

Modelado con lógica fuzzy de sistema controlado con función transferencia desconocida: un caso de estudio

Miguel A. Azar¹, Sergio L. Martínez¹ & Jesús Manero²

(1) *Inteligencia Artificial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Jujuy.*
aaazar@live.com; smartinez@fi.unju.edu.ar

(2) *Cultivos Industriales, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Jujuy.*
jmanero@fca.unju.edu.ar

RESUMEN: los sistemas de control tradicionales utilizan un modelo matemático que describe el comportamiento de la planta o sistema controlado. Cuando ese modelo es desconocido o bien su obtención es altamente compleja, es posible reemplazarlo por un sistema fuzzy logic que responda de forma similar. En este trabajo se modela e implementa un sistema de curado de tabaco, asociado a un sistema de control, desarrollado con lógica fuzzy. Los resultados son contrastados con mediciones directas sobre una estufa real bajo similares condiciones, mostrando la eficiencia del sistema desarrollado.

Área: Ciencias Aplicadas. Disciplina: Ciencias Tecnológicas. Subdisciplina: Ingeniería.

1 INTRODUCCION

Los sistemas de control retroalimentados en general cuentan con variables de entrada de referencia, variables de salida, un bloque de control y la planta a controlar. Dicha planta (proceso o sistema controlado) es el sistema u objeto comandado por el sistema de control con retroalimentación (DiStefano et al., 1992).

El primer paso en el análisis de un sistema dinámico, es elaborar su modelo es decir la descripción matemática de las características dinámicas del sistema (Ogata, 2003). Tal modelo en algunos casos no es posible obtenerlo por razones de complejidad, pero el comportamiento del sistema puede ser descrito por un experto mediante variables lingüísticas.

El presente trabajo aborda esa problemática y plantea un caso de estudio exitoso aplicado al control de temperatura de estufas para el secado de tabaco mediante sistemas fuzzy.

2 EL CURADO DEL TABACO

2.1 Conceptos previos

La producción de tabaco es un proceso que se desarrolla en cuatro fases (Guzmán Pérez et al., 1983), que son: 1) Cultivo, 2) Recolección, 3) Curado (o secado de la hoja) y 4) Procesado. El curado es la fase de mayor importancia y se define como el proceso mediante el cual se dirigen las reacciones biológicas (químicas) de la hoja de tabaco para lograr la calidad prefijada.

Para el tabaco tipo Virginia se emplea el curado a fuego indirecto [1] mediante estufas a gas que permiten, a través del calor que generan, amarillar y secar las hojas de tabaco. La estufa (Fig. 1) consiste en una cámara o recinto cerrado que utiliza calor artificial proveniente de la combustión de gas.



Figura 1. Esquema simplificado de una estufa para secado de tabaco.

Actualmente se ha extendido el uso de estufas Bulk-Curing o de Circulación Forzada (Agrovisión NOA, 1997). Con éstas el curado se realiza en forma semiautomática, debiendo ser necesaria la intervención de un operario especializado (denominado comúnmente como estufero) dedicado

completamente al control de dicho proceso. La condición de especializado se debe a que el control que realiza –de acuerdo a su criterio– difiere según las características de la hoja con la que se esté tratando.

Según Llanos Company (1981), las hojas se clasifican por la posición que ocupan a lo largo del tallo (pisos foliares). Los pisos foliares pueden ser:

- Bajera,
- Media,
- Superior o corona.

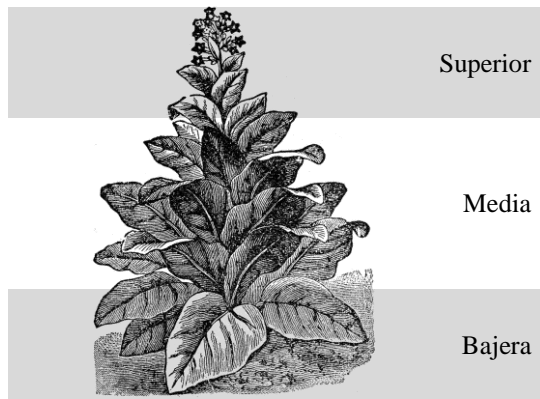


Figura 2. Pisos foliares de la planta de tabaco.

2.2 El proceso de curado

El curado es un proceso de secado o pérdida de agua en condiciones controladas para que las hojas de tabaco, mantengan el mayor tiempo posible su actividad biológica a fin de que los cambios químicos y bioquímicos se produzcan del modo más apropiado para conseguir un producto de alta calidad (Llanos Company, 1981). El curado se divide en 4 fases:

- 1) Amarillamiento (o amarillo),
- 2) Fijación de color,
- 3) Secado de lámina y
- 4) Secado de nervadura (o secado de vena).

En estas fases el operario o estufero manipula las válvulas de gas a fin de lograr un control de la temperatura de la cámara de secado. El programa o conjunto de curvas predeterminadas que el estufero trata de seguir, depende de la madurez de las hojas de tabaco, de la humedad inicial presente luego de cargar las hojas en la cámara y del piso foliar del cual provienen las hojas. La duración del proceso de secado es de aproximadamente ocho días, dependiendo de las variables mencionadas.

No existe un programa o secuencia específica de pasos a seguir para lograr un estufado exitoso.

Cada bibliografía proporciona diferentes formas de llevar a cabo el control del estufado.

La mayoría de los sistemas de control posee una entrada de referencia constante, sin embargo para este caso en estudio el estufero mantendría una temperatura de referencia variable, según su criterio. Para el experto la temperatura de referencia está regida por una gama de curvas predeterminadas. Su método se basa en una sucesión de reglas empíricas pero respetando las recomendaciones proporcionadas por la bibliografía especializada. Las distintas curvas que el estufero intenta seguir son similares entre ellas y poseen una pendiente ascendente. Esta situación se ve reflejada en la Fig. 3 (curva genérica recomendada por Massalín Particulares), en donde se puede observar solo una de las curvas de referencia en donde, a medida que avanza el tiempo, la temperatura se va incrementando gradualmente hasta llegar a un máximo de 71 °C.

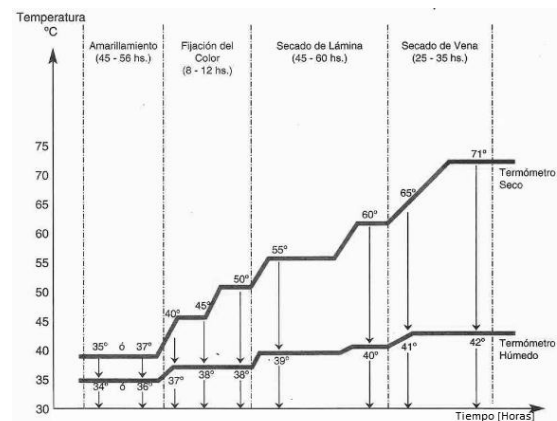


Figura 3. Curvas de temperatura genéricas durante el proceso de secado (Massalín Particulares).

En palabras del experto, la variación de temperatura de referencia va a estar en función de las siguientes condiciones iniciales:

- 1) Madurez de la hoja. La hoja que ingresa al secadero puede estar verde, madura o sobremadura.
- 2) Piso Foliar. Es la procedencia o ubicación de la hoja respecto al tallo y puede ser Bajera, Media, Superior o Corona (Fig. 2). Las hojas de la parte media y superior poseen el mismo cuerpo o grosor, por lo tanto son indistintas para el experto.
- 3) Temperatura inicial. Es la temperatura que posee la estufa antes de iniciar el curado. Esta puede ser alta o baja. La temperatura inicial puede considerarse un parámetro fuzzy ya que el estufero la considera de esa forma (alta o baja). En palabras del experto: una temperatura baja es de unos 20 °C. A partir de los 25 °C a 30 °C ya es alta.

4) Fase. La Fase tiene una definición precisa (amarilleo (A), fijación de color (FC), secado de lámina (SL) y secado de vena (SV)), sin embargo el momento de cambio de una fase hacia la otra no está nítidamente definido. En general la bibliografía especializada y los expertos coinciden en que no se inicia una fase una vez que finaliza la anterior sino que el cambio de fase es gradual (Fig. 4). El solapamiento existente entre las fases del curado de tabaco es lo que permite definir a la variable Fase como una variable difusa o fuzzy convencional.

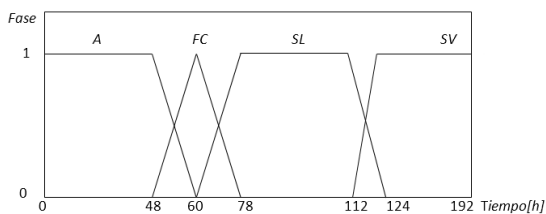


Figura 4. Conjunto fuzzy de la variable Fase.

Este conjunto de variables (Madurez, Piso foliar, Temperatura inicial y Fase) condiciona las decisiones a tomar por parte del experto sobre como realizará el estufado. Dicho de otro modo, el experto posee un programa diferente de curvas de temperatura para cada combinación de variables iniciales.

3 ANALISIS DEL CASO EN ESTUDIO

3.1 Modelado de la cámara de secado

Para el control de secado los operarios expertos (o estuferos) utilizan una sucesión de reglas ambiguas que no pueden ser modeladas mediante la lógica convencional.

Para el caso en estudio, se puede observar una tendencia muy notable de requisitos definidos en forma ambigua. Así por ejemplo, durante la educación el experto emplea la expresión siguiente: Para comenzar el amarilleo hay que medir la temperatura de bulbo seco en ese momento. Si es alta se abre la válvula de gas al mínimo para que aumente la temperatura lentamente.

Esto denota claramente que desde el punto de vista lingüístico existen definiciones imprecisas tales como: alta, mínimo y lentamente. El hecho de que las expresiones vertidas por parte del experto tengan características difusas no significa que sean inconsistentes. El principal control efectuado por parte del estufero es el de la apertura de la válvula de gas para aumentar o disminuir la temperatura en el interior de la estufa. El estufero a partir de una temperatura de referencia, que él

conoce por su expertitud, ajusta la apertura de la válvula de gas de manera que el error entre lo medido y lo deseado tienda a anularse.

Como se indicó anteriormente, el primer paso y el más importante en el análisis de un sistema dinámico, es elaborar su modelo. El modelo matemático de un sistema describe la respuesta de éste ante una determinada señal de entrada.

Ahora bien, para el caso en estudio, la elaboración de un modelo matemático de la respuesta en temperatura ante cambios en las variables de control resulta altamente compleja de definir dado que requiere un estudio intensivo de las variables involucradas. No obstante, la respuesta en temperatura ante los cambios de la apertura/cierre de la válvula de gas, fueron proporcionadas por el experto. Esta información permite un modelado fuzzy del sistema controlado en lugar de un modelado matemático estricto.

La Tabla 1 muestra la base de reglas fuzzy que utiliza el experto para describir la respuesta del sistema controlado (estufa) ante los cambios en la apertura de la válvula de gas.

Tabla 1. Set de variables fuzzy descriptivas del sistema controlado según el experto.

		AG				
		N	B	ME	A	MA
d(AG)	N	N	LEP	LIP	VP	VP
	B	LEN	N	LEP	LIP	VP
	ME	LIN	LEN	N	LEP	LIP
	A	VN	LIN	LEN	N	LEP
	MA	VN	VN	LIN	LEN	N

En donde: AG = Apertura de gas; d(AG) = Diferencial de AG; N = Nula; B = Baja; ME = Media; A = Alta; MA = Máxima; LEN = Lento negativo; LIN = Ligeramente negativo; VN = Veloz negativo; LEP = Lento positivo; LIP = Ligeramente positivo y VP = Veloz positivo.

La apertura de la válvula de gas es una variable fuzzy dado que el operador define el control de su apertura o cierre mediante expresiones lingüísticas difusas, tales como: mínimo, máximo, menos del máximo y un poco más del mínimo.

La Tabla 2 muestra el universo de discurso que abarcan las variables de salida del sistema controlado.

Tabla 2. Variables fuzzy de salida.

Variable abreviada	Tasa de variación de temperatura	Tasa °C/hora
VP	6 horas/°C	0.66
LIP	3 horas/°C	0.33
LEP	1.5 horas/°C	0.15
N	<1.5 horas/°C	<0.15 >-0.15
LEN	1.5 horas/°C	-0.15
LIN	3 horas/°C	-0.33
VN	6 horas/°C	-0.66

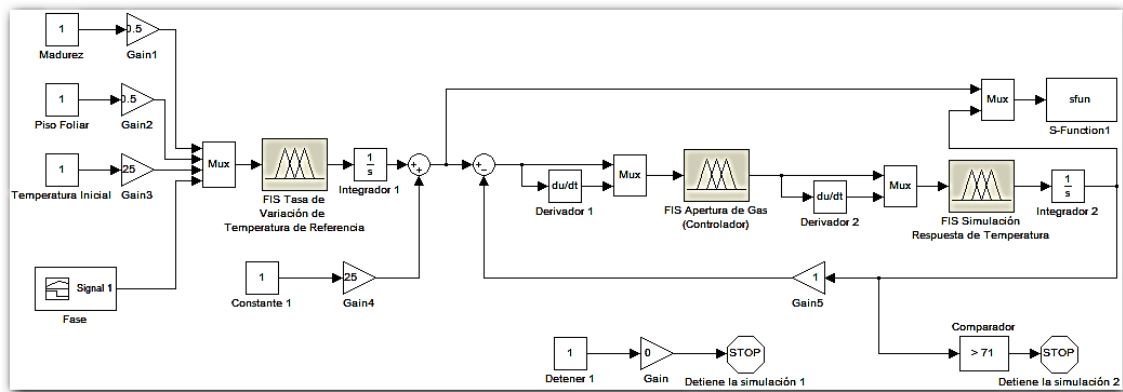


Figura 5. Esquema del modelo completo sobre Simulink-Matlab®.

3.2 Modelado del sistema de control

En la Fig. 5 se ilustra el modelo completo del sistema de control de temperatura desarrollado sobre el entorno de simulación gráfica de MatLab®, que incluye la cámara de secado. El bloque identificado como FIS (Fuzzy Inference System) Simulación Respuesta de Temperatura es el que modela la base de reglas representada en la Tabla 1; es decir, simula el comportamiento de la estufa sólo con las expresiones aportadas por el experto sobre cómo responde la cámara de secado ante las variaciones de la válvula de gas.

La salida del FIS Apertura de Gas modela el controlador fuzzy que recibe como entrada el error proveniente del sumador y su derivada. La salida de este FIS es la variable AG. El universo en discurso de AG está comprendido entre 0 y 1 (0 apertura nula, 1 apertura máxima).

El estufero hace referencia a “aumentar lentamente la temperatura o mantener la temperatura sin dejar enfriar el secadero”, es por ello que el resultado de las reglas también se expresa en esos términos.

La base de reglas pertenecientes al control de la apertura de gas está diseñada a partir de la plantilla de reglas de MacVicar-Whelan (Cheong, 2008).

4 IMPLEMENTACION

En base a las reglas obtenidas para el control de la planta se implementó un prototipo fuzzy. El modelo es un sistema continuo de simulación normal cuyo tiempo límite se estableció en 11.520 unidades de tiempo. Este valor se determinó debido a que cada intervalo de tiempo representa un minuto (el tiempo máximo de estufado son 8 días, es decir 11.520 minutos).

Este modelo utiliza las funciones personalizadas S-functions que proporcionan un mecanismo eficaz para ampliar las capacidades del entorno Simulink® [2]. Una S-function es la descripción,

en lenguaje máquina, de un bloque de Simulink® (MathWorks, 2001).

La Fig. 6 ilustra la aplicación desarrollada sobre una interfaz gráfica (GUI) de MatLab®, luego de ejecutada la simulación. Se puede apreciar la linealización de la curva para los mismos parámetros de entrada.

La linealización como puede observarse se realizó por tramos, en donde cada uno de éstos representa una fase del proceso de curado.

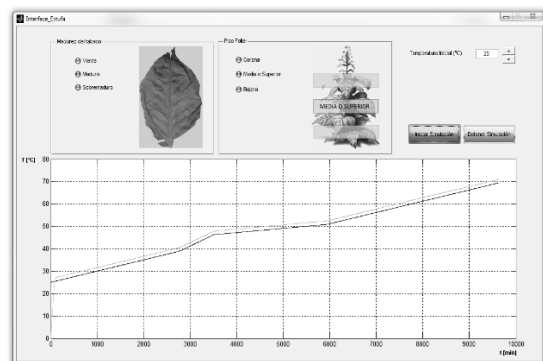


Figura 6. Resultados de la simulación del proceso de secado de tabaco obtenidos con el sistema de la Fig. 5.

5 EVALUACION

Los resultados obtenidos a través de las diferentes gráficas generadas por el sistema fueron contrastados con mediciones efectuadas *in situ* en estufas Bulk Curing, para las mismas condiciones de entrada, mediante el empleo de un registrador de temperatura electrónico marca UMMI.

Para la evaluación del prototipo, se consideraron como parámetros de comparación las pendientes obtenidas y el tiempo total de cada fase en el sistema, contra los mismos parámetros medidos en casos exitosos de mediciones sobre estufas Bulk Curing. Las pendientes comparadas fueron

tomadas por tramos, es decir, para cada fase del proceso se consideró su pendiente por separado. Para obtener las pendientes de las curvas medidas se las linealizó utilizando el método de mínimos cuadrados. En la Fig. 7 se muestra la gráfica de una medición realizada con los siguientes parámetros: Estufa: Bulk Curing, Madurez del Tabaco: Maduro, Piso Foliar: Superior, Temperatura Inicial: 26 °C.

El eje de ordenadas graduado entre 0 y 100 representa la temperatura en grados Celsius. La curva posee al inicio un valor de 26 °C y de 71 °C al finalizar el proceso de curado. Los picos y valles observados en las curvas denotan la complejidad de controlar en forma manual la temperatura.

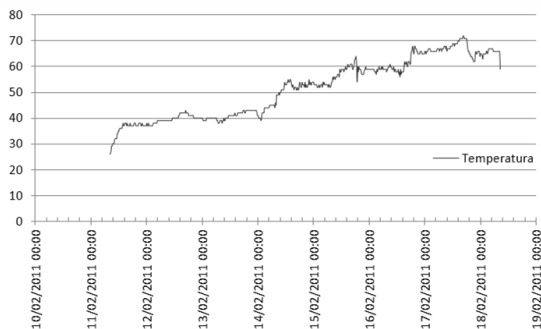


Figura 7. Curva de temperatura medida sobre una estufa Bulk Curing.

6 CONCLUSIONES

Para este trabajo se diseñó e implementó un modelo de estufa de secado de tabaco del tipo Bulk Curing, basado en lógica fuzzy, asociado a un sistema de control desarrollado con la misma tecnología.

La lógica fuzzy, además de su utilización muy difundida y relativamente creciente en sistemas de control, es una buena alternativa para el modelado de sistemas controlables en los cuales su función transferencia es desconocida o bien de difícil configuración matemática debido a su alta complejidad.

El empleo del entorno MatLab® constituyó una excelente alternativa de aplicación para la determinación de los resultados del modelo y la constatación con los datos empíricos en forma rápida y confiable.

Los resultados de la simulación fueron contrastados con mediciones directas sobre una estufa real del mismo tipo y bajo similares condiciones iniciales, mostrando un muy buen ajuste de la curva de secado (Fig. 6).

Es importante también remarcar que en el caso de estudio presentado el factor tiempo no es crítico; no obstante, en sistemas de tiempo real o pseudo-

real en donde 1 milisegundo puede ser determinante, los sistemas basados en lógica fuzzy no serían una buena alternativa salvo que los cálculos empleados en el método de defuzzificación sean los más simples tales como los de tipo LOM (Largest of Maximum), SOM (Smallest of Maximum) o MOM (Middle of Maximum). Los métodos como Centroide y Bisector requieren mayor capacidad de cómputo y por tanto ese costo computacional se ve reflejado en el tiempo de respuesta del sistema fuzzy.

7 BIBLIOGRAFIA

Agrovisión NOA, *Circulación Forzada y Optimización de Estufas*, Horacio David & Asociados, Argentina, 1997.

Cheong F., *A hierarchical fuzzy system with high input dimensions for forecasting foreign exchange rates*, Int. J. Artificial Intelligence and Soft Computing Vol. 1 No. 1, 2008.

DiStefano, J., A. Stubberud & I. Williams, *Retroalimentación y Sistemas de Control*, McGraw Hill, Los Ángeles, U.S.A., 1992.

Ogata, K., *Ingeniería de Control Moderna*, Prentice Hall Hispanoamericana S.A., Minnesota, USA., 2003.

Guzmán Pérez, J. L. & B. Muñoz Muñoz, *Recolección y Curado de los Tabacos Amarillos Tipo Virginia*, Hojas Divulgadoras Núm. 11/83 Publicaciones de Extensión Agraria Neografis, Madrid, España, 1983.

Llanos Company, M., *El tabaco manual técnico para el cultivo y curado*, Ediciones Muni-Prensa, Madrid, España, 1981.

MathWorks Inc. *Simulink® Model-Based and System-Based Design Writing S-Functions*, The MathWorks, Natick, U.S.A., 2001.

[1] Philip Morris International Growing Tobacco, http://www.pmi.com/eng/our_products/growing_tobacco/pages/growing_tobacco.aspx, 19 de Febrero de 2013.

[2] MathWorks® R2011b Documentation Center Simulink® What is an S-function? <http://www.mathworks.com/help/simulink/sfg/what-is-an-s-function.html>, 09 de Junio de 2013.