

## ESTRATEGIAS DE CONTROL DIFUSO PARA UN SISTEMA ALINEAL BIVARIABLE

### FUZZY CONTROL STRATEGIES FOR A TWO-VARIABLE NONLINEAR SYSTEM

JUAN L. HERNÁNDEZ SÁNCHEZ<sup>1</sup> Y CRISTIÁN CUADRA ALVARADO<sup>2</sup>

#### RESUMEN

Se presentan cuatro estrategias de control difuso para sistemas alineales bivariantes, extensibles a casos multivariantes. Las cuatro estrategias son evaluadas comparativamente en su aplicación en diseño de controladores difusos para una planta alineal de dos entradas y dos salidas, que consiste en un estanque agitado en que se controlan el caudal y concentración de salida mediante dos caudales de entrada. Los desempeños de las estrategias se evalúan por medio de un paquete de software MATLAB-SIMULINK, se presentan algunos resultados obtenidos y se formulan conclusiones pertinentes.

PALABRAS CLAVES: Control automático, Control difuso, Control multivariable, Estrategias de control.

#### 1. INTRODUCCION

En este trabajo se presentan cuatro estrategias de control difuso (fuzzy) aplicadas a un sistema alineal bivariante, con dos entradas y dos salidas. Las estrategias son extensibles a plantas multivariantes pero, por razones de espacio y mejor comprensión, se considera aquí sólo el caso concreto del control de concentración y caudal en un estanque ilustrado en la Figura 1 (Kwakernaak and Sivan 1972).

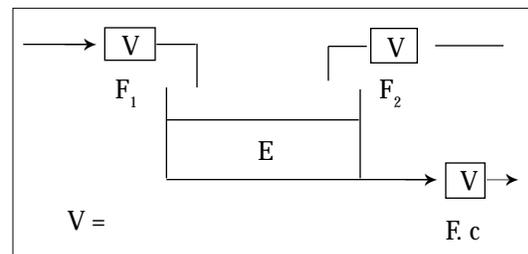


Figura 1. Estanque agitado.

En la Figura 1, el estanque E es alimentado por caudales  $F_1$  y  $F_2$ , con concentraciones  $c_1$  y  $c_2$ , respectivamente y se desea controlar el caudal de salida  $F$  y su concentración de mezcla  $c$ , conforme a ciertos criterios.

En los enfoques de control clásico se plantea un modelo matemático, basado en ecuaciones diferenciales alineales (Kwakernaak

<sup>1</sup>Departamento de Electrónica, Universidad Técnica Federico Santa María, Casilla 110-V, Valparaíso, Chile. E-mail: jhs@elo.utfsm.cl.

<sup>2</sup>Universidad Técnica Federico Santa María.

and Sivan, 1972), entre las variables de salida ( $F$ ,  $c$ ) y las variables de entrada  $F_1$  y  $F_2$ . Para aplicar las técnicas del control clásico lineal se asume que las concentraciones  $c_1$  y  $c_2$  son constantes y se efectúan linealizaciones taylorianas.

Sin embargo, el control de tal sistema puede ser efectuado por un operador humano que, aunque no conozca las leyes físicas o químicas involucradas, puede aplicar ciertas reglas, prescritas a priori, conforme a lecturas de instrumentos apropiados. El interés en automatizar este tipo de control, substituyendo al operador y sus razonamientos, ha conducido a esquemas de control difuso, basados en lógica borrosa o imprecisa (fuzzy), de muy amplia aplicación y desarrollo actuales.

Algunas referencias básicas son Chen (1996), Marks (1994) y Yen *et al.* (1995), entre muchas otras, que crecen en forma exponencial.

Las cuatro estrategias de control difuso presentadas en este trabajo son comparadas entre sí y se formulan algunas conclusiones. Las simulaciones se efectúan en el software MATLAB-SIMULINK (licenciado al Departamento de Electrónica, UTFSM).

## 2. CONTROL DIFUSO

### 2.1. Generalidades

Las técnicas del control difuso tratan de emular al operador humano que controla plantas o procesos alineales complejos por medio de reglas, lingüísticas por ejemplo. Se eliminan así los altos contenidos de matemática y física de un proceso y se va directamente al nivel en que trabaja el sistema.

### 2.2. Estructura del control difuso

En la Figura 2 se ilustra un esquema básico de control difuso.

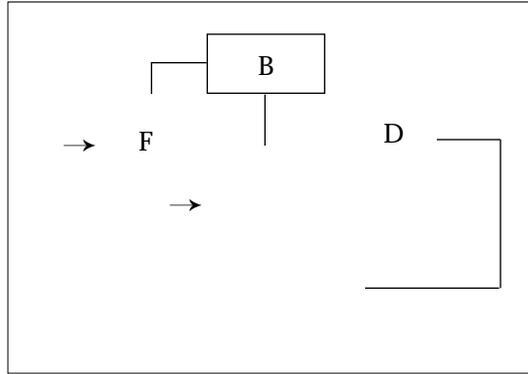


Figura 2. Esquema de control difuso.

En la Figura 2, “planta” es el sistema o proceso a controlar. El controlador difuso consta de cuatro bloques: B, base del conocimiento, que contiene las reglas de control aplicables; F, difusificador, que convierte datos numéricos a términos lingüísticos y grado de pertenencia a un conjunto de lógica difusa, previamente especificada; L, proceso lógico (inferencia) que decide las reglas que se deben aplicar; D, desdifusificador, que transforma los valores entregados por las reglas en un solo valor, que representa la acción conjunta y ponderada de las actuaciones o controles, a aplicar a la planta.

En las referencias antes citadas aparecen mayores detalles sobre los fundamentos del control difuso.

### 3. ESTRATEGIAS DE CONTROL DIFUSO ADOPTADAS

Las cuatro estrategias consideradas en este trabajo son explicadas en base al esquema general de la Figura 3.

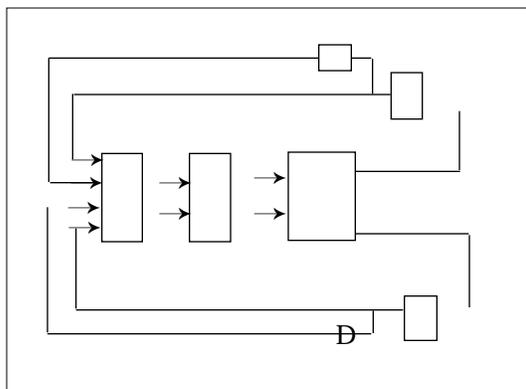


Figura 3. Esquema de control bivariable difuso.

En la Figura 3, el caudal  $F$  de salida es restado, en  $D_1$ , de la referencia de caudal  $RF$  para dar el error de caudal  $EF$  y, mediante el bloque  $D$ , el cambio del error de caudal  $DEF$ . Las señales  $EF$  y  $DEF$  se aplican al controlador difuso  $CD$ , que genera la actuación del caudal  $F_1$ . Lo correspondiente a la concentración  $c$  es similar ( $RC$ ,  $D_2$ ,  $EC$ ,  $DEC$  y actuación  $F_2$ ). El bloque  $S$  incluye integradores, si se consideran.

Los cuatro métodos de control difuso (CD) considerados son: 1. CD monovariante para cada lazo; 2. CD bivariable; 3. CD monovariante con integrador para cada lazo; 4. CD bivariable con integrador. En los casos 1 y 3 el bloque CD consiste en bloques CD separados para cada lazo.

Los métodos 1 y 2 están basados en experiencia del operador del proceso y los 3 y 4 se basan en experiencia en respuestas.

Por simplicidad, de explicación solamente, se asume que  $F$  es controlado por  $F_1$ , y  $c$  por  $F_2$ , que tiene mayor concentración que  $F_1$ , o sea,  $c_2 > c_1$ .

Los rangos de las variables se asumen como:

$F_1$ , de 0 a 0,05;  $F_2$ , de 0 a 0,025;  $c$ , de 1,25 a 1,35;  $F$ , de 0,02 a 0,045;  $F_1$ ,  $F_2$  y  $F$  en  $[m^3/\text{seg}]$  y  $c_1$ ,  $c_2$  y  $c$  en  $[kmol/m^3]$ .

### 4. CONTROLES DIFUSOS SIN INTEGRADORES

Para cada una de las estrategias se determinan los conjuntos difusos, en el menor número necesario posible.

#### 4.1. Control monovariante difuso para cada lazo

Para cada variable se usa el error, que es igual a la diferencia entre la referencia y el valor real de la variable, y se determina una señal de actuación o control. Para ello se practica con el proceso, variando las entradas y observando las salidas, se determina una base de datos y se generan las reglas de la lógica difusa.

Como ejemplo, para el error del caudal de salida,  $EF$ , se adoptan cinco conjuntos difusos con los términos lingüísticos: N (negativo); SN (seminegativo); Z, cero; SP (semipositivo); P (positivo). Son ilustrados en la Figura 4, donde  $m$  denota grado de pertenencia (entre 0 y 1), como es habitual en lógica difusa.

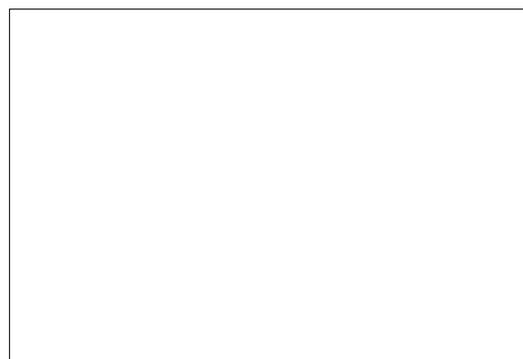


Figura 4. Conjuntos difusos del error de caudal  $EF$ .

En la Figura 4, la cercanía de los conjuntos SN y SP a Z permite tener buena sensibilidad en las reglas.

Los conjuntos difusos para la concentración no son mostrados, por brevedad. Para los caudales F1 y F2 se usaron cuatro conjuntos difusos (lento, L; semilento, SL; medio, M; y rápido, R).

Se emplearon las siguientes reglas para el control con el caudal F<sub>1</sub>, basados en el error EF, y otras similares para F<sub>2</sub>:

Si EC es	Entonces F <sub>1</sub> debe ser
R <sub>1</sub> : N (negativo)	L (lento)
R <sub>2</sub> : SN	SL
R <sub>3</sub> : Z	M
R <sub>4</sub> : SP	R
R <sub>5</sub> : P	R

La planta fue simulada, en su realidad a lineal, con condiciones iniciales: F<sub>1</sub>=0,015; F<sub>2</sub> 0,005; F=0,02; c=1,25; los caudales en (m<sup>3</sup>/seg) y la concentración en (kmol/m<sup>3</sup>).

En la Figura 5 se muestran, como ejemplo, los resultados de cambios de referencia para F a los 400 y 1000 [seg] y el correspondiente control F<sub>1</sub>.

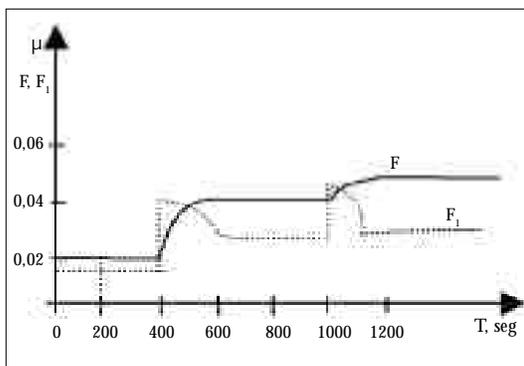


Figura 5. Respuestas de F y actuación F<sub>1</sub>.

El tiempo de asentamiento es de 150 [seg] y el de concentración es de 200 [seg]. Aunque no se muestran las respuestas de la con-

centración, c, ni de la actuación F<sub>2</sub>, se puede establecer lo siguiente: este tipo de control es muy sencillo, desacopla las variables F y c, tiene errores permanentes pero pequeños. En un control clásico podrían haber oscilaciones entre las variables F y c, pero con este control difuso ello no ocurre, dado que equivale al caso de dos operadores que controlan continuamente una variable cada uno.

#### 4.2. Control bivariable difuso

En este tipo de control se analizan las variables de entrada, que son los errores EF (del caudal F) y EC (de la concentración), como un ente global, para luego desarrollar los controles F<sub>1</sub> y F<sub>2</sub>.

Para EF se consideraron cinco conjuntos difusos (N, SN, Z, SP y P), como antes, pero distribuidos en forma diferente. Para EC se adoptaron siete conjuntos difusos: negativo (N); seminegativo (SN); cero menos (Zm); cero (Z); cero más (ZM); semipositivo (SP); y positivo (P). El caudal F<sub>1</sub> fue implementado con seis conjuntos difusos (L, lento; SL, semilento; M, medio; MM, medio más; SR, semirápido; R, rápido).

Los cinco conjuntos adoptados para F<sub>2</sub> son L, SL, M, SR, y R, con los significados antes citados.

El control bivariable fue realizado con nueve reglas. Como ejemplos, se citan dos de las reglas:

R<sub>1</sub>: Si EF es P y EC es P, entonces F<sub>1</sub> debe ser R y F<sub>2</sub> debe ser M.

R<sub>5</sub>: Si EF es SP y EC es SN, entonces F<sub>1</sub> debe ser SR y F<sub>2</sub> debe ser M.

Por razones de espacio no se muestran las simulaciones efectuadas.

De los resultados de esas simulaciones se deduce que este tipo de control tiene excelente comportamiento frente a cambios de referencia y que presenta rapidez y buena

forma de aproximarse a la referencia. Los errores permanentes se mantienen pequeños y se provee desacoplamiento entre las variables de salida. El nivel de energía empleado por los actuadores para atenuar cambios de referencia son bastante aceptables. En este controlador no hay normalización sino que las variables que ingresan a y salen del controlador vienen y van directamente al proceso. La operación es el símil de un operador humano que controla dos variables de salida mediante dos variables de entrada, que son los errores EF y EC.

## 5. CONTROLES DIFUSOS CON INTEGRADORES

En control automático siempre es deseable que las variables controladas tengan error permanente nulo, para lo cual se requiere realizar un controlador apropiado y que tenga una complejidad a lo más del nivel de la del proceso. Una forma de generar controladores difusos es aprovechando el error (E) y cambio del error (dE) de las respuestas transitorias,  $y(t)$ , del sistema a escalón unitario, como se ilustra en la Figura 6.

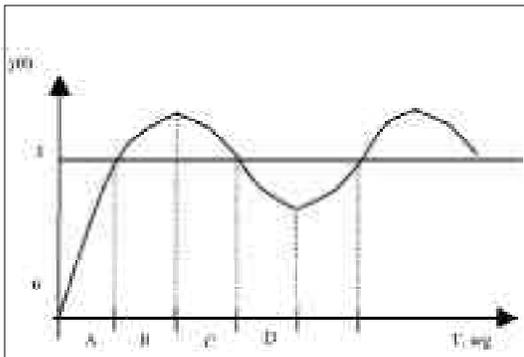


Figura 6. Regiones del error y cambio del error.

De las regiones señaladas en la Figura 6 se desprenden las siguientes acciones de control: Si E y dE están en la región A (o C), la

acción de control es Ninguna (N). Si E y dE están en la región B (o D) la acción de control es Corrección Negativa (Positiva), respectivamente.

El controlador utiliza entradas normalizadas para conjuntos de pertenencia en el rango  $[-1; 1]$ . Por otra parte, se sabe que el control integral permite reducir a cero los errores permanentes. Por ello, una vez que el controlador difuso determina una salida dicho valor debe ser escalado e integrado, como se ha indicado en la Figura 3.

### A. Control monovariante difuso con un integrador por lazo

En general, con este tipo de control difuso se logró desacoplar las variables de salida y anular los errores permanentes. Se adoptaron, para cada lazo, catorce conjuntos difusos de entrada, siete de salida y cuarenta y nueve reglas de control, con dos grados de libertad: error y cambio del error. Por razones de espacio no se incluyen aquí resultados de las simulaciones.

### B. Control multivariante difuso con integrador

En este caso se analizan en conjunto las cuatro variables de entrada: errores y cambios de errores del caudal y concentración de salida, como se indica en la Figura 3, con los bloques pertinentes.

Para no tener un número excesivo de combinaciones o reglas se adoptaron sólo tres conjuntos difusos para cada una de las cuatro variables de entrada, lo que implica ochenta y una reglas o combinaciones. Con cuatro conjuntos de entrada se tendrían 256 reglas. Los conjuntos difusos son triangulares y para variables de base normalizadas entre  $-1$  y  $+1$ .

Para las reglas de control se denotan por  $E_1$  y  $DE_1$  ( $E_2$ ,  $DE_2$ ) los errores y cambios de caudal (y concentración) de salida, respectivamente.

Si P y N denotan positivo y negativo y  $F_1$  y  $F_2$  son los caudales de control, dos reglas típicas son:

R1: Si  $E_1$  es P y  $DE_1$  es P y  $E_2$  es P y  $DE_2$  es P, entonces  $F_1$  debe ser P y  $F_2$  debe ser P.

R3: Si  $E_1$  es P y  $DE_1$  es P y  $E_2$  es P y  $DE_2$  es N, entonces  $F_1$  debe ser P y  $F_2$  debe ser cero.

Con el conjunto global del controlador difuso se pueden determinar las superficies de salidas o de desfusificación en el controlador (paso de valores difusos a valores reales). En estas superficies, no mostradas aquí, se pueden apreciar la estabilidad y alinealidad de este tipo de control.

En la Figura 7 se presenta el resultado de una simulación para F, en  $[m^3/s]$  y t en [seg].

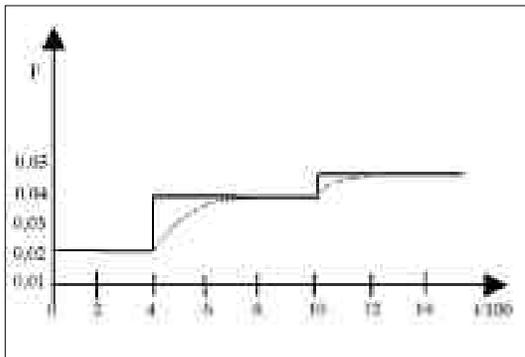


Figura 7. Respuesta del caudal F.

Las respuestas del caudal (y de la concentración no mostrada) son bastante buenas comparadas con los controladores antes indicados, pero el tiempo de asentamiento es casi el doble. Además, provee desacoplamiento. Las actuaciones son de forma irregular y no definitiva, pero de nivel adecuado.

Para reducir el tiempo de asentamiento habría que aumentar el número de conjuntos difusos de entrada, pero ello incrementa considerablemente la cantidad de reglas.

En general, los procesos complejos no son más que una colección de reglas sim-

ples e independientes, por lo que estos controladores, por procesamiento paralelo, alcanzan altas velocidades de ejecución.

## 6. CONCLUSIONES

Los cuatro algoritmos de control difuso para plantas alineales bivariantes presentados en este trabajo son de gran efectividad y simplicidad. Son mejores, no obstante, los dos algoritmos con integradores pues permiten reducir los errores permanentes y no son estáticos, y emulan a operadores humanos que estén siempre corrigiendo los errores de las señales a controlar.

Los cuatro controladores presentados son diseñados en base a la experiencia de los operadores. Son rápidos, sin saturación y desacoplan las variables, aunque con errores permanentes, pero pequeños.

Se eligieron conjuntos difusos triangulares o trapezoidales por simplicidad pero otras formas más complicadas no mejoran ni empeoran el control. En cada caso se asumieron los menores números convenientes de conjuntos difusos y de reglas de control.

Se constata también que la acción de un controlador proporcional integrativo (PI) difuso es equivalente a la acción de un PI clásico que cambie constantemente la ganancia y el tiempo integral, y que, por ende, es superior al controlador clásico.

El mejor controlador implementado es el tipo 3, bivariable difuso con un integrador por lazo, debido a que es más preciso, por tener un mayor número de conjuntos difusos de entrada. Si se aumentan los conjuntos difusos en el tipo 4, bivariable difuso con integradores, el número de reglas de decisión crece considerablemente. Sin embargo, el tipo 3 tiene más reglas y es algo más lento que los controladores difusos, 1 y 2, sin integradores.

Para lograr mejores resultados es recomendable combinar métodos clásicos y di-

fosos, pero el control clásico, en sus diversos enfoques, requiere de adecuada información física y matemática sobre el proceso, lo que tratan de soslayar las técnicas difusas.

## 7. AGRADECIMIENTO

Se agradece el apoyo del Proyecto DGIP-UTFSM 23.01.11 y de sus versiones anteriores.

## 8. REFERENCIAS

- CHEN, C. H. (Ed) (1996). *Fuzzy Logic and Neural Networks Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- KWAKERNAAK, H. and SIVAN, R. (1972). *Linear Optimal Control Systems*. New York: Wiley.
- MARKS, R. J. (Ed) (1994). *Fuzzy Logic Technology and Applications*. Piscataway, NJ: IEEE Press.
- YEN, J., LANGARI, R. and ZADEH, L. A. (1995). *Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems*. Piscataway, NJ: IEEE Press.

