combustible, se le produjo un escalón de 15 a 17 en el nivel de apertura de la válvula (0 - 100), registrándose un incremento de temperatura en el gas de secado desde 53.1 °C hasta 55.5 °C.

#### 3.1.2 Diseño de la PRBS.

Para el diseño de la PRBS (señal binaria pseudo aleatoria), se tomó en cuenta la dinámica del proceso, obtenida con la respuesta en lazo abierto. En la TABLA IV se tabulan los datos para la generación de la señal.

TABLA IV  
CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL PRBS

Parámetro	Valor
Flujo nominal (variable manipulable)	0.00015 kg/s
Tiempo de muestreo	1 s.

Tiempo de simulación	11400 s.
Tiempo mínimo de conmutación de la señal	300 s.
Variación de la señal	+/- 10 %

Para este proceso se generó un total de 11400 muestras. En la Fig. 1 se pueden observar las respuestas de temperatura del gas de secado, proporcionadas por la planta y por el modelo obtenido por identificación. Se seleccionó el modelo ARX [2 1 1] con un FIT del 90.76%, tasa superior a las obtenidas con los modelos ARMAX y OE.

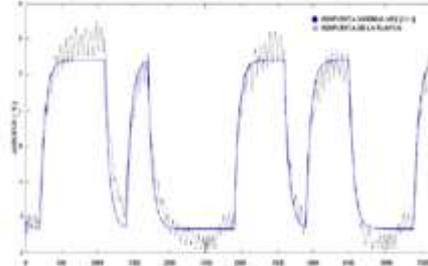


Figura 1. Datos de salida: Modelo Identificado y Planta.

En (2) y (3) se representa la estructura matemática en tiempo discreto para el modelo identificado ARX.

$$A(Z) = 1 - 1.038 Z^{-1} + 0.05276 Z^{-2} \tag{2}$$

$$B(Z) = 0.00578 \tag{3}$$

3.2 Diseño del GPC.

El algoritmo básico de control predictivo generalizado (GPC) fue propuesto por Clarke *et al.* [12] en el año 1987. En la actualidad este método es muy utilizado en los ámbitos académico e industrial. Con esta estrategia predictiva se calcula una secuencia de futuras acciones de control, minimizando una función de costo. Se minimiza una función cuadrática que por un lado mide la distancia entre la salida predicha del sistema y la trayectoria de referencia dentro del horizonte de predicción, y por otro lado mide el esfuerzo de control necesario para obtener dicha salida.[13]. A diferencia de otras estrategias de control predictivo, el GPC puede proporcionar soluciones explícitas en ausencia de restricciones, además puede trabajar con procesos inestables o de fase no mínima.

Para los procesos SISO (de una sola entrada y una sola salida), al ser linealizados en torno a un determinado punto de trabajo, se puede utilizar un modelo de control autorregresivo, integrado y con medias móviles (CARIMA), como se describe en la ecuación (4).

$$A(Z^{-1})y(t) = Z^{-d}B(Z^{-1})u(t-1) + B(Z^{-1})\frac{e(t)}{\Delta} \tag{4}$$

Con  $\Delta = 1 - Z^{-1}$ , en donde, A, B y C son los polinomios siguientes en el operador hacia atrás ( $Z^{-1}$ ); y(t) representa la salida del proceso, u(t) la señal de control, "d" el tiempo muerto y con e(t) se representa un ruido blanco con valor de media igual a cero.

La función de costo para esta estrategia de control viene dada por la ecuación (5).

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j) [\Delta u(t+j-1)]^2 \tag{5}$$

En donde  $\hat{y}(t+j|t)$  representa la predicción futura óptima en j pasos hacia delante de la salida, en función de los datos conocidos hasta el instante t. Los horizontes mínimo y máximo de la función de costo, con datos conocidos hasta el instante t, son  $N_1$  y  $N_2$ .  $N_u$  representa el horizonte de control,  $w(t+j)$  es la trayectoria de referencia futura, mientras  $\delta(j)$  y  $\lambda(j)$  son las secuencias de ponderación de calidad y energía. [13].

Para el cálculo del GPC de la planta de cacao, objeto de este estudio, se consideran los datos mostrados en la TABLA V.

TABLA V  
DATOS PARA EL CÁLCULO DEL GPC

Parámetro	Comentario
C=1	Polinomio asociado al ruido
d=5	Retardo o tiempo muerto
λ=0.8	Ponderación
N <sub>1</sub> =1	Horizonte mínimo Función Costo
N <sub>2</sub> =d+N	Horizonte máximo Función Costo
N=N <sub>u</sub> =3	Horizonte de control

Las señales de control u(t), u(t+1),...:u(t+N), tendrán valores que minimizan la función de costo de la ecuación (5). La salida y(t), será afectada solamente por u(t), después del instante 6 (d+1), ya que el proceso tiene un retardo o tiempo muerto d = 5.

Resolviendo el algoritmo para las condiciones de la planta de secado, se obtienen los siguientes valores:

$$R = 1$$

$$S = [1.7020 \quad -1.5221 \quad 0.0767]$$

$$T = 0.2566$$

En donde R, S y T son los valores con los que se pueden implementar el controlador predictivo generalizado. Otra opción para el cálculo del controlador, utilizando el mismo algoritmo, es obtener la ley de control, como se muestra en la ecuación (6).

$$u(t) = u(t-1) - 1.7020y(t) + 1.5221y(t-1) - 0.0767y(t-2) + 0.0072w(t+1) + 0.0147w(t+2) + 0.0221w(t+3) + 0.0289w(t+4) + 0.0358w(t+5) + 0.0427w(t+6) + 0.0494w(t+7) + 0.056w(t+8) \tag{6}$$

3.3 Diseño del controlador PID.

En la fig. 2 se muestra la gráfica con los datos obtenidos experimentalmente en la planta de cacao. Para calcular el controlador PID, se escogió el método de la curva de reacción de Ziegler-Nichols.

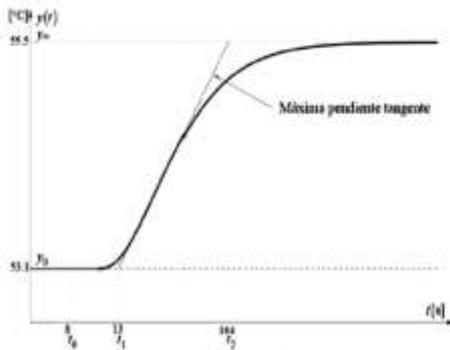


Figura 2. Curva de reacción de Ziegler-Nichols. Planta de secado de Cauas.

Se procede a calcular las constantes  $k_0$ ,  $\tau_0$  y  $\gamma_0$ , con las ecuaciones (7), (8) y (9).

$$k_0 = \frac{y_m - y_0}{y_0 - u_0} = \frac{55.5 - 53.1}{17 - 15} = 1.2 \quad (7)$$

$$\tau_0 = t_1 - t_0 = 13 - 8 = 5 \quad (8)$$

$$\gamma_0 = t_2 - t_1 = 164 - 13 = 151 \quad (9)$$

Los parámetros del controlador PID propuestos por Ziegler y Nichols a partir de la curva de reacción se los calcula con las ecuaciones (10), (11) y (12).

$$k_p = \frac{1.2 \gamma_0}{k_0 \tau_0} = \frac{1.2(151)}{1.2(5)} = 30.2 \quad (10)$$

$$T_i = 2\tau_0 = 2(5) = 10 \quad (11)$$

$$T_d = 0.5\tau_0 = 0.5(5) = 2.5 \quad (12)$$

IV. RESULTADOS

El punto de operación de la planta alrededor del cual se realizó la identificación del proceso es (0.00015 kg/s, 54.85 °C) para el flujo de combustible y temperatura del gas de secado respectivamente. En los resultados de la simulación, Fig. 3, se pudo constatar que la señal de salida realiza un muy buen seguimiento a la señal de consigna. Tener en cuenta que esto sucede cuando se trabaja utilizando la función de transferencia [B/A], obtenida a partir del procedimiento de identificación.

En la fig. 4 se observa el comportamiento de la planta de secado, trabajando alrededor del punto de operación sobre el cual fue linealizado. El tiempo de muestreo es de 1 segundo.

Se procedió a implementar el GPC, utilizando un Sistema embebido basado en microcontrolador. Frente a una consigna que varía entre 50 y 56 °C, a intervalos de 2°C. En la fig. 5 se puede apreciar una respuesta bastante aceptable con tiempos de estabilización aproximados de 180 segundos y valores de overshoot inferiores a 1 °C. El resultado es muy bueno, teniendo en cuenta que el cálculo del GPC fue realizado en base a un modelo linealizado de la planta.

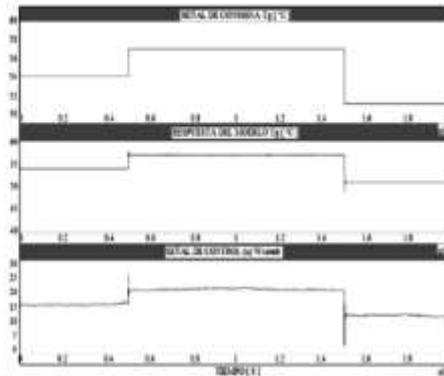


Figura 3. Simulación del GPC actuando sobre el modelo identificado.

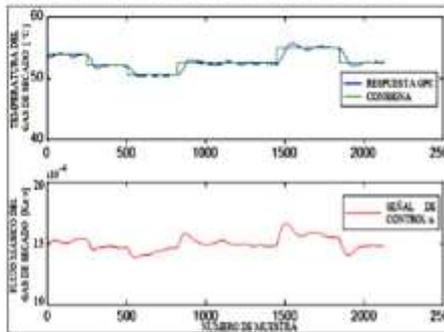


Figura 4. Respuesta de la planta alrededor del punto de operación nominal.

Con la finalidad de contrastar la respuesta de la planta bajo los efectos de los controladores PID y GPC, se realizó un experimento para registrar el comportamiento de la variable de temperatura del gas de secado para una misma señal de consigna.

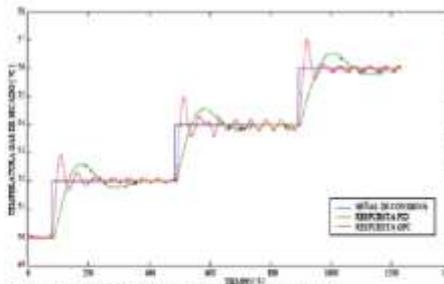


Figura 5. Respuestas de la planta para control GPC y PID.

En la fig. 5 se aprecian las respuestas de la planta frente a la consigna establecida y en la fig. 6 se muestran las acciones de control generadas por los controladores GPC y PID.

## Design and Implementation of a Temperature Predictive Controller for a Dryer Plant of Cocoa Beans

P. Parra Rosero, W. Ipanaqué Alama, J. Manrique Silupu

**Abstract**— In this paper we present the results of a research developed in a plant of artificial drying of cocoa beans, for the calculation of a generalized predictive controller (GPC), the same which was implemented using an embedded system based on a microcontroller. Natural and artificial drying techniques of cocoa beans are specified, the physical characteristics of the plant are detailed and the operational dynamic is determined through the linear identification of the process. The paper concludes with a comparative analysis of GPC and PID controllers implemented on the drying plant.

**Keywords**— GPC, PID, identification, control, artificial drying of cocoa beans.

**Resumen**— En este artículo se presentan los resultados de una investigación desarrollada en una planta de secado artificial de cacao, para el cálculo de un controlador predictivo generalizado (GPC), el mismo que fue implementado utilizando un sistema embebido basado en microcontrolador. Se especifican las técnicas de secado natural y artificial de cacao, se detallan las características físicas de la planta y se determina la dinámica de funcionamiento a través de la identificación lineal del proceso. El trabajo concluye con un análisis comparativo de los controladores PID y GPC implementados sobre la planta de secado artificial de cacao.

**Palabras clave**— GPC, PID, identificación, control, secado artificial de cacao.

### 1. INTRODUCTION

In Ecuador, as in other major cocoa producing countries worldwide, utmost attention is granted to grain benefited process. We regard as benefited the steps of: harvest, fermentation, drying, cleaning, sorting and storage of the cocoa bean. Harvest is the selection of ripe cobs, then the collection, starting and threshed of those cobs. The stages of fermentation and drying are the most critical ones in the process chain, on which the organoleptic qualities acquired by the grain depend.

The drying of cocoa can be performed naturally or artificially. In the drying step the oxidation process is initiated after the fermentation step, in which the formation of those compounds that determine the organoleptic qualities, such as flavor and cocoa flavor, was completed. At this stage there is also brown pigmentation developed from phenolic compounds. (Cros y Jeanjean, 1995) [1].

According to Enriquez [2], the main objective of the drying process is for finished cocoa to develop the chocolate flavor that began during fermentation and almonds acquire brown or brown cocoa typical fermented and dried properly.

For Rincon (1999) [3], it is useless that a good fermentation occurs if drying is not a suitable way as bad drying cocoa aroma and reach adequate flavor. According to the author, during the drying process excess moisture is discarded and acidity of newly fermented decreases from approximately

55% to 7%, moisture value that guarantees its subsequent storage, transportation and marketing almonds.

Successful drying of cocoa achieves optimal pH ranging from values 5.1 to 5.4, any sample almonds with a pH below 5.0 shows the presence of non-volatile acids, which generates unpleasant aromas, decreasing the quality of chocolate. (Armijo, 2002) [4].

Drying should be done slowly and gradually (Jiménez 2000) [5], the violent drying process does not allow a uniform drying and interrupts the enzymatic hydrolysis, generating almonds purple with astringent taste. Drying violent also produces rapid hardening of the seed coat or hull, which prevents the exit or diffusion of volatile acids generating almond tart taste. (Ramos, 2004) [6].

#### 1.1 Natural drying of Cocoa

Natural drying of cocoa is called the drying process by sun exposure and it consists on harnessing the heat generated by the sun to dry slowly and gradually the cocoa. According Enriquez (2004) [7] with this drying technique almonds successfully complete the internal biochemical changes, achieving good organoleptic characteristics. Using this drying technique allows for no control or regulation of the temperature at which the batch is exposed.

The room temperature of the area close to the Equator, where cocoa is harvested, ranges between 24 and 38 °C during the day; the cocoa bean is exposed to this temperature range at varying time intervals, namely 2 hours during the first day to the second day 4 hours and 8 hours for the remaining days.

In 2006 the Fagunwa, AO et al [8], authors presented their work on the development of intermittent solar dryer for cocoa beans. The system has thermal energy storage mechanisms and combined heating by convection and radiation, while maintaining the idea of natural drying.

#### 1.2 Artificial drying of Cocoa

For the artificial drying of cocoa different heat sources are used, preferably those generated from the combustion of fuels such as natural gas. For the benefit of cocoa in Ecuador stationary artificial dryers are mostly used. Enriquez (2004) [7], mentions some types of artificial drying: stoves, dryers with firewood, burning dryers, electric dryers and Cocoa Samco-type dryers. According to the author, most cocoa production worldwide comes from countries where drying is predominantly natural, but in some geographical regions harvest periods coincide with periods of rain and high humidity, in which case there is an inevitable resort to artificial drying.

Tinoco and Ospina [9] do an analysis of the dehydration process of cocoa with a view on decreasing drying time. In this work they conducted two experimental evidence dryings and computational analysis based on finite elements. For the first

test a gas oven with perforated trays arranged vertically and a sample of cacao with a mass of approximately 13kg was used. For the second experiment an oven with air flow at the inlet and an exhaust fan was used at a temperature of 55 °C. After analyzing the simulations computationally and the behavior of the variables of temperature and humidity, the authors concluded that cocoa should be stirred into the oven to prevent burns from contact between grains and metal trays. They recommended not removing large amounts of water vapor in the air and dry air dehydrates the surface of the grains, causing burns.

The authors C. L. Hii et al. [10] conducted an investigation to study the drying kinetics of the individual layers of the cocoa bean; these are the seed coat or hull and cotyledon. A thin layer of cocoa beans were dried using a heat pump and dry air at temperatures of 28.2 °C, 40.4 °C and 56 °C, recording throughout the process the moisture content of the seed coat and cotyledon. They observed that reducing the moisture content in the seed coat was faster than in the cotyledon during the first two hours of the process. Next, the intermediate drying step recorded higher moisture content in the head with respect to the cotyledon. Finally greater humidity was found in the seed coat in the cotyledon, demonstrating the migration of moisture from the cotyledon to the testa. In their conclusions, the authors argue that the behavior of moisture content recorded in the seed coat and cotyledon explained by postulating Luikov mass transfer in this case showed that mass transfer potential for the testa is always less than in the cotyledon, therefore mass transfer to the head of the cotyledon is affected, although there is less moisture content of the cotyledon.

In this paper, we show the results of the identification of a dryer cocoa plant, the same which is installed on the centenary campus of the Salesian Polytechnic University of Ecuador.

In the following paragraphs of the article, a description is made of the plant to be controlled, the results of modeling and simulation of the plant shown in open loop and finally the design and implementation of a detailed predictive controller for variable temperature drying gas. Furthermore a comparative analysis of the results obtained is performed using the predictive controller versus the results achieved using a PID controller.

In this work a significant contribution to the drying of cocoa is presented. The feasibility of implementing an artificial drying technique using a rotating cylinder and the heat transfer by convection as an alternative to natural drying process, based on artisanal techniques is demonstrated.

Artisanal drying techniques are not controlled and success of this process depends on simple observations and empirical analysis. The research developed around the implementation of a control algorithm for the pilot plant of artificial drying guarantees cocoa beans obtain optimum moisture level, without direct dependence on the climatic conditions of the harvest season.

## II. DESCRIPTION OF THE PLANT

The pilot plant consists of a dosing system grain, a combustion chamber fan thrust with a drying chamber, which consists of a rotary cylinder through which hot air flows in the

same direction as that in which cocoa moves. Figure 1 shows the drying system.



Figure 1. Cocoa drying plant.

In the dispensing system, which is described in TABLE I, fermented cocoa is deposited with a humidity of 0.35 on a dry basis, equivalent to 35% moisture. At the bottom of the dispenser the gravity and the vibration is used to meter the flow of cocoa beans continuously to the drying chamber.

TABLE I. DISPENSER FEATURES.

	minimum	maximum	Type
Dosing capacity	0.002 kg/s	0.020 kg/s	Vibrator
Storage capacity		100 kg.	chute

Generating hot (drying gas) air is performed with a combustion chamber that takes air from the environment and is heated by the combustion of liquefied petroleum gas (LPG - C4H10), the heated air is sent to the rotary cylinder. See the characteristics of the hot air generator in TABLE II.

TABLE II. FEATURES GENERATOR.

	minimum	maximum	Type
Diameter	-	0.28 m	-
Length	-	0.53 m.	-
Power	12.4kW	31.2 kW	-
Air flow	0.1 kg/s	0.8 kg/s	-
Fuel consumption	0.0001 kg/s	0.0007 kg/s	GLP
Outlet temperatura	40 °C	120 °C	-

The rotating cylinder (drying chamber), receives flows of cocoa and hot air. Internally the effect of heat transfer occurs by convection, the grain moves due to the rotation of the cylinder and the speed of the drying gas. Cocoa remains for a period of approximately 10 hours (residence time) within the cylinder to achieve a moisture content of 0.08 on a dry basis; value that allows the storage, transportation and processing.

Figure 2 schematically shows the cross section of the cylinder shown in TABLE III and the characteristics of the drying chamber are described.

TABLE III. Characteristics of the drying chamber

	minimum	maximum	Type
Rotation speed	0.5 rpm	4.0 rpm	cylindrical
Length		3.30 m.	
diameter		0.6 m.	



Figure 2. Cross section of the drying chamber.

The plant is sized to process a daily average of 200 kg with an average consumption of 20 kg of fuel gas.

### III. CONTROLLER DESIGN

PID control strategy is the most used in industrial processes in general, however, the predictive controllers are most commonly used in economically important sections within the industrial area [14]. The level of acceptance of predictive controllers is currently quite high, a sample of this acceptance is the tool box developed for MATLAB<sup>®</sup> by Bemporad et al [15], called Model Predictive Control Toolbox<sup>™</sup>. This tool enables the design and simulation of predictive controllers based on model, including the optimization problem that tries to minimize the error between the measured variable and the desired value of the output process.

Various industrial applications can be found in specialized literature, developed with predictive control, for example, predictive control based on neural networks of a heat exchanger [16], redesign and implementation of a prototype for the measurement and control of level and flow of water [17], predictive control based on model to an industrial furnace [18].

In the indexed database it has not been able to find the explicit solution implementing a control algorithm for a dryer cocoa plant based on a rotatory cylinder and continues flow of cocoa beans. From this reality, in this article the full analysis for implementing a controller to the pilot plant of this research is detailed. It should be noted that this type of plant is not commonly used for drying cocoa and the interior design of the rotatory cylinder is unprecedented. The distribution and location of pallets allow cocoa beans to keep always moving and in close contact with the drying air stream for a suitable residence time for obtaining dry cocoa.

To design the plant controller is necessary to know the dynamics of it. In this case it is proposed to use a predictive model-based control, it is therefore necessary to perform modeling of the plant, for which it was decided to use the linear identification process. Although, the drying process cocoa -object of this study- is to be nonlinear, plant identification will be performed around the operating point in which the process is stable and ensures obtaining cocoa beans with optimal level of moisture, this is around 0.08 on a dry basis.

It is known that the best results in the drying process are obtained in the natural drying process, with temperatures ranging between 30 and 40 °C. In this case of artificial drying, worked with temperatures between 50 °C and 70 °C.

### 3.1 Identification.

When starting this research, the drying of cocoa did not have a temperature controller circuit, therefore its operation took place in open loop.

Variable fuel mass flow, in this case, liquefied petroleum gas LPG, generates a high level of sensitivity in the temperature of the drying gas into the rotatory cylinder. Successful extraction operation of cocoa moisture depends on hot air temperature; very high temperatures, above 80 °C cause premature drying of grain and seed coat thus closing the pores there of. Testa have blocked the cocoa bean, is interrupted the process of mass transfer between the cotyledon and testa, despite following current process energy transfer between the gas drying and grain.

The point of nominal plant operation is 0.00015 kg / s mass flow of fuel (LPG - C4H10), value which is achieved by establishing a drying gas temperature inside the chamber 54.85 °C under environmental conditions 70% relative humidity and a temperature of 30 °C. During the day the room temperature varies a few degrees Celsius. If the plant operates in open loop, such a change causes changes in the level of the drying gas temperature within the chamber.

#### 3.1.2 Answer from Plant in Open Loop.

In open loop, several processes involving variable temperature can be defined according to the following transfer function described in (1).

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau}}{1 + \gamma s} \quad (1)$$

Where the coefficients  $K_0$ ,  $\tau$  and  $\gamma$  are obtained from the system response in open loop to a step input. It is part of the system stabilized and  $y(t) = y_0$  for  $u(t) = u_0$ . Applies a step input of  $u_0$  to  $u_1$ , the step value must be between 10% and 20% of nominal value, compared to this signal, the output response is register until it is stable in the new operating point [11]. Figure 3 shows the graph obtained experimentally on cocoa drying plant during testing in open loop. At the input signal, in this case fuel mass flow, a step is produced between 15 and 17 at the level of valve opening (0 - 100), registering an increase in temperature from the drying gas 53.1 °C to 55.5 °C.

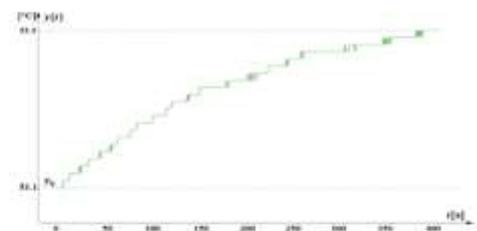


Figure 3. Step response of cocoa drying plant.

#### 3.1.2 Design of PRBS.

For the design of the PRBS (pseudo binary signal random) took into account the dynamics of the process, obtained with

the open-loop response. In the TABLE IV are tabulated the data for generating the data.

Parameters	Value
Nominal flow (manipulated variable)	15
Sampling Time	1 s.
Simulation time	11400 s.
Minimum switching signal	300 s.
Signal variation	+/- 10 %

For this process a total of 11400 samples are generated. In Figure 4 the responses of the drying gas temperature, provided by the plant and the model obtained by identification can be observed. The ARX model is selected [2 1 1] with FIT 90.76%, higher than those obtained with rate ARMAX and OE models.

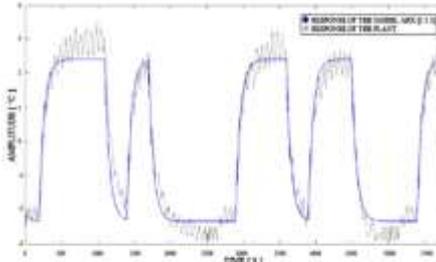


Figure 4. Output data. Model identified and Plant.

(2) and (3) represent the mathematical structure for the discrete-time model ARX identified.

$$A(Z) = 1 - 1.038 Z^{-1} + 0.05276 Z^{-2} \quad (2)$$

$$B(Z) = 0.00578 \quad (3)$$

3.2 GPC Design.

The basic algorithm of generalized predictive control (GPC) was proposed by Clarke et al. [12] in the year 1987. Currently this method is widely used in academia and industry. With this predictive strategy a sequence of future control actions are calculated by minimizing a cost function. A quadratic function on the one hand measures the distance between the predicted system output and the reference path within the forecast horizon and on the other side the control effort necessary to obtain this output is minimized. [13]. In contrast with other predictive control strategies, the GPC can provide explicit solutions in the absence of restrictions also it can work with unstable processes or non-minimum phase.

For SISO processes (one input and one output), being linearized around a given operating point, you can use a model of autoregressive control integrated with moving averages (CARIMA), as described in equation (4).

$$A(Z^{-1})y(t) = Z^{-d}B(Z^{-1})u(t-1) + B(Z^{-1})\frac{e(t)}{\Delta} \quad (4)$$

With  $\Delta = 1 - Z^{-1}$ , where A, B y C are polynomials in the following backward operator  $\{Z^{-1}\}$ ;  $y(t)$  represents the process output,  $u(t)$  the control signal "d" downtime and  $e(t)$  is a

white noise with mean value zero. The cost function for this control strategy is given by equation (5).

$$J(N_1, N_2, N_0) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j)[\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_0} \lambda(j)[\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (5)$$

Where  $[\hat{y}(t+j|t)]$  represents the optimal future prediction steps forward  $j$  output, based on the data obtained to time  $t$ . The minimum and maximum horizons of the cost function, are known to data time  $t$ , are  $N_1$  and  $N_2$ .  $N_0$  Represent the control horizon,  $w(t+j)$  is the trajectory of reference, while  $\delta(j)$  and  $\lambda(j)$  are weighting sequences of quality and energy [13].

To calculate the GPC of the cocoa plant, object of this study, the data shown can be seen in TABLE V.

Parameters	Comment
C=1	Noise associated polynomial
d=5	Delay or Down time
$\lambda=0.8$	weighting
$N_1=1$	Minimum horizon Cost Function
$N_2=d+N$	Maximum Horizon Cost Function
$N-N_0=3$	Control horizon

The control signals  $u(t), u(t+1), \dots, u(t+N)$ , have values that minimize the cost function of equation (5). The output  $y(t)$  will be affected only by  $u(t)$ , after time  $(d+1=6)$ , since the process is delayed or time  $d=5$ . Solving the algorithm to the conditions of the drying plant, the following values are obtained:

$$R = 1$$

$$S = [1.7020 \quad -1.5221 \quad 0.0767]$$

$$T = 0.2566.$$

Where R, S and T are the values that can be implemented the generalized predictive controller. Another option for calculating the controller, using the same algorithm is to obtain the control law, as shown in equation (6).

$$u(t) = u(t-1) - 1.7020y(t) + 1.5221y(t-1) - 0.0767y(t-2) + 0.0072w(t+1) + 0.0147w(t+2) + 0.0221w(t+3) + 0.0289w(t+4) + 0.0358w(t+5) + 0.0427w(t+6) + 0.0494w(t+7) + 0.056w(t+8) \quad (6)$$

3.3 Design of PID controller.

To calculate the PID controller, the method of the reaction Ziegler-Nichols curve was chosen. In Figure 5, the graph shows the data obtained experimentally in the cocoa plant.

It is proceed to calculate the constants  $k_0$ , to  $\gamma_0$ , with equations (7), (8) and (9).

$$k_0 = \frac{y_{\infty} - y_0}{u_{\infty} - u_0} = \frac{53.8 - 53.1}{17 - 15} = 1.2 \quad (7)$$

$$\tau_D = t_2 - t_0 = 13 - 8 = 5 \quad (8)$$

$$\gamma_0 = t_2 - t_1 = 164 - 13 = 151 \quad (9)$$

PID controller parameters proposed by Ziegler and Nichols from the reaction curve are calculated using the equations (10), (11) and (12).

$$k_p = \frac{1.2 \gamma_0}{k_0 \tau_D} = \frac{1.2(151)}{1.2(5)} = 30.2 \quad (10)$$

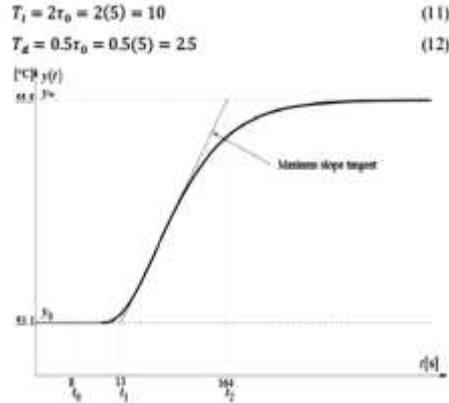


Figure 5. Ziegler-Nichols reaction Curve, Cocos drying plant

**IV. RESULTS.**

In SIMULINK®, the simulation for a period of 200000 seconds with a set point of  $54 \pm 3$  [°C] at the temperature of the drying gas into the drying chamber was run. The result of the experiment is shown in Figure 6.

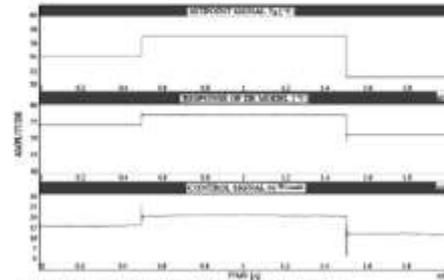


Figure 6. Simulation of GPC acting on the model identified.

The operating point of the plant around which the identification process was performed is  $(0.00015 \text{ kg / s}, 54.85 \text{ °C})$  for the fuel rate and drying gas temperature respectively. In the simulation results, Figure 10, it was found that the output signal does a great track to the set point. Note that this happens when you work using the transfer function  $[B / A]$ , obtained from the identification procedure.

The GPC was implemented, using an embedded system based on microcontroller. In front of a reference signal that varies between 50 and 60 °C, at intervals of 2 °C.

In Figure 7 we can observe quite an acceptable response with approximate stabilization times of 180 seconds and overshoot values below 1 °C. The result is pretty good considering that the calculation of the GPC was performed based on a linearized model of the plant. In Figure 7 the graph of the process response is observed against the established set point.

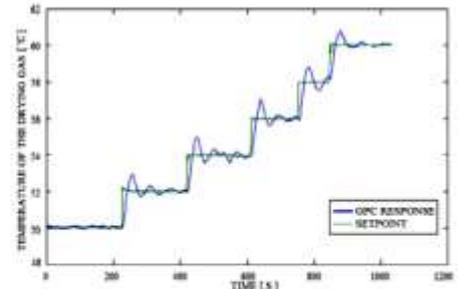


Figure 7. Response from Drying Plant with calculated GPC.

In Figure 8 the behavior of the drying plant is observed, working around the operating point on which it was linearized. The sampling time is 1 second.

In order to test the response of the plant under the influence of the PID and GPC controllers, an experiment was performed to record the behavior of the drying gas temperature variable for the same set point.

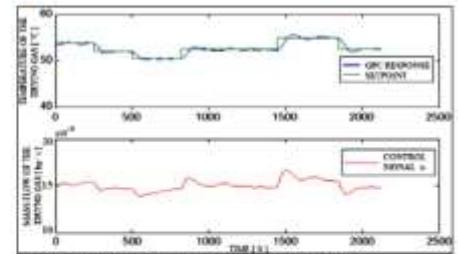


Figure 8. Plant response around the nominal operating point.

In Figure 9 the responses of the plant are seen in front of the set point and in Figure 10 control actions generated by the GPC and PID controllers are shown.

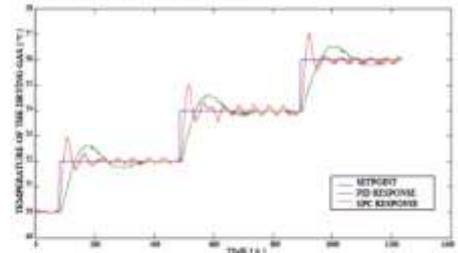


Figure 9. Responses of the plant to GPC and PID control.

Cocoa beans moisture results which underwent controlled drying process with GPC Control strategy, are exposed in Figure 11. The samples were taken, extracting process grains every 30 minutes. The moisture analysis was performed with a laboratory equipment OHAUS MB - 45.

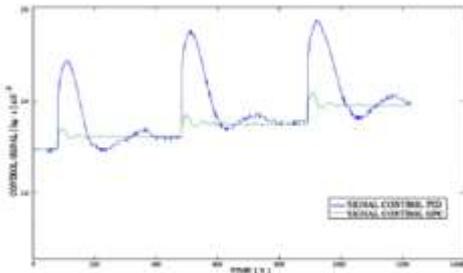


Figure 10. Shares of GPC and PID control

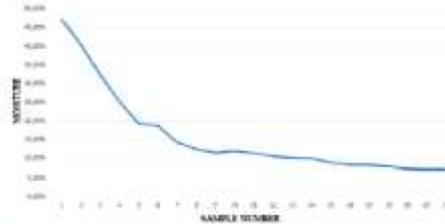


Figure 11. Moisture curve obtained from cocoa drying plant.

V. CONCLUSIONS.

It has been shown that by applying a predictive control optimal behavior close to the nominal values is obtained; results have been registered in a real prototype dryer using an embedded system for implementation.

Finally, there we have illustrated the control signal GPC by the controller PID (tuned by ZN), where you can see the advantage of the former favoring a considerable saving of GLP.

REFERENCES

[1] Cros, E., Jeanjean, N. Cocoa quality: Effect of Fermentation and Drying. Plantations, recherche, développement. 24:25-27. 1995.  
 [2] Enríquez, G. A. Control de cañidades durante un proceso productivo, Revista INIAP Quito, Ecuador. 2. (1):37-42. (1993)  
 [3] Rincón, S.O. Manual del Cacaotero. Bogotá Colombia., Cemacafé p. 78 – 80. 1999.  
 [4] Armijos, A. Caracterización de acidez como parámetro químico de calidad en muestras de cacao (Theobroma cacao L.) fino y ordinario de producción Nacional durante la fermentación. Tesis de Licenciatura En Química, Quito, Ecuador, 2002, Pontificia Universidad Católica p. 103.  
 [5] Jiménez, J.C. Efectos de dos Métodos de fermentación sobre la calidad de tres grupos de cacao (Theobroma cacao L.) cultivados en la zona de Quevedo, Provincia de los Ríos. Tesis Ingeniería Agronómica, Guaranda Ecuador, 200, Universidad Estatal de Bolívar, p. 57.  
 [6] Ramos, G., Ramos, P. y Azocar, A., Beneficio del Cacao, In Manual del Productor de cacao, Mérida Venezuela, (2000), p. 58-69.  
 [7] Enríquez G. A. Cacao Orgánico. Guía para Productores Ecuatorianos. Instituto Nacional Autónomo de investigaciones Agropecuarias. INIAP. (2004). Ecuador.

[8] A. O. Fagunwa, O. A. Koya y M.O. Development of an Intermittent Solar Dryer for Cocoa Beans. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript number 1292. Vol. XI, July, 2009.  
 [9] 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.  
 [10] 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).  
 [11] Ogata, K. Modern Control Engineering (5th Edition). Respuesta al escalón, p. 136. 2007  
 [12] Clark, DW., Mohtadi, C., Tuffs, PS. Generalized predictive control. Part I. The basic algorithm. Automatica 23 (2), 137-148, 1987. 3869, 1987.  
 [13] Camacho, EF., Bordons, C. Model Predictive Control. Second Edition. Springer-Verlag New York, Inc. pp. 48 – 53. 1997.  
 [14] De Keyser, R. A 'Gentle' Approach to PREDICTIVE CONTROL. UNESCO Encyclopaedia of Life Support Systems (EoLSS). Eolss Publishers Co Ltd, Oxford, 2003.  
 [15] Bemporad A, Morari M, Lawrence Ricker N. Model Predictive Control Toolbox™. 2005.  
 [16] Julii, M, Araabi, B. Neural Network based Predictive Control of a Heat Exchanger Nonlinear Process, Journal Of Electrical & Electronics Engineering, 4(2), 1219 – 1226. (2004).  
 [17] Ramírez, J, Landoño, C. Rediseño e implementación de un prototipo para la medición y control de nivel y caudal de agua, Tecno Lógicas, 1(1), 171-185. (2007).  
 [18] Rodríguez, M. A, León, J. Control Predictivo basado en Modelo de un homo industrial, Revista Colombiana de Física, 34(1), 245– 249 (2002).



**Pablo Parra Rosero** received his degree in Engineering with mention in Electrical Engineering from Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, in 1997; he holds a Masters degree in Automatic Production and Robotics from Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, Spain, granted in 2003, and is currently pursuing a PhD degree in Automation, Control and Optimization at the University of Piura, Peru. His current research interest areas include modeling, simulation and control of industrial processes.



research projects

**William Ipanaqué Alama** received his degree Engineering with mention in Industry Engineering from Universidad de Piura (UDEP), Peru, in 1984; he holds a PhD degree in Informatics and Automatic Engineering from Polytechnic of Milan, Italy; and is currently a professor and researcher at UDEP. He has written papers on modeling, simulation and advanced control (predictive) of industrial processes. He has also managed several research projects in Peru, and is the director of the Doctorate in Automation, Control and Optimization from UDEP.



ICCA 2011, IFAC 2011, CLCA 2012, ECC 2013 and ECC 2014.

**José José Manrique** received his degree in Engineering with mention in Electric Mechanic from Universidad de Piura (UDEP), Peru, in 2009. He holds a Masters degree in Energy Systems and Maintenance from Universidad de Piura (UDEP), Peru, granted in 2013 and is currently is a professor and researcher at UDEP. He has written papers on modeling, simulation and advanced control of industrial processes, which have been published in

# 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 mucilago, 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 periodos 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 (GPI), 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 cascavilla 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 rápida 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 [10], 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  $\chi^2$  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 añadidos 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 Corréa, P.C. *et al.*, en [15].

El último aporte registrado en tomo 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.

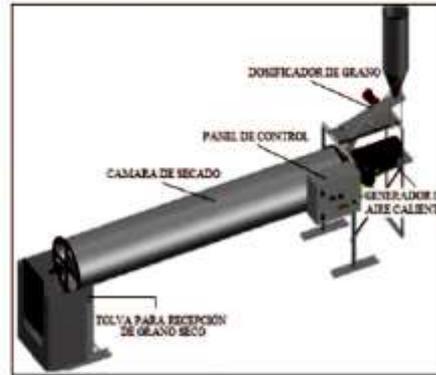


Fig. 1. Planta secadora de cacao.

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 de dosificación	0.002 kg/s	0.020 kg/s	Vibrador
Capacidad de 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	31.2kW	
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	0.3 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
$A_s$	Área de transferencia de calor	$m^2$
$\lambda$	Valor latente de evaporación del agua	$kJ/kg$

$C_{pa}$	Valor específico del agua	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
$C_{pg}$	Valor específico del gas de secado	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
$C_{pge}$	Valor específico del aire	$kJ/(kg \cdot ^\circ C)$
$\rho_c$	Densidad del cacao	$kg/m^3$
$\rho_g$	Densidad del aire (gas de secado)	$kg/m^3$
$F_R$	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	
$H_{ag}$	Entalpia de formación del agua	$kJ$
$E_{ch}$	Energía de intercambio del cacao húmedo	$kJ$
$E_{gh}$	Energía de intercambio del gas húmedo	$kJ$
$H_{pg}$	Poder calorífico del gas combustible GLP	$kJ/kg$
$K_m$	Coefficiente de transferencia de masa	$kg \text{ agua} / s$
<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidades</b>
$K_c$	Constante de ajuste para relación velocidad gas con velocidad cacao	$s$
$K_w$	Constante de ajuste para relación flujo mínimo cacao-velocidad del cacao	$m^2$
$L$	Longitud del cilindro	$m$
$m_c$	masa de cacao	$kg$
$m_g$	masa de gas	$kg$
$P_{at}$	presión atmosférica	$Pa$
$p_{wg}$	peso molecular del gas de secado	$kg/mol$
$Q$	Calor transferido del gas hacia la superficie del cacao	$kJ$
$R$	Constante de los gases ideales	$kJ/(mol \cdot ^\circ C)$
$Secr$	sección de transferencia de calor	$m^2$
$Sb$	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	$^\circ C$
$\eta$	eficiencia de la combustión	
$V_c$	velocidad de avance del cacao	$m/s$
$\omega_{rot}$	Constante de ajuste velocidad rotacional del cilindro	$r^2$
$W_c$	flujo mássico de cacao seco	$kg/s$
$W_{comb}$	flujo de combustible GLP	$kg/s$
$W_{ch}$	flujo mássico de cacao húmedo	$kg/s$
$W_g$	flujo mássico de gas seco, aire de secado	$kg/s$
$W_{gs}$	flujo mássico de aire, entrada cámara combustión	$kg/s$
$W_{gh}$	flujo mássico 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	$kg \text{ agua} / (kg \text{ sustancia seca})$
$X_c$	humedad crítica del cacao en base seca	$kg \text{ agua} / (kg \text{ sustancia seca})$
$X_{int}$	humedad interna del cacao en base seca	$kg \text{ agua} / (kg \text{ sustancia seca})$
$X_{sup}$	humedad superficial del cacao en base seca	$kg \text{ agua} / (kg \text{ sustancia seca})$
$Y$	humedad del gas en base seca	$kg \text{ agua} / (kg \text{ sustancia seca})$
$Y_0$	humedad del aire, entrada cámara de combustión en base seca	$kg \text{ agua} / (kg \text{ sustancia seca})$

**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.

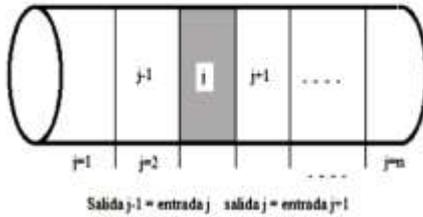


Fig. 3. Esquema de parámetros distribuidos.

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.

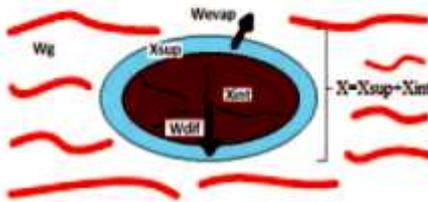


Fig. 4. Esquema de variables para el grano de cacao.

Se plantean las ecuaciones y correlaciones para la etapa  $j$ , desde  $j = 1$  (primera etapa), hasta  $j = n$  (última etapa). Para las variables de contenido 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  $[j-1]$   $W_{c_{s,j-1}}$  es igual al flujo de cacao a la entrada de la etapa  $[j]$   $W_{c_{e,j}}$ .

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 mássicos de cacao de entrada y salida en la etapa  $j$ .

Balance de masa de cacao en base seca:

$$d(m_{c_{s,j}})/dt = W_{c_{e,j-1}} - W_{c_{s,j}} \quad (1)$$

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

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  $W_{diff}$  debido a la pérdida de humedad desde la parte interna hacia la parte superficial del grano.

Balance de agua interna en el cacao:

$$d(m_{c_{h,j}} \cdot X_{int_{s,j}})/dt = W_{c_{e,j-1}} \cdot X_{int_{s,j-1}} - W_{c_{s,j}} \cdot X_{int_{s,j}} - W_{diff_j} \quad (3)$$

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

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 mássicos de humedad se suma el flujo de difusión  $W_{diff}$  que viene desde la parte interna del grano y se resta el flujo de evaporación  $W_{evap}$  que sale desde la superficie del grano hacia el gas de secado.

Balance de agua superficial en el cacao:

$$d(m_{c_{h,j}} \cdot X_{sup_{s,j}})/dt = W_{c_{e,j-1}} \cdot X_{sup_{s,j-1}} - W_{c_{s,j}} \cdot X_{sup_{s,j}} + W_{diff_j} - W_{evap_j} \quad (5)$$

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

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 mássicos de gas de entrada y de salida en la etapa  $j$ .

Balance de masa de gas en base seca:

$$d(m_{g_j})/dt = W_{g_{e,j-1}} - W_{g_{s,j}} \quad (7)$$

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

El flujo de gas en base seca  $W_{g_s}$  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.

$$W_{g_s} = W_{g_{e(1)}} \quad (9)$$

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

Balance de agua en el gas:

$$d(m_{g_j} \cdot Y_{s,j})/dt = W_{g_{e,j-1}} \cdot Y_{s,j-1} - W_{g_{s,j}} \cdot Y_{s,j} + W_{evap_j} \quad (10)$$

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

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:

$$d(m_{c_{h,j}} \cdot Ech_{s,j})/dt = W_{c_{e,j-1}} \cdot (1 + X_{s,j-1}) \cdot Ech_{s,j-1} - W_{c_{s,j}} \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot Ech_{s,j} + Q_j - W_{evap_j} \cdot (\lambda + Hag) \quad (12)$$

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

Los valores de Energía de intercambio para el cacao húmedo  $Ech_{s,j}$  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:

$$d(m_{g_j} \cdot Egh_{s,j})/dt = W_{g_{e,j-1}} \cdot (1 + Y_{s,j-1}) \cdot Egh_{s,j-1} - W_{g_{s,j}} \cdot (1 + Y_{s,j}) \cdot Egh_{s,j} - Q_j + W_{evap_j} \cdot (\lambda + Hag) \quad (14)$$

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

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.

$$mch = mc \cdot (1 + X_{s,j}) \quad (16)$$

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

$$X_{s,j} = Xint_{s,j} + Xsup_{s,j} \quad (17)$$

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  $(1 - Sh_j)$ .

$$Q_j = h_{c1} \cdot A_k \cdot (T_{g,j} - T_{c,j}) \cdot Sh_j + h_{c2} \cdot A_k \cdot (T_{g,j} - T_{c,j}) \cdot (1 - Sh_j) \quad (18)$$

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

$$W_{evap,j} = ((A_k \cdot h_{c1})/\lambda) \cdot (T_{g,j} - T_{c,j}) \cdot Sh_j \quad (19)$$

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.

$$W_{dif,j} = K_d \cdot (Xint_{s,j} - Xsup_{s,j}) \quad (20)$$

En (21), se establece la relación entre el flujo másico  $W_{c,j}$  y la velocidad del cacao  $V_c$ . En (22) se relaciona la velocidad del grano con la velocidad del gas de secado  $V_g$  y la velocidad de rotación del cilindro  $V_{rot}$ .

La velocidad del gas de secado depende del flujo volumétrico de gas  $F_g$  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  $Secc$ , restandole la superficie de grano que obstruye la circulación del mismo. Véase (23).

$$W_{c,j} = K_w \cdot m_{c,j} \cdot V_c \quad (21)$$

$$V_c = K_v \cdot V_{g,j} \cdot V_{rot} \quad (22)$$

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

En (24) se relaciona el flujo másico de gas seco  $W_{g,s(1)}$  con el flujo volumétrico de gas  $F_{g(1)}$ .

$$F_{g(1)} = W_{g,s(1)} \cdot (1 + Y_{s(1)}) / \rho_g \quad (24)$$

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  $W_{evap}$  con la velocidad de evaporación  $V_{evap}$ .

$$W_{evap,j} = V_{evap,j} \cdot m_{c,j} \quad (26)$$

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  $W_{ga}$  calentado y el flujo de gases de combustión generados por efecto de quemar el GLP  $W_{comb}$ .

Balance de masa para la cámara de combustión:

$$W_{gh_{e(1)}} = W_{ga} + W_{comb} \quad (27)$$

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

$$W_{ga} \cdot C_{pg} \cdot T_a + W_{comb} \cdot H_{pn} \cdot u = C_{pg} \cdot T_{g_{e(1)}} \cdot W_{gh_{e(1)}} \quad (28)$$

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

$$W_{gh_{e(1)}} = F_{g_{e(1)}} \cdot pm_g \cdot Pat / (R \cdot (T_{g_{e(1)}} + 273)) \quad (29)$$

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

$$Y_{e(1)} = Y_a \quad (30)$$

### 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.

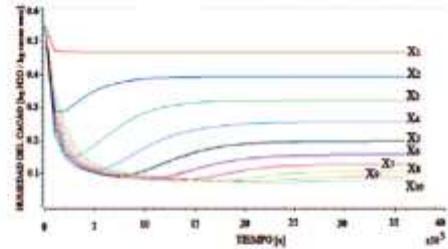


Fig. 5. Curvas de humedad para las 10 etapas del cilindro.

Los valores de humedad de cacao registrados para cada etapa del cilindro van desde  $X_1$  hasta  $X_{10}$  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  $X_{10}$  de 8% en base seca a la salida.

En la Fig. 6 se muestran los valores de temperatura del gas de secado  $T_g$  y temperatura del cacao  $T_c$  a lo largo de la cámara de secado. Esta gráfica muestra valores de temperatura en estado estacionario. Nótese que los niveles de  $T_g$  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.

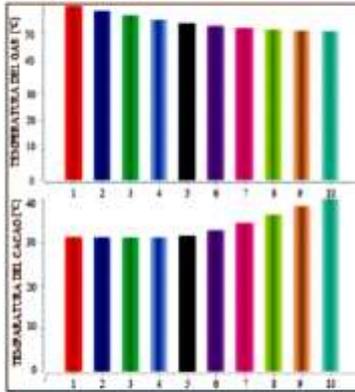


Fig. 6. Perfil de la evolución de la temperatura del gas de secado  $T_g$  y del cacao  $T_c$  para las 10 etapas del cilindro.

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  $K_g$ , 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.

TABLA V  
LÍMITES PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

Parámetro	Límite inferior	Límite superior	Valor inicial
$h_{c1}$	0.11	0.15	0.12
$h_{c2}$	0.08	0.12	0.09
$K_g$	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.

TABLA VI  
ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS - RESULTADOS

Parámetro	Valor inicial	Valor estimado
$h_{c1}$	0.11	0.113027
$h_{c2}$	0.09	0.112
$K_g$	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.

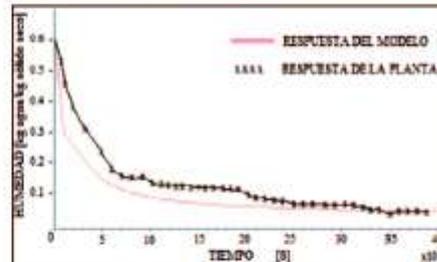


Fig. 7. Curvas de Humedad obtenidas del modelo y de la planta de secado.

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] Enriquez 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] Iguez A., Esnoz A., Martínez G., López A., Várseda 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. Hui, 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. HUI, 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., Ipanaque 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. Hui, 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 Unversitaria 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., Trelez, I.C., Couvatois, F., Bonazzi, C. and Trystram, G. Dynamic Optimal Control of Batch Rice Drying Process. *Drying Technology* 20(7):1319-1345. 2002.

# Predictive and adaptive nonlinear controller applied to a drying process of cocoa beans.

Parra Rosero Pablo  
 Department of Science and Technology.  
 Research group of industrial process (GIPI).  
 Universidad Politécnica Salesiana  
 Guayaquil, Ecuador  
 pparra@ups.edu.ec

Ipanaque Alama William; Manrique José; Oliden José  
 Department of Electronic and Automatic.  
 University of Piura.  
 San Eduardo, Piura, Perú.  
 william.ipanaque@udep.pe  
 jose.manrique@udep.pe  
 josecarlosoliden@gmail.com

**Abstract**— This paper describes the study for the design of a predictive controller based on the parametric model obtained for a dryer cocoa plant. The drying system is a nonlinear process, the parametric model obtained is nonlinear, these conditions allowed test the performance of algorithm NEPSAC (extended, predictive and self-adaptive nonlinear controller). It shows characteristics of the plant and a brief description of nonlinear model of the plant is made. The controller design details are shown and furthermore NEPSAC results are compared with Generalized Model Predictive Control (GPC) and PID control results. The implementation of the controllers was done using MATLAB® Software and an embedded system for the collect of the data.

**Keywords**— Cocoa beans, Predictive control, PID, GPC, NEPSAC, Drying system

## I. INTRODUCTION

The process of drying and fermentation of cocoa is important to ensure good flavor and aroma of chocolate, good practice in the drying step is crucial to achieve a good quality product demanded by the market, in this process the grain acquires the organoleptic qualities.

The cocoa post-harvest processes are: harvesting, fermentation, drying and storage. In the drying process there is brown pigmentation developed from phenolic compounds. If there is not a correct previously fermentation process, the results of the drying process will lack scent qualities and flavor expected. During the drying processes of cocoa beans, the moisture decreases from near 55% to 7% value that guarantees the suitable storage and transportation [1].

On the other hand, as in [2], the good drying process achieves pH ranging from values 5.1 to 5.4, if any cocoa bean has a pH below 5.0 has non-volatile acids, generating unpleasant aromas and decreasing the quality. The drying process should be done slowly, a very high level of temperature in the drying gas produces heterogeneous moisture and astringent taste in the cocoa beans.

The characteristics of natural and forced drying techniques of cocoa beans are described below: in the first case, the cacao is exposed directly to sun radiation for 2 hours during the first two days and 4 to 8 hours for the next two to four days,

depending on weather conditions; the drying process is slow, achieves good organoleptic properties, but, this technique does not execute a suitable control of the temperature, the temperature ranges between 24 and 38 °C in the day, an example of application of this technique is an intermittent solar dryer for cocoa which is described in [3], this system uses thermal energy storage and the heat is transferred by convection and radiation. The second case uses different methods or sources of energy, it exists some types of artificial drying techniques: stoves, burning dryers, electric dryers, and cocoa Samoa-type dryers according [4]. The artificial drying is necessary in regions where the harvest is running in rainy season, for this reason it is important to study these methods.

Two experiments are described in [5], about the artificial drying of cocoa. They used computational analysis based on finite elements. For the first experiment was used a gas oven (vertically) with 13 kg of cocoa, and in the second one was used an oven with air flow at the inlet, the authors analyzed the temperature and humidity, the conclusion on these studies is that cocoa should be moved into the oven to avoid burns in the grains.

A study made about the drying kinetics of an individual layer of cocoa beans used a heat pump, this work is described in [6]. The authors saw the performance of the moisture of the seed coat and cotyledon during the process, founding a greater amount of moisture in the shell than in the cotyledon.

Many projects had been executed in the control of drying process, for example, in [7], the authors made a multivariable robust control for a rotary dryer, in which were controlled (the feedback  $H_{\infty}$  controller) the outlet moisture of the dried material and the output temperature of the air; the rotary dryer is a MIMO system that consists in two inputs (the flow of wet material and the flow of fuel) and two outputs, finally were obtained important simulations and experimental results. In [8], it is proposed a Model Predictive Control (MPC) on drying of sugar beet shreds at a Danish sugar factory, the model developed for predictions is fitted to plant data and shows a good ability in future variations and disturbances, the MPC controller is compared with the traditional feedback control, where the performance of MPC is better.

The economical optimizing Nonlinear Model Predictive Controller (E-NMPC) for a spray drying plant, is shown in [9], the authors used the Kalman filter for the estimation of initial state and least square method (ALS) to estimate noise covariance, they demonstrated that the E-NMPC improves drying by 17% compared to conventional PI. The work described in [10], shows the effect of robustness of MPC controllers when controlling dead-time processes. It is proposed a predictive structure derived from the Filtered Smith Predictor which simplifies the tuning and improve robustness, separating the prediction from the optimal control computation and decreasing the disturbance amplitude.

The contribution in this paper is the implementation of Nonlinear Extended Prediction Self-Adaptive Control (NEPSAC), GPC controller and PID controller on a dryer cocoa plant, built at the Universidad Politécnica Salesana of Ecuador.

The NEPSAC is the nonlinear version of the Extended Prediction Self-Adaptive Controller, EPSAC. Several investigations on this subject are in [11], [12] and [13]. The authors have worked with the NEPSAC controller for simulation of evaporators and dryers. This paper is organized as follows: Section 2 introduces the plant description, Section 3 nonlinear model of the drying plant, Section 4 the controller design. The results and conclusions will be given in section 5 and 6, respectively.

## II. PLANT DESCRIPTION

The pilot plant installed has a fan in the combustion chamber, a drying chamber, that consists of a rotary cylinder through which hot air flows in the same direction as the cocoa beans. See Fig. 1.



Fig. 1. Cocoa drying plant.

The dosing capacity (type vibrator) is between 0.002 kg/s – 0.020 kg/s and the storage capacity (type chute) is 100 kg. The cocoa inputs mass flow to dryer with a humidity of 0.35 (35% moisture).

The hot air (drying gas) is generated by a combustion chamber (liquefied petroleum gas – GLP) that takes air from the environment and then sent to the dryer, the characteristic of the combustion chamber is shown in TABLE I.

The rotatory cylinder has inside of it the hot air (drying gas) and grains. Heat transfer occurs by convection. Due to the

rotation of the cylinder and the gas velocity, the grains are in motion.

TABLE I  
FEATURES HOT AIR GENERATOR

	VALUES
Diameter	0.78 m
Length	0.53 m
Power	12.4 - 31.2 kW
Air Flow	0.1 - 0.8 kg/s
Fuel Consumption	0.0001 - 0.0007 kg/s
Outlet Temperature	40 - 120 °C

The cocoa beans must be for 10 hours within the dryer, to achieve a moisture of 0.08, this value guarantees the storage, transportation and processing. The Fig. 2 shows the inside section of the dryer and the TABLE II describes the rotary cylinder characteristics.



Fig. 2. Inside section of drying plant

TABLE II  
DRYER FEATURES

	VALUES
Diameter	0.6 [m]
L/D Relation	6
Length	3.6 [m]
Transversal section	0.28274 [m <sup>2</sup> ]
Volume	1.0178 [m <sup>3</sup> ]

## III. NONLINEAR MODEL OF THE DRYER PLANT

The pilot plant has a manipulated variable of fuel (LPG) mass flow, this causes a high temperature of air (drying gas) that enters the rotary cylinder. The decrease in grain moisture depends on the temperature of the air inside (drying gas) the combustion chamber. It must be noted that when the air temperature is above 80 °C, it causes premature drying, and interrupts the process of mass transfer between the cotyledon and shell.

For the development of this work has been considered the parametric model proposed in [13]. This model has been previously validated with experimental data obtained from simulations and data taken from the implemented pilot plant for drying cocoa.

### A. Considerations for modeling

For the model, we take into account that the variables: cocoa temperature and drying gas change depending on the time and through the length of the cylinder, so that poses a distributed parameter model.

This model do not consider energy losses caused by heat transfer from the drying gas to the walls of cylinder or by transfer from these walls to the outside for the two chambers, combustion and drying. Heat transfer by radiation inside is assumed zero.

For the energy balance is assumed that the temperature of grain is not homogeneous.

The cocoa bean can be considered as a system of two compartments, such as the model described in [14]. One part water and part of solid (dry cocoa). To the inside the grain diffusion phenomenon occurs leading the water to the surface and from there the water by evaporation discharge into the drying gas stream. The drying gas is behaves as an ideal gas.

The dynamic of the combustion chamber is instantaneous. It is despised the increase of drying gas moisture at the exit of the combustion chamber. It is assumed that specific heat of drying gas is equal to specific heat of air; take into consideration that the drying gas is basically hot air.

#### B. Abbreviations and Acronyms

The nomenclature used for the planning model is described in TABLE III [13].

TABLE III  
NOMENCLATURE

Parameter	DESCRIPTION
$A_k$	Heat transfer area.
$\lambda$	Latent heat of evaporation water.
$C_{pw}$	Specific heat of water.
$C_{pg}$	Specific heat drying gas.
$C_{pga}$	Specific heat of air.
$\rho_c$	Cocoa density.
$\rho_a$	Air density (drying gas).
$\dot{V}_g$	Wet gas volume flow.
$h_{c1}$	Heat transfer coefficient between the gas and the wet cocoa.
$h_{c2}$	Heat transfer coefficient between the gas and dry cocoa.
$H_{hw}$	Enthalpy of wet cocoa.
$H_{hg}$	Enthalpy of wet gas.
$H_{pg}$	Calorific value of fuel gas LPG.
$k_a$	Thermal diffusivity constant.
$K_a$	Relation between gas speed and cocoa speed.
$K_s$	Relation between mass flow and cocoa speed.
$L$	Length of the cylinder.
$m_c$	Cocoa mass.
$m_g$	Drying gas mass.
$P_{at}$	Atmospheric pressure.
$p_{wg}$	Molecular weight of the drying gas.
$Q$	Gas heat transferred to the surface of cocoa.
$R$	Ideal gas constant.
$Secr$	Heat transfer section.
$S_k$	Relationship between wet surface and dry surface of cocoa.
$T_a$	Ambient air temperature.
$T_c$	Cocoa temperature at the entrance.
$T_g$	Inlet gas temperature drying chamber - combustion chamber outlet.
$\eta$	Combustion efficiency.
$\dot{V}_c$	Cocoa feed rate.
$\dot{V}_{rot}$	Constant rotational speed setting cylinder.
$\dot{W}_c$	Dry cocoa mass flow.
$\dot{W}_{comb}$	LPG fuel mass flow.
$\dot{W}_{ch}$	Wet cocoa mass flow.
$\dot{W}_g$	Dry gas mass flow.

$\dot{W}_{ga}$	Air mass flow, combustion chamber inlet.
$\dot{W}_{gh}$	Wet gas mass flow.
$\dot{W}_{diff}$	Diffusion mass flow.
$\dot{W}_{evap}$	Evaporation mass flow.
$X$	Cocoa moisture on dry basis.
$X_c$	Cocoa critical moisture on dry basis.
$X_{int}$	Cocoa internal moisture on dry basis.
$X_{sup}$	Cocoa surface moisture on dry basis.
$Y$	Gas moisture on dry basis.
$Y_a$	Air humidity, inlet combustion chamber dry basis.

#### C. Nonlinear Model

In this section are presented only the main equations of the model developed in [13], these equations correspond to the balances of mass and energy, however, it must be clarified that for the simulation and the implementation of the driver installed on the drying plant, was used the full model proposed in [13].

In (1) and (4) are represented mass balances for cocoa and for drying gas respectively. The moisture contained in the inside and on the surface of the cocoa bean is expressed in (2) and (3). The moisture contained in the drying gas is shown in (5). Energy balances are represented by (6) and (7), for the masses of cocoa and gas respectively.

Cocoa mass balance on dry basis:

$$d(m_{c,s,j})/dt = W_{c,s,j-1} - W_{c,s,j} \quad (1)$$

Mass balance for internal moisture of cocoa:

$$d(m_{c,s,j} \cdot X_{int,s,j})/dt = W_{c,s,j-1} \cdot X_{int,s,j-1} - W_{c,s,j} \cdot X_{int,s,j} - W_{diff,j} \quad (2)$$

Mass balance for the surface moisture of cocoa:

$$d(m_{c,s,j} \cdot X_{sup,s,j})/dt = W_{c,s,j-1} \cdot X_{sup,s,j-1} - W_{c,s,j} \cdot X_{sup,s,j} + W_{diff,j} - W_{evap,j} \quad (3)$$

Mass balance for gas on dry basis:

$$d(m_{g,j})/dt = W_{g,s,j-1} - W_{g,s,j} \quad (4)$$

Mass balance for moisture gas:

$$d(m_{g,j} \cdot Y_{s,j})/dt = W_{g,s,j-1} \cdot Y_{s,j-1} - W_{g,s,j} \cdot Y_{s,j} + W_{evap,j} \quad (5)$$

Energy balance for cocoa:

$$d(m_{ch,j} \cdot H_{ch,s,j})/dt = W_{c,s,j-1} \cdot (1 + X_{s,j-1}) \cdot H_{ch,s,j-1} - W_{c,s,j} \cdot (1 + X_{s,j}) \cdot H_{ch,s,j} + Q_j - W_{evap,j} \cdot (\lambda + H_{ag}) \quad (6)$$

Energy balance for gas:

$$d(m_{gh,j} \cdot H_{gh,s,j})/dt = W_{g,s,j-1} \cdot (1 + Y_{s,j-1}) \cdot H_{gh,s,j-1} - W_{g,s,j} \cdot (1 + Y_{s,j}) \cdot H_{gh,s,j} - Q_j + W_{evap,j} \cdot (\lambda + H_{ag}) \quad (7)$$

#### IV. CONTROLLER DESIGN

In this section, we present the control strategy, as it is known the PID control is very popular in industry, more the 90% use this controller. However the model predictive control has become popular in many processes because it can handle large and multivariable systems submitted to hard constraints on states

and inputs, [15]. Further the model predictive control is important because it considers the economical part in its formulation, [16].

In the literature there are many industrial applications Control MPC as solar power plant, industrial furnace, the narmtable servo system [17], system of hybrid electric bus [18], thermal comfort [19], and so on. however, it is not found an specific application developed with NEPSAC for a rotatory cylinder dryer of cocoa, the contribution of this study is to present the full analysis about the implementation the NEPSAC controller for pilot plant of cacao.

The NEPSAC algorithm was developed based on the ideas of Extended Prediction Self-adaptive control (EPSAC). That predictive control strategy was formulated in [20].

The EPSAC strategy consider the process model:

$$y(t) = x(t) + n(t) \quad (8)$$

Where  $y(t)$  is the process measured output,  $x(t)$  is the process model output and  $n(t)$  is the disturbance process model. The control require the process output prediction. The predicted values are calculated by:

$$y(t+k|t) = x(t+k|t) + n(t+k|t) \quad (9)$$

In EPSAC algorithm the future outputs are the sum of two effects. The  $y_{base}(t+k|t)$  is the effect of the past outputs,  $y_{base}(t+k|t)$  and process disturbance. The  $y_{opt}(t+k|t)$  is the effect of the control actions  $\delta u(t+k|t) = u(t+k|t) - u_{base}(t+k|t)$ . See (10).

$$y(t+k|t) = y_{base}(t+k|t) + y_{opt}(t+k|t) \quad (10)$$

The disturbance process model is expressed by:

$$n(t) = \frac{c(q^{-1})}{d(q^{-1})} \xi(t) \quad (11)$$

Where the  $\xi(t)$  is a white noise and the polynomials:

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_n q^{-n} \quad (12)$$

$$D(q^{-1}) = 1 + d_1 q^{-1} + d_2 q^{-2} + \dots + d_n q^{-n} \quad (13)$$

In (14)The  $y_{opt}(t+k|t)$  can be expressed by matrix notation:

$$Y_{opt} = GU \quad (14)$$

Where:

$$Y_{opt} = [y_{opt}(t+N_1|t), \dots, y_{opt}(t+N_2|t)]^T$$

$$U = [\delta u(t|t), \dots, \delta u(t+N_u-1|t)]^T$$

$$G = \begin{bmatrix} h_{N_1} & h_{N_1-1} & h_{N_1-2} & \dots & h_{N_1-N_u+2} & g_{N_1-N_u+2} \\ h_{N_1+1} & h_{N_1} & h_{N_1-1} & \dots & h_{N_1-N_u+3} & g_{N_1-N_u+3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ h_{N_2} & h_{N_2+1} & h_{N_2+2} & \dots & h_{N_2-N_u+2} & g_{N_2-N_u+2} \end{bmatrix} \quad (15)$$

The future response can be expressed by:

$$Y = \bar{Y} + GU \quad (16)$$

Where:

$$Y = [y(t+N_1|t), \dots, y(t+N_2|t)]^T \quad (17)$$

$$\bar{Y} = [y_{base}(t+N_1|t), \dots, y_{base}(t+N_2|t)]^T \quad (18)$$

Minimizing the cost function  $J$ :

$$\min J = \min \sum_{k=N_1}^{N_2} [r(t+k|t) - y(t+k|t)]^2 + \sum_{k=0}^{N_u-1} \lambda [u(t+k|t)]^2 \quad (19)$$

Where  $\lambda$  is a tuning parameter and  $r(t+k|t)$  is the reference. Solving the Minimizing problem, it is obtained the input ( $U$ ) to the process.

$$U = [G^T G - \lambda I]^{-1} G^T [R - \bar{Y}] \quad (20)$$

Where:

$$R = \begin{bmatrix} r(t+N_1|t) \\ \vdots \\ r(t+N_2|t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

## V. RESULTS

In Fig. 3, the result of the simulation model is illustrated for a NEPSAC controller with  $N = 10$ ,  $N_u = 1$  and  $\lambda = 0.1$ . The control signal (stream LPG) has a rather soft behavior while in the temperature response is observed anticipating the future value of the reference signal.

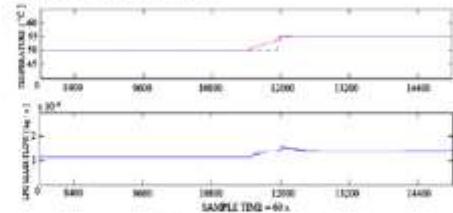


Fig. 3. Simulations results.

The plant is driven to a nominal operating point until it reaches the steady state value, 0.00015 kg/s, for fuel flow and 54.85 °C for drying gas temperature. We have implemented the NEPSAC controller on the embedded platform (MATLAB + ARDUINO), the actuator is an solenoid commanded PWM signal, the reference signal that varies between 50 and 55 °C. The temperature of drying gas, (see Fig. 4), has a variation of  $\pm 0.5$  Celsius degrees, and a pronounced anticipation in front of the reference signal, which is good because it reduces the time of establishment of the signal in the following reference value.

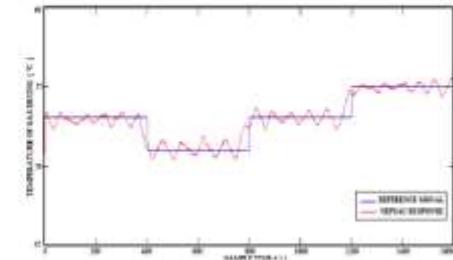


Fig. 4. Signal response for NEPSAC controller.

A comparison of the responses obtained with the implementation of the NEPSAC, PID and GPC controllers is performed. all controllers were tuned around the same operating point. See Fig. 5.

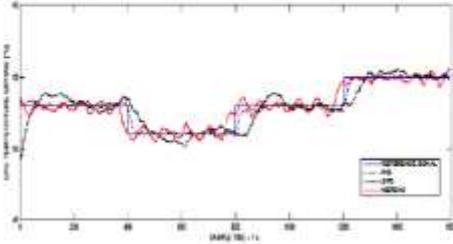


Fig. 5. Signals responses for NEPSAC, PID and GPC.

We can say that the three controllers generally present good performance against to changes in the set point, however, in Fig. 6, shows the manipulated variable, in which the PID controller: in general it is quite stable, but has small oscillations with relatively high frequency, substantially equal to the sampling frequency (1Hz), implying that the actuator changes position (open-close) in each sampling instant, causing a decrease in the lifetime of the actuator; The GPC controller: does not present recurrent fluctuations but it changes sharply which generates the removal of control relative to the reference signal; The NEPSAC controller: its oscillations are broader, but much less frequent which gives a softer treatment to the actuator.

From the viewpoint of energy consumption, overall NEPSAC and PID controllers and would have a similar consumption and less than GPC.

For this case study, it was determined that the NEPSAC controller helps reduce fuel consumption and get a moderate handling of LPG gas metering valve.

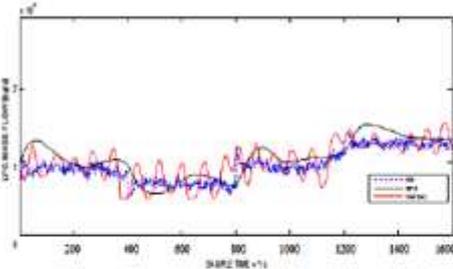


Fig. 6. The PID, GPC and NEPSAC control signal.

VI. CONCLUSIONS

The parametric model used for the implementation of NEPSAC, performed satisfactorily according to expected.

It has been successfully implemented the control circuit NEPSAC, using an embedded system for the drying pilot plant. From the results obtained it can be said that the anticipatory

effect achieved with this controller (NEPSAC) gives better performance than other controllers (PID and GPC).

Finally, it is concluded that the NEPSAC implemented on the dryer cocoa, provides an adequate signal to the actuator and a good performance against disturbances.

ACKNOWLEDGMENT

The collaboration of the Universidad Politécnica Salesiana of Ecuador for funding for the implementation of this research project and the cooperation received from the research group of industrial processes (GIPI) is appreciated.

The advice provided by the Department of Automation and Control at the University of Piura in Peru is recognized.

The work done by the students of the Universidad Politécnica Salesiana, who collaborated with the implementation of the pilot plant for drying cocoa is recognized.

REFERENCES

- [1] Rosero, P.P., Alama,W.I., Sibaja,J.M. "Design and Implementation of a Temperature Predictive Controller for a Dryer Plant of Cocoa Beans". Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering (APCASE) p. 202-207, IEEE Xplore Digital Library, Quito, Ecuador. 2015.
- [2] Amajón, A. "Características de ácidos como parámetro químico de calidad en muestra de cacao (Theobroma cacao L.) fino y ordinario de producción Nacional durante las fermentaciones". Tesis Lic., en Química, Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador. P. 103, 2002
- [3] Fagnawa, O. A., Koya, A. O., M. O. "Development of an Intermittent Solar Dryer for Cocoa Beans". Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal. Manuscript number 1292, Vol. XI, July, 2009.
- [4] Enriquez, C.Gustavo. "Cacao orgánico. Guía para productores ecuatorianos". Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, Quito, Ecuador. 2004
- [5] Tinoco H., Ospina D. "Análisis del proceso de deshidratación del Cacao para la disminución del tiempo de secado". Revista EIA, Número 13, p. 53-63, Medellín-Colombia. 2010
- [6] Hu, C.L., Law, C.L., Suzannah, S. "Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying". Journal of Food Engineering". 2011
- [7] Ortega, M. G., Castañó, F., Vargas, M., Rubio, F. R. "Multivariable robust control of a rotary Dryer: Analysis and design". Control Engineering Practice, p. 487-500. ScienceDirect, ELSEVIER, Sevilla, Spain. 2006.
- [8] Dokriken, H. "Model based predictive control of a rotary dryer". Chemical Engineering Journal, ELSEVIER, Denmark, 53 - 60, 2002.
- [9] Petersen, L. N., Jørgensen, J. B., Rawlings, J. B. "Economic Optimization of Spray Dryer Operation using Nonlinear Model Predictive Control with state Estimation". ScienceDirect, ELSEVIER, Denmark. Volume 48, Issue 8, Pages 507-513, 2015.
- [10] Normey-Rico, J. E., Lima, D. M., Santos, L. M. "Robustness of Nonlinear MPC for Dead-time Processes". 5th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control NMPC 2015 Volume 48, Issue 23, Pages 332-341.2015.
- [11] De Keyser, R., Gálvez-Carrillo, M., Ionescu, C. "Nonlinear predictive control with dead time compensator. Application to a solar power plant". Solar Energy, ScienceDirect, ELSEVIER, Volume 83, Issue 5 pp. 743-752 Belgium. 2009.
- [12] Ipanaque, W., Obiden, J., Manrique, J., Hernandez, A., Dutta, A., De Keyser, R. (2013). "Nonlinear Predictive Control of an Evaporator for Bioethanol production". Control European Conference (ECC) p. 2573-2578. INSPEC Accession Number: 119916400. Publisher IEEE. Zurich, Switzerland. 2013.
- [13] Rosero, P.P. "Modeling and simulation in distributed parameters for a dryer of cocoa beans". CHILEAN Conference on Electrical, Electronics

- Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON), pp 41 – 47, 2015.
- [14] Olmos, A., Trelea, I.C., Coutinho, F., Bonazzi, C. and Trystram, G. "Dynamic Optimal Control of Batch Rice Drying Process". *Drying Technology* 20(7):1319-1345, 2002.
- [15] Angeli, D., Rawlings, N.B., Cuyler, N.B. "Fundamentals of Economic Model Predictive Control". 51st IEEE conference on Decision and Control, p. 3851 – 3861, Maui, Hawaii, USA, 2012.
- [16] De Keyser, R. "Approach to Predictive Control" UNESCO Encyclopedia of Life Support Systems (EoLSS), EoLSS publisher Co Ltd, Oxford, 2003.
- [17] Zhang, Q., Wang, Q., Li, G. "Nonlinear modeling and predictive functional control of Hammerstein system with application to the unstable servo system". *Mechanical Systems and signal Processing*, ScienceDirect ELSEVIER, Vol. 72-73, p. 383-394, 2015.
- [18] Li, L., Zhang, Y., Yang, C., Yan, B., Martinez, C. M. "Model Predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus". *Energy Conversion and Management* ScienceDirect ELSEVIER, Vol. 111, p. 299-314, 2015.
- [19] Chen, X., Wang, Q., Stebic, J. "Occupant feedback based model predictive control for thermal comfort and energy optimization: A chamber experimental evaluation". *Applied Energy*, ScienceDirect ELSEVIER, 2015.
- [20] De Keyser, R. M. C. and Van Cauwenberghe, A. R. "Self-tuning predictive control" *Journal A*, pp. 22, 167-174, 1981.

# Temperature Nonlinear Model Predictive Controller (NMPC) for a Dryer Plant of Cocoa Beans.

(Controlador de Temperatura No Lineal Basado en Modelo (NMPC) para una Planta Secadora de Cacao)

Pablo Parra Rosero, *Member, IEEE*, William Ipanaqué Alama, José Manrique Silupu y José Oliden

**Abstract**— This paper presents the applications of a Nonlinear Model Predictive Controller (NMPC), this nonlinear controller uses the Nonlinear Extended Prediction Self-Adaptive Controller (NEPSAC), furthermore uses the Generalized Model Predictive Control (GPC) and PID to the control of a Dryer Plant of Cocoa Beans. It shows characteristics of the plant, and it realized the identification for know their dynamic. For the implementation of the controllers used a PC (Matlab software) and embedded system for the collect the data, finally the resulting controllers are compared.

**Index Terms**— Cocoa, Identification, PID, GPC, NEPSAC.

## I. INTRODUCCIÓN

EL proceso de secado y fermentación de cacao es importante para asegurar un buen sabor y aroma del chocolate, una buena práctica en la etapa de secado es crucial para conseguir un producto de buena calidad exigida por el mercado, en este proceso el grano adquiere las cualidades organolépticas.

Los procesos posteriores a la cosecha de cacao son: recolección, fermentación, secado y almacenamiento. En el proceso de secado hay pigmentación de color marrón desarrollada a partir de compuestos fenólicos, en [1] se afirma que resulta inútil ejecutar un buen proceso de secado, si el proceso previo de fermentación no se ha desarrollado de manera apropiada. Durante el proceso de secado la disminución del nivel de humedad va desde el 55% al 7 u 8%

Se agradece a todos los integrantes del grupo de investigación de procesos industriales GIPI, a la Universidad Politécnica Salesiana, por el financiamiento del presente proyecto de investigación y a la Universidad de Piura por el asesoramiento brindado.

Parra, P. profesor investigador de la Universidad Politécnica Salesiana, coordinador del grupo de investigación de procesos industriales GIPI. Actualmente trabaja en el área de ciencia y tecnología de la UPS. Guayaquil-Ecuador (e-mail: pparra@ups.edu.ec).

Ipanaqué, W. profesor investigador de la Universidad de Piura, coordinador del grupo de investigación SAC. Actualmente trabaja en el departamento de ingeniería mecánica y eléctrica en la UDEP. Piura-Perú (e-mail: william.ipanaque@udep.pe).

Manrique, J. profesor investigador de la Universidad de Piura, Actualmente trabaja en el departamento de ingeniería mecánica y eléctrica en la UDEP. Piura-Perú (e-mail: jose.manrique@udep.pe).

Oliden, J. investigador de la Universidad de Piura. Actualmente colabora con el grupo de investigación SAC de la UDEP. Piura-Perú (e-mail: josecarlosoliden@gmail.com).

Copyright: 9781509011476/16/\$31.00©2016IEEE.

aproximadamente, valor que garantiza el almacenamiento, transporte y posterior procesamiento del producto.

Por otro lado, un buen proceso de secado permite al grano de cacao, alcanzar pH que oscila entre valores de 5.1 a 5.4; para el caso de granos que tienen un pH por debajo de 5.0 aparecen ácidos no volátiles, generando aromas desagradables y la disminución de la calidad. El proceso de secado debe desarrollarse lentamente, un secado muy rápido no permite la obtención de un producto con características homogéneas, genera un sabor amargo y produce quemaduras de la cascarrilla del grano.

A continuación se describen las características y diferencias entre el secado natural y el secado artificial de cacao: en el primer caso, el cacao se seca por la exposición al sol y aprovecha la energía del sol, normalmente de 2 horas durante el primero y segundo día y de 4 horas a 8 horas del tercero al sexto o séptimo día. El proceso de secado lento, logra buenas propiedades organolépticas en el cacao, pero en esta técnica no existe control de la temperatura; la temperatura ambiente varía entre 24 y 38 °C durante el día en las zonas costeras de cultivo del Ecuador. Un secador solar intermitente es analizado en [3], en donde se utilizó el almacenamiento de energía térmica y la transferencia de calor por convección y radiación.

En el segundo caso, para el secado artificial o forzado se utilizan diferentes métodos o fuentes de energía, existen algunos tipos de estos secadores tales como: estufas secadoras, secadoras eléctricas y secadoras de cacao de tipo Samoa [4]. La utilización de técnicas de secado forzado resulta necesaria en las regiones en donde la temporada de cosecha coincide con la época de lluvias, por esta razón resulta importante el estudio estos métodos. En [5], se describen dos experimentos sobre el secado artificial de cacao; los autores utilizaron un análisis computacional basado en elementos finitos. Para el primer experimento se usó un horno de gas vertical con 13 kg de cacao, y para el segundo experimento se utilizó un horno con flujo de aire en la entrada; analizaron la temperatura y la humedad, la conclusión de estos estudios es que el cacao se debe mover en el horno para evitar quemaduras en los granos.

En [6] se describe la cinética de secado en capas individuales de grano de cacao, en donde el secado se realiza usando una bomba de calor, logrando observar mayor concentración de humedad en la cáscara o corteza de la

semilla que en el cotiledón del grano durante el proceso.

Varios proyectos se han ejecutado en relación al control del proceso de secado, por ejemplo, en [7] dieron cuenta de un control robusto multivariable para un secador rotatorio, en donde se controla la humedad de salida del material seco y la temperatura de salida del aire; su sistema MIMO consiste de dos entradas (el flujo de material húmedo y el flujo de combustible) y de dos salidas (temperatura y humedad), se obtuvieron resultados de simulaciones y resultados experimentales muy importantes. En [8] se aplicó un modelo de control predictivo (MPC) en el secado de trozos de remolacha azucarera en una fábrica de azúcar de Dinamarca, el modelo desarrollado para las predicciones está equipado para tomar datos y mostrar una buena capacidad en las variaciones de futuros disturbios, el controlador MPC se compara con el control de realimentación tradicional, donde el MPC es superior. En [9] se analiza un controlador predictivo no lineal basado en modelo económico optimizado (E-NMPC) para una planta de secado por aspersión, utilizando el filtro de Kalman para la estimación del estado inicial y el método de los mínimos cuadrados (ALS) para la estimación de covarianza de ruido; demostrando que el E-NMPC mejora el secado en un 17% en comparación con PI convencional. La investigación expuesta en [10], muestra un estudio del efecto de la robustez de los controladores MPC cuando el proceso tiene un tiempo muerto, propone una estructura predictiva, derivada del filtro de Smith que simplifica la puesta a punto y mejora la robustez, la separación de la predicción del cálculo de control óptimo y la disminución de la amplitud de la perturbación.

La contribución del presente trabajo es la aplicación de un controlador no lineal predictivo basado en modelo (NEPSAC), en una planta de secado de cacao. El NEPSAC es la versión no lineal del controlador predictivo extendido autoadaptable, EPSAC, [11]. En [12], los autores han trabajado con el controlador NEPSAC en un Simulador para un evaporador, y en [13] los autores describen la simulación de un secador de cacao.

El presente trabajo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 presenta la descripción de la planta, la sección 3 la identificación, la sección 4 muestra el diseño del controlador. Los resultados y conclusiones se recogen en los apartados 5 y 6, respectivamente.

## II. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA DE SECADO DE CACAO

La planta piloto instalada tiene una cámara de combustión y una cámara de secado que consiste en un cilindro rotatorio a través del cual fluye el aire caliente en dirección paralela al flujo de granos de cacao, como se ilustra en la Fig. 1.

La capacidad de dosificación (tipo vibrador) es de entre  $0.002 \text{ [kg / s]}$  y  $0.020 \text{ [kg / s]}$  y la capacidad de almacenamiento (tipo tolva) es de 100 kg. A la entrada del secador, el cacao tiene una humedad de 0,35 (35% de humedad). El aire caliente (gas de secado) está generando por la cámara de combustión (gas licuado de petróleo - GLP) que toma aire del ambiente, a continuación el aire caliente es

enviado a la secadora, las características de la cámara de combustión se muestran en la TABLA I.



Fig. 1. Planta de Secado de Cacao.

	Mínimo	Máximo	Tipo
Diámetro	-	0.28 m	-
Longitud	-	0.53 m	-
Potencia	12.4 kW	31.2 kW	-
Flujo de Aire	0.1 kg/s	0.8 kg/s	-
Flujo Combustible	0.0001kg/s	0.0007 kg/s	GLP
Temperatura Salida	40 °C	120 °C	-

Cuando el cilindro giratorio tiene en su interior el aire caliente (gas de secado) y los granos, la transferencia de calor se produce por convección, debido al giro del cilindro y a la velocidad del gas, los granos están en movimiento. El cacao debe permanecer durante 10 horas aproximadamente dentro de la secadora, para alcanzar una humedad entre 0,07 y 0,08; este valor garantiza el almacenamiento, el transporte y el posterior procesamiento del grano. En la Fig. 2 se muestra la sección interior de la secadora y en la TABLA II se describen sus características.



Fig. 1. Vista interna de la Planta de Secado.

	Mínimo	Máximo	Tipo
Velocidad de rotación	0.5 rpm	4.0 rpm	Cilíndrica.
Longitud	-	3.30 m	-
Diámetro	-	0.6 m	-

III. PROCESO DE IDENTIFICACIÓN DE LA PLANTA DE SECADO

En la planta piloto se tiene un flujo másico de combustible (GLP) como variable manipulada, el incremento del valor de esta variable, produce un aumento en el nivel de temperatura del aire (gas de secado) a la entrada del cilindro giratorio. La disminución de la humedad del grano depende de la temperatura del aire (gas de secado) en el interior la cámara de combustión. Debe tenerse en cuenta que si la temperatura del aire está por encima de 80 ° C hace que el secado sea prematuro, y causa que se interrumpa el proceso de transferencia de masa entre el cotiledón y testa o cáscara del grano, [1].

El punto de operación nominal de la planta es 0.00015 [kg / s] de flujo de masa de GLP, con este valor se alcanza una temperatura dentro de la cámara de 54.85 ° C, las condiciones ambientales son 70% de humedad relativa y una temperatura de 30 ° C.[1]

A. Lazo abierto.

Para conocer la dinámica del proceso, se ha llevado a cabo un experimento en bucle abierto, seleccionando como variable manipulada, el flujo de GLP, la variable de salida es la temperatura del gas de secado en la cámara de combustión. La Fig. 3 muestra el gráfico obtenido, se mantiene la apertura de la válvula entre 15 - 17%, causando un aumento en la temperatura del aire de 53,1 a 55,5 [° C].

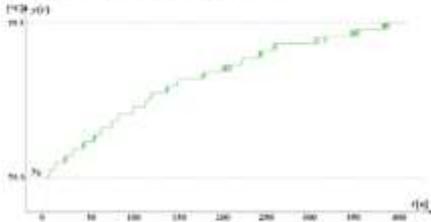


Fig. 3. Respuesta de la Planta en Lazo Abierto.

B. Diseño de la señal PRBS.

La dinámica del proceso de bucle abierto se ha considerado para el diseño de señal PRBS (señal pseudo aleatoria binaria), en la TABLA III se muestran los datos utilizados para generar la PRBS. [1]

TABLA III  
CARACTERÍSTICAS DE LA SEÑAL PRBS

Parámetros	Valor
Flujo nominal (variable manipulada)	15
Tiempo de muestreo	1 s.
Tiempo de simulación	11400 s.
Comutación mínima	300 s.
Variación de la señal	+/- 10%

En la Fig. 4 se muestra el modelo de identificación obtenido para la señal de temperatura del gas obtenido a partir de datos experimentales de la planta de secado. El modelo ARMAX se seleccionado tiene FIT de 90,76%.

Las ecuaciones (1) y (2) representan el modelo ARMAX identificado.

$$(Z)=1-1.038 Z^{-1}+0.05276 Z^{-2} \tag{1}$$

$$(Z)=0.00578 \tag{2}$$

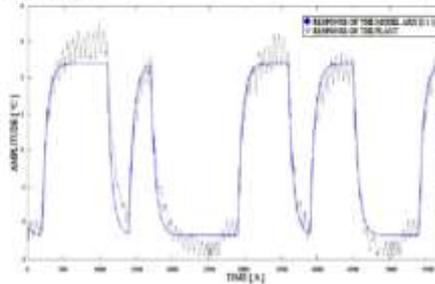


Fig. 4. Datos de salida del modelo y de la planta.

IV. DISEÑO DEL CONTROLADOR NEPSAC

En esta sección, se presentan las estrategias de control, como se conoce el control PID es muy popular en la industria, más del 90% de aplicaciones hacen uso de este controlador. Sin embargo, el modelo de control predictivo se ha popularizado como estrategia de control en muchos procesos, ya que puede manejar grandes sistemas multivariables sujetos a restricciones duras [14]; además, el control predictivo basado en modelo es importante debido a que considera el factor económico en su formulación, [15].

En la literatura especializada hay varias industriales y de control MPC, tales como: planta de energía solar, horno industrial, el sistema servo de la placa giratoria, [16]; el sistema de bus eléctrico híbrido, [17]; confort térmico, [18] y así sucesivamente, sin embargo, no hay ninguna aplicación específica desarrollada para un secador cilindro rotativo para el secado de granos de cacao, la contribución de este estudio está presente en el análisis completo de la aplicación de los controladores PID, GPC y NEPSAC de una planta piloto desarrollada para secado de cacao.

El algoritmo NEPSAC fue desarrollado basado en las ideas de predicción de control extendido auto-adaptativo (EPSAC). Esa estrategia de control predictivo fue formulada por De Keyser y Van Cauwenberghe, [19].

La estrategia EPSAC considerara el modelo de proceso:

$$y(t) = x(t) + n(t) \tag{3}$$

Donde y (t) es la variable medida a salida del proceso, x (t) es la salida del modelo del proceso y n (t) es la perturbación del modelo del proceso. El control requiere la predicción de la salida del proceso. Los valores predichos se calculan por:

$$y(t + k|t) = x(t + k|t) + n(t + k|t) \tag{4}$$

En el algoritmo EPSAC las salidas futuras se calculan como la suma de dos efectos. El  $y_{base}(t+k|t)$  es el efecto de las salidas anteriores,  $u_{base}(t+k|t)$  y la perturbación del proceso. El  $y_{opt}(t+k|t)$  es el efecto de las acciones de control  $\hat{u}(t+k|t) = u(t+k|t) - u_{base}(t+k|t)$ .

$$y(t+k|t) = y_{base}(t+k|t) + y_{opt}(t+k|t) \quad (5)$$

El disturbio del modelo está expresado por:

$$n(t) = \frac{c(q^{-1})}{D(q^{-1})} \xi(t) \quad (6)$$

En donde  $\xi(t)$  es un polinomio que representa al ruido blanco.

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + c_2 q^{-2} + \dots + c_c q^{-c} \quad (7)$$

$$D(q^{-1}) = 1 + d_1 q^{-1} + d_2 q^{-2} + \dots + d_d q^{-d} \quad (8)$$

El valor de  $y_{opt}(t+k|t)$  puede ser expresado por:

$$Y_{opt} = GU \quad (9)$$

En donde:

$$Y_{opt} = [y_{opt}(t+N_1|t), \dots, y_{opt}(t+N_2|t)]^T \quad (10)$$

$$U = [\delta u(t|t), \dots, \delta u(t+N_u-1|t)]^T$$

$$G = \begin{bmatrix} h_{N_1} & h_{N_1-1} & h_{N_1-2} & \dots & h_{N_1-N_u+2} & \theta_{N_1-N_u+2} \\ h_{N_1+1} & h_{N_1} & h_{N_1-1} & \dots & h_{N_1-N_u+3} & \theta_{N_1-N_u+3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ h_{N_2} & h_{N_2+1} & h_{N_2+2} & \dots & h_{N_2-N_u+2} & \theta_{N_2-N_u+2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

La respuesta futura, puede ser expresada por:

$$Y = \bar{Y} + GU \quad (11)$$

En donde:

$$Y = [y(t+N_1|t), \dots, y(t+N_2|t)]^T \quad (12)$$

$$\bar{Y} = [y_{base}(t+N_1|t), \dots, y_{base}(t+N_2|t)]^T \quad (13)$$

Minimizando la función de costo J:

$$\min J = \min \sum_{k=N_1}^{N_2} [r(t+k|t) - y(t+k|t)]^2 + \sum_{k=0}^{N_u-1} \lambda [u(t+k|t)]^2 \quad (14)$$

En donde  $\lambda$  es un parámetro de ponderación y  $r(t+k|t)$  es la referencia. Resolviendo el problema de minimización, se obtiene:

$$U = [G^T G - \lambda I]^{-1} G^T [R - \bar{Y}] \quad (15)$$

En donde:

$$R = \begin{bmatrix} r(t+N_1|t) \\ \vdots \\ r(t+N_2|t) \end{bmatrix} \quad (16)$$

Para la aplicación del algoritmo NEPSAC descrito, se ha procedido a trabajar con el modelo paramétrico desarrollado anteriormente para la misma planta de secado, en

## V. RESULTADOS EXPERIMENTALES

La planta es conducida a un punto de operación nominal hasta que alcanza un valor de estado estacionario de 0.00015 [kg /s], para el flujo de combustible y de 54.85 [° C] para la temperatura del gas de secado. Se han implementado tres controladores en la misma plataforma embebida (MATLAB + ARDUINO), el actuador es una electroválvula comandada con una señal PWM, la señal de referencia varía entre 50 y 55 [° C].

La Fig. 5 ilustra las actuaciones de los controladores Como respuesta a las pruebas experimentales de cambio de nivel en la señal de referencia.

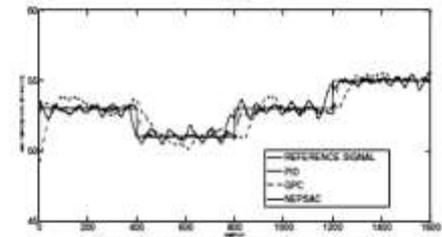


Fig. 5. Señales de Respuesta para los controladores.

Se observa que, en el controlador PID: hay una señal lo suficientemente cerca de la temperatura de referencia, es decir un mejor seguimiento con respecto a los otros dos controladores; en el controlador GPC: La señal de temperatura sigue la referencia, pero su rendimiento es menor con respecto al PID y al NEPSAC.

En el controlador NEPSAC: la temperatura tiene una variación de +/- 0.5 grados Celsius y una anticipación pronunciada a los cambios de referencia, lo cual es bueno, ya que reduce el tiempo de establecimiento de la señal en el siguiente valor de consigna. Ver Fig. 6

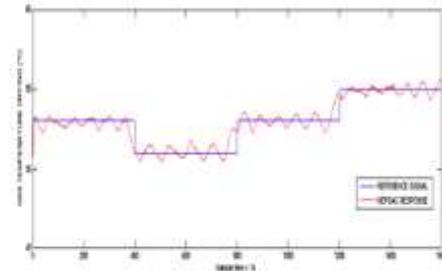


Fig. 6. Señal de Respuesta del controlador NEPSAC.

Se puede afirmar que los tres controladores presentan de forma general un buen desempeño con respecto a los cambios en el punto de ajuste, sin embargo, en la Figura 7 se muestra que en el controlador PID: en general es bastante estable, pero tiene pequeñas oscilaciones con una frecuencia relativamente alta, sustancialmente igual a la frecuencia de

muestreo (1 Hz), lo que implica que el actuador cambia de posición (de apertura-cierre) en cada instante de muestreo, provocando una disminución de la vida útil del actuador.

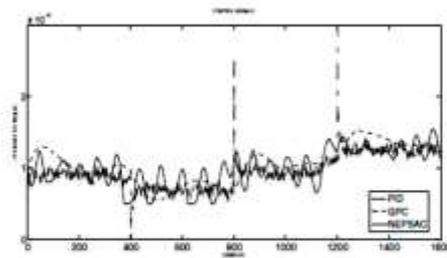


Fig. 7. Señales de Control PID, GPC y NEPSAC.

En el controlador GPC, no hay fluctuaciones recurrentes pero cambia drásticamente, en controlador NEPSAC, está en constante oscilaciones más amplias, pero con mucha menor frecuencia, lo que da una señal más suave para el actuador. Desde el punto de vista del consumo de energía, NEPSAC tendría un consumo similar o inferior al PID y GPC respectivamente.

## VI. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado la aplicación de un control predictivo modelo no lineal, NEPSAC, para el secado de cacao, en una planta real; pasando de los análisis realizados a nivel de simulación y utilizando un modelo no lineal en parámetros distribuidos para la implementación del controlador.

Finalmente, se ha comparado el rendimiento de un controlador NEPSAC con los controladores PID y GPC, en donde se ha podido notar la ventaja, sobre todo en la variable manipulada, y esto hace que sea factible un ahorro de consumo de combustible.

## REFERENCIAS

- [1] Parra, P., Ipanaque, W., Manrique, J. (2015). Design and Implementation of a Temperature Predictive Controller for a Dryer Plant of Cocoa Beans. *Computer Aided System Engineering (APCASE) 2015 Asia-Pacific Conference on Computer Aided System Engineering (APCASE) 202-207*, IEEE Xplore Digital Library, Quito, Ecuador.
- [2] Armijos, A. "Características de acidez como parámetro químico de calidad en muestra de cacao (*Theobroma cacao* L.) fino y ordinario de producción Nacional durante las fermentaciones". Tesis Lic., en Química. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador. P. 103, 2002.
- [3] Faganwa, O. A., Koya, A. O., M. O. "Development of an Intermitent Solar Dryer for Cocoa Beans". *Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal*. Manuscript number 1292, Vol. XI, July, 2009.
- [4] Enriquez, C. Gustavo. "Cacao orgánico. Guía para productores ecuatorianos". Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, Quito, Ecuador 2004.
- [5] Tinoco H., Ospina D. "Análisis del proceso de deshidratación del Cacao para la disminución del tiempo de secado". *Revista EIA*, Número 13, p. 53-63. Medellín-Colombia, 2010.
- [6] Hui, C.L., Law, C.L., Surannah, S. "Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying". *Journal of Food Engineering*, 2011.

- [7] Ortega, M. G., Castaño, F., Vargas, M., Rubio, F. R. "Multivariable robust control of a rotary dryer: Analysis and design". *Control Engineering Practice*, p. 487-500. ScienceDirect, ELSEVIER, Sevilla, Spain, 2006.
- [8] Didriksen, H. "Model based predictive control of a rotary dryer". *Chemical Engineering Journal*, ELSEVIER, Denmark, 53 - 60, 2002.
- [9] Petersen, L. N., Jørgensen, J. B., Rawlings, J. B. "Economic Optimization of Spray Dryer Operation using Nonlinear Model Predictive Control with state Estimation". *ScienceDirect, ELSEVIER, Denmark*, Volume 48, Issue 8, Pages 507-513, 2015.
- [10] Normey-Rico, J. E., Lima, D. M., Santos, L. M. "Robustness of Nonlinear MPC for Dead-time Processes". *3th IFAC Conference on Nonlinear Model Predictive Control NMPC 2015*, Volume 48, Issue 23, Pages 332-341, 2015.
- [11] De Keyser, R., Guívez-Camilo, M., Ionescu, C. "Nonlinear predictive control with dead time compensator: Application to a solar power plant". *Solar Energy*, ScienceDirect, ELSEVIER, Volume 83, Issue 5, pp. 743-752 Belgium, 2009.
- [12] Ipanaque, W., Oliden, J., Manrique, J., Hernandez, A., Dutta, A., De Keyser, R. (2013). "Nonlinear Predictive Control of an Evaporator for Bioethanol production". *Control European Conference (ECC)*, p. 2573-2578. INSPEC Accession Number: 15936400. Publisher IEEE, Zurich, Switzerland, 2013.
- [13] Parra, P. "Modeling and simulation in distributed parameters for a dryer of cocoa beans". *CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, pp 41 - 47, 2015.
- [14] Angeli, D., Rawlings, N. B., Cuyler, N. B. "Fundamentals of Economic Model Predictive Control". *51st IEEE conference on Decision and Control*, p. 3851 - 3861. Maui, Hawaii, USA, 2012.
- [15] De Keyser, R. "Approach to Predictive Control". *UNESCO Encyclopedia of Life Support Systems (EoLSS)*. EoLSS publisher Co Ltd. Oxford, 2003.
- [16] Zhang, Q., Wang, Q., Li, G. "Nonlinear modeling and predictive functional control of Hammerstein system with application to the tentable servo system". *Mechanical Systems and signal Processing*, ScienceDirect ELSEVIER, Vol. 72-73, p. 383-394, 2015.
- [17] Li, L., Zhang, Y., Yang, C., Yan, B., Martínez, C. M. "Model Predictive control-based efficient energy recovery control strategy for regenerative braking system of hybrid electric bus". *Energy Conversion and Management*, ScienceDirect ELSEVIER, Vol. 111, p. 299-314, 2015.
- [18] Chen, X., Wang, Q., Srebric, J. "Occupant feedback based model predictive control for thermal comfort and energy optimization: A chamber experimental evaluation". *Applied Energy*, ScienceDirect, ELSEVIER, 2015.
- [19] De Keyser, R. M. C. and Van Cauwenbergh, A. R. "Self-tuning predictive control". *Journal A*, pp. 22, 167-174, 1981.



**Pablo Parra Rosero** received his degree in Engineering with mention in Electrical Engineering from Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, in 1997; he holds a Masters degree in Automatic Production and Robotics from Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, Spain, granted in 2003, and is currently pursuing a PhD degree in Automation, Control and Optimization at the University of Piura, Peru. His current research interest areas include modeling, simulation and control of industrial processes.



**William Ipanaque Alama** received his degree Engineering with mention in Industry Engineering from Universidad de Piura (UDEP), Peru, in 1984; he holds a PhD degree in Informatics and Automatic Engineering from Polytechnic of Milan, Italy, and is currently a professor and researcher at UDEP. He has written papers on modeling, simulation and advanced control (predictive) of industrial processes. He has also managed several

research projects in Peru, and is the director of the Doctorate in Automation, Control and Optimization from UDEP.



**José José Manrique** received his degree in Engineering with mention in Electric Mechanic from Universidad de Piura (UDEP), Peru, in 2009. He holds a Masters degree in Energy Systems and maintenance from Universidad de Piura (UDEP), Peru, granted in 2013 and is currently is a professor and researcher at UDEP. He has written papers on modeling, simulation and advanced control of industrial processes, which have been published in ICCA 2011, IFAC 2011, CLCA 2012 and ECC 2014.



**José Carlos Oviden** Master's student in Mechanical Electrical Engineering majoring in automatic and optimization. He has worked as a lab assistant and member of the research team in applied research projects. Accustomed to working under pressure in meeting objectives and high learning ability and analysis.

## MODELACIÓN Y SIMULACIÓN EN AMBIENTE ECOSIMPRO DE UNA CÁMARA DE SECADO PARA CACAO

Pablo Parra Rosero<sup>1,\*</sup>, Rafael Saavedra<sup>2</sup> y William Ipanaqué<sup>3</sup>

### Resumen

En este artículo se presenta el sistema de ecuaciones utilizado para describir el modelo físico de una cámara para secado artificial de cacao. El modelo corresponde a un secador cilíndrico rotatorio equicorriente y se considera solamente la cámara de secado. Las ecuaciones de conservación de masa y de energía junto a algunas correlaciones obtenidas como resultado de ensayos experimentales se han implementado en un componente ensamblado en la plataforma de EcosimPro. Finalmente, se realiza un análisis de las curvas de masa, humedad y temperatura, obtenidas luego de realizar una simulación durante 10 horas de operación del sistema.

**Palabras clave:** modelo, simulación, masa, energía, humedad, secador.

### Abstract

This article presents the system of equations used to describe the physical model of a camera for artificial drying of cocoa. The pattern corresponds to a rotating cylindrical dryer in cocurrent and is considered drying camera only. The equations of conservation of mass and energy with some correlations obtained by means of experimental tests have been implemented in a component assembly EcosimPro platform. Finally, presents an analysis of the mass curves, humidity and temperature obtained after performing a simulation during 10 hours of system operation.

**Keywords:** model, simulation, mass, energy, moisture, dryer.

<sup>1,\*</sup>Máster en Producción Automatizada y Robótica Industrial, Ingeniero en Electricidad, Estudiante de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería DICOP - UDEP, Perú, Director de Carrera de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana. Autor para correspondencia ✉: pparra@ups.edu.ec

<sup>2</sup>Doctor en Informática Industrial, Politécnico de Milán, Italia, Ingeniero Industrial, Profesor ordinario principal, Universidad de Piura, Perú.

<sup>3</sup>Doctor en Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería en Mecánica y Electricidad, Universidad de Piura, Perú.

Recibido: 07 - Noviembre - 2012, Aprobado tras revisión: 29 - Noviembre - 2012

Forma sugerida de citación: Parra, P.; Saavedra, R. y Ipanaqué, W. (2012). "Modelación y simulación en ambiente Ecosimpro de una cámara de secado para Cacao". *INGENIUS*, N.º8, (Julio/Diciembre), pp. 54-60. ISSN: 1390-650X

## 1. Introducción

En la actualidad, Ecuador es el sexto productor de cacao híbrido y el primer productor de cacao fino de aroma a nivel mundial. Perú ha incrementado considerablemente su producción de cacao durante los últimos años. En ambos países el proceso de secado es predominantemente natural. Los sistemas de secado industrial están sujetos a grandes inversiones, por lo tanto los pequeños productores no tienen acceso a este proceso de secado de forma directa. El proceso de secado es común en varias industrias, fenómenos de transmisión de calor y transferencia de masa están involucrados en este proceso [1].

Hay varios tipos de secadores, los rotarios son ampliamente aplicados, algunos de ellos han sido tratados en la literatura científica: [2] describe una aplicación para un secador rotatorio de azúcar; [3] presenta un modelo aplicado a desechos vegetales; [4] modela un secador aplicando un control basado en modelos. No obstante la información científica en secadores aplicados a secado de cacao es muy escasa, ello ha motivado también el inicio de esta investigación.

A través de este trabajo se aspira obtener un modelo para un sistema de secado a baja escala, es decir, que permita el secado de pequeñas cantidades de cacao, pero, en cortos períodos de tiempo. Un pequeño productor podría secar alrededor de un cuarto de tonelada de cacao en un tiempo promedio de entre diez y doce horas. Con el proceso natural se requieren entre cuatro y seis días con condiciones climáticas óptimas.

Existen dos alternativas básicas para el proceso de secado de cacao. El secado natural, utilizando la energía solar térmica y el artificial que puede utilizar diferentes tecnologías y fuentes de energía para el proceso. La utilización del secado natural conlleva varias dependencias inherentes a los factores climáticos.

La ausencia de sol o la presencia de lluvia en algunas ocasiones suele prolongarse por un período de varios días consecutivos. Una vez cosechado el cacao, requiere ser fermentado de forma inmediata y consecutivamente debe ser sometido al proceso de secado. Si los factores climáticos no hacen factible el secado, entonces la producción se hecha a perder.

Los sistemas de secado artificial, de uso básicamente industrial, permiten efectuar el proceso de secado de forma independiente a los factores climáticos de la época o temporada. Existen diferentes tipos de secadores industriales, la mayoría de ellos utilizan la circulación de aire caliente a través de una cámara para conseguir la evaporación del agua contenida en el producto a secar.

En aplicaciones agroindustriales se utiliza un tipo particular de secador, denominado secador rotatorio. Este sistema puede hacer circular aire caliente en equicorriente o en contracorriente. En los secadores rotatorios se identifican tres partes fundamentales: la cámara de combustión, la cámara de secado y el ventilador de empuje o de tiro encargado de facilitar la circulación del aire caliente.

Existen varios trabajos de investigación orientados al diseño y modelación de secadores rotatorios. Se han estudiado secadores de cemento, de arena, de cáscara de limón y algunos otros productos de alimentación, pero, no existe un estudio orientado específicamente al secado de cacao en sistemas rotatorios. El presente trabajo considera únicamente el modelo matemático de la cámara de secado, dejando el análisis de la cámara de calentamiento y del ventilador de empuje o tiro de aire para la integración futura del sistema de secado completo.

Se describe el sistema de ecuaciones diferenciales que predice el comportamiento dinámico del proceso. Además, se utilizan las correlaciones propuestas en [5], las mismas que permiten obtener los valores del paso temporal y coeficiente volumétrico de transmisión de calor.

Utilizando la plataforma comercial EcosimPro, se ingresan el sistema de ecuaciones, las condiciones de frontera variables en el tiempo y valores explícitos para ensamblar el modelo. Posteriormente se simula y se analiza el comportamiento del mismo.

## 2. Materiales y métodos

En [6] se presenta un sistema de ecuaciones para la transferencia de masa y calor en el proceso de secado de cacao.

En [1] se muestra un sistema de ecuaciones que describe el comportamiento de un secador de arena. Se toma como base este trabajo y se ejecutan los cálculos y configuraciones de los parámetros del modelo para adaptarlo al secado de cacao.

El modelo matemático del secador de cacao se plantea bajo las siguientes consideraciones:

- Se realiza el análisis únicamente de la cámara de secado. El presente estudio no toma en cuenta la cámara de combustión o generador de aire caliente.
- La cámara de secado es un cilindro giratorio con flujo de aire en equicorriente. El cilindro tiene una ligera inclinación no mayor a 3%.

- Se desprecian los fenómenos de difusión, radiación y conducción. En el proceso se desarrolla una transferencia de calor predominantemente por efecto de convección.
- Se consideran constantes a los coeficientes de transferencia de masa y de energía.
- El calor específico del cacao es constante. Se toma este valor con referencia al cacao fermentado con un nivel de humedad del 56 %.
- El cilindro rota con una velocidad constante, lo que implica un avance del cacao a velocidad constante.
- El generador de aire caliente (cámara de combustión), hace circular gas (aire caliente) a velocidad constante a través del cilindro (cámara de secado).

En la Tabla 1 se presenta la nomenclatura utilizada para las constantes y variables que intervienen en el proceso con sus respectivas unidades.

Un esquema de las variables que se consideran en la cámara de secado se muestra en la Figura 1. Básicamente intervienen flujo másico, temperatura, masa y humedad tanto para el sólido como para el gas.

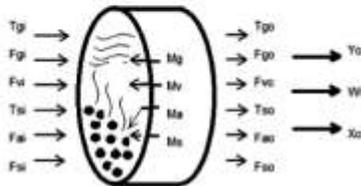


Figura 1. Cámara de secado. Variables que intervienen en el proceso.

A la entrada del cilindro ingresa cacao húmedo, el mismo que contiene una parte sólida y una parte de agua. Las ecuaciones de conservación de masa se expresan como:

La Ecuación 1 representa la dinámica de la variación de la masa del cacao (parte sólida).

$$\frac{d(M_{so})}{dt} = F_{si} - F_{so} \quad (1)$$

La dinámica del comportamiento del agua se describe a través de la Ecuación 2.

$$\frac{d(M_{ao})}{dt} = F_{ai} - F_{ao} - W_o \quad (2)$$

La Ecuación 3 representa el balance de masa del gas seco.

$$\frac{d(M_{go})}{dt} = F_{gi} - F_{go} \quad (3)$$

La Ecuación 4 describe el balance de masa de vapor de agua.

Tabla 1. Variables que intervienen en el sistema secador.

Abr.	Descripción	Unid.
Tgi	Temperatura del gas a la entrada	°C
Fgi	Flujo másico de gas a la entrada	kg/s
Fvi	Flujo de vapor contenido en el gas a la entrada	kg/s
Tsi	Temperatura del cacao a la entrada	°C
Fai	Flujo másico de agua contenida en el sólido a la entrada	kg/s
Fsi	Flujo másico de cacao a la entrada	kg/s
Mg	Masa de gas	kg
Mv	Masa de vapor contenida en el gas	kg
Ma	Masa de agua contenida en el cacao	kg
Ms	Masa de cacao	kg
Tgo	Temperatura del gas a la salida	°C
Fgo	Flujo másico de gas a la salida	kg/s
Fvo	Flujo de vapor contenido en el gas a la salida	kg/s
Tso	Temperatura del cacao a la salida	°C
Fao	Flujo másico de agua contenida en el sólido a la salida	kg/s
Fso	Flujo másico de cacao a la salida	kg/s
H	Humedad del cacao en base húmeda	
Yo	Humedad del gas en base seca	
Wo	Flujo másico de agua evaporada	kg/s
Xo	Humedad del sólido en base seca	
V	Volumen del cilindro	m <sup>3</sup>
Ua	Coefficiente volumétrico de transmisión de calor	kW/m <sup>3</sup> °C
Pa	Presión del gas	Pa
Cpa	Calor específico del agua	kJ/kg °C
Cpg	Calor específico a presión constante del gas seco	kJ/kg°C
Cpv	Calor específico a presión constante del vapor de agua	kJ/ kg°C
Cps	Calor específico del cacao	kJ/ Kg°C

$$\frac{d(M_{vo})}{dt} = F_{vi} - F_{vo} + W_o \quad (4)$$

Se plantean dos ecuaciones de conservación de energía, una para la fase sólida y otra para la fase gaseosa.

La Ecuación 5 corresponde a la fase sólida:

$$\begin{aligned} \frac{d[(C_{ps} \times M_{so} + C_{pa} \times M_{ao}) \times T_{so}]}{dt} = & \\ (F_{si} \times C_{ps} + F_{ai} \times C_{pa}) \times T_{si} - \dots & \\ \dots - (F_{so} \times C_{ps} + F_{ao} \times C_{pa}) \times T_{so} - \dots & \\ \dots - W_o \times (C_{pa} \times T_{so} + \lambda) + \dots & \\ \dots + U_a \times V \times (T_{go} - T_{so}) & \end{aligned} \quad (5)$$

La Ecuación 6 corresponde a la fase gaseosa:

$$\begin{aligned} \frac{d[(C_{pv} \times M_{vo} + C_{pg} \times M_{go}) \times T_{go}]}{dt} = & \\ (F_{gi} \times C_{pg} + F_{vi} \times C_{pv}) \times T_{gi} + \dots & \\ \dots + (F_{go} \times C_{pg} + F_{vo} \times C_{pv}) \times T_{go} + \dots & \\ \dots + W_o \times (C_{pa} \times T_{so} + \lambda) - \dots & \\ \dots - U_a \times V \times (T_{go} - T_{so}) & \end{aligned} \quad (6)$$

Se establecen las ecuaciones de humedad en base seca y en función de las masas y de los flujos, tanto para el sólido (cacao) como para el vapor de agua contenido en el gas (aire caliente) que circula dentro de la cámara.

En función de los flujos másicos, para el cacao se plantea la Ecuación 7.

$$X_o = \frac{F_{ao}}{F_{so}} \quad (7)$$

En la Ecuación 8 se representa la humedad en función de los flujos para el vapor.

$$Y_o = \frac{F_{vo}}{F_{go}} \quad (8)$$

Las Ecuaciones 9 y 10 expresan la humedad en base seca en función de las masas, para el cacao y para el vapor, respectivamente.

$$X_o = \frac{M_{ao}}{M_{so}} \quad (9)$$

$$Y_o = \frac{M_{vo}}{M_{go}} \quad (10)$$

La relación entre la masa de gas seco contenida en el cilindro con la temperatura y la masa del gas está dada por la Ecuación 11.

$$\begin{aligned} M_{go} = \left( V - \frac{M_{so}}{s} \right) \times \left( \frac{pmg \times pma}{pmg \times (Y_o + pma)} \right) \times \dots & \\ \dots \times \left( \frac{Pa}{R(T_{go} + 273)} \right) & \end{aligned} \quad (11)$$

Donde  $s$  es la densidad del cacao (sólido seco),  $pmg$  es el peso molecular del gas (aire caliente),  $pma$  es el peso molecular del agua y  $R$  es la constante universal de los gases. La relación entre la masa del sólido y el flujo del sólido se establece en la Ecuación 12.

$$M_{so} = t_{paso} \times F_{so} \quad (12)$$

La Ecuación 13 muestra la relación del flujo de evaporación  $W_o$ .

$$W_o = V_{evap} \times M_{so} \quad (13)$$

Las Ecuaciones 14, 15 y 16 representan la humedad, la velocidad del gas y la densidad del cacao a la salida del cilindro secador.

$$H_o = \frac{X_o}{1 + X_o} \quad (14)$$

$$V_{go} = \frac{F_{go}}{o \times area_o} \quad (15)$$

$$o = \frac{pmg \times Pa}{R \times (T_{go} + 273)} \quad (16)$$

En [5] se presentan estudios de secadores rotatorios establecen una correlación para determinar el tiempo de paso del producto a través del cilindro. Esta correlación considera la longitud, velocidad angular, inclinación, diámetro, forma de los vuelos o aletas interiores del cilindro (17). Además, se toman en cuenta la granulometría, viscosidad y adherencia como características del sólido a secar, en este caso del cacao.

$$t_{paso} = \frac{0,23 \times L}{S \times N^3 \times D} - 9,84 \times Dp^{-0,5} \times \frac{L \times G}{F} \quad (17)$$

Donde el tiempo de paso ( $t_{paso}$ ) está dado en minutos, la longitud del cilindro ( $L$ ) en metros y la velocidad angular ( $N$ ) en  $rpm$ .  $S$  es la inclinación del cilindro, ( $G$ ) el flujo de gas, ( $F$ ) el flujo de sólido y ( $Dp$ ) el tamaño promedio de las partículas de sólido a secar.

En la Tabla 2 se detallan los valores considerados y obtenidos en la aplicación de la correlación de [5].

**Tabla 2.** Valores considerados para el cálculo del tiempo de paso.

Abr.	Valor	Unid.
L	2	m
S	0.0087 (0.5)	
Dp	15000	$\mu\text{m}$
N	1	rpm
D	0.5	m
G	0.5	kg/s
F	0.05	kg/s
tpaso	6229	s

Para la determinación del coeficiente volumétrico de transmisión de calor se han considerado fuentes bibliográficas como: [5], [7], [8].

Mediante análisis estadísticos presentados en [5], se estable la correlación (18).

$$U_a = K \times \frac{G^n}{D} \quad (18)$$

Donde  $K$  es una constante de proporcionalidad,  $G$  representa el flujo másico de gas secante por unidad de área transversal,  $D$  el diámetro del cilindro y  $n$  constante. El valor de  $U_a$  dependerá de la geometría del cilindro, las constantes  $K$  y  $n$  serán especificadas para cada caso.

En [7] se realizó un aporte estableciendo que se debería tomar en cuenta la geometría de los vuelos y la velocidad de rotación del cilindro para la determinación del valor  $K$ . De sus análisis estadísticos sugiere utilizar valores de  $n$  ente 0,46 y 0,67.

Para el presente trabajo no se ha contado con una planta experimental o industrial para poder determinar mediante ensayos los valores de  $K$  y  $n$ , por lo tanto se ha considerado factible utilizar los valores propuestos en [8] para secadores rotatorios comerciales.  $K = 0,8254$  y  $n = 0,67$ .

Considerando que el flujo másico de aire caliente es de 0.5 kg/s y que el área transversal del cilindro es de 0,1963 m<sup>2</sup>, se calcula un valor de  $U_a = 0.20706$  kW/m<sup>2</sup>°C.

### 3. Resultados y discusión

Una vez presentado el modelo matemático para el secador rotatorio y estimados los valores de tiempo de paso y coeficiente volumétrico de transmisión de calor, se procedió a crear un componente dentro del entorno

de EcosimPro. Este software permite ingresar todas las ecuaciones algebraicas y diferenciales ordinarias sin guardar un orden específico. Es necesario dentro del componente especificar o declarar todas las variables del modelo e ingresar los valores de todas las constantes requeridas.

La compilación del componente permitirá, de existir, rectificar los errores detectados, además, en esta fase se deben cargar los valores o las condiciones de frontera del proceso. En la Tabla 3 se muestran los valores de las constantes utilizadas en el modelo.

**Tabla 3.** Valores de las constantes que intervienen en el sistema secador.

Abr.	Valor	Unid.
Cpg	1.006	kJ/kg°C
Cpa	4.1868	kJ/kg°C
Cpv	1.890	kJ/kg°C
Cps	3.715392	kJ/kg°C
R	8314	J/°C kmol
pmg	28.966	kg/kmol
pa	18.02	kg/kmol

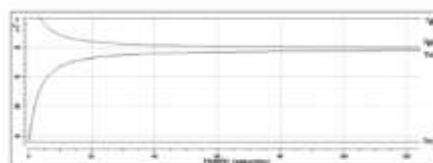
Varios de los datos inherentes a la caracterización física del cacao se han obtenido de [9] y para la obtención de constantes físicas del agua y del vapor se han obtenido de [10].

Los valores de las condiciones de frontera utilizados en la simulación de un experimento con el modelo presentado se detallan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Condiciones de frontera para el sistema secador.

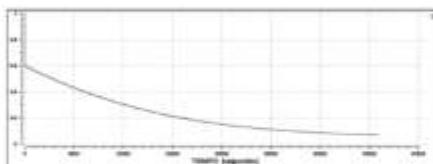
Abr.	Valor	Unid.
$\lambda$	2260	kJ/kg
Fal	0.03	kg/s
Fgl	0.5	kg/s
Fgo	0.025	kg/s
Fsl	0.05	kg/s
Fvi	0.001	kg/s
H	0.6	
P	100000	Pa
Tgi	50	°C
Tsi	29	°C
$s$	700	kg/m <sup>3</sup>

En la Figura 2 se observa la evolución de los valores de temperatura tanto del gas (aire caliente) como del sólido (cacao). El comportamiento está dentro del límite máximo que es de 50°C, temperatura del gas a la entrada del cilindro.



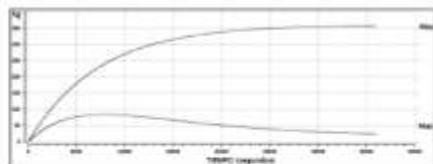
**Figura 2.** Curvas de temperatura para el aire caliente y para el cacao.

La curva de humedad del sólido refleja el comportamiento típico de un proceso de secado. Para este caso se ingresa cacao fermentado con un nivel de humedad del 60%. La simulación se ejecuta para un tiempo de 10 horas. En la Figura 3 se observan los cambios de humedad en función del tiempo, registrándose un valor aproximado del 12% de humedad en base húmeda. El valor de humedad óptimo requerido por el mercado es del 8%.



**Figura 3.** Curva de secado para el cacao.

El incremento de masa de cacao seco y decremento de masa de agua contenida en los granos de cacao se puede apreciar en la Figura 4. La relación o proporción de agua contenida en el cacao se refleja de forma clara a los 36000 s de tiempo transcurrido.



**Figura 4.** Variación de masa de cacao seco y de masa de agua contenida en el cacao.

#### 4. Conclusiones

Las ecuaciones utilizadas en este trabajo corresponden a un modelo general de un secador rotatorio, pero se ha configurado el modelo con valores específicos para el secado de cacao.

Existen valores ingresados en el modelo que son aproximaciones, es decir, que las correlaciones utilizadas arrojan resultados que posteriormente deberían ser validados con ensayos experimentales. Este es el caso del coeficiente volumétrico de transmisión de calor, el tiempo de paso y la velocidad de evaporación del cacao.

Los ensayos de carácter experimental se deben realizar en una planta industrial o con un sistema prototipo para el secado de cacao.

La simulación ejecutada para un tiempo de 10 horas arroja resultados coherentes. Un nivel de humedad reducido del 60% al 12%, una masa de cacao seco de 310 kg, para una planta de 2 m de longitud con un diámetro de 0.5 m, permiten proponer la implementación del prototipo físico para secado de cacao. Este prototipo permitirá la validación del modelo simulado en este trabajo.

#### Referencias

- [1] F. Castaño, F. R. Rubio, and M. G. Ortega, "Modelado de secadores rotatorios en iso-corriente," *RIAI*, vol. 6, no. 4, pp. 32-43, 2009.
- [2] S. Savaresi, R. Bitmead, and R. Peirce, "On modelling and control of a rotary sugar dryer," *Control Engineering Practice*, vol. 9, no. 3, pp. 249-266, 2001.
- [3] A. Iguaz, A. Esnoz, G. Martínez, A. López, and P. Virseda, "Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer," *Journal of food engineering*, vol. 59, no. 2, pp. 151-160, 2003.
- [4] H. Didriksen, "Model based predictive control of a rotary dryer," *Chemical Engineering Journal*, vol. 86, no. 1, pp. 53-60, 2002.
- [5] S. Friedman and W. Marshall, "Studies in rotary drying Part II: Heat and mass transfer," *Chemical Engineering Progress*, vol. 45, pp. 573-588, 1949.
- [6] J. Nganhou, "Heat and mass transfer through a thick bed of cocoa beans during drying," *Heat and mass transfer*, vol. 40, no. 9, pp. 727-735, 2004.
- [7] P. Y. McCormick, "Gas velocity effects on heat transfer in direct heat rotary dryers," *Chemical Engineering Progress*, vol. 58, no. 6, pp. 57-61, 1962.
- [8] R. H. Perry, D. W. Green, and J. O. Maloney, *Manual del ingeniero químico*. McGraw-Hill, 1992.

- [9] H. Tinoco and D. Ospina, "Análisis del proceso de deshidratación del cacao para la disminución del tiempo de secado," *EIA*, no. 13, pp. 53-63, 2010.
- [10] Y. Cengel and M. Boles, *Termodinámica*. McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2003.

## Apéndice 8. Hoja de vida

### CURRÍCULO INVESTIGADOR

#### 1. DATOS DEL INVESTIGADOR

- PABLO GERMAN PARRA ROSERO
 

Estado civil	Casado(a)
Género	Masculino
Nacionalidad	Ecuatoriana
Email institucional	pparra@ups.edu.ec
Organización	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
Evaluador	si
Dirección	matices, diamante, mz 16 v12
País de Nacimiento	Ecuador
Provincia de nacimiento	Chimborazo Ciudad de nacimiento Riobamba
País de Residencia	Ecuador
Provincia de residencia	Guayas
Ciudad de residencia	Guayaquil
Palabra primaria	Ingeniería
Palabra secundaria	Educación en Ingeniería
Palabras específicas	CONTROL; AUTOMATIZACIÓN; CACAO

#### 2. ARTÍCULOS PUBLICADOS

- MODELACIÓN Y SIMULACIÓN EN AMBIENTE ECOSIMPRO DE UNA CÁMARA DE SECADO PARA CACAO
 

Palabras clave	Modelo; simulación; masa; energía; humedad; secador. Año 2012
Índice	Latindex Catálogo
ISBN	1390-860X
ISSN	1390-860X
Revista	INGENIUS
Idioma	ESPAÑOL

DOI: <http://dx.doi.org/10.17163/ings.n8.2012.07>

- **MODELING AND SIMULATION IN DISTRIBUTED PARAMETERS FOR A DRYER OF COCOA BEANS**

Sensitivity analysis, Estimation, Cocoa Beans, Drying

Año 2016  
 Índice ISI  
 ISBN 978-1-4673-8755-2  
 ISSN 978-1-4673-8755-2  
 Otro índice SCOPUS  
 Revista IEEE Xplore Digital Library  
 Idioma ESPAÑOL  
 DOI: 10.1109/Chilecon.2015.7400350

- **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A TEMPERATURE PREDICTIVE CONTROLLER FOR A DRYER PLANT OF COCOA BEANS**

Año 2015  
 Índice ISI  
 Otro índice SCOPUS  
 Revista IEEE Xplore Digital Library  
 Idioma INGLÉS  
 DOI: 10.1109/APCASE.2015.43

- **PREDICTIVE AND ADAPTIVE NONLINEAR CONTROLLER APPLIED TO A DRYING PROCESS OF COCOA BEANS**

Año 2016  
 Índice ISI  
 ISBN 978-1-5090-1630-3  
 ISSN 978-1-5090-1630-3  
 Otro índice SCOPUS  
 Revista IEEE Xplore Digital Library  
 Idioma INGLÉS  
 DOI: 10.1109/ETCM.2016.7750842

- **ARTIFICIAL DRYING OF COCOA BEANS BASED ON A CONTINUOUS FLOW REVOLVING SYSTEM**

Año 2016  
 Índice ISI

ISBN 15480992  
 ISSN 15480992  
 Otro índice scopus  
 SJR 0.25  
 Cuartil 3  
 Revista IEEE Latin America Transactions (Vol.14),  
 Issue: 6)  
 Idioma ESPAÑOL  
 DOI: 10.1109/TLA.2016.7555220

- TEMPERATURE NONLINEAR MODEL PREDICTIVE CONTROLLER (NMPC) FOR A DRYER PLANT OF COCOA BEANS

Año 2016  
 Índice ISI  
 ISBN 978-1-5090-1148-3  
 ISSN 978-1-5090-1148-3  
 Otro índice SCOPUS  
 Revista IEEE Xplore Digital Library  
 Idioma ESPAÑOL  
 DOI 10.1109/ICA-ACCA.2016.7778388

### 3. HISTORIAL LABORAL

- UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Cargo DOCENTE INVESTIGADOR  
 Área CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
 En funciones si  
 Fecha desde Oct 20, 1998  
 Fecha hasta Feb 2, 2018  
 Actividades principales DOCENCIA E INVESTIGACIÓN

### 4. GRADOS ACADÉMICOS

- INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACION ELECTRONICA

Universidad emisora ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL  
 Universidad receptora ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

- |                   |                |  |
|-------------------|----------------|--|
| Fecha senescyt    | Nov 27, 2002   |  |
| Registro senescyt | 1021-02-317432 |  |
| Nombre            | Si             |  |
- **DIPLOMA SUPERIOR EN EVALUACION DE LA EDUCACION SUPERIOR**

Universidad emisora	UNIVERSIDAD SALESIANA	POLITÉCNICA
Universidad receptora	UNIVERSIDAD SALESIANA	POLITÉCNICA

Fecha senescyt	Jul 9, 2007	
Registro senescyt	1034-07-664210	
Nombre	Si	
  - **ESPECIALISTA EN EDUCACION A DISTANCIA**

Universidad emisora	UNIVERSIDAD SALESIANA	POLITÉCNICA
Universidad receptora	UNIVERSIDAD SALESIANA	POLITÉCNICA

Fecha senescyt	Aug 17, 2011	
Registro senescyt	1034-11-733242	
Nombre	Si	
  - **MASTER EN PRODUCCION AUTOMATIZADA Y ROBOTICA (PAIR)**

Universidad emisora	UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA	
Universidad receptora	UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA	

Fecha senescyt	Apr 11, 2013	
Registro senescyt	7502R-13-7946	
Nombre	Si	

## **5. LIBROS PUBLICADOS**

- **ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE PROCESOS INDUSTRIALES EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

Tipo libro	Académico
Año publicación	2017

ISBN 9789978102848  
 Número de páginas 258  
 Revisión por pares si  
 Editorial ABYA YALA  
 Ámbito editorial Académico  
 Enlace <https://www.dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/14913>

## 6. PROCESOS

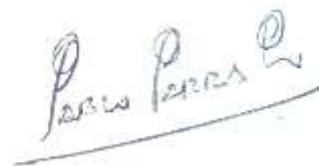
- **ESTRATEGIAS DE CONTROL PREDICTIVO PARA PROCESOS INDUSTRIALES.**

Descripción Implementación de algoritmos de control avanzados sobre plataformas libres, utilizando sistemas embebidos.  
 Organización UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
 Fecha inicio May 19, 2015  
 Fecha fin Dec 19, 2017

## 7. TESIS

- **COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE VISIÓN ARTIFICIAL PARA DETERMINAR EL GRADO DE FERMENTACIÓN DE VARIOS TIPOS DE GRANOS DE CACAO EN EL PROCESO POSTCOSECHA EN LA REGIÓN LITORAL DEL ECUADOR**

Fecha de grado Jan 19, 2018  
 Tipo de asignación Tesis Maestría  
 Tipo de tesis Tesis Maestría  
 Universidad UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA



.....  
 PABLO GERMAN PARRA ROSERO  
 INVESTIGADOR