

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 cacao 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 Piura – Perú.

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

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

J. Manrique, Facultad de Electricidad y Mecánica, Universidad de Piura, 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 cascarilla, 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 períodos 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 cascarilla 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 CACAO

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 – C₄H₁₀), 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 - C₄H₁₀), 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 realtiva 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).

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

Donde los coeficientes K_0 , τ y γ 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 [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 ramdomica), 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) | 0.00015kg/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.

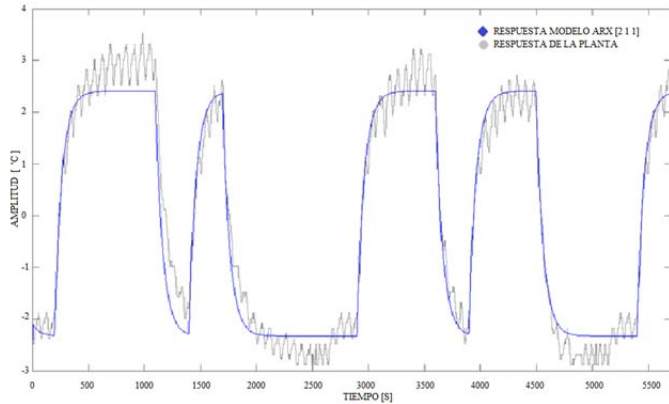


Figura 1. Datos de salida. Modelo Identificado y Planta.

En (2) y (3) se representa la estructura matemática en tiempo discreto para el modelo identificado ARX.

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

$$B(Z) = 0.00578 \quad (3)$$

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).

$$A(Z^{-1})y(t) = Z^{-d}B(Z^{-1})u(t-1) + B(Z^{-1})\frac{e(t)}{\Delta} \quad (4)$$

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).

$$J(N_1, N_2, N_u) = \sum_{j=N_1}^{N_2} \delta(j)[\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \lambda(j)[\Delta u(t+j-1)]^2 \quad (5)$$

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 |
| $\lambda=0.8$ | Ponderación |
| $N_1=1$ | Horizonte mínimo Función Costo |
| $N_2= d+N$ | Horizonte máximo Función Costo |
| $N=N_u=3$ | Horizonte de control |

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 $d+1$, 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).

$$u(t) = u(t-1) - 1.7020y(t) + 1.5221y(t-1) - 0.0767y(t-2) + 0.0072w(t+1) + 0.0147w(t+2) + 0.0221w(t+3) + 0.0289w(t+4) + 0.0358w(t+5) + 0.0427w(t+6) + 0.0494w(t+7) + 0.056w(t+8) \quad (6)$$

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.

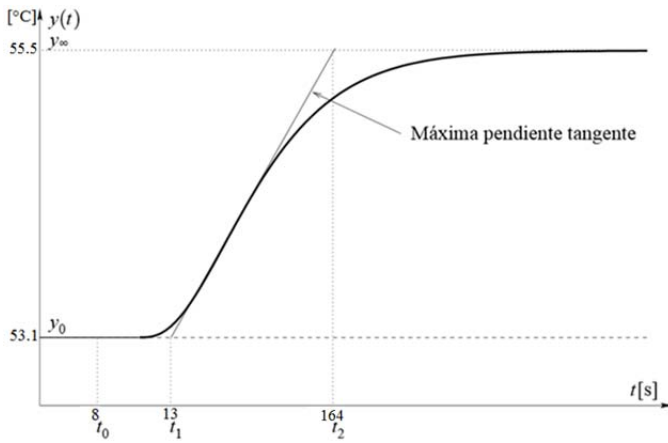


Figura 2. Curva de reacción de Ziegler-Nichols. Planta de secado de Cacao.

Se procede a calcular las constantes k_0 , τ_0 y γ_0 , con las ecuaciones (7), (8) y (9).

$$k_0 = \frac{y_\infty - y_0}{u_\infty - u_0} = \frac{55.5 - 53.1}{17 - 15} = 1.2 \quad (7)$$

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

$$\gamma_0 = t_2 - t_1 = 164 - 13 = 151 \quad (9)$$

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.

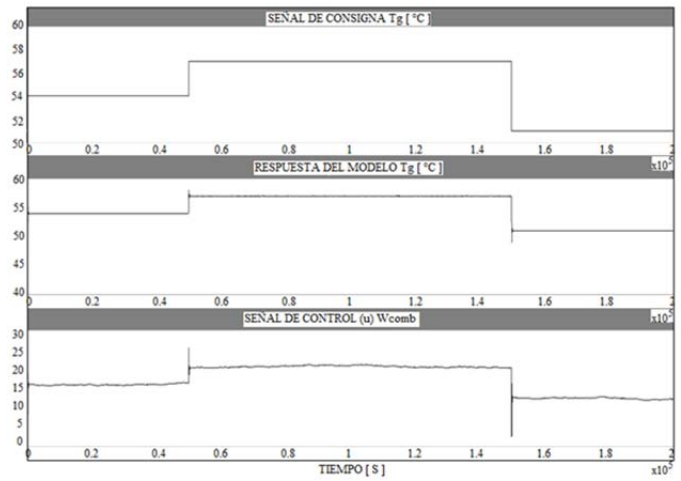


Figura 3. Simulación del GPC actuando sobre el modelo identificado.

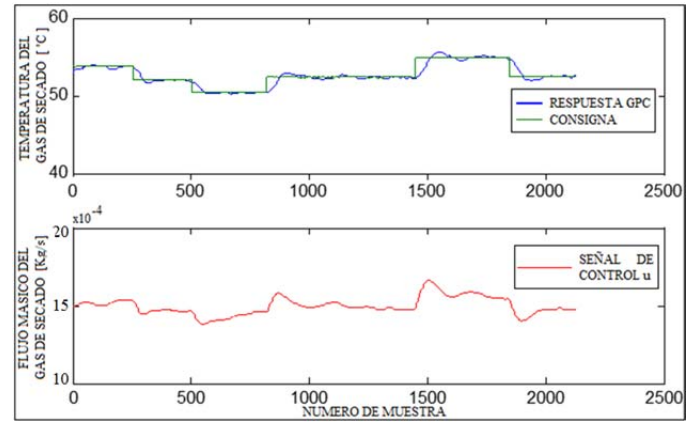


Figura 4. Respuesta de la planta alrededor del punto de operación nominal.

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.

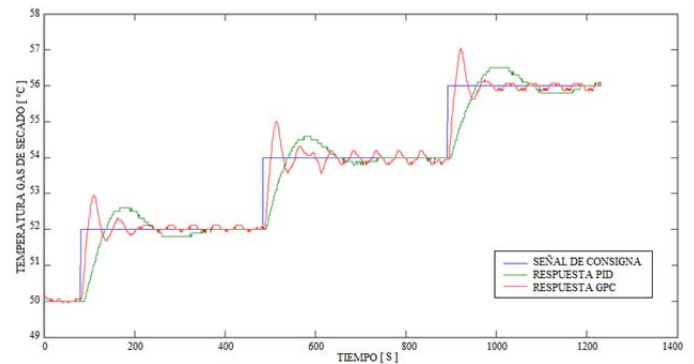


Figura 5. Respuestas de la planta para control GPC y PID..

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.

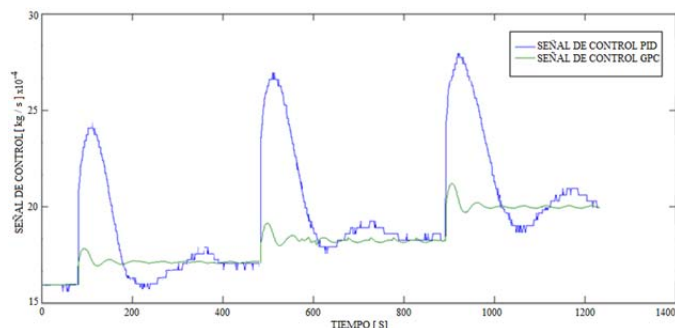


Figura 6. Acciones de control GPC y PID.

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 fig. 7. Las muestras se tomaron, extrayendo granos del proceso cada 30 minutos. El análisis humedad se realizó con un equipo de laboratorio OHAUS MB – 45.

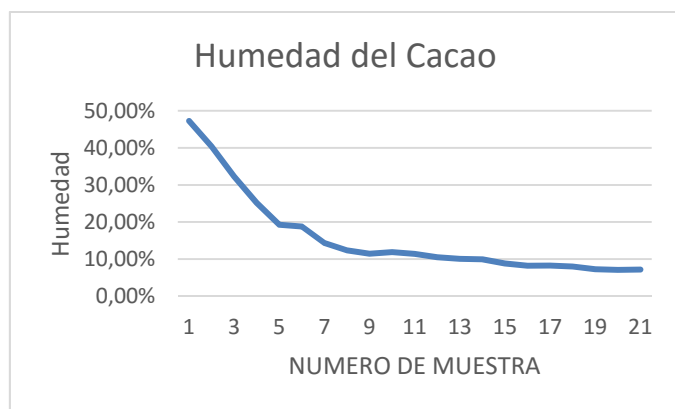


Figura 7. Curva de Humedad del cacao obtenida de la planta de secado.

V. CONCLUSIONES

Resulta factible secar granos de cacao de forma artificial, utilizando una cámara cilíndrica y alimentando al sistema con un flujo másico continuo. Al utilizar esta nueva técnica de secado, se consigue obtener cacao seco a la salida de la cámara de forma permanente y en cantidades reguladas por el flujo de entrada.

Al ser lenta la dinámica de la planta de secado, se consiguió implementar dos diferentes tipos de controladores para la temperatura del gas de secado, con ambas estrategias de control se obtuvo grano seco de caco con un nivel satisfactorio de humedad, alrededor del 8%.

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.

REFERENCIAS

- [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 calidades durante un proceso productivo, Revista INIAP Quito, Ecuador. 2. (1): 37-42. (1993)
- [3] Rincón, S.O. Manual del Cacaotero. Bogotá Colombia., Cenicafé 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 'Gent'le 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] 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).
- [17] 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).
- [18] Rodríguez, M. A, León, J. Control Predictivo basado en Modelo de un horno 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.



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.



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, ECC 2013 and ECC 2014.