

# DISEÑO DE UN CONTROL DE TEMPERATURA DIFUSO PARA UN TÚNEL DE SECADO DE CÍTRICOS

## *TEMPERATURE FUZZY CONTROL DESIGN FOR A CITRUS DRYING TUNNEL*

**Priscila González Rosales**

Tecnológico Nacional de México / ITS de Misantla, México  
*182t0772@misantla.tecnm.mx*

**David Lara Alabazares**

Tecnológico Nacional de México / ITS de Misantla, México  
*dlaraa@misantla.tecnm.mx*

**Recepción:** 28/octubre/2020

**Aceptación:** 27/noviembre/2020

### **Resumen**

El limón mexicano es un producto de mercado internacional y las empacadoras de cítricos realizan esfuerzos para cumplir con las normas de calidad e inocuidad de esta fruta. Una planta empacadora es proceso de industrialización que consta de diferentes etapas, entre estas, se incluyen un presecado y secado, al sanitizado y encerado, respectivamente, que consisten en hacer circular el limón mediante una banda transportadora por un túnel con flujo de aire caliente para extraer la humedad en su superficie. Sin un control adecuado de temperatura, el fruto presentará humedad o deshidratación. En este trabajo se presenta el modelado y control difuso de temperatura de un túnel de secado. Con datos experimentales de entrada-salida en lazo abierto se identifican los parámetros del modelo para diseñar el controlador. Los resultados se validan con simulaciones, evidenciando que el set-point de temperatura se alcanza en menos de 100s sin sobresalto, con un buen desempeño evitando el estrés térmico.

**Palabras Clave:** Control difuso, control de temperatura, túnel de secado.

### **Abstract**

*The Mexican lemon is an international market product. The citrus packing companies make efforts to comply with the quality and safety standards of this fruit.*

*A citrus packing plant is an industrialization process that consists of different stages, including pre-drying after sanitizing and drying after waxing, which consists on make circulate the lemon through a conveyor belt inside of a tunnel with hot air flow to extract moisture on its surface. If there is not an adequate temperature control, the fruit will show moisture or dehydration. In this paper the modeling and diffuse temperature control for drying tunnel is presented. Using open-loop input-output experimental data, the model parameters are identified to design a fuzzy control. The results are validated with numerical simulations, showing that the temperature set-point is reached in less than 100s without overshoot, which is a good performance avoiding thermal stress.*

**Keywords:** *Drying tunnel, fuzzy control, temperature control.*

## **1. Introducción**

En México, la región de Misantla-Martínez de la Torre en el estado de Veracruz es reconocida como exportadora de cítricos y ocupa un importante lugar de producción nacional [Martínez, 2018]. Las empacadoras de cítricos, en la mejora continua, perfeccionan e innovan sus procesos, para entregar un producto con inocuidad de calidad, manteniendo su frescura, apariencia y prolongando su vida en anaqueles.

La inocuidad de los productos de la industria alimentaria a nivel mundial es una exigencia que los obliga a mantener estándares de calidad de los alimentos, dado que una mínima alteración en estos impacta la salud pública. Por esta razón, de acuerdo con [Miliotis, 2007] y [Jiau, 2017] es importante mantener los parámetros dentro rangos que garanticen la calidad de los alimentos manufacturados.

La tasa de crecimiento de la población indica que la inocuidad de los alimentos será un parámetro importante que influirá en la economía de los países en vías de desarrollo [Maldonado, 2007].

La inocuidad se rige por normas de análisis y controles preventivos, basados en los estudios de riesgos de alimentos de consumo humano de la Administración de Alimentos y Medicamentos, FDA-USA. Los controles preventivos se basan en el monitoreo (secuencia planificada de observaciones o mediciones) que determina si

las medidas de control se implementan y operan adecuadamente, tanto en el diseño del método como en el equipamiento [FDA, 2016].

Por un lado, los productos agrícolas frescos, incluyendo el limón, son perecederos, y el proceso de empaque mantiene la inocuidad del producto, protegiéndolo y evitando la manipulación individual [FAO, 1987].

Por otro lado, el agua es un componente crítico que determina propiedades físicas, textura, cualidades sensoriales y tasas de reacciones químicas y microbiológicas en los alimentos. Es una práctica común reducir la humedad de la superficie de las frutas para conservarlas, y el secado es un método que reduce la humedad [Kerr, 2019].

Postcosecha, el limón se traslada a las empacadoras donde ingresa a la recepción de fruta y reposa alrededor de 8 horas para disminuir la humedad. Luego, pasa por un preempaque, descartando el producto que no cumple las características organolépticas requeridas, los que son aceptados se clasifican según su color y pasan a desverdización [Murray, 2019]. Después de la primera clasificación, inmediatamente sigue el empaque, donde el limón se procesa para satisfacer los requerimientos del consumidor y es tratado con los pasos que se muestran en el mapa de proceso de la figura 1, donde el limón primero llega al área de vaciado (a), luego se clasifica en base a su dimensión (b), se preselecciona manualmente (c), se lava mediante cepillado y enjuagado para remover residuos de tierra, pesticidas o adherencias (d), a continuación se hace pasar por la tina de sanitizado (e), entra al túnel de presecado (f), se le aplica cera fungicida mediante aspersores (g), entra al túnel de secado para curar la cera y remover la humedad (h), después pasa a clasificarse por calibre (i) y por requerimientos específicos de cliente (j), por último se pesa, envasándolo en cajas (k), y se arman pallets de embarque (l).

En el proceso de secado, el limón se expone a un flujo de aire caliente, a una temperatura de entre 30 y 40°C, durante un período corto, haciéndolo pasar por el túnel de secado, como el que se bosqueja en la figura 2, el cual se encuentra delimitado de cubiertas laterales, superior e inferior, tiene una banda transportadora de rodillos en su interior desde la entrada hasta la salida con una pendiente positiva en dirección contraria al flujo de aire caliente, cuya fuente se sitúa al final del túnel.



Figura 1 Proceso para la industrialización de cítricos.

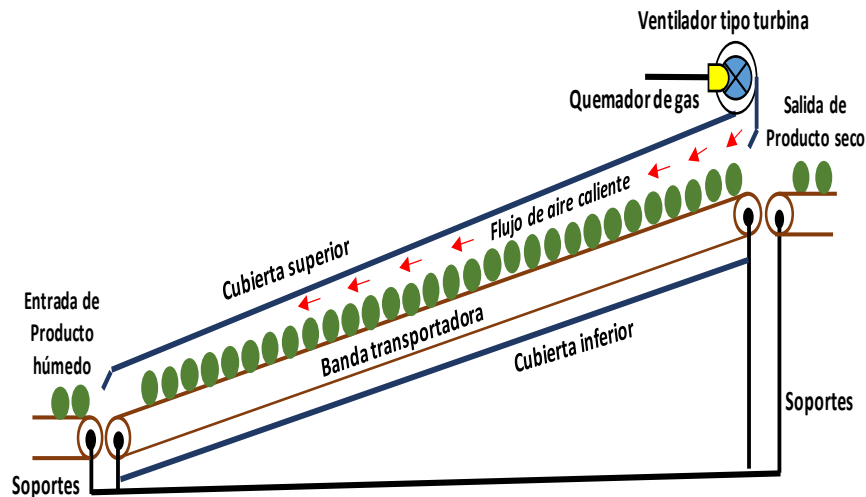


Figura 2 Esquema del túnel de secado.

En el presecado y secado se remueve la humedad de la superficie del cítrico, pero en el secado se logra la adherencia de la cera, mejorando el aspecto y la apariencia de los limones, brindando, además, una mayor vida en anaquel. El flujo de aire caliente combate algunos de los hongos que afectan la calidad del limón, por lo cual se debe tener un control de temperatura para no perjudicar al cítrico, ya que si existe exceso de humedad causará la proliferación de gérmenes patógenos o en caso contrario el limón presentará deshidratación afectando su calidad.

## **Revisión de la bibliografía**

Existen diversos trabajos concernientes a estudios de sistemas de secado de frutas por ejemplo en los trabajos de [Azaharul, 2005] y [Zhu, 2014], se obtiene el modelado de la transferencia de masa que ocurre en las frutas sometidas al secado por convección. En el trabajo presentado en [Mabrouk, 2006] se modela la relación de la temperatura con la transferencia de masa al interior de un túnel de secado de cama fija, obteniendo las ecuaciones que rigen la dinámica del proceso, que son validadas numéricamente. En [Yadollahinia, 2008] se presenta el desarrollo y prueba de un túnel de secado automatizado de uso general para estudiar las características de secado y el modelado matemático de varios productos agrícolas. En los estudios realizados en [Belghit, 1999] y [Romdhane, 2015] se determina la dinámica de un túnel de secado de convección forzada para secar plantas de salvia (*salvia officinalis*) y limón, respectivamente, donde se determina que la temperatura es el principal factor para obtener resultados óptimos.

En lo que concierne al control de temperatura y otras variables de los procesos de secado, un modelo matemático semiempírico fue propuesto en [Zanoelo, 2008] para reproducir la cinética de secado en un secador continuo de cama compacta, el cual se obtuvo a partir de un balance de masa para el agua en la fase sólida de la cámara de secado y se validó en estado estacionario con datos de un secador industrial continuo. El modelo transitorio se resolvió numéricamente y con este modelo se sugirió una estrategia de control PID para mantener el contenido de humedad de descarga en el rango aceptable, ajustando la velocidad de la cinta transportadora y la temperatura para compensar las perturbaciones en las condiciones de operación. El rendimiento de un controlador PID se verificó mediante una comparación entre las respuestas de lazo abierto y cerrado del contenido de humedad de descarga ante perturbaciones.

En [Lutfy, 2015] se presenta un control basado en redes neuronales adaptable aplicado a un modelo basado en red autorregresiva no lineal con entrada exógena (NARX), donde los resultados fueron validados en simulación. En el artículo [Dürr, 2020] un sistema de control PI auto sintonizado en línea con estimación de parámetros se aplica a un sistema de secado continuo de levadura.

## Contribución y objetivo

Por lo expuesto anteriormente, en este trabajo tiene como objetivo el diseño de un sistema de control difuso de temperatura en el túnel de secado de cítricos, para mantenerla dentro de los valores establecidos por los perfiles de secado. Para esto, a partir de datos experimentales de entrada-salida en lazo abierto se realiza una identificación de los parámetros del modelo matemático, el cual es validado comparándolo con la respuesta del proceso real en lazo abierto. Con este modelo, se diseña el controlador. Los resultados se validan con simulaciones numéricas, comparando el control difuso con un control clásico PID, evidenciando que el valor deseado de temperatura se alcanza en menos de 100 segundos sin sobresalto, siendo esto un buen desempeño que evita el estrés térmico contribuyendo a la mejora del proceso.

## Fundamentos de control difuso

El control de lógica difusa (FLC) es una técnica de control retroalimentado que utiliza información cualitativa mediante el uso de reglas verbales o lingüísticas de la forma si-entonces [Babuska, 1996], [Rhinehart, 1996] y [Passino, 1998]. Para obtener la ley de control, el FLC utiliza la teoría de conjuntos difusos, el conjunto de reglas y un sistema de inferencia difusa. Los principales elementos de un FLC se muestran en la figura 3.

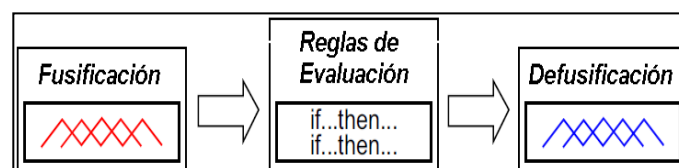


Figura 3 Elementos de un control lógico difuso.

**Definición (Conjunto Difuso):** Un conjunto difuso  $A$  en  $U$  se define como el conjunto de pares ordenados  $A \triangleq \{ \{x, \mu_A(x)\} | x \in U \}$ , donde  $U$  se dice que es el universo en discurso,  $\mu_A(x)$  es la función de pertenencia para el conjunto de todos los objetos  $x$  en  $U$  [Jantzen, 2007]. Esta definición significa que la función de pertenencia relaciona a cada elemento  $x$ , dentro del universo de la variable, un grado del nivel pertenencia  $\mu_A(x)$ , el cual es un número real en el intervalo cerrado

[0,1]. Es importante mencionar que la suma de los niveles de pertenencia es siempre 1.

**Sistema de inferencia difusa:** El proceso de fusificación convierte las entradas o variables físicas, por ejemplo, una señal de error  $e(t)$  en un sistema de control, en conjuntos difusos adecuados. El proceso de inferencia difusa combina las funciones de membresía con las reglas de control para obtener una salida difusa, por ejemplo  $u(t)$  en un sistema de control de lazo cerrado. Este proceso también es conocido como razonamiento difuso. Finalmente, estas salidas de los cálculos difusos se traducen en términos de valores reales utilizando un sistema de defusificación [Babuska, 1996], [Rhinehart, 1996].

**Máquina de inferencia:** Existen dos modelos principales de máquinas de inferencia, Mamdani y Takagi-Sugeno (TS), en este trabajo utilizaremos el primero que proporciona las reglas basadas en ecuación 1, regla  $k$ .

$$\text{if } (x_1 \text{ is } A_{1k}), \text{ and } (x_2 \text{ is } A_{2k}), \dots \text{ and } (x_N \text{ is } A_{Nk}) \text{ then } y_k \text{ is } B_K \quad (1)$$

Donde  $A_{nk}$  and  $B_K$  representan las funciones de membresía,  $x_N$  y  $y_k$  son las entradas y salidas del sistema difuso, esta regla de modelo de inferencia tiene antecedentes y consecuencias que se componen de conjuntos difusos.

**Defusificación:** El método de defusificación se puede definir para un número arbitrario de reglas  $R$  (de salida). La ecuación 2 muestra cómo se calcula  $\Delta u(t)$  (salida de un controlador) como una suma ponderada de la salida del sistema difuso:

$$\Delta u(t) = \frac{\sum_{k=1}^R a_k \Delta u_k}{\sum_{k=1}^R a_k} \quad (2)$$

Donde  $\Delta u_k$  el cambio a la salida del controlador difuso que se emite para la regla específica  $k$ , que depende de las variables de entrada de la máquina de inferencia y  $a_k$  es el grado de activación para dicha regla  $k$ .

## 2. Métodos

Para obtener el control lógico difuso para regular la temperatura al interior de un túnel de secado, que es parte del proceso en una planta empacadora se utilizó una metodología que consiste en los pasos mostrados en la figura 4.

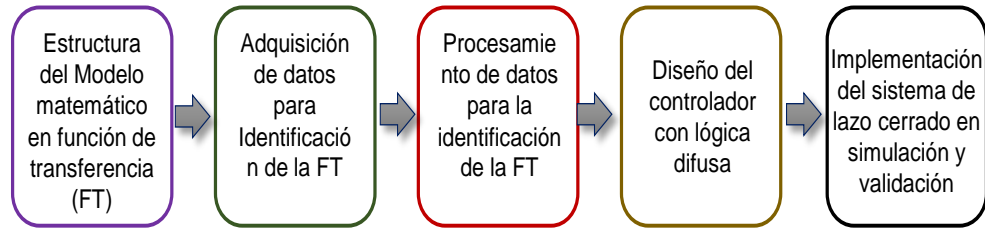


Figura 4 Metodología para el diseño del controlador basado en lógica difusa.

### Estructura del modelo matemático en función de transferencia

El modelo matemático para el sistema de control de temperatura representa la relación entre la temperatura y el suministro de combustible (gas). Se tomará como esquema una función de transferencia de segundo orden debido a que esta función obedece al comportamiento de un sistema térmico que por lo regular se representa por un sistema de primer orden propuesto por [Smith, 1998] combinado con el sistema de flujo de aire caliente cuyo modelo simplificado también puede ser representado por una función de primer orden e introduciendo un retardo en el modelo, provocado por los sensores y actuadores, se tiene la siguiente estructura de función de transferencia como base para la identificación, ecuación 3.

$$G(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} e^{-\tau_d s} \quad (3)$$

Cabe mencionar que la identificación de un sistema es un método (Figura 5) que consiste en elaborar el modelo matemático, con coeficientes numéricos, en base a datos de la entrada y salida de proceso, que se ajustan a las características dinámicas del proceso [Johansson, 1993].

### Adquisición de datos para la identificación

Para adquirir los datos se aplicó como señal de entrada un escalón (en la referencia) y midieron los datos de temperatura al interior del túnel mediante un termopar tipo J instalado a la mitad de la trayectoria de la banda transportadora. La lectura que arroja el termopar tipo J se registró mediante la tarjeta de adquisición de datos NI9211 integrada al Chasis cDAQ8172 conectada a una PC mediante puerto USB, tal como describe en la figura 6 (Hardware).



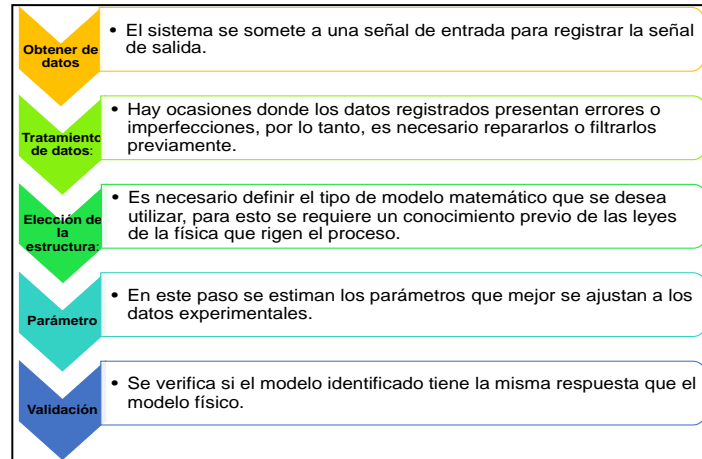


Figura 5 Pasos de la identificación de sistemas.

El programa que realiza la lectura se desarrolló en el entorno de LabVIEW de National Instruments y está constituido de las etapas indicadas en la figura 6 (Software) y que a continuación se describen:

- Configuración (A), es donde se inicializa al módulo termopar asignándole el canal físico, los valores máximos y mínimos, así como unidades. Además, se configura el archivo para registro de datos.
- Adquisición (B) está dentro del lazo principal, donde periódicamente se lee el canal del termopar hasta que se detiene la aplicación por el usuario.
- Registro de datos (C) toma lugar al cerrar el programa, donde los datos son almacenados en una hoja de Excel, para su posterior análisis.

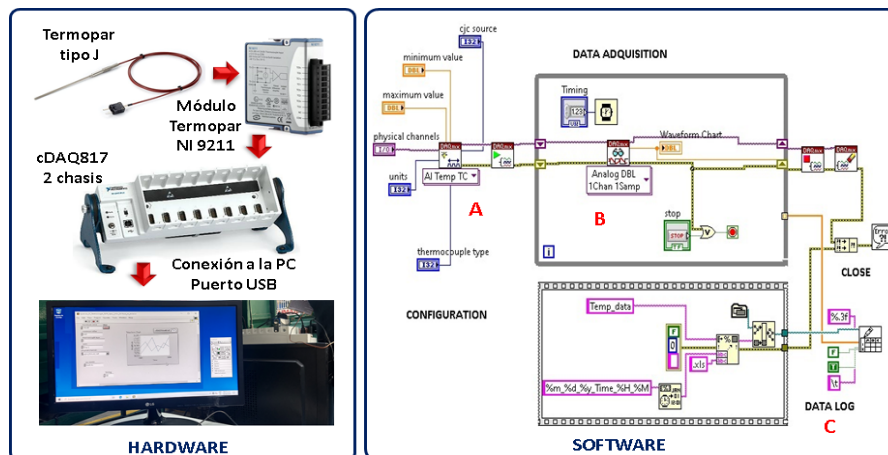


Figura 6 Arquitectura del sistema de adquisición de datos.

## Procesamiento de datos para la identificación

En el área de control se emplea la herramienta de MATLAB ident que facilita el ajuste de los parámetros en los diferentes esquemas [MATLAB, 2020]. Al ejecutar ident se abre una ventana (figura 7), que permite introducir los datos entrada-salida (1), si se necesita acondicionarlos se puede realizar un preprocesamiento (2), luego se selecciona el sistema que identificará (3). En el lado derecho de la figura 7, se seleccionan los polos y ceros, así como el retardo del sistema. Para visualizar más información del modelo obtenido hacer clic en (4).

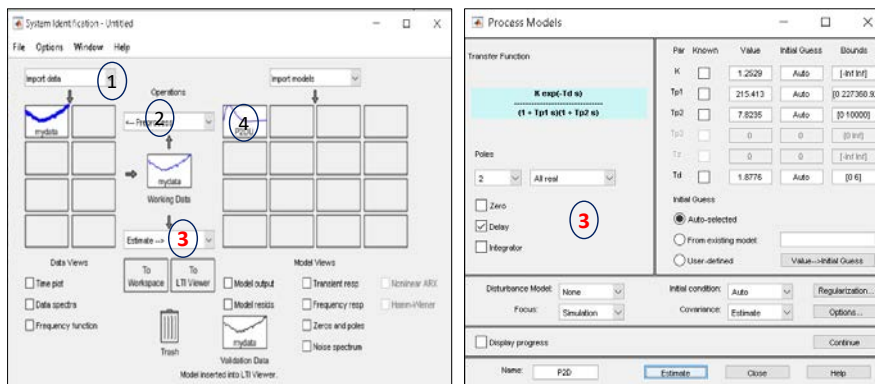


Figura 7 Herramienta para identificación de modelos de MATLAB.

## Diseño del controlador con lógica difusa

El lazo de control propuesto es un sistema Proporcional Integral Difuso como el que se muestra en la figura 8.

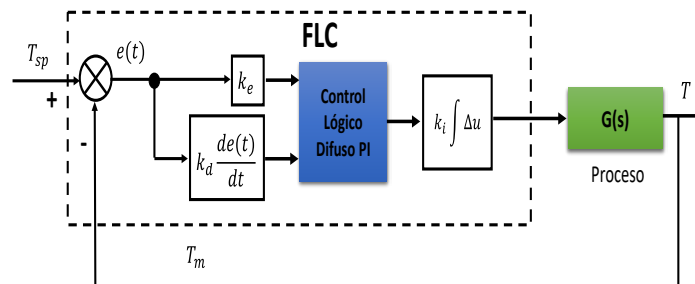


Figura 8 Sistema de control de temperatura difuso integral.

El proceso es la función de transferencia del túnel de secado, y el control es constituido de un FLC que toma como entradas el error  $e(t)$  y la derivada del error

$de(t)/dt$ . La salida del controlador es el incremento de la señal de control  $\Delta u(t)$ , la cual pasa por integrador para tener acción integral.

El propósito del controlador es mantener la temperatura a un nivel deseado,  $T_{sp}$ , por lo tanto, definimos el error como  $e(t) = T_{sp} - T_m$ , donde  $T_m$  es el valor medido. Entonces, se definen las variables lingüísticas para el sistema de control difuso, las cuales se plantean en función del error  $e(t)$  y la derivada del error, entonces de acuerdo a la figura 9, tendremos tres variables lingüísticas para cada una de las entradas definidas como negativo (N), positivo (P) y cero (C).

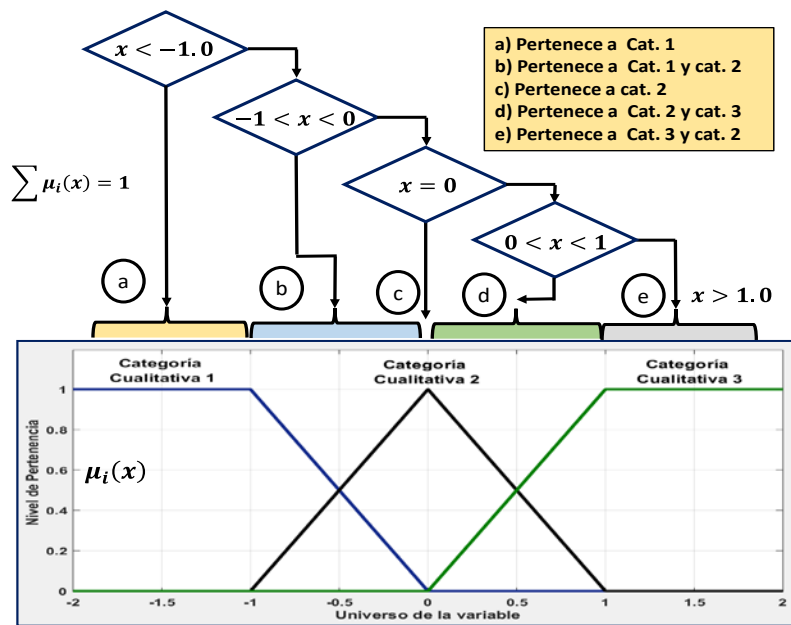


Figura 9 Funciones de membresía para la variable de control.

Las variables de entrada  $e(t)$  y  $de(t)/dt$  se han escalado para que las funciones para el rango de -1 a +1, de la siguiente manera [Dale, 2011]:

- Variable cualitativa 1 = Negativo (N) si  $e(t) < -1$  o si  $\frac{de(t)}{dt} < -1$
- Variable cualitativa 2 = Cero (C) si  $e(t) = 0$  o si  $\frac{de(t)}{dt} = 0$
- Variable cualitativa 3 = Positivo (P) si  $e(t) > 1$  o si  $\frac{de(t)}{dt} > 1$

Los niveles de pertenencia del error se denotan por  $\mu_{Ai}(x)$  y para la derivada del error se denota como  $\mu_{Bi}(x)$ . Las variables pueden estar dentro de tres variables

lingüísticas (tres categorías cualitativas) y pertenecer a estas tres o estar en valores intermedios con cierto nivel de pertenencia a cada uno. De la misma manera, se definen variables lingüísticas para la variable de salida, las cuales se describen en la figura 10. Estas variables servirán para definir las reglas de la máquina de inferencia. Las funciones de pertenencia de la salida  $\Delta u(t)$  están definidas por las cinco variables lingüísticas siguientes:

- GA = Gran Incremento = +10%
- IM = Incremento Medio = +5%
- C = Cero Incremento = 0%
- DM = Disminución Medio = -5%
- GD = Gran Disminución = -10%

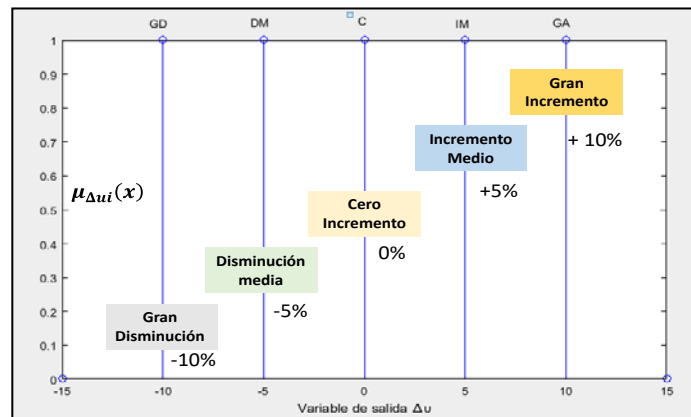


Figura 10 Niveles de pertenencia de la variable de salida.

La máquina de inferencia consta de nueve reglas que están en función del signo las variables lingüísticas del error y su derivada, tal como se muestra en la figura 11, y están sujetas al siguiente esquema de Mamdani.

		$e(t)$		
		N	C	P
$\frac{de(t)}{dt}$	$\mu_{A_i}(x)$			
	$\mu_{B_i}(x)$	N	C	P
	N	CI 1	IM 2	GA 3
	C	DM 4	CI 5	IM 6
	P	GD 7	DM 8	CI 9

Figura 11 Máquina de Inferencia.

La defusificación se realiza utilizando la ecuación 2, donde  $a_k$  está dada por ecuación 4.

$$a_k = \min[\mu_{A_k}(x), \mu_{B_k}(x)] \quad (4)$$

Lo anterior para cada una de las k reglas cuyo diagrama de flujo para implementarse en lenguaje de programación, se muestra en la figura 12.

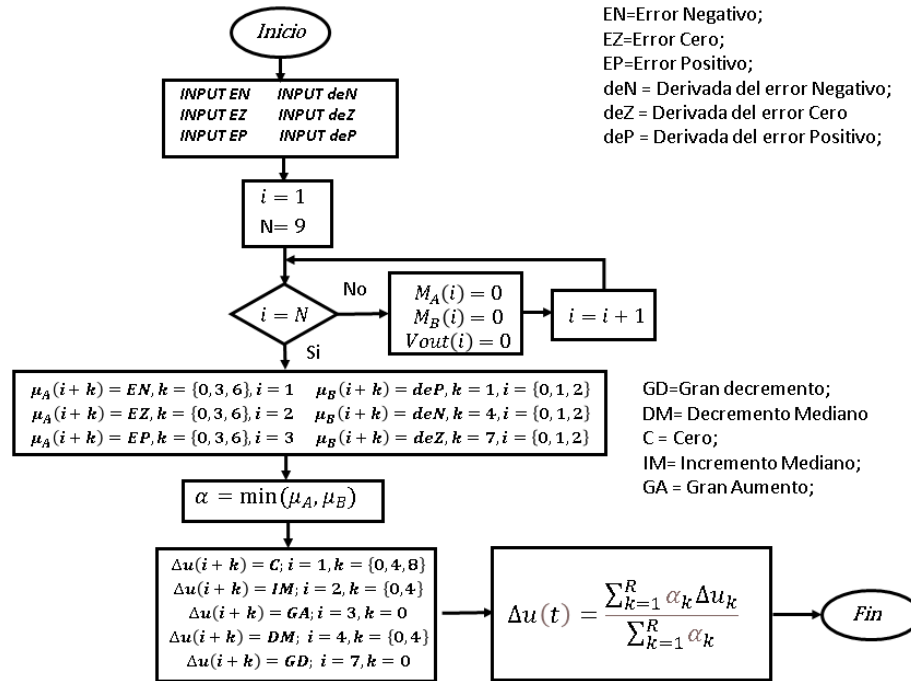


Figura 12 Diagrama de flujo para la defusificación.

### 3. Resultados

#### Modelo identificado

Con los datos experimentales obtenidos del túnel de secado mediante el sistema de adquisición de datos, descrito en la sección anterior, se realizó la identificación del sistema para una función de transferencia de segundo orden y se parametrizó con ecuación 5.

$$G(s) = \frac{35}{1681s^2 + 2235s + 1} \quad (5)$$

Además, se estableció un retardo  $\tau_d = 1.8776$ . La validación de la identificación se hizo utilizando como entrada una señal escalón aplicada al sistema en lazo abierto,

cuya respuesta experimental se puede apreciar en el lado izquierdo de la figura 13. La respuesta del sistema identificado se muestra a la derecha de la figura 13, la cual es aceptable para realizar el diseño del controlador.

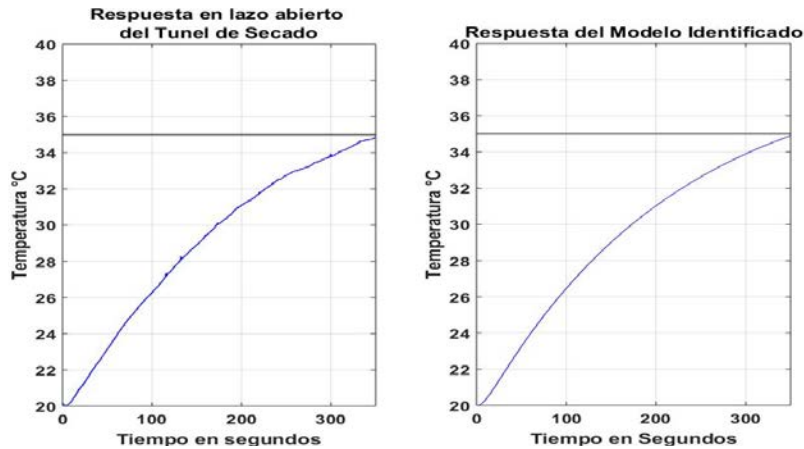


Figura 13 Curva de respuesta de la temperatura ante entrada escalón.

### Diseño del control Difuso

A partir de la función de transferencia se implementó el sistema de lazo cerrado de control, mostrado en la figura 14, que corresponde a un control difuso-PI, el cual consiste de máquina de inferencia del tipo Mamdani, tanto para error  $e(t)$  como para la derivada del error  $de(t)/dt$ , así como para las reglas de defusificación que permiten obtener la salida de control ( $\Delta u(t)$ ).

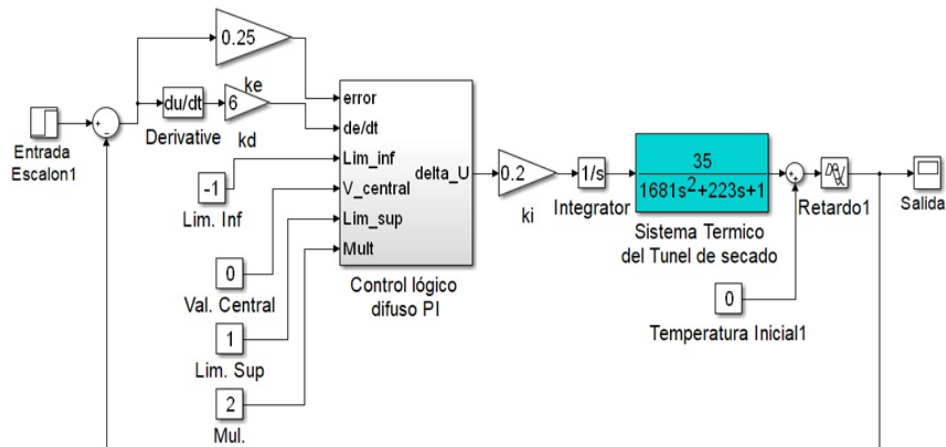


Figura 14 Control lógico difuso PI en lazo cerrado.

La figura 15 muestra los bloques internos del controlador que corresponden a los fusificadores de las entradas y el defusificador que entrega la salida. Los niveles de pertenencia para la entrada se muestran en la figura 9, mientras que los niveles de pertenencia para la variable de salida se describen en la figura 10. La máquina de inferencia se presenta en la figura 11 y el bloque de defusificación tiene el código descrito en la figura 12.

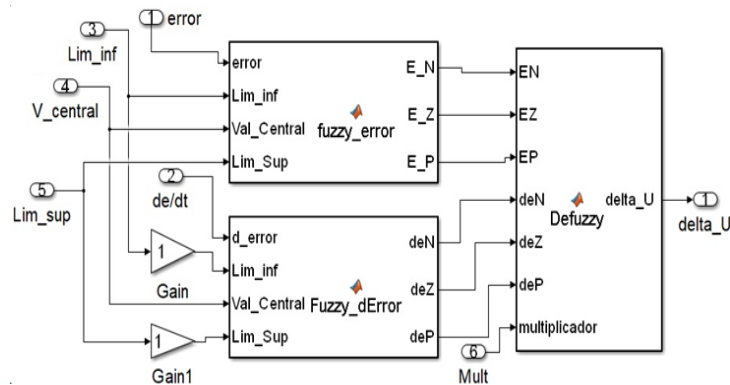


Figura 15 Implementación lógico difuso PI (Interna).

### Diseño de un control PID

Con estos parámetros también se sintonizó un controlador PID (para compararlo con el propuesto) con el método de Ziegler and Nichols [Aström, 1995]. Se obtuvieron la ganancia proporcional y los tiempos integral y derivativo  $K_p = 1.8$ ,  $T_i = 0.01$ , y  $T_d = 0.01$ . Entonces, teniendo la función de transferencia y el controlador se implementó la simulación en SIMULINK MATLAB, cuyo sistema de lazo cerrado se muestra en la figura 16.

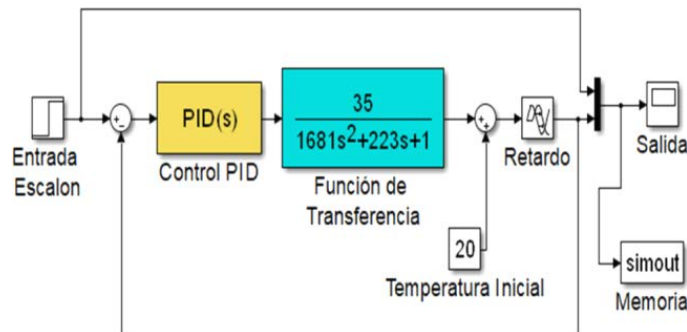


Figura 16 Implementación del sistema de control en lazo cerrado.

Nótese que se puede establecer una temperatura inicial del sistema, y el sistema puede alcanzar el valor deseado sumando este valor inicial.

Se realizó la simulación simultanea de ambos controladores en paralelo, donde ambos se sometieron a una entrada escalón y las salidas de estos se visualizan simultáneamente de forma gráfica en la figura 17.

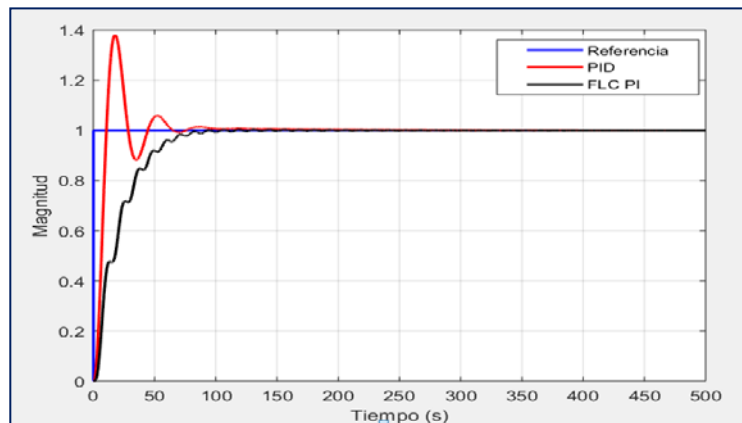


Figura 17 Respuesta de los controles FLC-PI y PID.

La simulación en lazo cerrado muestra las respuestas para el control PID con el trazo de color rojo, para el control difuso con el trazo en color negro y la entrada o referencia es el escalón con el trazo color azul. Al comparar ambos controladores se puede constatar que la respuesta de salida alcanza el valor en estado estable a los 100 segundos. Ciertamente el control PID también llega al valor en estado estable en el mismo tiempo, pero este presenta un sobrepico a los 10 segundos, lo cual no es deseable puesto que estresa al sistema térmico y produce un calor excesivo en el interior del túnel que afecta al producto. Por lo tanto, el control difuso demuestra un buen desempeño del sistema de control de temperatura del túnel de secado.

#### **4. Discusión**

Como se puede observar, con los parámetros de la identificación se implementó el modelo en simulación el lazo abierto cuya respuesta fue semejante a la del sistema físico, de acuerdo con las gráficas de la figura 13. Luego, con este modelo



se diseñó un control lógico difuso para regular la temperatura del túnel de secado siguiendo el esquema del control lógico difuso PI propuesto en la figura 8, cuya máquina de inferencia se presenta en la figura 11. La simulación en lazo cerrado se muestra en la figura 14. y se compara con el control PID, donde se puede constatar que la respuesta a la salida alcanza el valor en estado estable a los 100 segundos. Ciertamente el control PID también llega al valor en estado estable en el mismo tiempo, pero este presenta un sobresalto a los 10 segundos, lo cual no es deseable puesto que estresa al sistema térmico y produce un calor excesivo en el interior del túnel que afecta al producto y representa un gasto mayor de gas para la empresa. Por lo tanto, el control difuso demuestra un buen desempeño del sistema de control de temperatura del túnel de secado.

## **5. Conclusiones**

Los resultados muestran que el sistema de control permite regular la temperatura de un túnel de secado, mejorando la calidad del secado del producto, lo que reduce pérdidas debido a producto no conforme y aumenta el tiempo de vida de la fruta en anaquel, así como un ahorro en el consumo de energía.

Como trabajo futuro se recomienda combinar el control de temperatura con la velocidad de aire. Por otro lado, se propone como trabajo futuro construir un prototipo a escala para validar los resultados obtenidos en simulación.

## **Agradecimientos**

Este trabajo fue parcialmente financiado por el programa de becas CONACYT, el Tecnológico Nacional de México y agradecemos las facilidades brindadas por la empresa Veca Produce SA de CV.

## **6. Bibliografía y Referencias**

- [1] Aström Karl J. and Hagglund T. PID Controllers theory design and tuning, second edition, Research Triangle Park, NC, 1995.
- [2] Babuška, R., and H.B. Verbruggen, An Overview of Fuzzy Modeling for Control Engineering Practice, Vol 4 No. 11, pp. 1593-1600, 1996.

- [3] Azharul Karim and Hawlader M.N.A, A Mathematical modelling and experimental investigation of tropical fruits drying, *Int. J. of Heat and Mass Transfer* Vol. 48, pp. 4914–4925, 2005.
- [4] Belghit A, Kouhila M, Boutaleb EC, Experimental Study of Drying Kinetics of Sage in a Drying Tunnel Working in Forced Convection. *Rev. Energ. Ren.* Vol. 2, pp. 17-26, 1999.
- [5] Controles preventivos de alimentos para humanos, FDA; 21 CFR 117.3. Pág. 13, Primera edición, 2016.
- [6] Dale S, Thomas F. E., Ducand A. M and Francis J. D., *Process Dynamic and Control*, 3<sup>rd</sup> Edition, Wiley, USA, 2011.
- [7] Dürr Robert et al, Self-tuning control of continuous fluidized bed drying of baker's yeast pellets, *Drying technology*, Vol. 38, pp. 646–654, 2020.
- [8] FAO, Manual para el mejoramiento del manejo de post cosecha de frutas y hortalizas: <http://www.fao.org/docrep/x5055S/x5055S00.HTM>, 1987.
- [9] Getting Started with System Identification Toolbox, MATLAB, The MathWorks Inc, USA: <https://www.mathworks.com/help/ident>. 2020.
- [10] Jantzen, j., *Foundations of Fuzzy Control*, Adison Wiley, New York, 2007.
- [11] Jiau X. et al, Microbiological Risk Assessment in Food, in *Food Safety in China*, Ed. Joseph J, pp. 287-305, 2017.
- [12] Johansson. R. "System Modelling and Identification". Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1993.
- [13] Lutfy Omar F., Selamat Hazlina, and Mohd Noor S. B., Intelligent Modeling and Control of a Conveyor Belt Grain Dryer Using a Simplified Type 2 Neuro-Fuzzy Controller, *Drying Technology*, Vol. 33, pp. 1210–1222, 2015.
- [14] Mabrouk Salah, Khiari Besma and Sassi Mohamed, Modelling of heat and mass transfer in a tunnel dryer, *Applied Thermal Engineering* Vol. 26, pp.110–2118, 2006.
- [15] Martinez R., Overview of Mexico 's Citrus Industry, *Citrus ind. mag*: <http://citrusindustry.net/2018/04/11/mexican-citrus-discussed/>\_2018.
- [16] Miliotis M. Role of microbial risk assessment in food safety. *South African Medical Journal*, vol. 97 No.11, pp. 1211-1214, 2007.

- [17] Maldonado, Ronald, & Graziani, Lucía. Herramientas estadísticas de la calidad para la diagnosis: estudio de un caso en la industria de productos cárnicos. *Interciencia*, Vol. 32 No. 10, pp. 707-711, 2007.
- [18] Murray Ricardo, Candan Ana, Vázquez Daniel, Manual de postcosecha de frutas: manejo integrado de patógenos M31.2a ed., INTA, Argentina, 2019.
- [19] Passino, K. M., and S. Yurkovich, Fuzzy control, Addison-Wesley, USA, 1998
- [20] Rhinehart, R. R., H. H. Li, and P. Murugan, Improve Process Control Using Fuzzy Logic, *Chem, Eng. Progress*, Vol. 92 No. 11, pp. 60-70, 1996.
- [21] Romdhane N. G et al., Effect of Air-Drying Temperature on Kinetics of Quality Attributes of Lemon (*Citrus limon* cv. *lunari*) Peels, *Drying Technology*, Vol. 33, pp. 1581–1589. 2015.
- [22] Smith Carlos. A. and Corripio Armando B. Principles and practice of automatic process control, 2nd edition, Editorial: John Wiley, 1997.
- [23] Yadollahinia A.R., Omid M. And Rafiee S., Design and Fabrication of Experimental Dryer for Studying Agricultural Products, *Int. J. of Agriculture and Biology*, Vol. 10, 2008, pp. 61-65.
- [24] Zanoelo E.F., Abitante A, Meleiro L.A.C., Dynamic modeling and feedback control for conveyors-belt dryers of mate leaves, *Journal of Food Engineering* Vol. 84, pp. 458–468, 2008.
- [25] Zhu A. and Shen X., Model and mass transfer characteristics of convection drying of peach slices, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 72, pp. 345–351, 2014.