

SISTEMAS DE LOGICA DIFUSA

Marco Antonio Pérez Cisneros * y James Vernon +

*División de Electrónica y Computación, CUCEI, Universidad de Guadalajara, México.

+Consultor "Control Systems Principles"

RESUMEN: Este artículo pertenece a la serie de notas de aplicación en modelado y control de sistemas que han sido creadas por "Control Systems Principles" para ilustrar los principios básicos de la teoría de control. Dichos fundamentos incluyen algunos sistemas genéricos y métodos que son comunes en muchas áreas del desarrollo tecnológico y la industria. Estas notas de aplicación buscan explicar dichos sistemas y sus principios de una manera clara y fácil de entender. Por tanto las notas describen primero las características mas importantes de un sistema, como funciona y finalmente como puede ser controlado. Diferentes sistemas en tiempo real, diseñados por el fundador de 'Control Systems Principles', Prof. Peter Wellstead, son utilizados para demostrar la viabilidad de los algoritmos de control. Dichos sistemas son actualmente manufacturados por "TQ Education & Training Ltd" bajo la línea CE. En particular este artículo describe un método simple pero muy útil para aplicar lógica difusa en sistemas de control.

1. ¿Por qué Lógica Difusa?

Normalmente en la lógica convencional tenemos un conjunto de enunciados que pueden ser verdaderos o falsos, si o no, 0 o 1. En el contexto de la lógica difusa, el enunciado de "la temperatura es 25 grados centígrados" puede verdadero o falso. Sin embargo, en muchas situaciones la respuesta puede ser mas de un simple "...este, no estoy seguro", "quizás", "bueno, depende..." y algunas otras. Por ejemplo, en un día veraniego la frase "la temperatura esta muy alta" no es ni verdadera ni falsa, ya que es una idea cualitativa que representa una opinión más que un hecho objetivo. Otro ejemplo es la frase "yo requiero un día totalmente soleado en la playa para poder sentir calor", pero existen otras personas (como algunos científicos visitantes en 'Control Systems Principles' que pueden sentir calor en medio de una tormenta de nieve o en la cima de una montaña. No existe certeza en estas situaciones, depende del contexto.

La lógica difusa maneja esta incertidumbre en ingeniería mediante grados de certeza para responder a una cuestión lógica. ¿Esto es realmente útil? La respuesta es comercial y practica. Comercialmente, la lógica difusa ha sido usada con gran éxito para controlar maquinas y productos de consumo. En aplicaciones adecuadas, los sistemas difusos son de simple diseño y pueden ser entendidos e implementados por personas no especialistas en sistemas de control. En la mayoría de los casos, una persona con antecedentes técnicos medios puede diseñar un control difuso. El sistema de control no será óptimo pero puede ser aceptable. Los ingenieros de control también la utilizan en aplicaciones donde el poder de cómputo es muy limitado y un control sencillo es suficiente. La lógica difusa no es la respuesta para todos los problemas técnicos pero para aquellos problemas de control donde la simplicidad y la rapidez en la implementación son importantes, la lógica difusa es un fuerte candidato. Una muestra de aplicaciones que han utilizado lógica difusa exitosamente se enumera a continuación:

Control del ambiente

- Equipos de aire acondicionado.
- Humidificadores

Equipos para el hogar

- Lavadoras y secadoras
- Aspiradoras
- Tostadores
- Hornos de microondas.

- Refrigeradores

Equipo electrónico

- Televisiones
- Fotocopiadoras
- Cámaras fotográficas y Videocámaras con enfoque automático, auto-exposición y anti-vibración.
- Sistemas de alta fidelidad.

Sistemas automotrices.

- Control del clima en vehículos.
- Cajas de velocidades automáticas.
- Dirección en las cuatro ruedas.
- Sistemas de control asiento-espejos.

Es una lista impresionante que puede darte una idea de importantes áreas de aplicación. En general no encontraras un controlador difuso en aplicaciones donde la seguridad es muy importante, a menos de que el rendimiento práctico y teórico haya sido totalmente estudiado.

2. Motivación desde una perspectiva de Ingeniería.

Un bloque tradicional produce una salida basada en la lógica binaria. Una afirmación positiva o negativa resulta como salida de un bloque típico de decisión. Sin embargo, el inventor de la lógica difusa, el Dr. Lofti Zadeh encontró que en la manera como los humanos toman decisiones existen algunas sombras de significado para las cuales el SI/NO clásico puede ser reemplazado por ejemplo con:

**DEFINITIVAMENTE SI,
PROBABLEMENTE SI,
QUIZAS,
PROBABLEMENTE NO,
DEFINITIVAMENTE NO.**

La lógica difusa copia este patrón usando niveles de posibilidad en un número de categorías inciertas o difusas. Por ejemplo, piensa en el sistema de tanques acoplados (ver nota técnica sobre este sistema, puede ser descargado de nuestra pagina www.control-systems-principles.co.uk). El objeto a ajustar es el voltaje de entrada (u) hacia el motor de la bomba que se muestra en la figura 1. De tal modo que el nivel del tanque 2 se conserva en el estado estable. La salida medida esta en el nivel del segundo tanque y se denota por la señal y_2 . Nuestro colega Elke aplicaría un controlador PI a este sistema. Pero si el nivel exacto no es tan importante entonces ¿por que no usar un controlador mas simple? Digamos que un controlador siguiendo nuestro sentido común podría conformarse con las siguientes reglas difusas:

**SI {nivel muy alto} ENTONCES {reducir el voltaje de la bomba}
SI {nivel muy bajo} ENTONCES {incrementar el voltaje de la bomba}
SI {nivel correcto} ENTONCES {fijar el voltaje de la bomba en cero}**

El rendimiento del controlador no seria tan bueno como un controlador PI, pero podría ser aceptable considerando que en este caso buscaríamos un controlador tan simple y barato como sea posible para una aplicación dada.

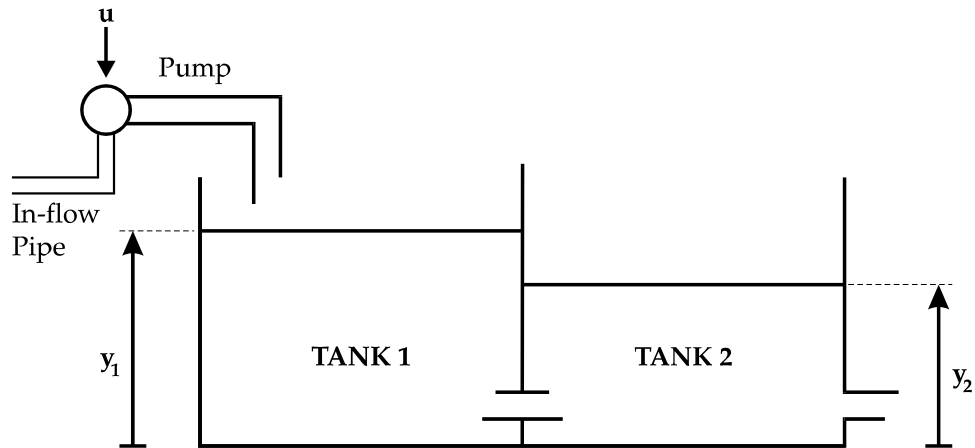


Figura 1. Sistema de tanques acoplados.

3. ¿Cómo hacer Lógica Difusa?

3.1. Clasificación – Ajustando una señal real dentro del conjunto de variables difusas.

El primer paso en lógica difusa es convertir la señal x (que bien pudiera ser una señal de error en el sistema de control) en un conjunto de variables difusas. A este paso se le conoce como **clasificación difusa o 'fuzzificación'**. Esto se hace asignando valores (que serán nuestros valores difusos) a partir de un conjunto de funciones de membresía o pertenencia. Los valores de cada función de pertenencia se etiquetan mediante $\mu(x)$, y son determinados por el valor de la señal x y la figura de cada función de membresía. Un clasificador difuso divide los rangos posibles en los cuales puede clasificarse el valor de la señal x como sigue:

- a) LP: x es Largo Positivo
- b) MP: x es Medio Positivo
- c) S: x es Pequeño (de las siglas en ingles 'Short')
- d) MN: x es Medio Negativo
- e) LN: x es Largo Negativo

Las funciones de membresía para tres de esos cinco niveles difusos se muestran en la figura 2a. Entonces por ejemplo, el valor (o variable difusa) para la función de membresía MP y un valor de la señal de entrada de $x = 2.5v$ es igual a $\mu_{mp}(2.5) = 0.5$.

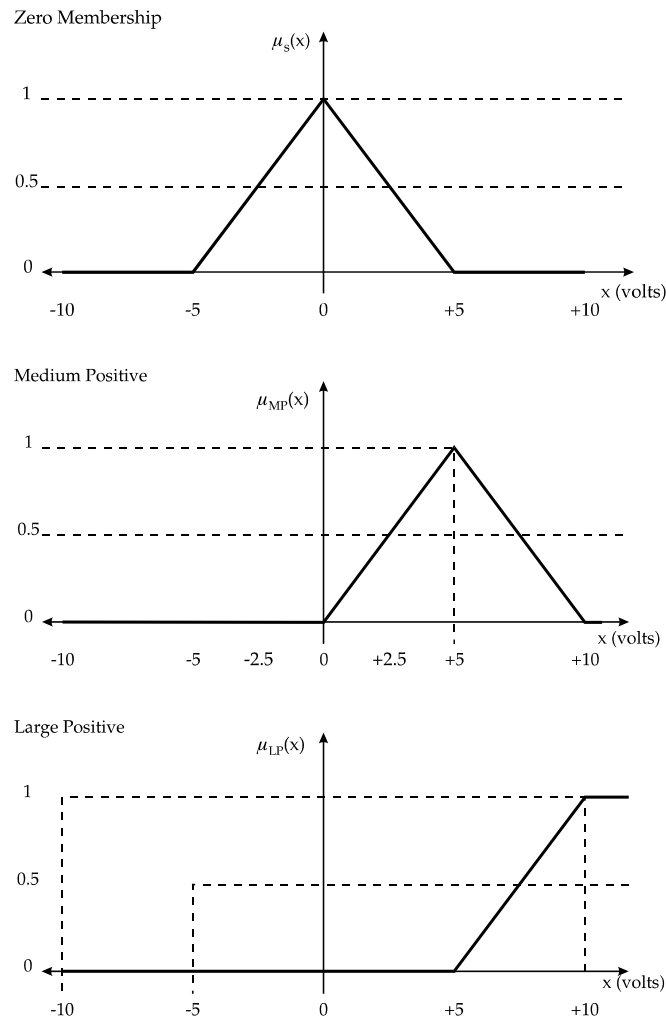


Figura 2. Funciones de membresía para el rango Pequeño (S: x es pequeña), Medio Positivo (MP) y Largo Positivo (LP).

La figura 2a solamente muestra las formas de las membresías S, MP y LP. Las otras dos (MN y LN) tienen la misma figura que MP y LP pero con el eje x en forma inversa. La figura 2b muestra todas las funciones de membresía en el mismo eje.

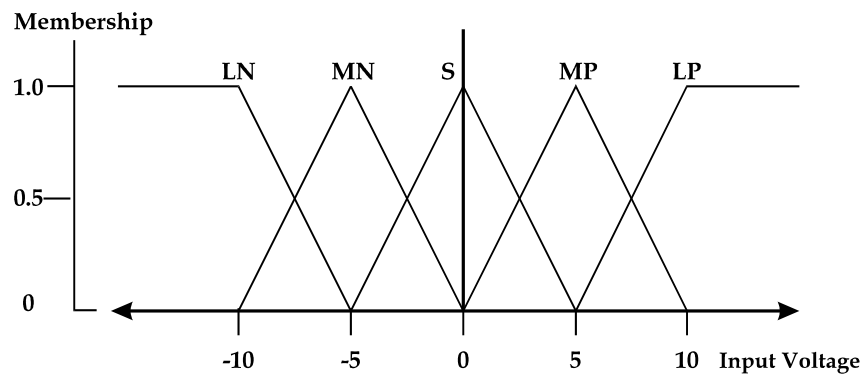


Figura 2b. Conjunto completo de las funciones de membresía para una ‘fuzzificación’ de cinco niveles.

La forma de las funciones de membresía en las figuras 2a y 2b se conoce como triangular, que es solamente una de muchas opciones para implementar dichas funciones de membresía. Yo he usado formas triangulares por que son ampliamente usadas, tienen una implementación simple y ofrecen buenos resultados.

Un elemento ‘fuzzificador’ tendría una señal medida de un sensor como su entrada y provee como salida los valores de las variables difusas que corresponden dadas las formas de las funciones de membresía. Por ejemplo, si una señal de un sensor con un voltaje de salida de 2V se aplica al ‘fuzzificador’ de cinco niveles, el conjunto resultante de variables difusas puede ser como sigue:

$$\begin{aligned}\mu_{LN} &= 0 \\ \mu_{MN} &= 0 \\ \mu_S &= 0.6 \\ \mu_{MP} &= 0.4 \\ \mu_{LP} &= 0\end{aligned}$$

Como la entrada al ‘fuzzificador’ cambia en el rango de $-10v$ a $+10v$, los valores difusos correspondientes también cambiarían.

En un controlador, el clasificador difuso o ‘fuzzificador’ se utiliza para determinar el nivel de membresía conectando una señal obtenida del sistema a su entrada. Por ejemplo, si un ‘fuzzificador’ de cinco niveles se conecta al sistema de tanques acoplados, el valor de membresía asociado con el enunciado “El nivel del Tanque 2 es Largo Positivo” se obtiene conectando la señal del nivel en el tanque 2 (y_2) a la entrada del ‘fuzzificador’ y se monitorea la salida LP en el clasificador difuso como se muestra en la figura 3.

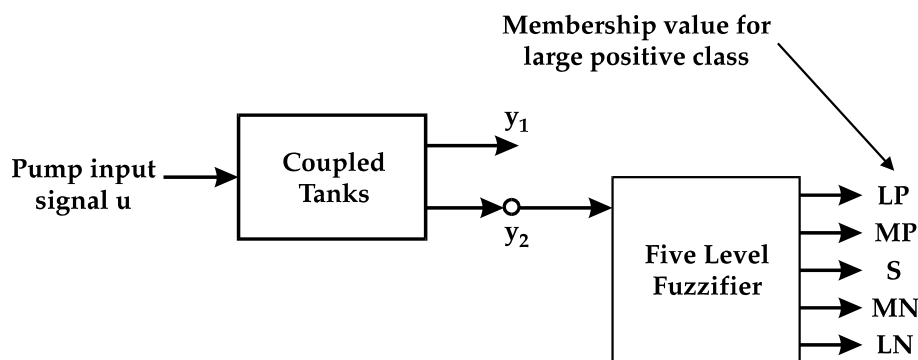


Figura 3. Midiendo el valor de membresía “El nivel 2 es Largo Positivo”.

3.2. Bloques de decisión difusos.

El control difuso utiliza equivalentes difusos de los operadores lógicos AND, OR y NOT para construir las reglas difusas. Las definiciones quedan como sigue:

AND: Si μ_α es la membresía de la clase α para un variable medida μ_β y es la membresía de clase β para otra variable medida, entonces el AND difuso se obtiene como el mínimo de los dos valores de membresía, es decir:

$$\mu_{\alpha AND \beta} = \mu_\alpha \wedge \mu_\beta = \min(\mu_\alpha, \mu_\beta)$$

El símbolo \wedge se utiliza para denotar la operación AND difusa. Una definición alternativa del AND difuso puede entenderse como el producto de dos valores de membresía como sigue:

$$\mu_{\alpha \text{ AND } \beta} = \mu_{\alpha} \wedge \mu_{\beta} = \mu_{\alpha} \times \mu_{\beta}$$

Hemos usado ambos en aplicaciones prácticas sin encontrar mucha diferencia por lo que generalmente recomendamos la primera definición.

OR: Las definiciones previas de $\mu_{\alpha} \mu_{\beta}$ se utilizan de nuevo, y la función OR difusa se define como:

$$\mu_{\alpha \text{ OR } \beta} = \mu_{\alpha} \vee \mu_{\beta} = \max(\mu_{\alpha}, \mu_{\beta})$$

NOT: Para la membresía μ_{α} la operación difusa NOT se define como:

$$\mu_{\text{NOT } \alpha} = \neg \mu_{\alpha} = 1 - \mu_{\alpha}$$

Donde el símbolo \neg se usa para denotar la operación de negación difusa NOT.

3.3. El proceso de ‘Defuzzificación’, regresando valores difusos a valores reales.

El último paso en la construcción de un sistema de lógica difusa es convertir de nuevo las variables difusas generadas por la base de reglas en valores con interpretación real. El proceso se denomina ‘defuzzificación’ por que combina las variable difusas para generar el valor real de la señal (también comúnmente denominado CRISP o no-difuso) el cual puede ser usado posteriormente para generar acciones de control. Por ejemplo, en el caso de un sistema de control para tanques acoplados, la señal ‘CRISP’ sería un voltaje que puede ser usado para operar el amplificador en el manejador de la bomba.

Un bloque de ‘defuzzificación’ como el que se muestra en la figura 4, tendría entradas que corresponden a las siguientes cinco acciones:

- a) LP: Señal de salida Larga y Positiva
- b) MP: Señal de salida Media y Positiva
- c) S: Señal de salida ‘Small’ (pequeña)
- d) MN: Señal de salida Media y Negativa
- e) LN: Señal de salida Larga y Negativa.

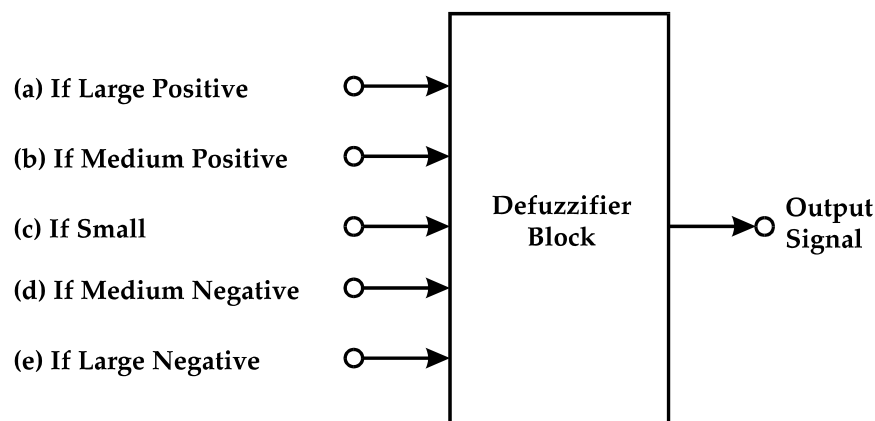


Figura 4. Diagrama de un bloque representando un clasificador difuso o ‘fuzzificador’.

El ‘fuzzificador’ combina la información de las entradas difusas para obtener un solo valor de salida ‘CRISP’ (expresado en lógica convencional o no difusa). Existen diferentes formas para lograr esto. El método mas simple y ampliamente usado se conoce como el método de centro de gravedad que

básicamente opera como sigue: Si los niveles difusos LP...LN tienen valores de membresía etiquetados como μ_1, \dots, μ_5 entonces la señal CRISP de salida se define como:

$$u = \frac{\sum_{i=1}^5 u_i \mu_i}{\sum_{i=1}^5 \mu_i}$$

Donde los valores de u_i son $u_1 = 10V$, $u_2 = 5V$, $u_3 = 0V$, $u_4 = -5V$, $u_5 = -10V$, y corresponden a los puntos centrales de las clases difusas LP, MP, S, MN y LN con respecto de la entrada al 'defuzificador'. Aquellas entradas al 'defuzificador' que no tienen conexión con el valor de entrada tienen un valor difuso de entrada igual a 0.

4. Diseñando reglas de control difuso.

Muchos artículos de investigación acerca de cómo crear un conjunto de reglas difusas han sido escritos. La mayoría de estos métodos son matemáticos y requieren conocimiento analítico para entenderlos. Desde nuestra perspectiva, este hecho derrota el propósito de la lógica difusa. La principal motivación para utilizar lógica difusa es la facilidad para escribir reglas del sentido común de tal manera que sea posible construir una estrategia de control razonable, sin olvidar un conocimiento teórico profundo sobre control. Esto quiere decir que no tendremos conocimiento de las propiedades de estabilidad del controlador. También el alcance de las aplicaciones no se restringe a aplicaciones de control simples lo cual es bueno por que existen problemas de control sencillos que solamente requieren una solución sencilla. Hemos mencionado ya algunos productos del mercado domestico, pero podemos agregar otros lazos de control industriales sencillos.

Un sistema de control difuso se construye a través de una base de reglas de la forma:

SI {situación} ENTONCES {acción}

El procedimiento empieza por escribir las reglas básicas y luego refinarlas basadas en nuestra experiencia. En el ejemplo del sistema de tanques acoplados, una regla difusa que conforma el sistema de control pudiera ser la siguiente:

SI {Error Pequeño 'S'} Y {Señal de control Larga Positiva 'LP'}

ENTONCES {Señal de control Pequeña 'S'} (#1)

Los errores difusos "Señal de control pequeña S" y "señal de control Larga Positiva" serian obtenidos usando el error e , y la señal de control u , como señales de entrada a dos 'fuzzificadores' independientes de cinco niveles, seleccionando las salidas 'S' y 'LP' respectivamente. Dichos niveles difusos son luego alimentados a un bloque AND difuso para obtener el valor difuso que representa el valor de membresía correspondiente a dicha situación. Un sistema difuso que implementa la regla de control difuso (#1) se muestra en la figura 5.

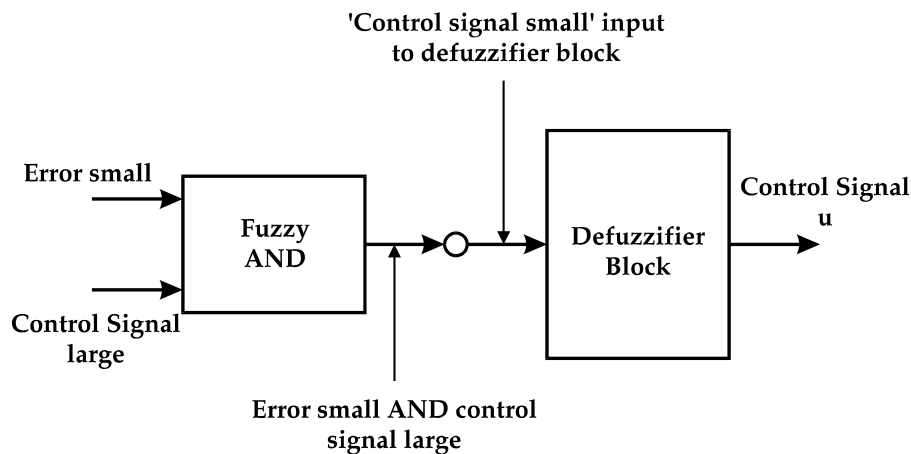


Figura 5. Una implementación de la regla difusa #1.

En la mayoría de sistemas de control difuso, el conjunto de acciones difusas es una lista simple de reglas en una secuencia simple de lazo abierto. Un ejemplo de una secuencia de control difuso de lazo abierto es la que pudiera ser usada en el controlador de temperatura de agua para una lavadora, donde el control de la temperatura del agua no es una variable crítica. En una versión simplificada de un ciclo de lavado, el ingeniero de diseño puede desear empezar el lavado con calor máximo y gradualmente reducir la potencia conforme corre el tiempo del ciclo de lavado, terminando con poder cero al final del ciclo. Un conjunto de reglas difusas para este ciclo de control pudiera ser:

SI {Tiempo ciclo es Pequeño 'S'} ENTONCES {Potencia calentador Larga Positiva 'LP'}

SI {Tiempo ciclo es Medio Positivo 'MP'} ENTONCES {Potencia calentador Media Positiva 'MP'}

SI {Tiempo ciclo es Largo Positivo 'LP'} ENTONCES {Potencia calentador Pequeña 'S'}

Nota que las reglas en esta secuencia de control difuso son de tal forma que pueden ser fácilmente escritas e implementadas en programación secuencial utilizando los bloques difusos que se describieron previamente. El conjunto de reglas difusas se hace más complejo si existe un estado de los niveles difusos asociado con más de una señal y que debe ser considerado. En estos casos, pudieran requerirse reglas conteniendo interacciones como AND/OR difusas de dos o más variables. Por ejemplo, considera de nuevo el control de ciclos de la lavadora. El diseñador desea hacerlo mas sofisticado tomando en cuenta la temperatura del agua. Supóngase que se desea prevenir que la temperatura del agua se eleve demasiado, entonces la tercera regla pudiera cambiarse de la siguiente manera:

**SI {Tiempo ciclo es Largo Positivo 'LP'} O {Temperatura del Agua es Larga Positiva 'LP'}
ENTONCES {Potencia calentador Pequeña 'S'}**

El uso del operador difuso OR significa que se ha creado un ciclo extra de control complejo y en el cual la potencia del calor se reduce si la temperatura llega a ser muy alta, así como al final del lavado.

Del ejemplo simple de arriba, puede verse como podemos unir reglas difusas y sumar a ellas cualquier nueva variable que pueda requerirse. En algunos casos, el conjunto de reglas difusas puede ser muy largo y difícil de seguir. En esos casos se utilizan tablas con los posibles estados difusos, que no son más que tablas lógicas que nos ayudan a comprimir de una forma tabular sencilla un conjunto largo de enunciados conteniendo el operador AND difuso. El sistema de Lógica Difusa CE124 que se describe abajo utiliza una tabla por esta razón.

5. Control difuso en sistemas con retroalimentación.

Las aplicaciones de control difuso más adecuadas son aquellas donde existen requerimientos cualitativos para una acción de control satisfactoria y dichos requerimientos pueden ser enunciados fácilmente como reglas difusas. Por esta razón, los controladores con lógica difusa son usados para operar funciones automáticas en lavadoras, video-grabadoras, reproductores de CD, sistemas de aire acondicionado, cámaras y productos similares. También es posible encontrar lógica difusa en controladores de retroalimentación industriales que han sido implementados normalmente por operadores humanos expertos que tienen el control manual de procesos complejos. El procedimiento que se sigue es sintetizar las habilidades humanas del operador en una base de reglas difusas y desarrollar así un sistema de control difuso. El diseñador del sistema difuso copia las acciones heurísticas del operador humano mientras controla el proceso y escribe las correspondientes reglas difusas. Mediante observaciones detalladas de un operador habilidoso, es posible obtener un conjunto completo de reglas difusas que puede reproducir el mejor rendimiento del operador humano. El resultado es un sistema de control inteligente que se obtiene sin referencia a la teoría clásica de los sistemas de control pero contiene el conocimiento de un buen operador humano. Por esta razón hubo un gran entusiasmo en los setentas y ochentas por esta técnica, pero se ha encontrado que el operador humano no puede ser fácilmente reemplazado y ahora esos sistemas difusos son usados como “consejeros” del operador. La idea es mejorar la seguridad en lugar de reemplazar al operador.

Una aplicación popular de la lógica difusa es el control de lazos simples, normalmente controlados usando controladores PID. La lógica difusa copia la acción del controlador PID con algunas modificaciones para manejar el comportamiento no lineal. En la figura 6 se muestra como un sistema difuso podría reemplazar un controlador convencional.

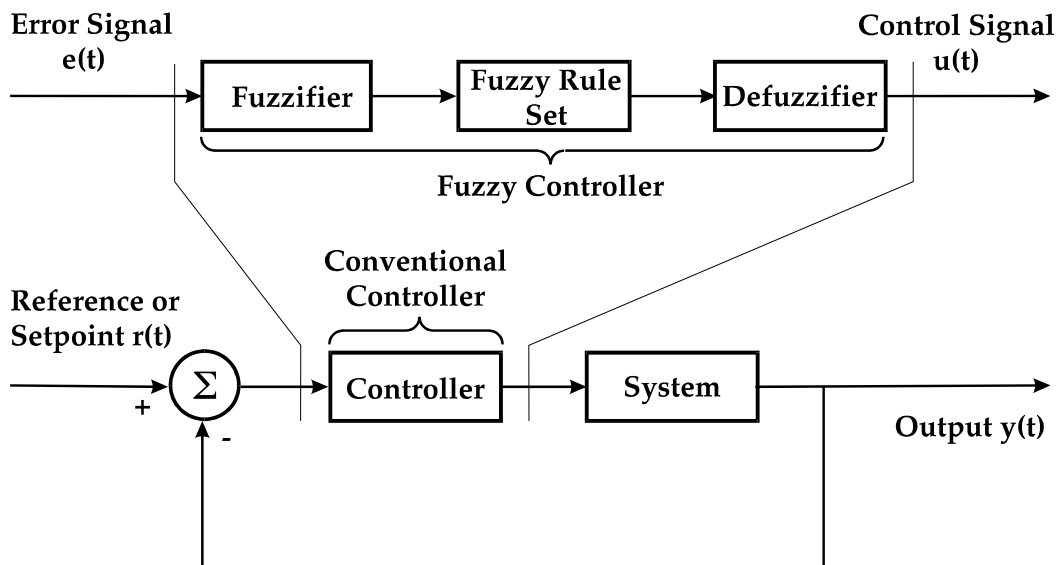


Figura 6. El controlador difuso y su relación con un lazo de control convencional.

El procedimiento adaptado en control difuso pretende imitar las acciones de un controlador tradicional utilizando reglas difusas y agregar características para tratar con sistemas de propiedades especiales como pueden ser algunos comportamientos no lineales.

5.1. Control difuso proporcional.

Una versión muy simple de un controlador proporcional difuso es la siguiente:

- Regla 1:** SI {error LN} ENTONCES {control LN}
- Regla 2:** SI {error MN} ENTONCES {control MN}
- Regla 3:** SI {error S} ENTONCES {control S}

Regla 4: SI {error MP} ENTONCES {control MP}

Regla 5: SI {error LP} ENTONCES {control LP}

De hecho este conjunto de reglas produce exactamente la misma acción de control lineal como un controlador proporcional con una ganancia uno, operando sobre la señal de error. Esto no representa ninguna ventaja. Sin embargo, la ganancia del controlador puede ser no lineal cambiando las reglas difusas, lo cual puede ser muy útil en aplicaciones especiales. Para dar un ejemplo muy sencillo, considera el caso del sistema de tanques acoplados, donde la bomba de entrada no puede ser manejada hacia atrás para extraer agua de los tanques (por ejemplo la entrada de control mínimo es 0V) y la señal de entrada al amplificador de la bomba no aceptara mas de un máximo de 10V. Dichos límites prácticos en el rango de operación de un actuador en un sistema de control son normales. Es fácil adaptar un controlador difuso para responder a estas especificaciones. Un controlador proporcional difuso que incorpora la limitante de una señal de entrada mínima de 0V será:

Regla 1: SI {error LN} OR {error MN} OR {error S} ENTONCES {control S}

Regla 2: SI {error MP} ENTONCES {control MP} (RS4)

Regla 3: SI {error LP} ENTONCES {control LP}

Aquí el nivel S es 0V y la Regla 1 asegura que la bomba no recibe señales negativas. La figura 7 es una implementación de este conjunto de reglas:

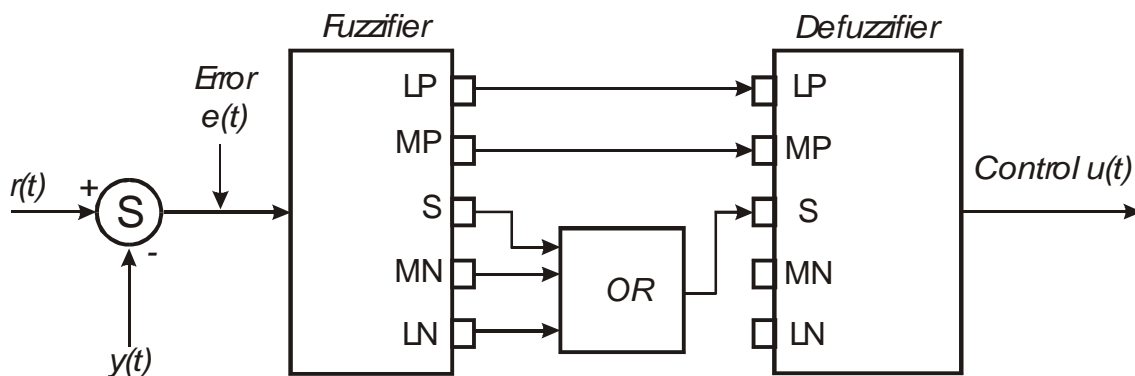


Figura 7. Implementación de el conjunto de reglas difusas RS4

Esta es una demostración simple. Con reglas difusas mas elaboradas, pueden implementarse factores no lineales más complejos. Muchos profesionales cuestionaran si este es el camino correcto para diseñar un controlador no lineal, sin embargo los ingenieros prácticos algunas veces hacen esto donde existe cierta certeza positiva sobre las implicaciones en la estabilidad del sistema.

5.2. Control difuso proporcional derivativo.

El controlador difuso proporcional puede ser extendido fácilmente para incluir la acción integral y derivativa. Aquí vamos a discutir solamente la extensión derivativa. En este caso el controlador difuso opera sobre la señal de error $e(t)$ y la derivada de la señal de salida $\frac{dy(t)}{dt}$ y produce una salida del

‘defuzzificador’ que es la señal de control $u(t)$. (Ver las notas de aplicación sobre el control de tres términos en nuestra pagina Web www.control-systems-principles.co.uk para que entiendas por que se usa la derivada de la salida y no la derivada del error). El controlador difuso se basa en dos señales: el error y el rango de cambio de la salida. En este contexto es importante resaltar que el controlador difuso no contiene elementos dinámicos. Todos los componentes dinámicos están afuera del controlador y son obtenidos mediante una medición directa del sistema o por medio del procesamiento de las señales de entrada y salida del sistema. La derivada de la salida puede estar disponible como una medición directa o a través de un observador de los estados del sistema.

Después de la “fuzzificación” del error y el rango de la salida, las reglas difusas se aplican a las variables recién “fuzzificadas”. El rol de la retroalimentación del rango en un controlador convencional es reducir la acción de control si la salida esta cambiando muy rápido. Esto reduce la posibilidad de que la salida sobrepase el valor de referencia deseado $r(t)$. Usando este principio, las reglas difusas pueden ser escritas para evitar estos eventos. Por ejemplo, en el conjunto de reglas que se muestra abajo, las primeras cinco reglas proveen control proporcional difuso. Las reglas 6 y 7 tratan de compensar cambios rápidos cuando el error es pequeño, generando un componente de control que reducirá el rango de cambio en la salida del sistema.

- Regla 1:** SI {error LP} ENTONCES {control LP}
Regla 2: SI {error MP} ENTONCES {control MP}
Regla 3: SI {error S } ENTONCES {control S}
Regla 4: SI {error MN} ENTONCES {control MN}
Regla 5: SI {error LN} ENTONCES {control LN}
Regla 6: SI {error S} AND {rango de salida LP } ENTONCES {control LN}
Regla 7: SI {error S} AND {rango de salida LN } ENTONCES {control LP}

Este conjunto de reglas aproxima las acciones de control proporcional y derivativa pero solamente cuando el error es pequeño. Estudiando un controlador lineal convencional con retroalimentación del rango de cambio, es posible conformar conjuntos de reglas para imitarlo. Por ejemplo la ley de control convencional proporcional derivativa es:

$$u(t) = k_p e(t) - k_d \frac{dy(t)}{dt}$$

Donde k_p es la ganancia proporcional y k_d es la ganancia de retroalimentación derivativa. A partir de esta ecuación, es posible deducir un conjunto equivalente simple de reglas difusas, como sigue:

- Regla 1:** SI {error N} AND {cambio de P} ENTONCES {control N}
Regla 2: SI {error N} AND {cambio de N} ENTONCES {control S}
Regla 3: SI {error P} AND {cambio de N} ENTONCES {control P}
Regla 4: SI {error P} AND {cambio de P} ENTONCES {control S}

El control difuso correspondiendo a este conjunto de reglas es una aproximación no detallada del comportamiento de un controlador con acción proporcional derivativa. Con estas cuatro reglas, la calidad del control que puede alcanzarse seria pobre. Para ver esto, la figura 8 muestra una vista isométrica de la señal de control graficada como una función del error y del cambio en la salida. Nótese que la acción de control se mueve solamente entre tres valores +10V, 0V y -10V. Los pobres resultados de este conjunto de reglas pueden mejorarse si se agregan mas niveles de “fuzzificación” para alcanzar una aproximación mas cercana a la verdadera ley de control. Por ejemplo, la figura 9 muestra la superficie de control que corresponde a cinco niveles de “fuzzificación” en las reglas de control.

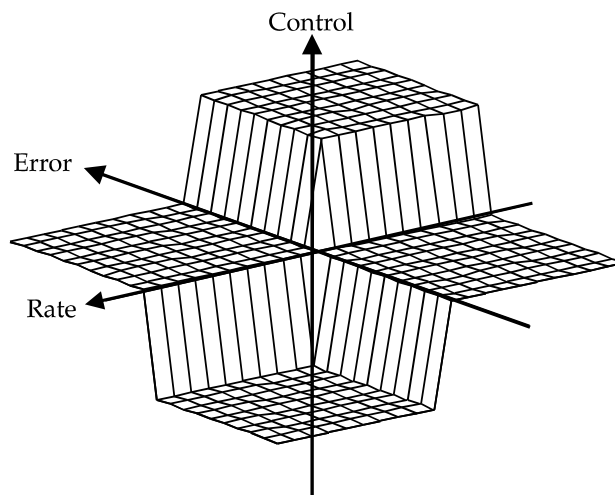


Figura 8. Gráfico isométrico de la señal de control con respecto al error y cambio del error en la salida utilizando un controlador difuso de tres niveles.

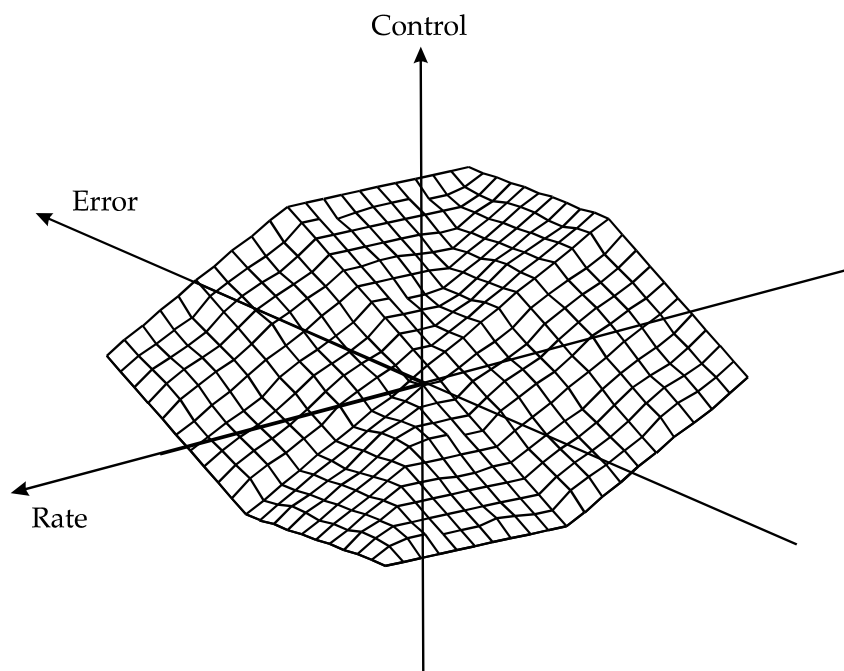


Figura 9. Gráfico isométrico para la señal de control con respecto al error y cambio del error en la salida utilizando un controlador difuso de cinco niveles.

La adición de niveles de clasificación extra nos da una superficie de control mucho más suave e incrementando el número de niveles de “fuzzificación” aun más podemos obtener una aproximación mucho más cercana. Sin embargo, no es el propósito del control difuso emular al control convencional y estos resultados se incluyen solamente como demostración. El control difuso generalmente se aplicara bien a sistemas simples de control como por ejemplo productos domésticos que se mencionaron al principio de este artículo o también a sistemas donde se pueden compensar fácilmente las características no lineales utilizando una base especial de reglas difusas.

6. Sistemas de lógica difusa

Entre muchos sistemas de lógica difusa disponibles, el sistema que se muestra en la figura 10 es un equipo típico. Su presentación representa el esquemático del sistema difuso, con dos “fuzzificadores” en la izquierda del panel (arriba y abajo del logotipo de TQ), una tabla de estados difusos en la parte superior central y un conjunto de operadores difusos AND, OR y NOT (de nuevo en el centro). Además podemos encontrar el “defuzzificador” en la parte derecha.

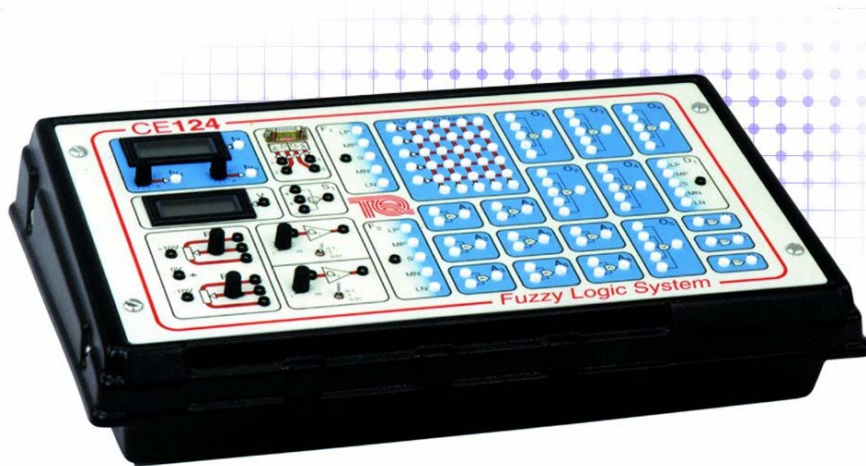


Figura 10. El sistema de Lógica Difusa CE124 manufacturado por TQ.

El sistema mostrado en la figura 10 ha sido especialmente diseñado para permitir al usuario una implementación rápida de sistemas basados en lógica difusa en una forma intuitiva. Gracias a que los componentes de lógica difusa están representados por separado, es fácil conectar las reglas difusas de un diagrama de bloques y luego seguir las variaciones en las señales “fuzzificadas” en todo el sistema (utilizando los medidores difusos que también se incluyen en el sistema). Esta propiedad es muy importante y útil durante la etapa de desarrollo y prueba de un hardware real. En particular el diseñador puede evaluar la forma en que cambian las funciones de membresía en el tiempo y verificar que la base de reglas esta realmente haciendo lo que debe. Re-cablear el sistema difuso es rápido y fácil, de tal forma que el sistema de control difuso puede ser puesto a prueba y mejorado en línea. Por las mismas razones, el CE124 es una herramienta de aprendizaje muy recomendable. Hemos encontrado que la gente considera los conceptos de la lógica difusa como difíciles, pueden entender dichos conceptos después de una sesión con el hardware del CE124.

El equipo CE124 ofrece distintas opciones de hardware y software para el desarrollo de sistemas basados en lógica difusa. Esto contrasta con otros productos usados en este campo que normalmente requieren de algunos paquetes de Matlab para operar, como por ejemplo el ‘Fuzzy Logic Toolbox’. Los paquetes de software pueden ser herramientas muy poderosas y pueden contener características avanzadas de los sistemas difusos, sin embargo son generalmente herramientas de simulación por lo que una implementación práctica es difícil de concretar.

7. Palabras finales

Esperamos que ahora hayas comprendido algunas ideas sobre el uso de la lógica difusa aplicada al control. A pesar de que tenemos numerosas preguntas, pedimos disculpas por adelantado por que no podemos contestar tus preguntas o dudas sobre detalles en el contenido de estas notas, a menos de que tengamos un acuerdo con tu organización. Para más información sobre sistemas de control difuso y el sistema de desarrollo de lógica difusa CE124 manufacturado por TQ Ltd, consulta la pagina de Internet de TQ, utiliza las ligas de interés en nuestro sitio Web www.control-systems-principles.co.uk, o escribe directamente a TQ en el correo electrónico: info@tq.com.

El control de nivel de procesos y el sistema de tanques acoplados puedes también consultarlos en nuestra gama de artículos técnicos en la pagina Web de 'Control Systems Principles'.

Gracias a que hemos trabajado en sistemas de control difuso por un buen tiempo, estas notas técnicas contienen una buena cantidad de información útil acerca de su forma de operar. Si deseas saber mas acerca de sistemas difusos existen muchos artículos de investigación muy detallados así como algunos libros de texto en control difuso. De cualquier manera te recomendamos iniciar con los artículos originales escritos por Lofti Zadeh. Recuerda que la lógica difusa ha llegado a ser un campo de experimentación para muchos investigadores por lo que debes ser cuidadoso y selectivo en el material que consultas. Así mismo es importante comentar que los ingenieros e investigadores japoneses han tomado muy en serio la lógica difusa, por lo tanto es recomendable prestar especial atención a sus publicaciones ya que a menudo contienen material muy relevante e informativo.