

Nociones básicas sobre lógica difusa

Federico Laínez*

Resumen

Los cada vez mayores avances tecnológicos y la competitividad invitan a mejorar los sistemas de control y producción de las fábricas, en busca de aumentar sus ganancias y de satisfacer a los consumidores con productos de buena calidad. Diversos investigadores que han dedicado gran parte de sus vidas al estudio del control de sistemas, han encontrado en los sistemas de regulación por lógica difusa un método alternativo al control clásico, por medio del cual se facilitaría el diseño del controlador de la planta. Luego de diversas pruebas con esta nueva tecnología, se han visto notables ventajas en cuanto a los costos y al desempeño de los equipos. Sin embargo, en El Salvador aún no se han difundido las bases sobre las que descansa el control difuso y, por ende, todavía no se determina cuan grandes beneficios traerían las ventajas que ofrece. En el presente artículo, se presenta una serie de nociones sobre lógica difusa, esperando le sirvan al lector para abordar el estudio de este tema, al cual se profundizará en futuras entregas.

1. Introducción

La industrialización es un factor importante en el desarrollo de un país, donde se busca optimizar los procesos de una tarea específica para aprovechar al máximo los recursos con que se cuenta y ofrecer al consumidor productos de muy buena calidad al menor costo posible, gracias a los procedimientos utilizados en la manufactura que se auxilian de nuevas tecnologías, evitando en gran medida los tiempos muertos y desperdicios originados por aquellos productos que no aprueban un estándar de calidad.

Es evidente la participación de la electrónica como una importante herramienta utilizada en el manejo de máquinas herramientas y equipos que llevan a cabo una diversidad de procesos en una planta, los cuales, en un principio utilizaron amplificadores operacionales y, en términos generales, la computación analógica para calcular parámetros en función del tiempo y realizar el control; luego, con el uso de computadoras personales se aplicaron programas que controlaban el sistema, pero bajo la filosofía del control clásico.

En países industrializados como Japón y Estados Unidos se utiliza cada vez más el control difuso en el funcionamiento de electrodomésticos y manejo de máquinas eléctricas en el área industrial, por múltiples ventajas que ofrece este tipo de tecnología frente a la del control clásico, que por su complejidad en el nivel matemático resulta menos amigable.

Sin embargo, las alternativas de solución existentes no pueden ser óptimas para resolver problemas tecnológicos en todos los casos, por lo que es necesario investigar una serie de situaciones, por medio de las cuales pueda observarse que tan

aplicable es este tipo de control en El Salvador. De esta forma, se pretende dar a conocer los fundamentos básicos que describen la filosofía del control difuso, conocido también como "Fuzzy control", para que más personas que tengan estas nociones puedan sugerir ideas nuevas para el control de sistemas.

2. Esquema del control industrial.

En un primer momento, se conoce el control clásico utilizado por una gran cantidad de ingenieros en el campo industrial. Su esquema se basa en un sistema realimentado en el que se consideran componentes proporcionales, integrales y derivativas. Es necesario encontrar una serie de "coeficientes de la planta" para ajustar ganancias y realizar ensayos que lograrán un control óptimo; este proceso podría lograr un margen de error pequeño entre la variable controlada medida y el valor deseado en un gran margen de valores para la(s) variable(s) de entrada con los que se alimente la planta, pero esto no asegura que pueda hacerlo para todos los valores.

El control clásico puede ser desarrollado de diversas maneras, las cuales podrían incluir el uso de amplificadores o computadoras digitales; sin embargo, debe considerarse que una variable de salida dependerá de las de entrada siendo "procesada" por una función de transferencia.

Esta función de transferencia tendrá una serie de términos proporcionales, integrales y derivativos, ya que los eventos ocurridos en la planta o sistema en el cual se desea controlar una variable, están relacionados con el tiempo, de manera que, las condiciones de salida en tiempos $n-1$ acumulados desde un cierto periodo y la razón de cambio con que estos aparecen, son determinantes para calcular el nuevo parámetro de salida.

* Ingeniero electricista. Ex catedrático Universidad Don Bosco

Se supone que este parámetro proveerá las condiciones físicas de salida (muy probablemente con la ayuda de un transductor) y, que en un tiempo $n+1$ (para sistemas discretos), la variable a controlar se acercara al valor deseado por el operador, usuario o responsable del control en la planta. El caso es similar para los sistemas continuos y el efecto interesante a observar es la convergencia de la variable controlada al valor deseado por el diseñador.

Sin embargo, la dificultad que presenta el control clásico se observa en el procedimiento requerido para obtener los "coeficientes de la planta"; es decir, los valores de las constantes que habrán de agregarse a la función de transferencia en el circuito o programa controlador, para que las funciones integrativas y derivativas proporcionen valores coherentes que hagan converger la variable controlada al valor deseado.

Se muestra en la figura 1, un sistema básico y su función de transferencia, típicas en el control clásico.

Una consideración importante es la aplicabilidad de esa función de transferencia en todo el rango de operación del controlador, ya que la mayoría de sistemas no son lineales y, la función calculada para ciertos valores de las variables de entrada no funcionarían adecuadamente en un gran margen de valores. El control no es óptimo en esas circunstancias.

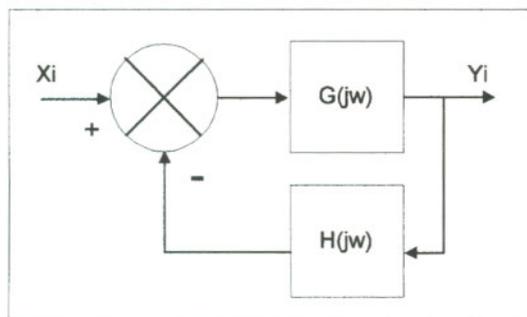


Figura 1. Diagrama a bloques para un sistema de control realimentado.

Por otro lado, es conocido que la estabilidad de un sistema dependerá exclusivamente de los polos en la función de transferencia y, posiblemente con mucha suerte, el controlador diseñado para una planta específica no producirá oscilaciones que muestren un comportamiento indeseado en el sistema.

Como ya se ha mencionado, el cálculo de la variable de salida en el controlador puede realizarse por medio de circuitería analógica o a través de un programa de computadora (Con sus respectivos convertidores analógico-digitales, en el caso que lo amerite); en el segundo caso, que resulta ser el más

flexible, tiene la desventaja de necesitar procesadores de alta velocidad y gran cantidad de memoria.

Podría resumirse las características del control clásico de la siguiente forma:

- Dificultad para obtener los coeficientes de la planta y para calcular la función de transferencia por la cantidad y calidad de los términos que la conforman
- Probabilidad de no funcionar adecuadamente para todos los valores en las variables de entrada, especialmente para el caso de sistemas no lineales.
- En función de los coeficientes, podría obtenerse una inestabilidad en el sistema; especialmente, para un tipo de control todo o nada.
- Facilidad de diseñar el controlador con dispositivos analógicos.
- Conocimiento ampliamente difundido entre las personas que conocen de control industrial.

3. Nociones fundamentales sobre lógica difusa.

3.1 Generalidades.

El control por lógica difusa está basado en el conocimiento humano, donde se busca observar el comportamiento de un sistema y, a prueba y error se decide cómo aplicar la señal al gobernador o actuador que provocará cambios a la variable que se desea controlar.

Así, se considera la existencia de conocedores en un sistema determinado, a los cuales se les denomina como "expertos" del mismo y que serán una fuente confiable por su larga experiencia en el control, para indagar sobre la acción que deberá tomar el actuador, ante los cambios que toman los valores de las variables de entrada; en efecto, el sistema corregirá la variable controlada para que tenga el valor esperado por el usuario, a través de una referencia, de manera rápida y estable, es decir, sin que se produzcan oscilaciones a la salida.

Sin embargo, de la manera más general, al consultarle al experto del sistema sobre el valor que tiene una de las variables de entrada, esa persona opinará lingüísticamente con estimaciones tales como: mucho, poco, medianamente, etc.

En este caso particular, se asocian los valores que toma un parámetro físico a las variables lingüísticas establecidas, y la relación existente se cuantifica en grados de pertenencia; es decir, que existe a su vez una cantidad asociada a la posibilidad de que el parámetro medido cumpla con las condiciones que rige la variable lingüística. Esto puede observarse mejor en el gráfico de la figura 2:

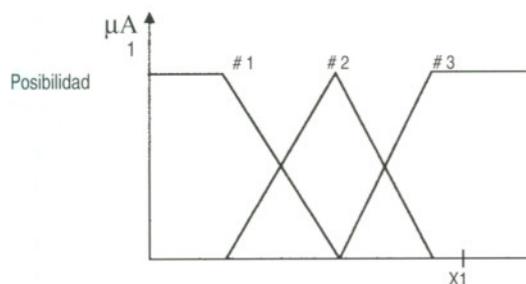


Figura 2. Representación gráfica de un conjunto difuso.

Se observa que el mayor grado de pertenencia posible es de 1 y se define cuando la relación entre la variable medida con el conjunto es plena; por ejemplo, el valor de pertenencia para $X_1=1$, indicando que la variable es definitivamente alta.

A medida que las apreciaciones del experto indiquen la existencia de varios rangos o clasificaciones de la variable, así se modificará la cantidad de conjuntos difusos a considerar, recordando que en un sistema existirán n variables de entrada, m_i conjuntos difusos para cada enésima entrada, p variables de salida y q_i conjuntos para cada una de las anteriores. Refiriéndose a la figura 3:

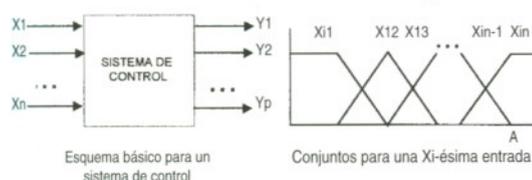


Figura 3. Sistema de control y los conjuntos que lo conforman.

Se recuerda que la definición de conjuntos se aplica a variables de entrada como de salida.

Ahora bien, en las figuras 1 y 2 se han definido conjuntos que describen formas geométricas triangulares y trapezoidales, aunque debe aclararse que no son las únicas: Existen muchas formas de representar los grados de pertenencia de una variable en un conjunto, observándose gráficamente triángulos, trapecios, sigmoides y otras que son conocidas como funciones L, S, A, II etc., las cuales se utilizan para “suavizar” en una u otra medida el valor obtenido por una función; es decir, causa un efecto similar al que tiene una $f(x)$ cuando se modifica su pendiente para un intervalo de x .

3.2 Operaciones entre conjuntos.

Ya se disponen de los conjuntos, pero, ¿Cómo habría de relacionarlos para conocer la influencia de cada una de las variables de entrada sobre las de salida?. Para ello, se definen las operaciones entre

conjuntos, las cuales poseen propiedades similares a los clásicos, tales como:

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (1)$$

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (2)$$

$$\mu'_{A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (3)$$

Así, la interacción entre las variables podría ser definida con la función y obtener un valor asociado que deberá relacionarse con la(s) variable(s) de salida, lo cual se logra mediante una segunda serie de “reglas lingüísticas”; por ejemplo:

“Si la temperatura es alta y la presión es baja, entonces la velocidad debe ser baja”.

“Si la temperatura es baja y la presión es media, entonces la velocidad debe ser alta”.

Se observa que, para las variables de temperatura, presión (Que son entradas de un sistema) y velocidad (salida del sistema), existirán m , n , y o conjuntos respectivamente y, si se desea establecer una relación entre todas las variables, existirán una serie de combinaciones igual a:

Cantidad de relaciones operacionales entre conjuntos = $m \times n^1$.

Y, dos o más de las combinaciones efectuadas puede referirse a un mismo conjunto de salida, sin importar precisamente la cantidad de veces que lo haga.

3.3 El proceso de “Fuzzificación”.

Existen, básicamente, dos formas de definir los conjuntos que indicarán el grado de pertenencia en una variable: Vertical y Horizontal, en ambos casos se ha de recurrir a la opinión de un experto o un algoritmo basado en el muestreo estadístico de las variables.

- Vertical.

Cuando al valor del parámetro físico se le asocia el grado de pertenencia; por ejemplo, se consulta a una serie de expertos cómo le parece que es la temperatura para un sistema particular y se generará la siguiente tabla:

¹ Se consideran únicamente dos variables de entrada.

Valor del parámetro Opinión del experto	X1	X2	X3	...	Xn
Experto #1	muy bajo	bajo	medio	...	alto
Experto #2	muy bajo	bajo	bajo	...	alto
...
Experto #m	muy bajo	muy bajo	bajo	...	alto

Tabla 1. Apreciación de los expertos sobre los valores de un parámetro físico A

Se ofrece automáticamente una cierta cantidad de conjuntos: Bajo, medio, ..., alto. Se toma cada conjunto y se observa el porcentaje de expertos que opina que X_i "es bajo", incrementándose el porcentaje de 0% hasta 100% paulatinamente que al graficarse describirá aproximadamente una línea recta creciente; posteriormente, los valores de X_i tomarán valores tan altos que menos expertos lo catalogarán de "bajo" y se graficará una línea decreciente. Así, se completa el conjunto de bajo.

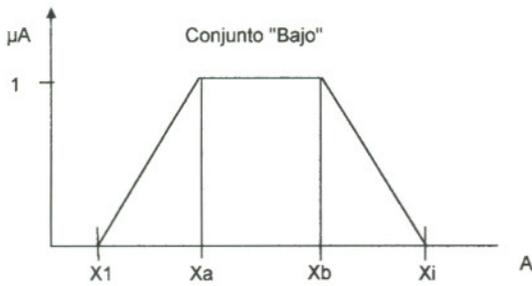


Figura 3. Expresión gráfica del conjunto difuso "bajo".

Se observa en la figura anterior que, según el gráfico, el 100% de los expertos opina que los valores $X_a < X < X_b$ tienen un valor bajo.

De manera similar, se procede para los otros conjuntos.

- Horizontal.

En este caso, se dispone de un modelo de conjunto y de un grado de pertenencia sugerido, y se formula la pregunta ¿Cuánto debe valer X_i para que pueda tener un grado de pertenencia $\mu_i A$ en el conjunto "temperatura baja"?

Entonces se obtiene un promedio de todos los valores recabados en la encuesta a expertos, generando cada valor de X_i y, por consiguiente, el conjunto.

3.4 El proceso de "Defuzzificación".

Tiene como objetivo primordial obtener un único valor a partir de los conjuntos difusos de salida y, para ello necesita hacer uso de los valores de grados de pertenencia generados en las "relaciones operacionales" entre conjuntos.

Cada vez que se tomó una variable física #1, ésta se asoció a uno o varios conjuntos $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$, obteniéndose varios grados de pertenencia $\mu_{A_1}, \mu_{A_2}, \dots, \mu_{A_n}$ de manera similar, para una variable física #2 se obtuvieron $\mu_{B_1}, \mu_{B_2}, \dots, \mu_{B_m}$. Posteriormente, las relaciones operacionales entre conjuntos mostraron cada conjunto de salida μ_{C_i} asociado a la relación de los conjuntos μ_{A_i} y μ_{B_i} .

Si se considera que ya es conocido el conjunto de salida μ_{C_i} , debe obtenerse un grado de pertenencia asociado a él, lo cual se logra con los operadores siguientes u otros que el diseñador estime conveniente.

$$\mu_{A \cap B} = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (4)$$

$$\mu_{A \cup B} = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (5)$$

$$\mu'_{A}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (6)$$

Así, se obtienen $m \times n$ conjuntos de salida, cada uno tiene asociado un grado de pertenencia y existen diferentes métodos para producir un valor determinístico a partir de los μ_{C_i} y conjuntos C_i , entre los cuales se mencionan: Centro de áreas, centro de sumas, primero de área mayor, primero de área máxima y otros.

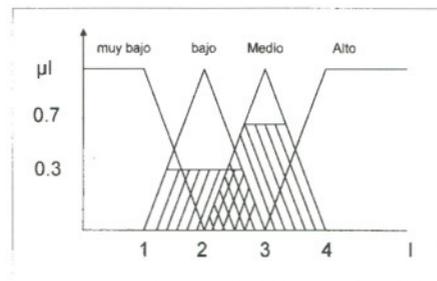


Figura 4. Conjuntos de salida.

Por ejemplo, si se tienen los conjuntos de salida de la figura 4, muy bajo, bajo, medio y alto y, además, sólo los conjuntos bueno y medio poseen relación con las variables de entrada y su grado de pertenencia asociado es:

$$\mu_{\text{bajo}}(I) = 0.3 \quad (7)$$

$$\mu_{\text{medio}}(I) = 0.7 \quad (8)$$

Se utilizará en este caso el método de centro de áreas, el cual establece que el valor determinístico se define como:

$$UI^* = \frac{\int U \sum_{k=1}^n \mu_{\text{bajo}}(k)(U) dU}{\int \sum_{k=1}^n \mu_{\text{bajo}}(k)(U) dU} \quad (9)$$

En términos prácticos, podría expresarse:

$$U_1^* = ((\mu_{\text{bajo}}(I) \cdot I_{\text{bajo}}) / (\mu_{\text{bajo}}(I) \cdot I_{\text{bajo}} + \mu_{\text{alto}}(I) \cdot I_{\text{alto}})) / (\mu_{\text{bajo}} + \mu_{\text{alto}}) \quad (10)$$

Este término U_1^* es el valor que se ha estado buscando para aplicarlo al actuador de un sistema de control, concluyendo así el proceso que inició con las variables de entrada y obtuvo otro que, hará posible que la variable controlada converja al valor deseado por aquella persona que diseñó el controlador de la planta.

4. Conclusiones.

El control difuso se fundamenta en una base matemática mucho más sencilla que en el control clásico, por lo que la hace más amigable; además, la probabilidad en un sistema para que se torne inestable es menor cuando se hace por control difuso porque hay una serie de conocimientos proporcionados por expertos, que logran establecer medidas correctivas en el sistema antes que éste pueda entrar en oscilación.

Sin embargo, dado que en El Salvador la experiencia sobre el control difuso se limita a pocas personas, éste no ofrece la certeza que solucionará en cuanto a costos y desempeño los problemas de producción en la industria; lo cual invita a investigar más respecto al tema y así determinar si el control clásico prevalecería sobre el difuso en todas las aplicaciones industriales.

Bibliografía

- Alippi, C., A. Ferrero & V. Piuri. "Artificial intelligence for instruments and measurement applications". IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. Vol. 1. No. 2. June 1998. Pp. 9-17.
- Boullart, L., A. Krijgsman & R. Vingerhoed. Application of artificial intelligence in process control. Pergamon Press. 1992. Oxford, England.
- Chen, S. "A new method for evaluating weapon systems using fuzzy sets theory". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans. Vol. 26. No. 4. July 1996. Pp. 493-497.
- Cheok, K., K. Kobayashi, S. Scaccia & G. Scaccia. "A fuzzy logic-based smart automatic windshield wiper" IEEE Control Systems Magazine. Vol. 16. No. 6. December 1996. Pp. 28-34.
- Crowe, T. & J. Nuño. "A fuzzy parametrical forward and backward-chained two-dimensional attribute decision model" IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans. Vol. 27. No. 2. March 1997. Pp. 186-194.
- Dean, J. "Artificial intelligence in test" IEEE Aerospace and Electronic Systems. Vol. 20. No. 7. July 1997. Pp. 16-20.
- Driankov, D., H. Hellendoorn & M. Reinfrank. An introduction to fuzzy control. Springer-Verlag. 1993. Berlin.
- García, R. y T. de Pedro. "Un potente modelo computacional para un coprocesador borroso" IV Jornada Iberoamericana de Automática. Septiembre 1998. Antigua Guatemala.
- Godoy, M. "Intelligent control based alternative energy performance improvement". IV Jornada Iberoamericana de Automática. Septiembre 1998. Antigua Guatemala.
- Godoy, M. "A fuzzy logic based photovoltaic peak power tracking controller". IV Jornada Iberoamericana de Automática. Septiembre 1998. Antigua Guatemala.
- Godoy, M. "Fuzzy logic based wind generation performance improvement". IV Jornada Iberoamericana de Automática. Septiembre 1998. Antigua Guatemala.
- Gupta, M. & N. Sinha. Intelligent control systems. Theory and applications. IEEE Press. 1996. New York.
- Kóczy, L. "Fuzzy if... then rule models and their transformation into one another". IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics - Part A: Systems and Humans. Vol. 26. No. 5. July 1996. Pp. 621-637.
- Liu, C., D. Pierce & H. Song. "Intelligent system applications to power systems". IEEE Computer Applications in Power. Vol. 19. No. 4. October 1997. Pp. 21-24.
- Moreno, L. Control fuzzy. Universidad Carlos III de Madrid/FSE/CAM. 1995. Leganés.
- Pedrycz, W. Fuzzy control and fuzzy systems. Research Studies Press Ltd. 1993. 2nd Edition. Tauton, Somerset, England.