

Sistemas de lógica difusa en el proceso de secado de café en lecho fluidizado

Fuzzy logic systems applied to fluidise bed coffee drying

Elkin Mauricio López Fontal¹

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se experimenta con un sistema de secado de granos en lecho fluidizado. Se utiliza un prototipo en el cual se seca café utilizando varias temperaturas del aire de secado (López, 2002). Los resultados obtenidos muestran que el tiempo de secado varía entre 6 a 8 horas, el contenido de humedad final del grano presenta uniformidad y en prueba de tasa se obtiene un producto con características organolépticas de buena calidad. Como complemento a lo anterior y teniendo en cuenta el grado de incertidumbre de dicho proceso, mediante sistemas de lógica difusa se plantean en forma preliminar algunas posibles estrategias de control y automatización que presenta el proceso de secado de café en lecho fluidizado, relacionadas con: establecer el punto de fluidización de los granos húmedos, control de la velocidad superficial del aire, y usar al inicio del proceso de secado una temperatura de aire mayor de 50°C .

Palabras clave: secado, secado de café, fluidización, lecho fluidizado, café pergamino, lógica difusa, estrategias de control.

ABSTRACT

The present investigation deals with a system for coffee bean drying on a fluidised bed. A prototype was used in which coffee beans were dried using several drying temperatures. The results showed 6 to 8 hour drying periods. The coffee beans presented uniform final humidity content and the product presented good sensory characteristics. Complementing the foregoing and considering this process' degree of uncertainty, fuzzy logic systems were used for establishing some possible preliminary control strategies for drying coffee beans on a fluidised bed related to establishing the point of fluidisation, controlling surface air speed and using air temperature greater than 50°C at the start of the process.

Key words: drying, coffee drying, fluidisation, fluidised bed, parchment coffee, fuzzy logic, control strategies.

Recibido: mayo 25 de 2005

Aceptado: octubre 3 de 2005

Introducción

El café es uno de los productos agrícolas que más genera divisas al país. La producción colombiana asciende a más de 700.000 toneladas de café pergamino seco al año; por lo tanto cualquier investigación que se realice para mejorar la producción o su procesamiento es de gran importancia para el sector y la economía del país.

El grano una vez alcanza su madurez se debe cosechar y beneficiar inmediatamente. Una de las operaciones más importantes es el secado, que consiste en eliminar parte del agua del grano, desde 55% b.h de contenido de humedad inicial hasta un 10 a 12% b.h de contenido de humedad final (Cenicafé, 1999).

En la mayoría de las fincas cafeteras se seca el café en forma natural, o en forma artificial dependiendo del área cultivada y de la capacidad económica del productor.

El secado natural del café se efectúa mediante la energía solar y la del viento, mientras que en el secado artificial o mecánico se utiliza aire forzado, el cual es calentado mediante algún sistema de intercambio de calor para luego entrar en contacto con el lecho estático de granos de café húmedos. Los equipos frecuentemente utilizados son secadores de tipo silo normalmente con dos o más compartimientos, lo cual permite hacer la inversión del flujo de aire dos o más veces durante el proceso; esta operación tarda entre 20 y 25 horas y en general se presenta desuniformidad en el contenido de humedad final del grano (Cenicafé, 1999).

¹ Ingeniero químico, magíster en Automatización Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, e-mail: emlopezf@unal.edu.co ó emlopezf@gmail.com

El secado de café en lecho fluidizado se presenta como una alternativa para obtener café con un contenido de humedad final uniforme y reducir el tiempo de secado (Finzer, 1994; Hemati, 1998).

Pensando en la eficiencia de dicho proceso y en la calidad del producto final se hace necesario controlar ciertas variables tales como: la altura alcanzada por los granos fluidizados, la temperatura inicial del aire de secado, la velocidad superficial del aire, etc.

La lógica difusa no sólo considera que hay una infinidad de valores semánticos entre "verdadero" y "falso", sino que también tiene en cuenta que esos mismos valores de verdad son imprecisos. Por lo tanto, es una herramienta eficaz en el manejo de variables que presentan cierto grado de incertidumbre. Es así como, mediante sistemas de lógica difusa, se realiza el planteamiento preliminar de estrategias de control para las variables antes mencionadas, relevantes en un proceso de secado de café en lecho fluidizado (García, 1991).

Materiales y métodos

Localización

La etapa experimental de esta investigación se realizó en el laboratorio de poscosecha de granos del Departamento de Ingeniería Agrícola de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia.

Materia Prima

En toda la parte experimental se utilizó café pergamino, variedad Colombia, con un contenido de humedad inicial entre el 52 y 55 % b.h, y beneficiado por el método tradicional. Antes de someterlo al secado se retiraba el grano llamado guayaba y media cara, el brocado y demás granos que presentaran algún defecto físico.

Equipo de Secado Utilizado

El equipo de secado utilizado esta constituido por las siguientes secciones generales, las cuales se ilustran en la Figura 1. (López, 2002)

Sección de proceso: denominada también sección superior, está constituida por la tolva de alimentación, la cámara de secado, el distribuidor del aire y una zona de acople con el ventilador.

Intercambiador de calor: en este sector del equipo se calienta el aire desde la temperatura ambiente hasta la temperatura de proceso. Está formado por una resistencia eléctrica, la cual está ubicada en la parte media de una carcasa en forma cilíndrica que va acoplada al ducto de succión del ventilador.

El ventilador: se utilizó un ventilador centrífugo de fabricación colombiana, con un motor trifásico marca US motor, de 1 HP de potencia, una velocidad angu-

lar máxima de 3475 rpm y una frecuencia máxima de 60 Hz. Se contó con un motorreductor (variador de velocidad) marca Telemecanic, para motores de máximo 2 HP de potencia, que permitía manipular la frecuencia del motor y por ende la velocidad del flujo de aire generado por el ventilador.

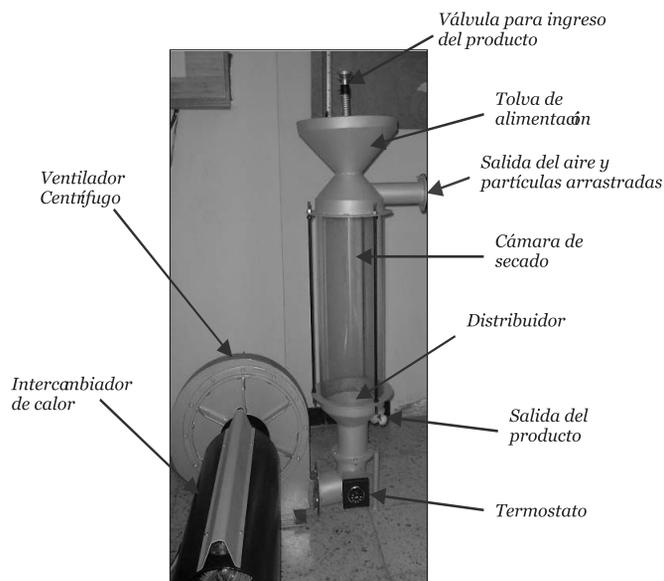


Figura 1. Foto general del equipo de secado de granos en lecho fluidizado (Fuente: el autor).

Estrategias de control

Para el diseño de los sistemas de lógica difusa se utilizó el software UNFUZZY (Duarte, 1997).

En el planteamiento de las estrategias de control se presentan algunos inconvenientes comunes, entre los que se destacan los siguientes:

- En el proceso de secado de café en lecho fluidizado no se contó con un sistema que permitiera medir la humedad de los granos en línea.
- No se dispone de la función de transferencia de la planta.
- Los granos de café fluidizados presentan un movimiento de tipo Browniano, lo cual dificulta la posible medición en línea de la altura que alcanzan.
- Uno de los principales inconvenientes es la ausencia sensorica apropiada para el equipo utilizado.
 - No se dispone de un sensor de fluidización para determinar el punto de fluidización óptimo de los granos de café húmedos.
 - No se dispone de un sensor de porosidad, variable importante en el proceso.
 - No se dispone de un sensor para medir la temperatura de los granos de café.

Estrategia de control 1: Punto de fluidización

Objetivo: establecer el punto de fluidización de los granos húmedos en un proceso de secado de café en lecho fluidizado y de esta forma asegurar que el secador opere en el punto óptimo de fluidización (Álvarez, 2001).

Descripción del problema: como condición inicial del proceso de fluidización de granos de café pergamino húmedo se presenta un lecho estático; si se aumenta lenta y progresivamente la velocidad del aire, se presenta un aumento también progresivo de la caída de presión del aire en el lecho de granos, hasta el momento en que debido a la fuerza de arrastre del gas se observa una expansión y un aumento de la porosidad del lecho; si se sigue incrementado la velocidad del aire, se presenta un equilibrio entre las fuerzas que actúan sobre los granos, y en consecuencia se observa movimiento de ellos; además en ese instante la caída de presión se hace constante. En ese momento se tiene fluidización de los granos (punto de fluidización) (Levenspiel, 1969). Específicamente en el proceso de fluidización realizado en la presente investigación, se manipula la frecuencia del variador, con lo cual se logra indirectamente manipular la velocidad del flujo de aire (al variar la frecuencia de alimentación del motor de inducción se varía la velocidad del ventilador y por tanto el flujo de aire); es decir, que al incrementar lenta y progresivamente la frecuencia del variador se presenta un incremento en la caída de presión del aire, para luego presentarse el punto de fluidización en el cual la caída de presión toma un valor aproximadamente constante (ver las Figuras 2 y 3).

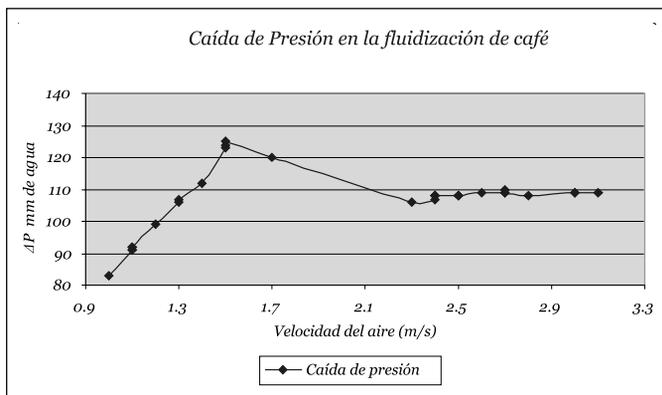


Figura 2. Curva típica de velocidad del aire Vs caída de presión, cuando en el proceso de secado se mantiene la frecuencia del variador constante después del punto de fluidización

Se puede observar en la Figura 2 que se presenta un aumento progresivo de la velocidad del aire (a la salida), mientras que la caída de presión del aire en el lecho fluidizado permanece prácticamente constante después de obtener el punto de fluidización.

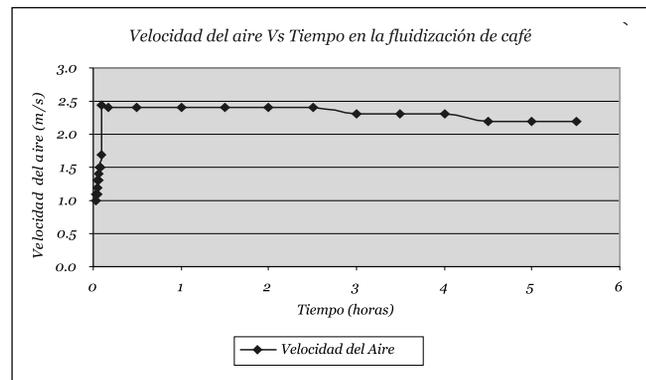


Figura 3. Comportamiento de la caída de presión, cuando después del punto de fluidización se mantiene la frecuencia constante.

Al iniciar el proceso, se presenta una curva típica de caída de presión en función del tiempo; por el incremento en la frecuencia del variador se presenta un aumento en la caída de presión del aire, el cual se da hasta el momento de la fluidización de los granos; después del punto de fluidización, si se mantiene la frecuencia del variador fija, la caída de presión presenta un comportamiento aproximadamente constante en las tres primeras horas del proceso, para luego presentar una leve tendencia decreciente hasta el final del proceso (ver Figura 3), en la cual además se puede observar que el punto de fluidización se da al poco tiempo de iniciado el proceso.

Estrategia de control 2: Control de la velocidad superficial del aire, después de obtener el punto de fluidización.

Objetivo: después de obtener el punto de fluidización, mantener la velocidad del aire, a la salida del proceso, en un valor constante.

Descripción del problema: tal como se muestra en la Figura 4, al cambiar la frecuencia del variador (en forma manual y en lazo abierto), para tratar de mantener una altura constante de los granos fluidizados, se presenta un comportamiento con variaciones pequeñas en la velocidad superficial del aire a la salida del proceso.

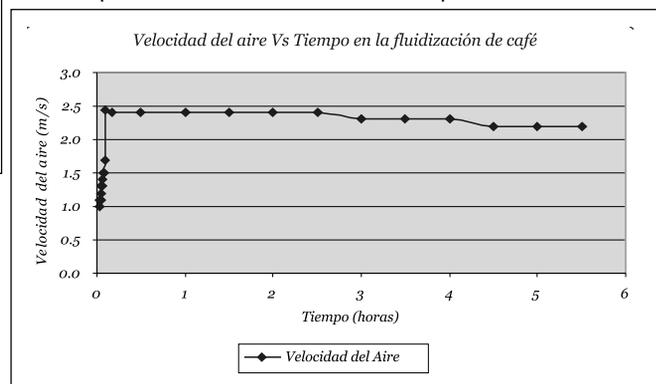


Figura 4. Velocidad del aire en función del tiempo, cuando en el proceso de secado de café en lecho fluidizado se varía la frecuencia, después del punto de fluidización.

Se sabe que cuando el proceso es realizado cambiando la frecuencia del variador (López, 2002), se presentan índices de correlación mayores de 0.95 para los datos de secado obtenidos experimentalmente y los de un modelo matemático (modelo de Thompson), con una diferencia en tasa de secado menor del 1%. Al asegurar una velocidad de aire constante se logra mantener las condiciones supuestas por el modelo de Thompson y de esta forma tener una mejor predicción del tiempo final de secado; por otra parte variar la frecuencia en un proceso de secado de café en lecho fluidizado, resulta favorable por tiempos de secado y consumo de energía (López, 2002).

Estrategia de control 3: Usar una temperatura de aire mayor de 50°C, al inicio del proceso de secado, durante un corto periodo de tiempo.

Objetivo: acelerar el proceso de secado utilizando una temperatura de aire alta (> 50 °C) al inicio del proceso.

Descripción del problema: cuando los granos de café pergamino húmedo (aproximadamente 55% b.h) se ponen en contacto con una corriente de aire caliente, su temperatura se incrementa progresivamente. Debido a la humedad superficial en los granos (humedad no ligada), en los primeros minutos del secado el efecto evaporativo es mayor, y en consecuencia el enfriamiento del aire también es mayor. Esto hipotéticamente permitiría inicialmente tener una temperatura de aire por encima de los 50 °C con el fin de reducir el tiempo de secado, la cual se mantendría durante un corto tiempo, para prevenir que la temperatura de los granos supere los 50 °C y así evitar poner en riesgo su calidad (Cenicafé, 1999).

Resultados y discusión

Estrategia de control 1

Propuesta teórica: no existe un sensor que determine el punto de fluidización en un proceso de secado de café en lecho fluidizado. Por lo tanto se propone determinarlos realizando mediciones indirectas en el proceso. Se propone también medir la caída de presión del aire en el lecho de granos y la velocidad del flujo de aire. Mediante la manipulación de la frecuencia del variador (indirectamente la velocidad del flujo de aire) se detectará en qué momento la caída de presión se hace aproximadamente constante, lo que indicará que se presenta movimiento de los granos (punto de fluidización). Será necesario establecer la mínima frecuencia con la cual se logra una fluidización apropiada de los granos.

- Variables medidas: serán la caída de presión del aire en el lecho de granos de café húmedo, la cual será medida mediante un sensor de tipo capacitivo, que genere una señal digital de bajo amperaje; la caída de

presión del aire es la diferencia entre la presión estática del aire antes de entrar en contacto con el lecho de granos, y la presión estática del aire cuando ha atravesado gran parte del lecho. Y la velocidad del flujo de aire, que se medirá después de haber atravesado el lecho de granos mediante un anemómetro, con salida digital de bajo amperaje.

- Variable manipulada: es la frecuencia del variador. La cual actuará en un rango de 0 a 60 Hz.
- Controlador propuesto: dado que no existe un detector de punto de fluidización, pero sí se tiene un conocimiento sobre el proceso, se propone la utilización de un sistema experto para gobernar el proceso y detectar el punto de fluidización. Una vez alcanzado el punto de fluidización se suspenderá la operación del sistema experto.

Sistema experto basado en lógica difusa

El sistema experto se propone basado en el conocimiento existente sobre los procesos de fluidización de granos de café. El conocimiento que se posee se refleja en la curva genérica, de caída de presión Vs frecuencia, que se muestra en la Figura 5 (Perrot, 1998).

En la Figura 5 se pueden identificar claramente las siguientes regiones:

Región 1: si se presenta incremento en la caída de presión del aire (cambio positivo en la caída de presión) y además incremento en la velocidad del aire (cambio positivo en la velocidad del aire), es necesario incrementar la frecuencia de variador (cambio positivo en la frecuencia de variador); la región 1 se asocia con las reglas 2 y 3 (ver Tabla 1).

Región 2: si la caída de presión presenta un descenso (cambio negativo en la caída de presión) y la velocidad de aire aumenta (cambio positivo en la velocidad del aire), se debe incrementar la frecuencia del variador (cambio positivo en la frecuencia de variador), la región 2 se asocia con la regla 6 (Tabla 1).

Región 3: si la caída de presión es constante (cambio en la caída de presión es cero) y la velocidad del aire aumenta (cambio positivo en la velocidad del aire), se debe disminuir la frecuencia (cambio negativo en la frecuencia de variador), la región 3 se asocia con la regla 5 (ver Tabla 1).

Región 4: si la caída de presión es constante (cambio en la caída de presión es cero) y la velocidad del aire disminuye (cambio negativo en la velocidad del aire), se debe disminuir la frecuencia (cambio negativo en la frecuencia de variador), la región 4 se asocia con la regla 4 (ver Tabla 1).

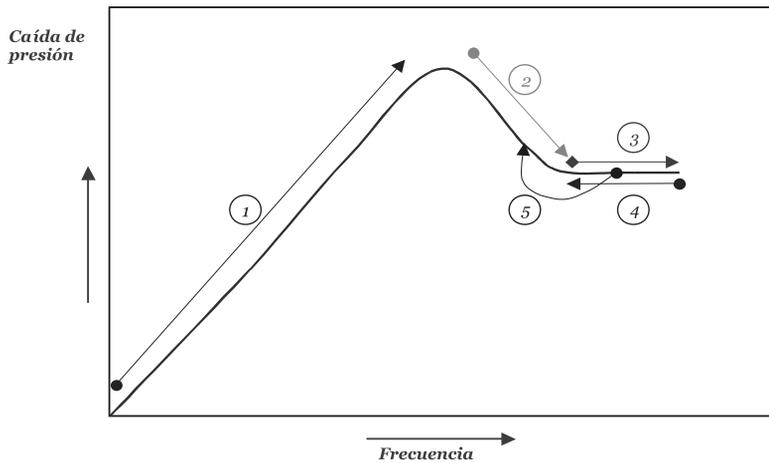


Figura 5. Esquema genérico de la caída de presión en función de la frecuencia del variador, en el proceso de fluidización de café húmedo, con características relevantes para el sistema experto.

Región 5: si se presenta un cambio en la caída de presión positivo y la velocidad del aire disminuye (cambio negativo en la velocidad del aire), se debe aumentar la frecuencia (cambio positivo en la frecuencia de variador), la región 5 se asocia con la regla 1 (ver Tabla 1).

Con esta información es posible construir un sistema experto basado en lógica difusa, en donde cada región generará una o más reglas. El diseño se realiza utilizando el software UN-Fuzzy, en donde adicionalmente se puede llevar un registro de las reglas que han sido activadas en el proceso para detectar así cuándo se ha llegado al punto de fluidización y por tanto permitir la suspensión del sistema experto.

El sistema experto se basa en un sistema de lógica difusa, el cual presenta las siguientes características:

La definición de las variables de entrada y de salida y sus respectivos conjuntos difusos se realiza gracias a la experiencia adquirida durante la etapa experimental realizada en la presente investigación (López, 2002).

Definición de variables de entrada y salida:

- Variables de entrada:

El cambio en la caída de presión: ΔP

El cambio en la velocidad del aire: CV

$$CV(k) = V(k) - V(k - 1)$$

- Variable de salida:

El cambio en la frecuencia del variador: CF

$$CF(k) = F(k) - F(k - 1)$$

Universo de entrada

Número de variables de entrada: 2

Nombre de la variable de entrada 1: el cambio en la caída de presión (ΔP).

Universo de discurso de la variable ΔP : [-5, 10]

Número de conjuntos difusos de la variable ΔP : 3

Nombre de los conjuntos difusos de la variable ΔP : Negativo, Cero, Positivo.

Funciones de pertenencia de la variable ΔP : ver Figura 6

Difusor de la variable ΔP : Triángulo



Figura 6. Funciones de pertenencia de la variable de entrada: cambio en la caída de presión.

Nombre de la variable de entrada 2: el cambio en la velocidad del aire (CV).

Universo de discurso de la variable CV: [-0.2, 0.5]

Número de conjuntos difusos de la variable CV: 3.

Nombre de los conjuntos difusos de la variable CV: CV Negativo, CV Positivo, CV Positivo grande.

Funciones de pertenencia de la variable CV: ver Figura 7.

Difusor de la variable CV: Triángulo.



Figura 7. Funciones de pertenencia de la variable de entrada: cambio en la velocidad del aire.

Universo de salida

Número de variables de salida: 1

Nombre de la variable de salida 1: el cambio en la frecuencia (CF).

Universo de discurso de la variable CF: [-0.5, 2].

Número de conjuntos difusos de la variable CF: 4

Nombre de los conjuntos difusos de la variable CF: CF Negativo pequeño, CF Positivo pequeño, CF Positivo mediano, CF Positivo grande.

Funciones de pertenencia de la variable CF: ver Figura 8.

Concesor de la variable CF: Centro de gravedad.

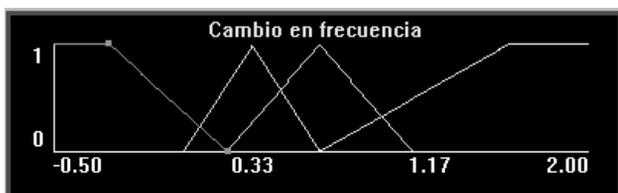


Figura 8. Funciones de pertenencia de la variable de salida: cambio en la frecuencia del variador.

Los universos de discurso de las variables de entrada o de salida son valores que podrán ser manipulados por el usuario del sistema, de acuerdo a su gusto o necesidad.

Máquina de inferencia:

- Operador AND: Mínimo.
- Operador de implicación: Mínimo.
- Operador de composición: Mínimo.
- Operador de unión: Máximo.

Base de reglas:

Número de reglas: 6

Las reglas se muestran en la Tabla 1, donde los valores de cada casilla corresponden a los consecuentes de cada regla.

Tabla 1. Base de reglas para el sistema basado en lógica difusa.

Cambio en la velocidad del aire	Cambio en la caída de presión		
	Positivo	Cero	Negativo
CV Negativo	CF Positivo pequeño	CF Negativo pequeño	
CV Positivo	CF Positivo mediano	CF Negativo pequeño	CF Positivo mediano
CV Positivo grande	CF Positivo grande		

Como prueba de escritorio, se realizaron simulaciones con el sistema experto propuesto, presentándose la siguiente curva de caída de presión Vs frecuencia del variador, la cual se compara con una curva obtenida experimentalmente (López, 2002) tal como se muestra en la Figura 9.

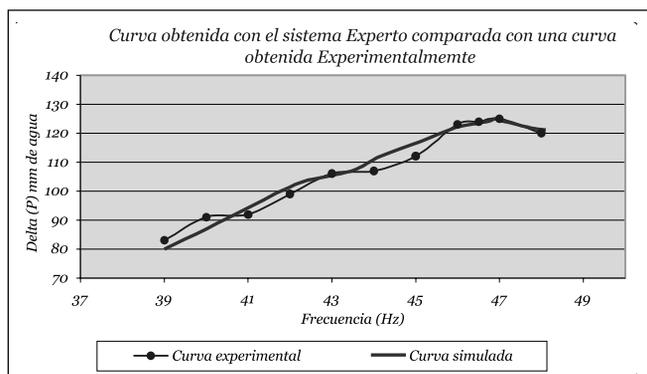


Figura 9. Curvas de caída de presión Vs frecuencia del variador, obtenidas experimentalmente y mediante simulación utilizando el sistema experto propuesto.

En la Figura 9 se aprecia que la curva obtenida mediante simulación utilizando el sistema experto propuesto se aproxima significativamente bien a la curva obtenida experimentalmente, situación que permite establecer que el sistema experto, basado en lógica difusa, es acertado al cumplir con el fin buscado (Restrepo, 2003).

Estrategia de control 2

Propuesta teórica: después de obtener el punto de fluidización, mantener la velocidad superficial del aire a la salida, en un valor constante durante el proceso de secado, mediante la manipulación de la frecuencia del variador. De esta forma se lograría que indirectamente la altura de los granos permanezca en un valor relativamente constante.

- Variable controlada: la variable a controlar es la velocidad superficial de aire a la salida, la cual sería medida mediante un anemómetro, con salida digital de bajo amperaje.
- Variable manipulada: la variable manipulada es la frecuencia del variador, la cual estará en el rango de 0 a 60 Hz.
- Controlador propuesto: inicialmente se realizó el diseño de un sistema de lógica difusa. El sistema de lógica difusa presenta las siguientes características:

Sistema de lógica difusa para la estrategia de control 2

El sistema de lógica difusa propuesto para esta estrategia de control cuenta con una entrada y una salida y las siguientes características:

Universo de entrada:

Número de variables de entrada: 1

Nombre de la variable de entrada 1: el cambio en la velocidad del aire (CV).

Universo de discurso de la variable CV: [-1, 1]
 Número de conjuntos difusos de la variable CV: 5
 Nombre de los conjuntos difusos de la variable CV: Negativo mediano, Negativo pequeño, Cero, Positivo pequeño, Positivo mediano.
 Funciones de pertenencia de la variable CV: ver Figura 10
 Difusor de la variable CV: Triángulo.

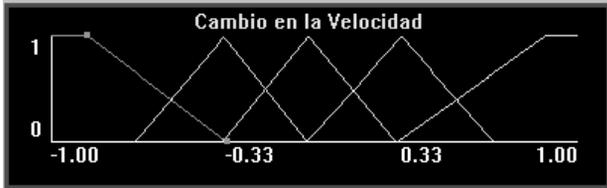


Figura 10. Funciones de pertenencia de la variable de entrada: Cambio en la velocidad del aire.

Universo de salida:

Número de variables de salida: 1

Nombre de la variable de salida 1: el cambio en la frecuencia (CF).
 Universo de discurso de la variable CF: [-1,1].
 Número de conjuntos difusos de la variable CF: 5
 Nombre de los conjuntos difusos de la variable CF: Negativo mediano, Negativo pequeño, Cero, positivo Pequeño, Positivo mediano.

Funciones de pertenencia de la variable CF: ver Figura 11.

Concesor de la variable CF: centro de gravedad.

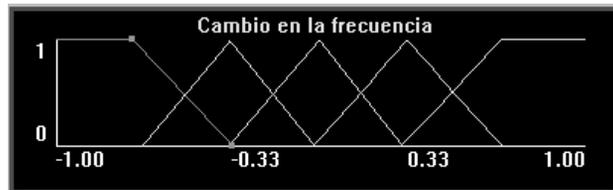


Figura 11. Funciones de pertenencia de la variable de salida: cambio en la frecuencia (Fuente: el autor).

Base de reglas:

Número de reglas: 5.

Regla 1:

IF Cambio en la velocidad es Negativo mediano.
 Cambio en la frecuencia es Positivo mediano.
 THEN

Regla 2:

IF Cambio en la velocidad es Negativo pequeño.
 Cambio en la frecuencia es Positivo pequeño.
 THEN

Regla 3:

IF Cambio en la velocidad es Cero THEN Cambio en la frecuencia es Cero.
 THEN

Regla 4:

IF Cambio en la velocidad es Positivo pequeño.
 Cambio en la frecuencia es Negativo pequeño.
 THEN

Regla 5:

IF Cambio en la velocidad es Positivo mediano.
 Cambio en la frecuencia es Negativo mediano.
 THEN

Relación entrada-salida

En la Figura 12 se muestra la relación entrada-salida obtenida con el UNFUZZY, de acuerdo a la configuración del sistema de lógica difusa propuesto para la estrategia de control 2.

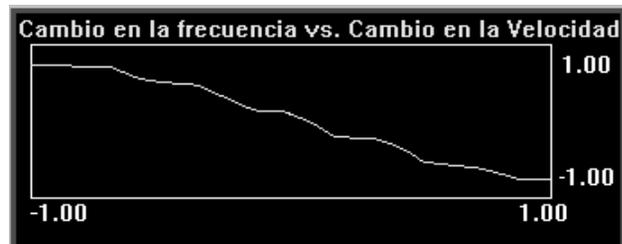


Figura 12. Relación entrada-salida.

Hay que señalar que esta relación entrada-salida es muy cercana a la que se puede obtener con un controlador proporcional.

Estrategia de control 3

Propuesta teórica: se plantea la posibilidad de realizar el proceso de secado de café en lecho fluidizado inicialmente a una temperatura de aire mayor de 50 °C, durante un corto tiempo, para aprovechar el efecto del mayor enfriamiento evaporativo, y de esta forma reducir el tiempo total de secado.

Por lo tanto, asumiendo que se presenta equilibrio térmico entre el aire de secado y los granos, se medirá la temperatura del aire a la salida del proceso, y cuando esté cercana a los 50°C se disminuirá la temperatura del aire a la entrada del proceso, hasta el valor aproximado de 50 °C.

- Variable controlada: la variable a controlar sería la temperatura de los granos, que en ningún momento puede ser mayor de 50 °C.
- Variable manipulada: la variable manipulada, sería la temperatura del aire, la cual al iniciar el proceso tendría un valor por encima de 50 °C, e iría descendiendo hasta un valor en el cual la temperatura de los granos sea de aproximadamente 50 °C.
- Controlador propuesto: el problema planteado hasta el momento podría solucionarse implementando un controlador proporcional, específicamente un controlador proporcional con programación de ganancia, con el cual el proceso de secado se iniciaría con una temperatura alta (> 50 °C) y en el momento en que la temperatura del aire a la salida esté muy cercana a 50 °C, se disminuye la temperatura del aire a la entrada del proceso. Existen dos posibilidades: que el cambio de temperatura se haga abruptamente, o que la disminución sea gradual. Por el momento no se cuenta con información experimental que permita decidir al respecto.

Conclusiones

Para la segunda estrategia de control no es necesario un sistema de lógica difusa, pues con un controlador de tipo proporcional se cumple con el objetivo trazado.

Los sistemas de lógica difusa se presentan como una alternativa favorable para el control y automatización del proceso de secado de café en lecho fluidizado, teniendo en cuenta su grado de incertidumbre.

El sistema experto diseñado rastrea bastante bien la curva de caída de presión Vs frecuencia obtenida experimentalmente, lo que evidencia la posibilidad de implementación de dicho sistema.

Se establece la necesidad de profundizar mucho más en el diseño e implementación de controladores para el proceso de secado de café en lecho fluidizado.

Bibliografía

Álvarez, H.D. et al. "Desarrollo de un sensor virtual basado en modelo, para el número de fluidización, en un lecho fluidizado sólido-gas". Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 2001.

Centro Nacional de Investigaciones de Café. "Beneficio ecológico del café". Ingeniería Agrícola, 1999, 273 pp.

Duarte, O.G. "Sistemas de lógica difusa: fundamentos". Disponible en: <http://ohm.ingsa-la.unal.edu.co/ogduarte/>

Duarte, O.G. "Aplicaciones de lógica difusa". Disponible en: <http://ohm.ingsala.unal.edu.co/ogduarte/>

Duarte, O. "Unfuzzy, software para el diseño, análisis e implementación de sistemas de lógica difusa". Tesis de maestría en automatización industrial, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1997.

Finzer, J.R.D. ET AL. "Drying coffee beans in vibrating tray dryer". Drying technology 15(6-8), 1983-1994, 1997.

García, A., María C. "Inteligencia artificial en el control de procesos: controladores borrosos". Mundo Electrónico, febrero, 1991.

Hemati M. et al. "Continuous and intermittent drying of maize in a flotation fluidized bed." In Fluidization VII. Ensigc Chenmin de la loge, Toulouse Cedex, France.pp 831-839.

Kunni, D.; Levenspiel, O. Fluidization engineering. Edit. John Wiley and sons, EE UU, 1969, 430 pp.

López, F.E.M. "Extracción de aceite de café, a partir de café brocado". Tesis de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 1997.

López, E.M. "Secado de café en lecho fluidizado". Tesis para magister en Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia. sede Bogotá, Bogotá, 2002, 195 pp.

Pérez, C. A. "Diseño e implementación de un pre secador continuo de arroz, de lecho fluidizado". Tesis de maestría en Ingeniería Mecánica, Universidad de los Andes, Bogotá, 2000, 120 pp.

Perrot, N. et al. "Application of fuzzy rules-based models to prediction of quality degradation of rice and maize during hot air drying". Drying Technology, 16(8), 1.533-1.565, 1998.

Restrepo V.A. "Desarrollo de sistemas expertos". Revista Universidad Eafit, No. 68, pp 29-38.

Restrepo, H.D. "Sensores inteligentes basados en sistemas expertos, para procesos de fluidización". Tesis de doctorado, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 2003.

Reyes, A. "Secado de pulpa de manzana en un lecho fluidizado". Resumen en XXVIII Congreso Brasileiro de sistemas particulados. Disponible en: <http://acd.ufrj.br/enemp2000/034.htm>

Steinmets, D. et al. "IV Journées Internationales de Termique ". In Fluidization VII. Alger, France, 1989.

Thyagarajan, T. et al. "Artificial neural networks: principle and application to model-based control of drying systems: a review". Drying Technology, 16(6), 931-966, 1998.