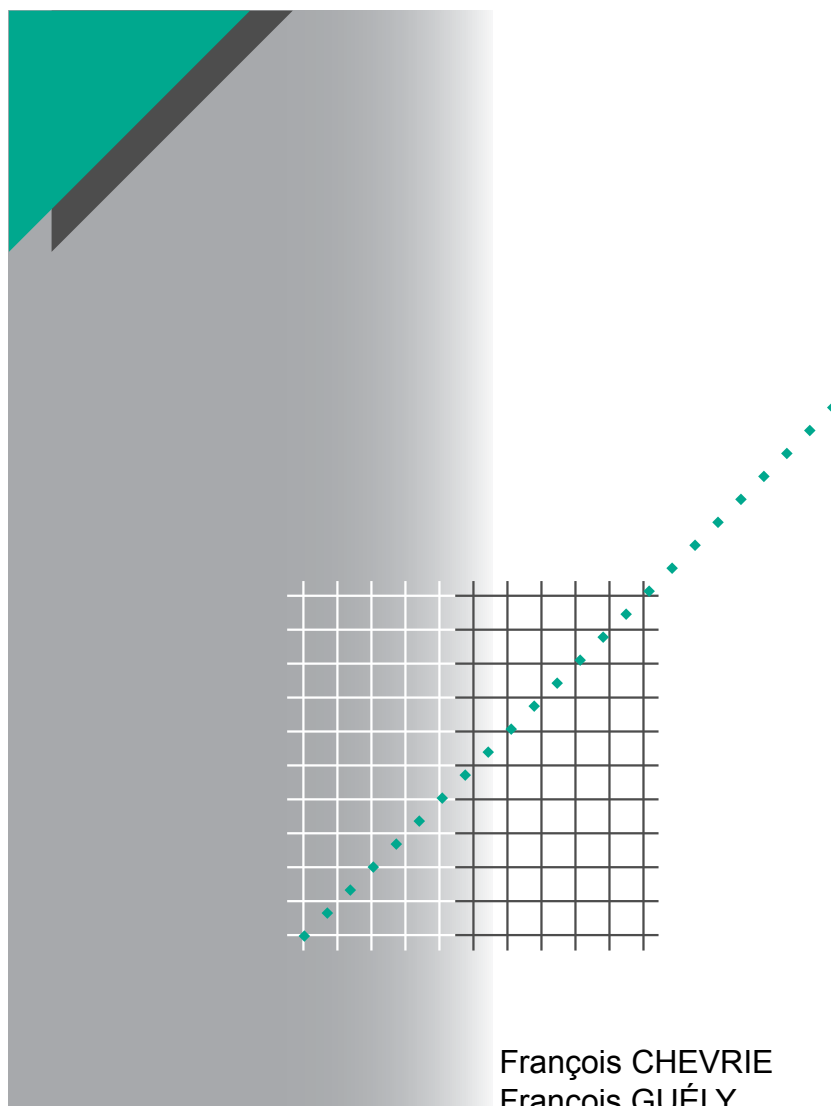
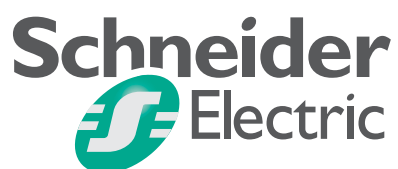


Cuaderno Técnico nº 191

La lógica difusa



François CHEVRIE
François GUÉLY



La **Biblioteca Técnica** constituye una colección de títulos que recogen las novedades electrotécnicas y electrónicas. Están destinados a Ingenieros y Técnicos que precisen una información específica o más amplia, que complemente la de los catálogos, guías de producto o noticias técnicas.

Estos documentos ayudan a conocer mejor los fenómenos que se presentan en las instalaciones, los sistemas y equipos eléctricos. Cada uno trata en profundidad un tema concreto del campo de las redes eléctricas, protecciones, control y mando y de los automatismos industriales.

Puede accederse a estas publicaciones en Internet:

<http://www.schneiderelectric.es>

Igualmente pueden solicitarse ejemplares en cualquier delegación comercial de **Schneider Electric España S.A.** o bien dirigirse a:

Centro de Formación Schneider
C/ Miquel i Badia, 8 bajos
08024 Barcelona

Telf. (93) 285 35 80
Fax: (93) 219 64 40
e-mail: formacion@schneiderelectric.es

La colección de **Cuadernos Técnicos** forma parte de la «Biblioteca Técnica» de **Schneider Electric España S.A.**

Advertencia

Los autores declinan toda responsabilidad derivada de la incorrecta utilización de las informaciones y esquemas reproducidos en la presente obra y no serán responsables de eventuales errores u omisiones, ni de las consecuencias de la aplicación de las informaciones o esquemas contenidos en la presente edición.

La reproducción total o parcial de este Cuaderno Técnico está autorizada haciendo la mención obligatoria:
«Reproducción del Cuaderno Técnico nº 191 de Schneider Electric».

Cuaderno Técnico nº 191

La lógica difusa



François CHEVRIE

Entra en Telemecanique en 1987 y se incorpora al servicio de automática avanzada de la Dirección de la investigación en 1993. Ingeniero CNAM en automatismos industriales, hizo su trabajo de final de carrera sobre la integración de la lógica difusa en los autómatas Schneider.

Ha participado activamente en la preparación de la oferta del producto de lógica difusa para la gama de los autómatas Micro/Premium, y en la puesta en funcionamiento de muchas instalaciones con esta técnica, especialmente en industrias de automoción y agroalimentarias.



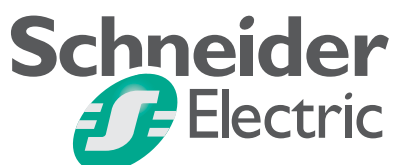
François GUÉLY

Diplomado de la Escuela Central de París en 1988, entró en Telemecanique, en el Japón, en 1990, doctorándose en automática en 1994; es responsable del servicio Automática Avanzada de Schneider desde 1995. Ha participado en la elaboración de la extensión hacia la lógica difusa de la norma de los lenguajes para autómatas programables.

Trad.: Ángel Martínez

Original francés: marzo 1998

Versión española: marzo 2002



Terminología

Activación:

Ver grado de verdad.

Base de conocimientos:

Conjunto de funciones de pertenencia y de las reglas de un sistema difuso conteniendo el informe, el conocimiento del operador, del experto, etc.

Conclusión:

Una conclusión de regla es una proposición que asocia una variable lingüística y un término lingüístico escrito después del «por tanto» de la regla. Una conclusión puede estar constituida por varias proposiciones.

Condición:

Ver Predicado.

Defuzificación:

Transformación en valor numérico, después inferencia, de un conjunto difuso de una variable lingüística de salida.

Grado de activación:

Ver Grado de verdad.

Grado de pertenencia:

Un elemento x perteneciente a un conjunto difuso A con un grado de pertenencia comprendido entre 0 y 1, dado por la función de pertenencia $\mu_A(x)$

Grado de verdad:

El grado de verdad, o grado de activación, de una regla toma un valor «y» comprendido entre 0 y 1 deducido de los grados de pertenencia de los predicados de la regla. Influye directamente sobre el valor de las conclusiones de esta misma regla. Se dice también que la regla está activa para «y».

Conjunto difuso:

En la teoría clásica de los conjuntos, es la función característica quién define el conjunto: esta función sólo toma los valores discretos 0 (elemento no pertenece al conjunto) ó 1 (pertenece al conjunto). Un conjunto difuso está definido por una función de pertenencia que puede tomar todos los valores reales comprendidos entre 0 y 1.

Función de pertenencia:

Función $\mu_A(x)$ quien a todos los valores de entrada x corresponde su grado de pertenencia al conjunto A . Este valor gradual está comprendido entre 0 y 1.

Fusión captadores:

Ver Fusión de datos.

Fusión de datos:

La fusión de datos consiste en extraer, a partir de muchos datos, una o muchas informaciones pudiendo ser de naturaleza diferente. Ejemplo: las magnitudes R , V y B del color de un biscuit, deducen el estado de cocción del biscuit. Se habla igualmente de fusión captadores.

Fuzificación:

Transformación de un valor numérico en grado de pertenencia difusa por evaluación de una función de pertenencia.

Inferencia:

Ciclo de cálculo de los grados de activación de todas las reglas de la base así como de todos los conjuntos difusos de las variables lingüísticas que se encuentran en las conclusiones de estas reglas.

Predicado:

Llamado también premisa o condición, un predicado de regla es una proposición asociando una variable lingüística y un término lingüístico escrito entre el «si» y el «por tanto» de la regla. Un predicado puede estar formado por la combinación de muchas proposiciones.

Premisa:

Ver Predicado.

Singleton:

Función de pertenencia $\mu_A(x)$ «puntero», es decir nula para todo x , salvo en un punto singular x_0 .

Término lingüístico:

Término asociado a una función de pertenencia caracterizando una variable lingüística.

Variable lingüística:

Variable numérica aplicada en entrada, para fuzificación, o en salida, después defuzificación, de un módulo de lógica difusa. Se le atribuye el adjetivo lingüístico porque está utilizada, en las funciones de pertenencia y las reglas, por su nombre y no por un valor numérico.

La lógica difusa

En los inicios teóricos, la lógica difusa se reafirma como una técnica operacional. Utilizada junto a otras técnicas de control avanzado. Sus inicios son discretos, pero apreciados en los automatismos de control industrial.

La lógica difusa no sustituye a los sistemas de regulación convencional. Es complementario. Sus ventajas se deben a su capacidad de:

- formalizar y simular el informe de un operador o de un diseñador en la conducción y el reglaje de un procedimiento,
- dar una respuesta simple para los procedimientos cuya modelización es difícil,
- tomar en cuenta sin discontinuidad unos casos o excepciones de naturalezas diferentes, y las integra poco a poco en el informe,
- tomar en cuenta varias variables y efectuar de la «fusión ponderada» unas magnitudes de influencia.

¿Cuál es el aporte de esta técnica en la conducción de un proceso industrial?

¿Cuál puede ser el impacto sobre la calidad y el coste de la fabricación del producto?

Después de algunas nociones teóricas de base, este Cuaderno Técnico responde al Ingeniero de automatización y al utilizador potencial a través de los ejemplos industriales, en términos de puesta a punto y de ventajas competitivas.

Índice

1 Introducción	1.1 La lógica difusa hoy	p. 6
	1.2 Historia de la lógica difusa	p. 6
	1.3 Interés y utilización de la lógica difusa para el control	p. 7
2 Teoría de los conjuntos difusos	2.1 Noción de pertenencia parcial	p. 8
	2.2 Funciones de pertenencia	p. 8
	2.3 Operadores lógicos difusos	p. 10
	2.4 Reglas difusas	p. 11
3 Ejemplo didáctico de aplicación	3.1 Introducción	p. 16
	3.2 Presentación del ejemplo	p. 16
	3.3 Variables y términos lingüísticos	p. 17
	3.4 Reglas y salidas	p. 18
4 Puesta en marcha	4.1 ¿Cuándo se pueden utilizar las bases de reglas difusas?	p. 19
	4.2 Concepción de una aplicación	p. 19
	4.3 Explotación de una aplicación	p. 20
	4.4 Selección de la tecnología de puesta en marcha	p. 21
	4.5 Normas	p. 22
5 Aplicaciones difusas	5.1 Tipos de utilización	p. 23
	5.2 Ejemplos de realizaciones industriales	p. 24
6 Conclusión		p. 29
Anexo		p. 30
Bibliografía		p. 32

1 Introducción

1.1 La lógica difusa hoy

La lógica difusa hoy, en la mayoría de las aplicaciones actuales, permite tener en cuenta todos los conocimientos cualitativos de diseñadores y de operadores en la automatización de los sistemas.

Ello suscita en Francia un interés mediático en los inicios de los años 90. Las numerosas aplicaciones en los electrodomésticos y la electrónica de consumo realizadas especialmente en el Japón han sido el elemento desencadenante.

Máquinas de lavar sin reglaje, detectores de movimiento y de otras numerosas innovaciones han hecho conocer el término «lógica difusa» a muchas personas.

En el automóvil las transmisiones automáticas, los controles de inyección y de antichoque, el aire acondicionado están realizados sobre unos vehículos de serie gracias a la lógica difusa.

En el campo de los procesos de producción, continuo y por partes y en los automatismos (que nos interesan esencialmente aquí) las aplicaciones se multiplican. La lógica difusa se ha desarrollado porque se trata de un acercamiento esencialmente pragmático, eficaz y genérico. Se dice a veces que permite sistematizar el terreno del empirismo y entonces se hace difícil de dominar. La teoría de los conjuntos difusos facilita un método pertinente y fácilmente realizable en las aplicaciones en tiempo real; permite transcribir y dar dinamismo a los conocimientos de los diseñadores o de los operadores.

Este aspecto adaptable y universal de la lógica difusa permite acometer la automatización de procesos tales como la puesta en marcha, el reglaje de parámetros, para los cuales poco existía anteriormente.

Este Cuaderno Técnico presenta la lógica difusa y sus aplicaciones en el marco de los procesos de producción.

1.2 Historia de la lógica difusa

Aparición de la lógica difusa:

El término de conjunto difuso aparece por primera vez en 1965 cuando el profesor Lotfi A. Zadeh, de la Universidad de Berkeley en USA, publicó un artículo titulado «Conjuntos fluidos» (Fuzzy sets). Él ha realizado después de numerosos avances teóricos en el campo y ha estado rápidamente acompañado por numerosos investigadores desarrollando unos trabajos teóricos.

Primeras aplicaciones

Paralelamente, ciertos investigadores se han inclinado por la lógica difusa en problemas ciertamente difíciles. Así en 1975, el profesor Mandani en Londres desarrolló una estrategia para el control de los procedimientos y presentó los resultados más esperanzadores que se han obtenido sobre la conducción de un motor a vapor. En 1978, la sociedad danesa F. L. Smidth realizó el control de un horno de cemento. Esta es la primera aplicación real industrial de la lógica difusa.

Desarrollo

Es en el Japón donde la búsqueda no es solamente teórica pero igualmente más aplicativa, la lógica difusa conoce su verdadero desarrollo. Al final de los años 1980 se produce un verdadero boom que hace hablar. Los productos del gran consumo, máquinas de lavar, aparatos de fotografía y otros aparatos «fuzzy logic» son numerosos. En la industria, se contempla el tratamiento de aguas, las grúas portuarias, los metros, los sistemas de ventilación y de climatización. En fin existen aplicaciones existen en unos campos muy diferentes tales como la banca o los diagnósticos médicos.

A partir de 1990, es en Alemania donde las aplicaciones aparecen en gran número aunque en menor escala que en USA. En fin en Francia, la lógica difusa hoy es una realidad.

1.3 Interés y utilización de la lógica difusa para el control

Interés

La lógica difusa se encuentra en cierto número de pruebas:

- Los conocimientos que el ser humano tiene de una situación cualquiera es generalmente imperfecta,
 - ello puede ser incierto (duda de su validez),
 - o impreciso (él tiene dificultad para expresar claramente).
 - El ser humano resuelve a menudo los problemas complejos con la ayuda de datos aproximados: la precisión de los datos es a menudo inútil; por ejemplo para escoger un apartamento se podrá tener en cuenta la superficie, la proximidad de los comercios, la distancia del lugar de trabajo, el alquiler, sin por tanto tener necesidad de un valor muy preciso de cada uno de estos datos.
 - En la industria donde los técnicos, los operadores resuelven a menudo los problemas complejos de manera relativamente simple y sin tener necesidad de retocar el sistema. De la misma manera todo el mundo sabe que un modelo matemático no es necesario para conducir un vehículo y por tanto un vehículo es un sistema muy complejo.
 - Cuando la complejidad de un sistema aumenta, menos es posible hacer afirmaciones precisas sobre su comportamiento.
- De estas constataciones vienen naturalmente las deducciones siguientes:
- antes de conformar el sistema, es a menudo interesante amoldar el comportamiento de un operador humano cara al sistema,
 - antes de los valores numéricos precisos, el funcionamiento debe estar descrito por unos calificativos globales traduciendo el estado aproximado de las variables.

Utilización para el control

La lógica difusa es bien conocida en los automatismos para sus aplicaciones en el control-mando de procesos, llamada entonces corrientemente «control difuso». Todo como un controlador (o corrector) clásico, el controlador difuso se inserta en el bucle de regulación y calcula el comando a aplicar al procedimiento siguiente una o más consignas y una o más medidas efectuadas sobre éstas.

Las bases de reglas difusas son interesantes en comandos pues permiten:

- tener en cuenta un informe existente de naturaleza cualitativa,
- tener en cuenta las variables que difícilmente se integran en el bucle,
- de mejorar el funcionamiento de controladores clásicos, para:
- autorreglaje fuera de línea o en línea de las ganancias de estos controladores,
- modificación de su salida (feed forward) en función de sucesos que no pueden ser tenidos en cuenta por una técnica clásica.

La capitalización del saber hacer

Para considerar la utilización de las reglas difusas, se hace necesario que exista un informe, un saber hacer humano. Las bases de las reglas difusas no aportan solución cuando nadie sabe cómo funciona el sistema o no puede mandarlo manualmente.

Cuando este saber-hacer existe y es transcribible bajo forma de reglas difusas, se permite emplear la lógica difusa y el funcionamiento es fácilmente comprensible para el utilizador.

Más allá de la automatización, la lógica difusa permite una real capitalización del saber-hacer del terreno, a menudo buscada para evitar la parte del saber-hacer o para la desmultiplicación en la empresa.

Entonces en la colección de informes, el olvido inconsciente de informaciones, la dificultad de explicar, el temor de divulgar su saber son obstáculos, a menudo, encontrados. Esta etapa debe, entonces, estar preparada y manejada con cuidado, particularmente en el terreno humano.

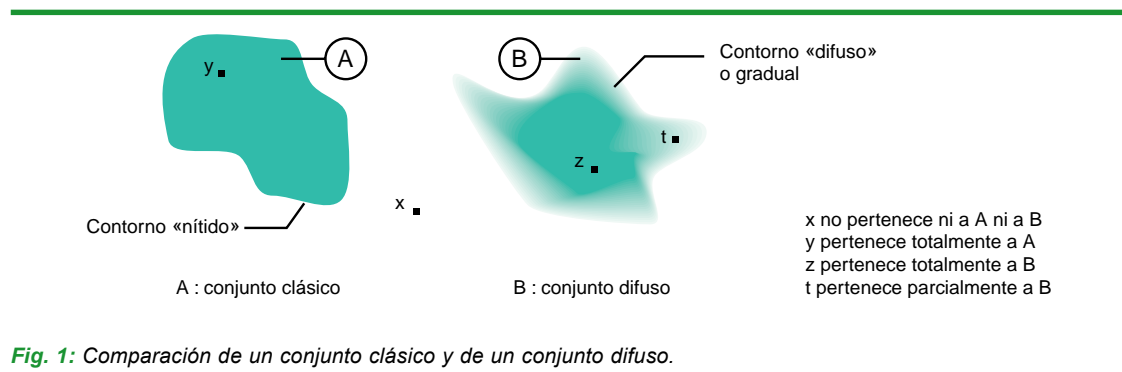
En el caso donde un informe humano existe, la utilización de las reglas difusas está considerada, con mayor razón cuando las imperfecciones tachen el conocimiento del sistema, cuando es muy complejo y su ajuste es difícil o cuando el modo de abordar pasa por una visión global de ciertos de sus aspectos. Las reglas difusas no sustituyen a los métodos clásicos de la automática pero los complementan.

2 Teoría de los conjuntos difusos

2.1 Noción de pertenencia parcial

En la teoría de conjuntos un elemento pertenece o no pertenece a un conjunto. La noción de conjunto es el origen de numerosas teorías matemáticas. Esta noción no permite, sin embargo, tener en cuenta unas situaciones simples que se encuentran frecuentemente. Entre unas frutas, es fácil definir el conjunto de manzanas. En contra, será mas difícil definir el conjunto de manzanas maduras. Se sabe bien que la manzana madura progresivamente... la noción de manzana madura es entonces gradual.

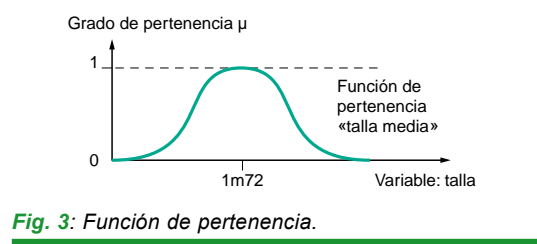
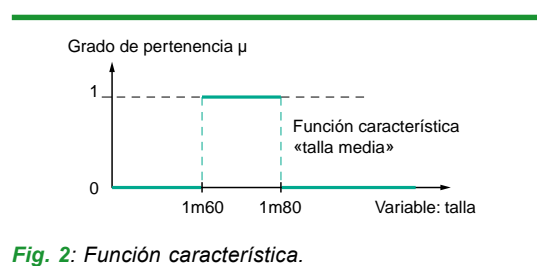
Para estas situaciones se ha creado la noción de conjunto difuso. La teoría de los conjuntos difusos se apoya en la noción de pertenencia parcial: cada elemento pertenece parcialmente o gradualmente a los conjuntos difusos que están definidos. Los contornos de cada conjunto difuso (**figura 1**) no son «nítidos», pero «difusos» o «graduales».



2.2 Funciones de pertenencia

Un conjunto difuso está definido por su «función de pertenencia» que corresponde a la noción de «función característica» en lógica clásica.

Suponemos que queremos definir el conjunto de unas personas de talla media. En lógica clásica convenimos por ejemplo que las personas de talla media son aquéllas que la talla está comprendida entre 1,60 m y 1,80 m. La función característica del conjunto (**figura 2**) da «0» para las tallas fuera del intervalo [1,60 m; 1,80 m] y «1» en este intervalo. El conjunto difuso de las personas de talla media estará definido por una «función de pertenencia» que difiere de una función característica por el hecho que ella puede tomar no importa que valor en el intervalo [0,1]. A cada talla posible corresponderá un grado de pertenencia al conjunto difuso de las tallas medias (**figura 3**) comprendido entre 0 y 1.



Varios conjuntos difusos pueden estar definidos sobre la misma variable, por ejemplo los conjuntos talla pequeña, talla media y talla grande, nociones explicadas cada una de ellas por una función de pertenencia (**figura 4**).

Este ejemplo muestra la gradualidad que permite introducir la lógica difusa. Una persona de 1,80 m pertenece al conjunto «talla grande» con un grado 0,3 y al conjunto «talla media» con un grado de 0,7. En lógica clásica, el paso de medio a grande será brusco. Una persona de 1,80 m sería por ejemplo de talla media mientras que una persona de 1,81 m sería grande, contrasta con la intuición. La variable (por ejemplo: talla) así como los términos (por ejemplo: medio, grande) definidas por las funciones de pertenencia llevan respectivamente los nombres de variables lingüísticas y de términos lingüísticos.

Como se verá más adelante, las variables y términos lingüísticos pueden ser utilizados directamente en las reglas.

Las funciones de pertenencia, teóricamente, pueden tomar cualquier forma. Sin embargo, a menudo, se definen por unos segmentos de recta, denominadas «lineal por tramos» (**figura 5**).

Las funciones de pertenencia «lineal por tramos» son muy utilizadas porque:

- son simples,
- se componen de unos puntos que permiten definir las zonas donde la noción es verdadera, las zonas donde es falsa, que simplifica el dictamen.

Éstas son las funciones de pertenencia que serán utilizadas en este documento.

En ciertos casos, la función de pertenencia puede ser igual a 1 para un solo valor de la variable e iguales a 0 por otra parte, y toman entonces el nombre de «funciones de pertenencia aproximada». Una aproximación difusa (**figura 6**) definida sobre una variable real (talla) es la traducción en el campo difuso de un valor particular (talla de Paul) de esta variable (anexo).

Fuzzificación - Grado de pertenencia

La operación de fuzzificación permite pasar del campo real al campo difuso.

Consiste en determinar el grado de pertenencia de un valor (medida por ejemplo) a un conjunto difuso. Por ejemplo (**figura 7**), si el valor corriente de la variable «entrada» es 2, el grado de pertenencia a la función de pertenencia entrada débil es igual a 0,4 que es el resultado de la fuzzificación.

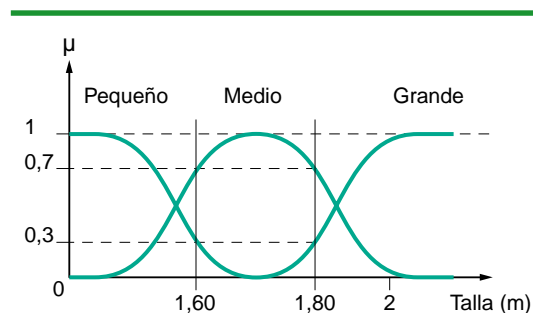


Fig. 4: Función de pertenencia, variable y término lingüístico.

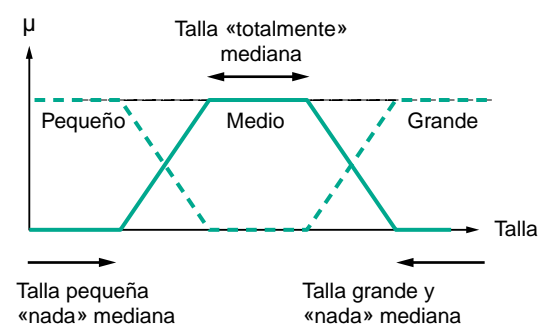


Fig. 5: Funciones de pertenencia líneas por tramos.

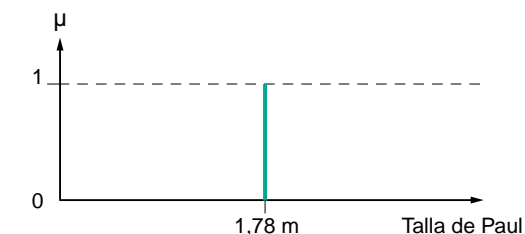


Fig. 6: Función de pertenencia aproximada.

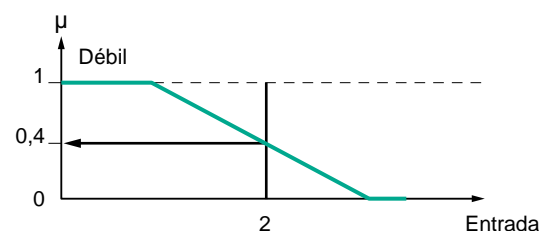


Fig. 7: Fuzzificación.

Se puede también decir que la proposición entrada débil es verdadera a 0,4. Se habla entonces de grado de verdad de la proposición. Grado de pertenencia y grado de verdad son, entonces, unas nociones similares.

2.3 Operadores lógicos difusos

Estos operadores permiten escribir unas combinaciones lógicas entre nociones difusas. Es decir hacer unos cálculos sobre unos grados de verdad. Igual que para la lógica clásica, se pueden definir unos operadores Y, O, negación.

Ejemplo: Apartamento interesante = Alquiler razonable y superficie suficiente.

Selección de los operadores

Existen numerosas variantes en estos operadores (**anexo**). Sin embargo, los más difundidos se llaman «de Zadeh» descritos más adelante. Su utilización será considerada en el ejemplo didáctico de utilización de una base de reglas difusas.

En adelante, el grado de verdad de una proposición A será asignada $\mu(A)$.

Intersección

El operador lógico correspondiente a la intersección de conjuntos es la Y. El grado de verdad de la proposición «A Y B» es el mínimo de los grados de verdad de A y de B:

$$\mu(A \text{ Y } B) = \text{MÍN}(\mu(A), \mu(B))$$

Ejemplo:

«Temperatura baja» es verdadera a 0,7,
«Presión débil» es verdadera a 0,5,
«Temperatura baja» Y «Presión débil» es entonces verdadera a 0,5 = MÍN (0,7;0,5)

Observación: El operador Y de la lógica clásica se cumple: 0 Y 1 da 0.

Unión

El operador lógico correspondiente a la unión de conjuntos es la O. El grado de verdad de la proposición «A O B» es el máximo de los grados de verdad de A y de B:

$$\mu(A \text{ O } B) = \text{MAX}(\mu(A), \mu(B))$$

Ejemplo:

Temperatura baja es verdadera a 0,7
Presión débil es verdadera a 0,5

Temperatura baja O Presión débil es entonces verdadera a 0,7.

Observación: El operador O de la lógica clásica se cumple: 0 O 1 da 1.

Complemento

El operador lógico correspondiente al complemento de un conjunto es la negación.

$$\mu(\text{NON } A) = 1 - \mu(A)$$

Ejemplo:

«Temperatura baja» es verdadera a 0,7
«NON Temperatura baja», que se utilizará generalmente bajo la forma «Temperatura NON baja», es entonces verdadera a 0,3.

Observación: El operador negación de la lógica se cumple: NON (0) da 1 y NON (1) da 0.

Contactos difusos

El lenguaje de contactos está muy utilizado en los automatistas para escribir las combinaciones lógicas. Ello permite en efecto su representación gráfica. Schneider ha introducido la utilización de la representación de contactos para describir las combinaciones lógicas difusas.

El siguiente ejemplo trata del confort del aire ambiente:

El aire caliente y húmedo es inconfortable (transpiración excesiva); lo mismo que la respiración se hace difícil en un aire frío y demasiado seco. Las situaciones más confortables térmicamente son aquellas en las cuales el aire es caliente y seco o frío y húmedo. Esta comprobación fisiológica puede ser transcrita por los contactos difusos de la **figura 8** correspondiente a la combinación siguiente:

Confort bueno = (Temperatura baja y Humedad fuerte) O (Temperatura alta y Humedad débil)

Representa una definición posible de la sensación de confort de una persona en un ambiente térmico para la cual el aire está inmóvil.

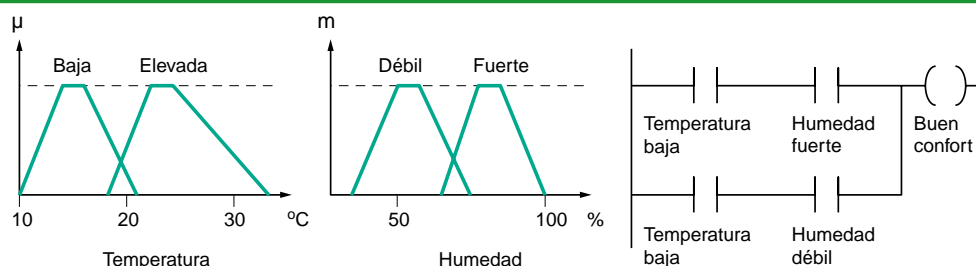


Fig. 8: Contactos difusos.

Clasificación difusa

La clasificación comprende en general dos etapas:

- preparatoria: determinación de las clases a considerar,
- en línea: Afectación de los elementos a las clases.

La noción de clase y de conjunto son idénticas sobre la teoría.

Existen tres tipos de métodos de afectación, según el resultado producido:

- booleano: los elementos pertenecen o no a las clases.
- probabilístico: Los elementos tienen una probabilidad de pertenecer a las clases booleanas, como por ejemplo la probabilidad de que un paciente tenga la Rubéola al ver unos síntomas que se le presentan (diagnóstico).

- gradual: Los elementos tienen un grado de pertenencia a los conjuntos; por ejemplo, una ensalada pertenece más o menos a la clase de las ensaladas frías.

Los métodos de clasificación, que produzcan un resultado gradual, booleano o probabilístico, pueden ser considerados a partir:

- de una experiencia (caso de «contactos difusos» mencionado anteriormente).
- de ejemplos utilizados por un aprendizaje (por ejemplo en el caso de clasificar una red de neuronas).
- de un conocimiento matemático o físico de un problema (por ejemplo el confort de una situación térmica puede ser evaluada a partir de ecuaciones de balance térmico).

Los métodos de clasificación gradual (o difuso) permiten, esencialmente, poner a punto los bucles de regulación. Este es el caso del ejemplo de la cocción industrial de los biscuits expuesto más adelante.

2.4 Reglas difusas

La lógica difusa y la inteligencia artificial

La lógica difusa tiene por objetivo tener en cuenta y poner en práctica la manera de razonar de un ser humano. Por tanto, ello puede considerarse en el campo de la inteligencia artificial. La herramienta más utilizada en las aplicaciones de lógica difusa es la base de reglas difusas. Una base de reglas difusas está compuesta de reglas que están generalmente utilizadas en paralelo, pero pueden igualmente estar encadenadas en ciertas aplicaciones.

Una regla es de tipo:

SI «predicado» ENTONCES «conclusión».

Por ejemplo: «Si temperatura elevada y presión fuerte ENTONCES ventilación alta y válvula grande abierta».

Las bases de reglas difusas, así como los sistemas expertos clásicos, se apoyan sobre una base de conocimientos sacados de la experiencia humana. Hay sin embargo grandes diferencias en las características y el tratamiento de estos conocimientos (figura 9).

Bases de reglas difusas experto)	Base de reglas clásicas (sistema
Pocas reglas	Muchas reglas
Tratamiento gradual	Tratamiento booleano
Encadenamiento posible pero poco útil	Reglas encadenadas $A \text{ O } B \Rightarrow C$ $C \Rightarrow D,$ $D \text{ Y } A \Rightarrow E$
Reglas tratadas en paralelo secuencialmente	Reglas utilizadas una por una,
Interpolación entre reglas pueden ser contradictorias	No interpolación, no contradicción

Fig. 9: Base de reglas difusas y base de reglas clásicas.

Una regla difusa se compone de tres etapas funcionales, resumidas en la **figura 10**.

Predicado

Un predicado (aunque llamado premisa o condición) es una combinación de proposiciones para los operadores Y, O, NO.

Las proposiciones «temperatura elevada» y «presión fuerte» del ejemplo precedente están combinadas por el operador Y para formar el predicado de la regla.

Inferencia

El mecanismo de inferencia más comúnmente utilizado se llama «de Mamdani». Representa una simplificación del mecanismo más general basado sobre «la implicación difusa» y «el modo generalizado». Estos conceptos están explicados en el anexo. Sólo las bases de reglas «de Mamdani» se utilizan seguidamente.

Conclusión

La conclusión de una regla difusa es una combinación de proposiciones unidas por unos operadores Y. En el ejemplo precedente, «ventilación alta» y «válvula grande abierta» son la conclusión de la regla.

No se utiliza la cláusula O en las conclusiones, pues introducen una incertidumbre en el conocimiento (el informe no permite determinar qué decisión tomar). Esta incertidumbre no se toma en cuenta por el mecanismo de inferencia «de Mamdani» no se adapta entonces a priori a un diagnóstico de tipo «diagnóstico médico»

para el cual las conclusiones son inciertas. La teoría de las posibilidades, inventada por Lotfi Zadeh, aporta en este caso una metodología adecuada.

De la misma manera, la negación está a priori prohibida en las conclusiones para las reglas de Mamdani. En efecto, si una regla tenía por ejemplo la conclusión «entonces ventilación no media», sería imposible decir si esto significa «ventilación débil» o «ventilación fuerte». Esto sería también un caso de incertidumbre.

Mecanismo de inferencia de Mamdani

■ Principio

Una base de reglas difusas de Mamdani comprende entonces unas reglas lingüísticas que hacen referencia a unas funciones de pertenencia para describir los conceptos utilizados (**figura 11**).

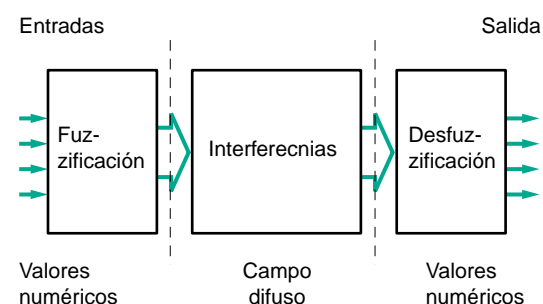
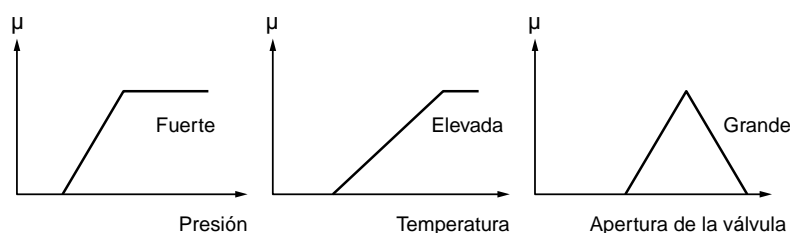


Fig. 10: Tratamiento difuso.

Si «presión fuerte» Y «temperatura elevada» ENTONCES «abrir válvula grande»



Si «presión media» Y «temperatura elevada» ENTONCES «abrir válvula mediana»

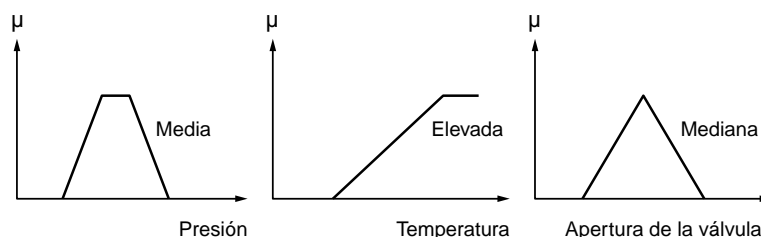


Fig. 11: Implicación.

Los mecanismos de inferencia comprenden las etapas siguientes:

■ Fuzzificación

La fuzzificación consiste en evaluar las funciones de pertenencia utilizadas en los predicados de las reglas, como ilustra la **figura 12**.

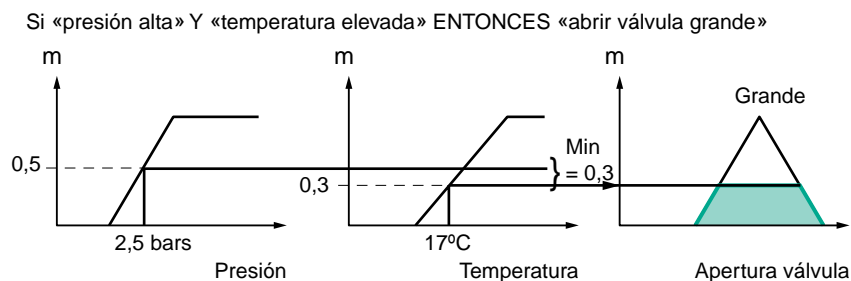
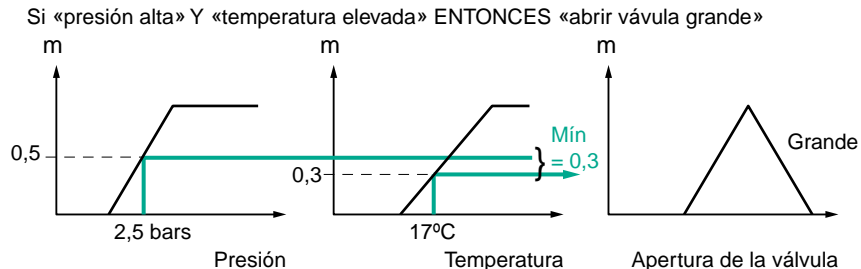
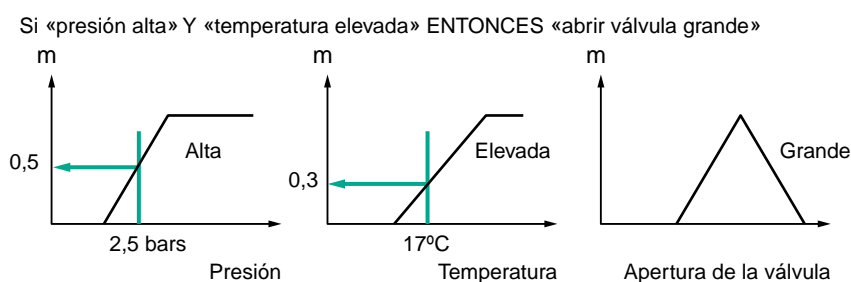
■ Grado de activación

El grado de activación de una regla es la evaluación del predicado de cada regla por combinación lógica de las proposiciones del predicado como ilustra la **figura 13**. La «Y» se

realiza efectuando el mínimo entre los grados de verdad de las proposiciones.

■ Implicación

El grado de activación de la regla permite determinar la conclusión de la regla, es la implicación. Existen más operadores de implicación (anexo), pero el más utilizado es el «mínimo». El conjunto difuso de conclusión está construido obteniendo el mínimo entre el grado de activación y la función de pertenencia, clase de «limitación» de la función de pertenencia de conclusión (**figura 14**).



Si «presión alta» Y «temperatura elevada» ENTONCES «abrir válvula grande»

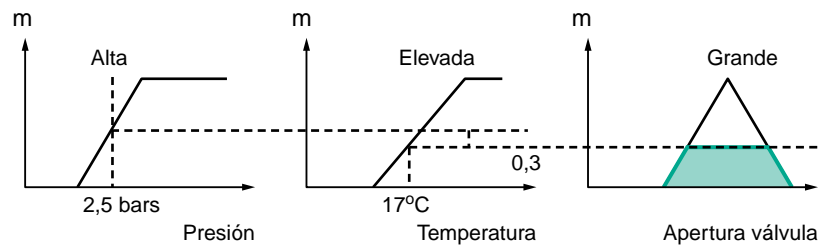


Fig. 15: Agresión de las reglas.

■ Asociación

El conjunto difuso global de salidas está construido por asociación de los conjuntos difusos obtenidos por cada una de las reglas concernientes a esta salida. El ejemplo siguiente presenta el caso donde dos reglas actúan sobre una salida. Se considera que las reglas están unidas por una «O» lógica, y se calcula entonces el máximo entre las funciones de pertenencia resultantes para cada regla (figura 15).

Defuzzificación

Al final de la inferencia, el conjunto difuso de salidas está determinado pero no es directamente utilizable para dar una información precisa al operador o mandar un accionador. Es necesario pasar del «mundo difuso» al «mundo real», es la defuzzificación.

Existen varios métodos, el más utilizado es el cálculo del «centro de gravedad» del conjunto difuso (figura 16).

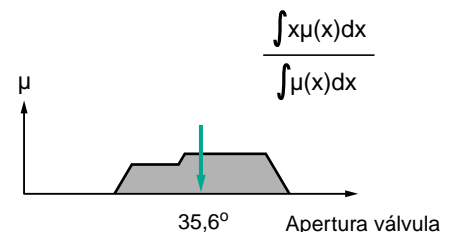


Fig. 16: Defuzzificación por centro de gravedad.

Reglas «libres» y «en tabla»

Las bases de reglas difusas, en general, se definen por unas funciones de pertenencia sobre las variables del sistema, y por unas reglas que pueden ser escritas textualmente. Cada regla hace referencia a unas entradas y unas salidas que pueden ser diferentes, como lo muestra el ejemplo siguiente:

R1: SI «temperatura elevada»
ENTONCES «salida elevada»

R2: SI «temperatura media»
Y «presión baja»
ENTONCES «salida media»

R3: SI «temperatura media»
Y «presión elevada»
ENTONCES «salida baja»

R4: SI «temperatura baja»
Y «presión elevada»
ENTONCES «salida muy baja»

Esquemáticamente, se pueden representar las «zonas de acción» de las reglas y su recubrimiento en la tabla de la **figura 17**.

Se constata que:

- todo espacio no está forzosamente cubierto; la combinación «temperatura baja» y «presión baja» aquí no se tiene en cuenta; la explicación es por ejemplo que esta combinación no es físicamente posible para esta máquina, o que no nos interesa; es preferible verificar ya que puede tratarse de un olvido,

- la primera regla solamente tiene en cuenta la temperatura; esta situación es un hecho normal en la medida donde ello refleja correctamente el informe existente.

Muchas de las aplicaciones se definen sin embargo en unas «tablas» de reglas. En esta óptica, el espacio es «cuadrículado», y a cada «caso» corresponde una regla. Esto acerca a la ventaja de ser sistemático, pero:

- no permite siempre traducir simplemente (en un mínimo de reglas) el informe existente,

- solamente es aplicable para dos incluso tres entradas, cuando unas bases de reglas «libres» pueden ser construidas con un número importante de variables.

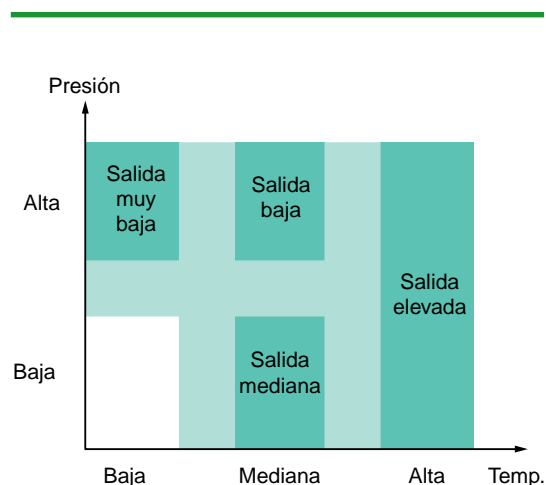


Fig. 17: Implicación representada en la tabla.

Observaciones

- Una base de reglas difusas tiene un comportamiento estático no lineal con relación a sus entradas.

- Las bases de reglas difusas no son dinámicas por ellas mismas, aunque se utilizan a menudo como entradas unas variables traduciendo la dinámica del sistema (derivadas, integrales,...) o el tiempo.

- El regulador «PID difuso», a menudo presentado como ejemplo didáctico para hacerse una idea sobre la lógica difusa, el interés principal es realizar un PID no lineal, esto raramente se utiliza en lugar de un PID clásico. Por otra parte es difícil la posibilidad de integrar un informe.

3 Ejemplo didáctico de aplicación

3.1 Introducción

La mayoría de las realizaciones de lógica difusa necesitan de un conocimiento especializado previo del dominio de la aplicación. A fin de ser accesible al lector, el ejemplo que sigue está

basado sobre una aplicación ficticia. Está destinado a ilustrar el modo de creación de una base de reglas difusas.

3.2 Presentación del ejemplo

Se trata de un proceso de lavado de ensaladas destinado a producir unas ensaladas pre-embaladas para los departamentos «frescos» de los supermercados.

Las ensaladas se cortan, después se lavan y al final se embalan. Este lavado está destinado a separar la ensalada de la tierra así como los microorganismos que pudieran proliferar durante la conservación del producto. El fabricante desea automatizar el proceso de lavado.

El lavado se realiza en continuo. Los trozos de ensalada se sitúan en unos «tambores» que se desplazan en un túnel donde se pulveriza con agua clorada. El agua permite evacuar la tierra, mientras que el cloro está destinado a matar los microorganismos (**figura 18**).

Las prioridades siguientes están realizadas por el marketing y ordenadas según su importancia:

- Frente al cliente
 - Garantizar la calidad
 - Ensaladas bien limpias (apariencia)
 - Ausencia de gusto de cloro
 - Garantizar la seguridad
 - Nivel de microorganismos aceptable
- Frente a la rentabilidad
 - Maximizar la producción
 - Economizar el agua
 - Economizar el cloro

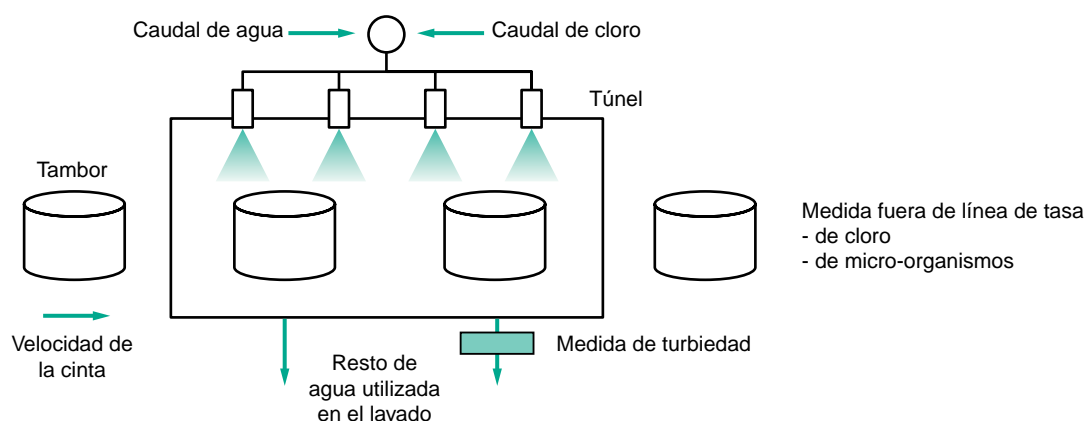


Fig. 18: Proceso de lavado de las ensaladas.

Los operadores controlan el proceso manualmente tienen el hábito de mirar el agua usada al final del lavado. Si el agua está clara, se deduce por experiencia que las ensaladas tendrán una apariencia «limpia». Se decide instalar un captador óptico «de turbiedad» permitiendo determinar el grado de transparencia de este agua.

Por otra parte, los operadores utilizan cada hora un informe de análisis efectuado en la fábrica, y dan la tasa de microorganismos en las ensaladas lavadas sacadas al final de línea, así como su tasa de cloro remanente.

Se desea entonces utilizar estas informaciones para un mejor control:

- la velocidad de transporte de las ensaladas (que permite aumentar el caudal de producción),
- la cantidad de cloro pulverizado,
- la cantidad de agua pulverizada,

Existen algunas limitaciones:

- sobre la velocidad de transporte, por la mecánica,
- sobre el caudal de agua a fin de no dañar las hojas.

3.3 Variables y términos lingüísticos

Se decide entonces deducir las variables siguientes:

■ Entradas:

- Tasa de microorganismos: Tasa_Micro
- Tasa de cloro remanente: Tasa_Cl
- Turbiedad del agua: Turbiedad
- Velocidad de transporte: Velocidad
- Caudal de agua: C_Agua

■ Salidas:

- Modificación del caudal de agua: Var_C_Agua
- Modificación del caudal de cloro: Var_C_Cl
- Modificación de la velocidad: Var_Vel

Un operador experimentado, un especialista en microbiología y un «degustador» de ensaladas permite obtener las funciones de pertenencia siguientes (**figura 19**).

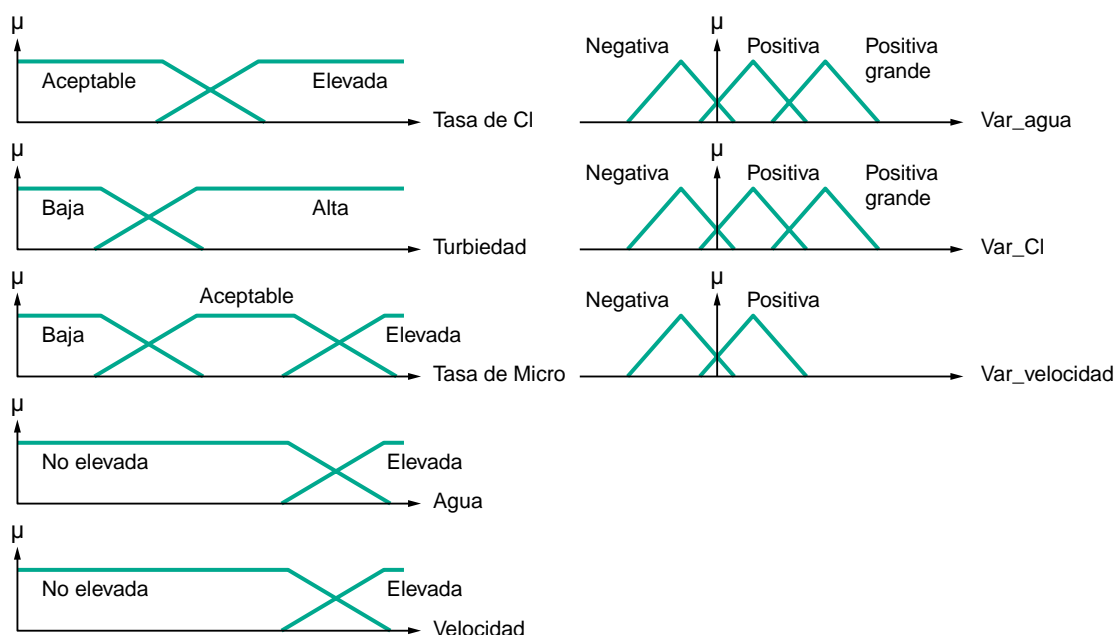


Fig. 19: Funciones de pertenencia lineales por tramos.

3.4 Reglas y salidas

Escritura de las reglas difusas

Una reunión con los operadores permite determinar las siete reglas siguientes, que corresponden cada una a un caso de la figura dada:

SI «Turbiedad alta» Y «C_Agua no elevada»
ENTONCES «Var_C_Agua positiva grande»
(ensaladas mal lavadas)

SI «Turbiedad alta» Y «C_Agua elevada»
ENTONCES «Var_Vel negativa»
(ensaladas mal lavadas pero la velocidad de la banda elevada)

SI «Tasa_Micro elevada»
ENTONCES
«Var_C_Cl positivo grande»
(demasiados microorganismos)

SI «Turbiedad débil» Y «Tasa_Micro no elevada» Y «Velocidad no elevada» Y «Tasa_Cl aceptable» Y «C_Agua no elevada»
ENTONCES
«Var_Vel positiva» Y «Var_C_Cl positivo» Y «Var_C_Agua positiva»
(todo va bien y es posible aumentar la producción)

SI «Tasa_Cl elevada» Y «Tasa_Micro no elevada»
ENTONCES «Var_C_Cl negativa»
(las ensaladas tienen sabor a cloro pero no tienen microorganismos)

SI «Velocidad elevada» Y «Tasa_Cl aceptable» Y «Turbiedad débil»
ENTONCES «Var_C_Agua negativa»
(todo va bien y la producción es máxima: economizar el agua)

SI «Tasa_Micro débil»
ENTONCES «Var_C_Cl negativa»
(ningún microorganismo: disminuir el cloro para economizar).

Defuzzificación

En la medida donde se desea un comportamiento progresivo de la base de reglas en todos los casos y una interpolación entre las reglas, se selecciona el centro de gravedad como operador de defuzzificación.

4 Puesta en marcha

4.1 ¿Cuándo se pueden utilizar las bases de reglas difusas?

La Selección de las bases de reglas difusas para resolver aplicaciones pueden hacerse cuando las condiciones siguientes se cumplen:

- posibilidad de actuar sobre el proceso,
- existencia de una peritación o de un saber hacer,

■ posibilidad de medir o de observar las magnitudes importantes (entradas y salidas),

■ informe cualitativo (si es matemática, la automática clásica se favorece),

■ informe gradual (si es booleano, los sistemas expertos se adaptan mejor).

4.2 Concepción de una aplicación

Selección de los operadores

En la mayoría de las aplicaciones, las bases de reglas «de Mamdani» se utilizan. Esta selección se adapta salvo si el informe comprende unas indeterminaciones.

Se escogen igualmente muy a menudo unas funciones de pertenencia «trapezoidales», porque son muy fáciles de implementar y simplifican la obtención del informe. Las funciones de pertenencia de salida son a menudo «singletons», salvo cuando las reglas están encadenadas. Una función de pertenencia de salida triangular significa en efecto una incertidumbre sobre la salida a aplicar, y no tiene mucho efecto sobre la interpolación entre las reglas.

En fin la defuzzificación se realiza por el «centro de gravedad» para la regulación (se tiene en cuenta todas las reglas activas); la utilización de

la «media de las máximas» para los problemas de toma de decisión, permite cortar en el momento que unas reglas están «en conflicto» y evitar acabar en una decisión intermedia.

Metodología

La concepción de una base de reglas difusas es un proceso interactivo. La mayor parte del trabajo se encuentra al nivel de recopilación de conocimientos. Uno de los intereses de la lógica difusa es la posibilidad de validar la base de reglas junto a la obtención del informe, antes de testear sobre un sistema real. La **figura 20** ilustra el modo empleado.

Recopilación de conocimientos

Puede ser descompuesto en tres etapas:

- listar las variables a tener en cuenta; derivarán en las variables lingüísticas de la base de reglas,

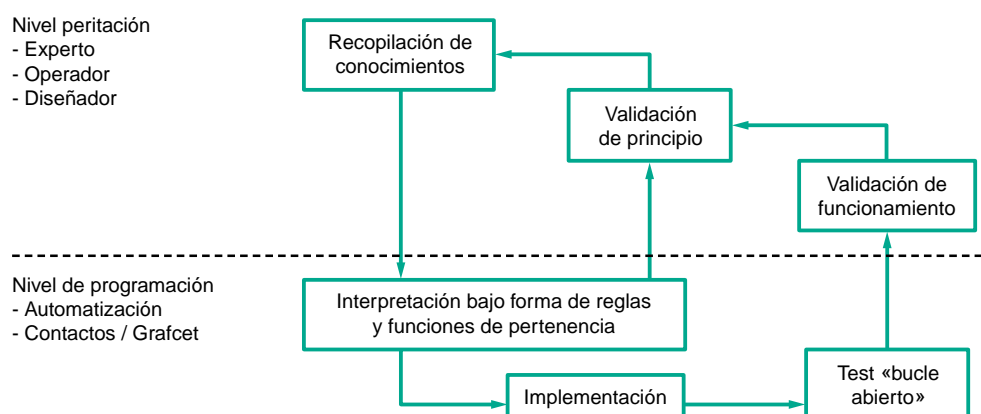


Fig. 20: Metodología de la concepción.

- listar las grandes cualidades a tomar en cuenta, precisar cuándo ellas son verdaderas y falsas. Estos tamaños derivan en los términos lingüísticos de la base de reglas,
- expresar cómo estos conceptos son manipulados: cuáles son los casos a considerar, cómo se caracterizan, cómo actuar en cada caso.

La transcripción bajo forma de reglas difusas es entonces directa. Conviene sin embargo escribir al menos las funciones de pertenencia y de reglas posibles a fin de limitar el número de parámetros que serán necesarios reglar más tarde y conservar una buena legibilidad de la base. Se constata que es más fácil añadir unas reglas para tomar en cuenta unas situaciones nuevas que quitar.

Validación de la base de conocimientos

Se trata en varias etapas:

- presentación de la base de reglas a los expertos que han participado en la recopilación de conocimientos y discusión: esto permite identificar los puntos que no tienen que ser abordados, y de verificar si las reglas son comprensibles para todos;

■ simulación «en bucle abierto»: los expertos comparan el comportamiento de la base de reglas con el comportamiento esperado por ellos, sobre unos casos seleccionados de antemano;

- si el proceso puede ser simulado, se puede igualmente efectuar las simulaciones en bucle cerrado.

Puesta a punto

Las bases de reglas así escritas dan a menudo satisfacción desde sus primeros ensayos. Se llega sin embargo a tener la necesidad de modificar o de poner a punto la base de reglas. Los principios que siguen permiten guiar en la búsqueda de la causa probable de la desviación observada:

- si el comportamiento del corrector en bucle cerrado es contrario al que debe ser, ciertas reglas están probablemente mal escritas;
- si se decide optimizar el resultado, en general es preferible reglar mejor las funciones de pertenencia;
- si el sistema no es robusto, que funciona en ciertos casos pero no siempre, es probable que todos los casos no hayan tenido en cuenta y que hayan que añadir unas reglas.

4.3 Explotación de una aplicación

La función de los operadores

El nivel de implicación de los operadores pilotando una aplicación que hace referencia a la lógica difusa sea más variable.

Se constatan los siguientes casos:

- sistema completamente autónomo, el utilizador final no conoce la lógica difusa y no sabe que está utilizada,
- la lógica difusa es una «caja negra» puede ser desconectada o pasada a «modo manual» por el operador,
- el operador es capaz de modificar (reglar) las funciones de pertenencia en función de la situación y es el hecho por ejemplo de un cambio de producción.
- el operador tiene una visibilidad sobre las reglas (por ejemplo su grado de activación); comprende y sabe interpretar lo que la base de reglas hace; por ejemplo cuando la situación es excepcional él puede salir al paso sobre la base de reglas,
- el operador es el principal diseñador de la base, los medios de consignar son saber-hacer y de validar el comportamiento obtenido.

Los cambios en la producción

Durante la vida de la aplicación, la base de reglas se debe poder adaptar a los cambios del sistema de producción y de los productos fabricados. Estos cambios pueden ser de diversa naturaleza:

- los objetivos son diferentes (temperatura de cocción), por ejemplo del hecho de un cambio de producto fabricado: hay que modificar entonces las consignas o las funciones de pertenencia de la entrada de las reglas,
- los dimensionamientos del sistema son diferentes: hay que modificar las funciones de pertenencia,
- la naturaleza del sistema ha cambiado (por ejemplo el transporte de la base de reglas de una máquina a otra): hay que revisar las reglas y las funciones de pertenencia.

Los cambios más frecuentes son del primer tipo y pueden entonces estar conducidos por unos operadores cualificados.

4.4 Selección de la tecnología de puesta en marcha

La mayoría de las aplicaciones que existen hoy en día están realizadas con las plataformas de materiales más corrientes (microcontroladores, microprocesadores, autómatas, microordenador...).

Numerosos software de ayuda al desarrollo de bases de las reglas difusas tienen por objetivo microcontroladores, autómatas programables, microordenadores entre otros, permitiendo poner en marcha rápidamente las bases de reglas difusas sin programar.

Es posible programar directamente las inferencias difusas (ensamblador, lenguaje C...). Esta solución tiene el inconveniente de ser menos rápida en fase de prototipo y de exigir unos conocimientos en programación y un dominio de los algoritmos utilizados en lógica difusa.

Para las aplicaciones más exigentes en tiempos de respuesta o para obtener un precio de coste de grandes series más bajos, la utilización de componentes dedicados a la lógica difusa es interesante. Esto se desarrolla porque:

- las operaciones necesarias para efectuar las inferencias difusas son elementales y realizables en números enteros,

- es posible realizar ciertas operaciones en paralelo,

- el cálculo se efectúa por etapas sucesivas, que permite realizar simplemente las arquitecturas «pipeline».

En particular, numerosos ASIC destinados a unos mercados particulares existentes (automóvil, electrodoméstico...). Están ahora a menudo integrados en el interior mismo de los microcontroladores, costo bajo, donde ello permite acelerar las inferencias difusas.

La **figura 21** ilustra a título de ejemplo las necesidades de aplicación que se pueden encontrar en número de reglas (complejidad de la aplicación) y tiempo de ciclo (rapidez), así como las tecnologías utilizadas (cifras de 1993). Las reglas consideradas aquí son un predicado y una conclusión.

La selección técnico-económica es entonces un compromiso entre la flexibilidad aportada por las soluciones lógicas, la economía de nivel y el resultado de las soluciones materiales adoptadas.

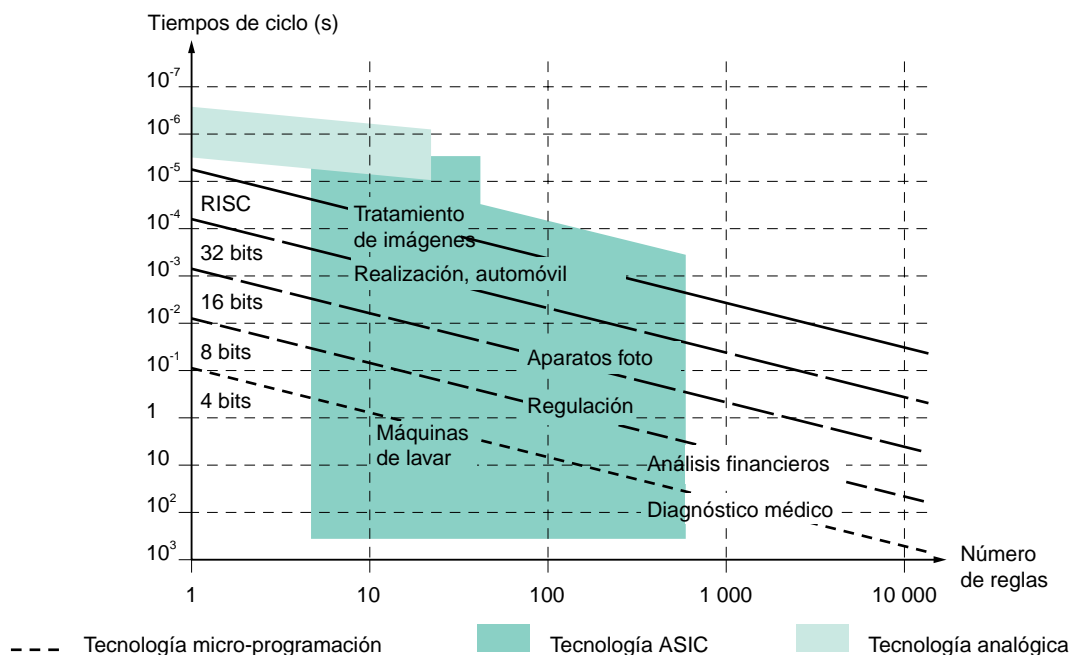


Fig. 21: Técnicas de los componentes y campos de aplicación.

4.5 Normas

Componentes

La ausencia de normas es uno de los problemas mayores que retardan la utilización de componentes dedicados a la lógica difusa. No son compatibles entre ellos, siendo cada uno el resultado de la selección efectuada por los constructores.

Software

En el dominio del software, la falta de portabilidad ha retardado igualmente la generalización de la utilización de la lógica difusa en la industria.

Hoy, un grupo de trabajo al que Schneider participa activamente, integra la norma lenguaje «lógica difusa» a la norma lenguaje de los autómatas programables (primer borrador oficial de la norma IEC 61131-7 disponible en 1997). Otras iniciativas en el dominio de la normalización de la lógica difusa deberán aparecer.

5 Aplicaciones difusas

5.1 Tipos de utilización

Funciones realizadas

La tabla que sigue muestra las funciones más comunes realizadas industrialmente que ayudan a los sistemas difusos (X significa utilización posible, XX que la técnica está bien adaptada a este tipo de problema). Las bases de reglas son excelentes allí donde una interpolación y una acción son necesarias, cuando los métodos de clasificación se adaptan para las tareas de evaluación y de diagnóstico efectuadas en general arriba. Ocurre que las aplicaciones asocian más funciones, preservando la gradualidad de la información.

	Bases de reglas	Algoritmos de clasificación
Regulación, mando	XX	
Reglaje automático de parámetros	XX	
Ayuda a la decisión	XX	X
Diagnóstico	X	XX
Control de calidad		XX

Lógica difusa y otras técnicas

La lógica difusa es ante todo una extensión, una generalización de la lógica booleana. Permite introducir una gradualidad en las nociones anteriores que aparentemente sean verdaderas o falsas.

La probabilidad, sin revisar la causa de la naturaleza binaria de los eventos (sea verdadero sea falso), permite generar la incertidumbre de la ocurrencia de estos eventos.

El punto de encuentro entre estas dos aproximaciones, la teoría de las posibilidades (inventada por Lotfi Zadeh), permite tomar en cuenta a la vez la ocurrencia e incertidumbre (figura 22).

Las bases de las reglas difusas están a menudo comparadas por las aplicaciones de mando/regulación a las redes neuronales y a la automática clásica. Estas tres aproximaciones necesitan respectivamente un informe para poder

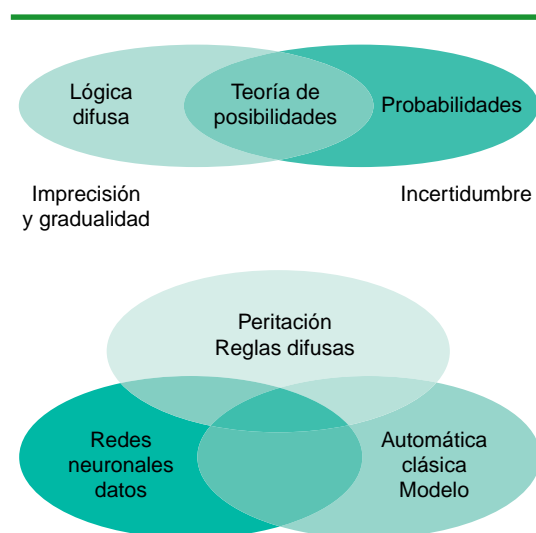


Fig. 22: Comparación de la lógica difusa y de otras técnicas.

ser aplicadas, los datos sirven al aprendizaje y un modelo dinámico como procedimiento.

Su comparación sólo es posible cuando los tres están disponibles simultáneamente, esto es a menudo el caso en los estudios teóricos pero raramente en la práctica; si los tres están disponibles, los aspectos prácticos son a menudo preponderantes. En particular, la lógica difusa puede ser preferida por su inteligibilidad por los operadores.

Hibridación de las técnicas

La lógica difusa se utiliza a menudo en combinación con otras técnicas. Estas asociaciones son favorables cuando cada aproximación pone en principio sus propios puntos fuertes.

■ Aprendizaje de reglas difusas o neurodifusas

Las bases de reglas difusas pueden ser modificadas utilizando unos métodos de aprendizaje.

Los primeros métodos dichos de «self organizing controller» han estado puestos en marcha desde 1974 y van dirigidos a modificar heurísticamente el contenido de las reglas difusas pertenecientes

a una «tabla de reglas». El informe se modifica por el aprendizaje, pero las funciones de pertenencia quedan sin cambiar.

Una segunda aproximación a menudo experimentada consiste en modificar los parámetros representativos de las funciones de pertenencia. A diferencia del primer método, las reglas y la estructura de la peritación no se alteran. La modificación de los parámetros de las funciones de pertenencia se realizan utilizando unos métodos de optimización, por ejemplo unos métodos de gradiente o unos métodos de optimización global tales como los algoritmos genéticos o la simulación. Esta aproximación a menudo se cualifica de «neurodifusa», en particular en el caso donde el gradiente se utiliza. En efecto, la utilización del gradiente para optimizar estos parámetros se parece a la «retropropagación», utilizada en las redes neuronales llamadas «perceptrons multicapas» para optimizar los pesos entre las capas de las redes de neuronas.

Una tercera aproximación (que se puede calificar de optimización estructural de la base de las reglas) pretende determinar simultáneamente reglas y funciones de pertenencia por aprendizaje. Se conduce entonces en general el aprendizaje sin referencia a un informe. Las reglas obtenidas pueden entonces, teóricamente utilizar para ayudar a forjar un informe.

■ Utilización de lógica difusa combinada a la automática

Una base de reglas difusas a veces ha partido de un regulador. El empleo de la lógica difusa para simular un término proporcional permite todas las salidas no lineales. Los casos particulares de funcionamiento degradado como las sobrecargas, el mantenimiento o las averías parciales son fácilmente integradas.

Una base de reglas difusas es más ventajosa utilizada fuera del bucle de regulación, en supervisión de un regulador. Ello sirve entonces para emplazar un operador para ajustar los parámetros de regulación en función de las condiciones de explotación de la realimentación.

5.2 Ejemplos de realizaciones industriales

La lógica difusa ahora está admitida formando parte de los métodos corrientes para controlar los procesos industriales. La automática binaria y el regulador PID se utilizan en las aplicaciones; pero cada vez más la lógica difusa está reconocida y utilizada por sus éxitos diferenciadores, sobre todo en materia de dominio de la calidad de la producción y de los costes. Con relación a las ventajas competitivas ofrecidas por la lógica difusa en ciertas aplicaciones, el integrador o el utilizador final generalmente no tiene en cuenta. Hay en estas aplicaciones todo un saber hacer capitalizado, o bien un astuto recorte técnico. Se admite la confidencialidad. Esto explica que no es posible detallar del mismo modo todos los ejemplos que siguen.

Estación de depuración

Para la mayoría, las estaciones de depuración modernas utilizan unos procesos biológicos (desarrollo de bacterias en unas áreas reservadas) para purificar las aguas usadas antes de devolver al entorno natural. La materia orgánica contenida en el agua devuelta está

utilizada por la bacteria para crear sus constituyentes celulares. Esta devolución de gas carbónico (CO_2) y del nitrógeno (N_2). Del aire está insuflada en el depósito. La energía utilizada por esta ventilación representa corrientemente más de la mitad de la energía global consumida por la estación. Para asegurar el desarrollo correcto de las bacterias y la depuración, las concentraciones de NH_4 y O_2 en los depósitos de ventilación deben ser estrictamente controladas; por tanto para reducir los costos de energía el caudal de aire está mantenido al mínimo compatible con los procesos biológicos.

El hecho de añadir a estas exigencias la consideración de algunos casos de funcionamiento particulares, como por ejemplo un caudal aguas arriba muy elevado, circunstancia extrema donde los parámetros están profundamente modificados, y los resultados de depuración degradados.

Existen unos modelos matemáticos parciales de estaciones, no se dispone de un modelo completo, y la estrategia de pilotaje del conjunto debe a menudo ser desarrollada heurísticamente.

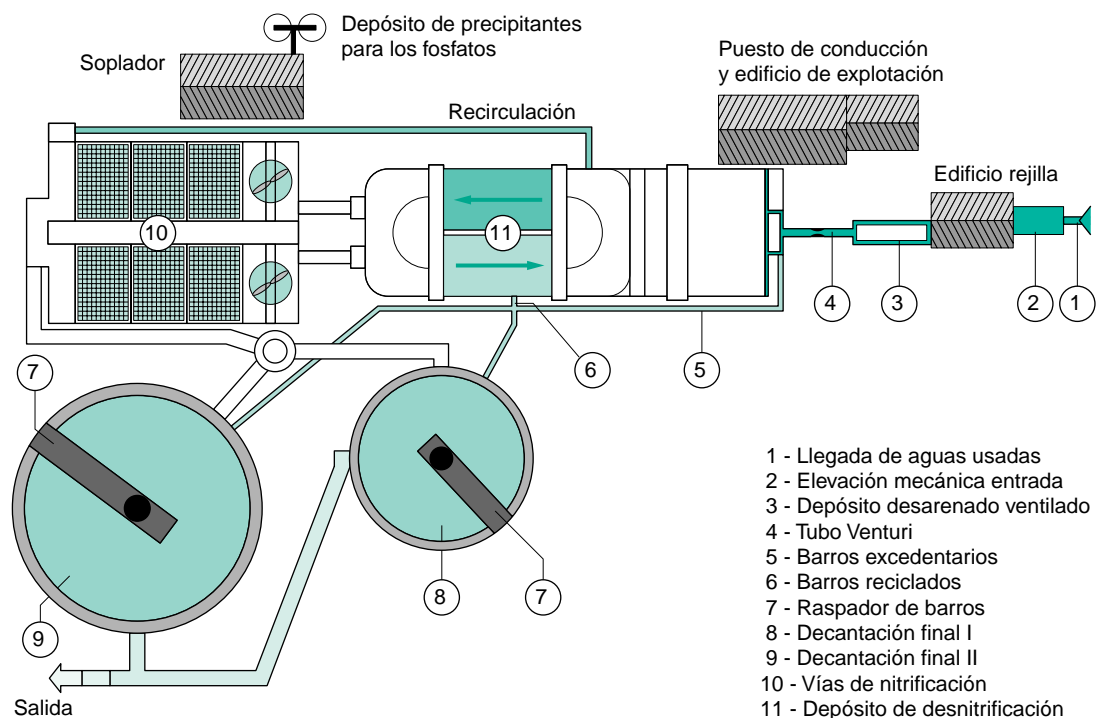


Fig. 23: Sinóptico de la estación de depuración.

El empleo de la lógica difusa hoy en día es bastante frecuente en una estación de depuración. La estación de la **figura 23**, situada en Alemania funciona desde 1994. El control difuso se ha realizado sobre un autómata programable Schneider Modicon, gracias a sus módulos funcionales estándar de regulación difusa.

El diseñador recalca el interés de utilizar la lógica difusa en la regulación: las excepciones, situaciones donde la capacidad de depuración está parcialmente degradada, están tratadas simplemente y sin discontinuidad.

He aquí el método escogido para introducir estos estados de excepción en un bucle de regulación:

Un término proporcional que se debe adaptar a las circunstancias excepcionales está identificado en el bucle de regulación; el término proporcional, en primer lugar se transcribe en lógica difusa, luego este elemento de lógica difusa se inserta en el bucle de regulación.

Una vez las funciones de pertenencia convenientemente ajustadas, dos reglas bastan para describir este regulador proporcional:

Si entrada baja ENTONCES salida baja.

Si entrada alta ENTONCES salida alta.

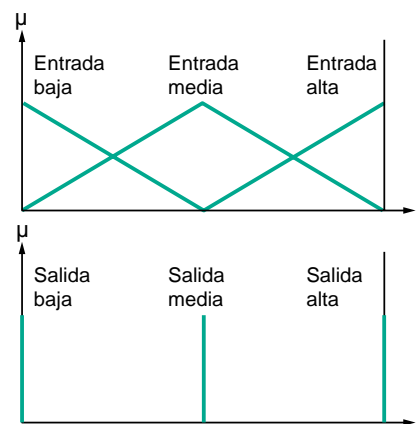


Fig. 24: Simulación de un término proporcional de regulador.

Una tercera regla se añade a la demanda de los operadores que encuentran una mejor comprensión de funcionamiento:

Si entrada media ENTONCES salida media (**figura 24**).

Una vez el término proporcional está simulado, las excepciones se introducen bajo forma de otras reglas, dependiendo de otras combinaciones de variables de entrada.

Un ejemplo simple de esta posibilidad está ilustrado por la **figura 25**.

La tabla de la **figura 26** presenta las reglas correspondientes a la recirculación. El término proporcional está realizado a partir de la variable de entrada «contenido en NO_x ». Las dos variables de entrada «contenido O_2 nitri», «contenido O_2 denitri» definiendo una situación de excepción en la primera regla.

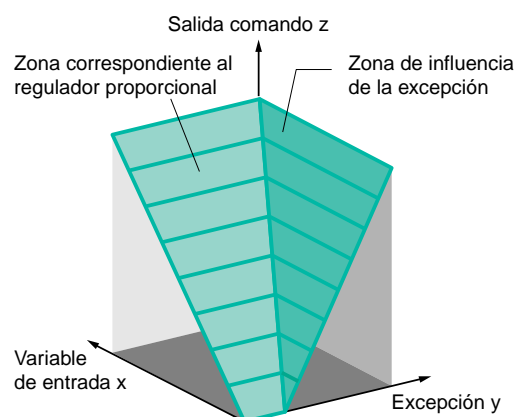


Fig. 25: Introducción de una excepción en un término proporcional.

He aquí otro tratamiento utilizando la lógica difusa: una parte de los fangos que se depositan en el estanque río abajo se reciclan y se reinyectan arriba. La tabla de la **figura 27** presenta las reglas correspondientes al reciclaje de los fangos. La primera regla expresa una excepción, debido a demasiado caudal aguas arriba. En estas condiciones, un reciclaje importante introducía un aumento de sobrecarga de la instalación. El estado de excepción se detecta por la turbiedad elevada, pues los fangos sedimentados causan un caudal elevado.

A título de indicación, otras funciones de instalación utilizan la lógica difusa:

- inyección de aire,
- gestión de los fangos excedentes.

Agroalimentaria

La automatización de las líneas de hornos industriales para la cocción interesa a los fabricantes de biscuits tanto en Francia como en Alemania. Para este tipo de regulación una solución convencional no puede dar satisfacción a causa de la no linealidad, de la multiplicidad y de la heterogeneidad de los parámetros sensibles. La modelización de los procesos de cocción es compleja e incompleta. Dependiendo,

Si contenido O_2 nitri	Y contenido O_2 denitri	Y contenido NO_x	ENTONCES cantidad recirculación
No bajo	superior a 0		bajo
		bajo	bajo
		normal	normal
		elevado	elevado

Fig. 26: Tabla de reglas de la función recirculación.

Si turbiedad del agua evacuada	Y cantidad evacuada de fango reciclado	Y nivel de los fangos	ENTONCES cantidad
elevado		bajo	baja
	normal	bajo	baja
	elevada	bajo	normal
	baja	normal	elevada
	normal	normal	normal
	elevada	normal	elevada
	baja	alta	normal
	normal	alta	elevada

Fig. 27: Tabla de reglas de la función reciclaje de barro.

de los operadores entrenados estarán en condiciones de controlar perfectamente la cocción utilizando sus conocimientos empíricos.

El ejemplo seleccionado es el de una cadena de producción de biscuits aperitivos.

Un grupo francés ha llamado a Schneider quien en colaboración con ENSIA (Escuela Nacional Superior de las industrias agrícolas y alimentarias), ha desarrollado una solución automatizada.

Las principales características medibles de un biscuit son su color, su humedad, y sus dimensiones. Pueden estar influenciadas por las variaciones de calidad de los constituyentes de la masa, de las condiciones del ambiente, de la duración de la permanencia del biscuit en el horno... Estas influencias deben ser compensadas por el reglaje de los hornos y la velocidad de desplazamiento de las cintas transportadoras. La regulación de la calidad de

Funciones	Técnicas asociadas
Fusión captadores aprendizaje	Interpolación «caja negra»
Evaluación subjetiva	Clasificación difusa
Diagnóstico	Contactos difusos
Toma de decisión	Base de reglas difusas

Fig. 28: Funciones y técnicas asociadas.

producción de un proceso agroalimentario de este tipo puede ser descompuesto según las etapas funcionales siguientes:

- condicionamiento y fusión de datos,
- evaluación de tamaños subjetivos (unidos a la calidad),
- diagnóstico de las desviaciones de calidad,
- toma de decisión.

La lógica difusa permite aquí tener en cuenta unos tamaños cualitativos todos a lo largo de esta descomposición y de utilizar el informe «Oficio» existente. Las bases de reglas difusas han sido utilizadas con provecho, conjuntamente a otras técnicas (**figura 28**).

■ Evaluación subjetiva

La mayor parte de las nociones definiendo la calidad dependen de varias variables. La calidad se evalúa entre otras por el color, que es tridimensional, de donde el interés de definir unas funciones de pertenencia no booleanas para varias variables. Los algoritmos de clasificación, a partir de las variables de entrada y de estas funciones suministran los elementos de diagnóstico (la parte superior del biscuit bien cocido, demasiado cocido...).

■ Diagnóstico

Los contactos difusos han sido utilizados por el diagnóstico de las desviaciones de calidad constatadas sobre los biscuits (**figura 29**). El horno comporta 3 secciones.

El balance de funcionamiento es satisfactorio.

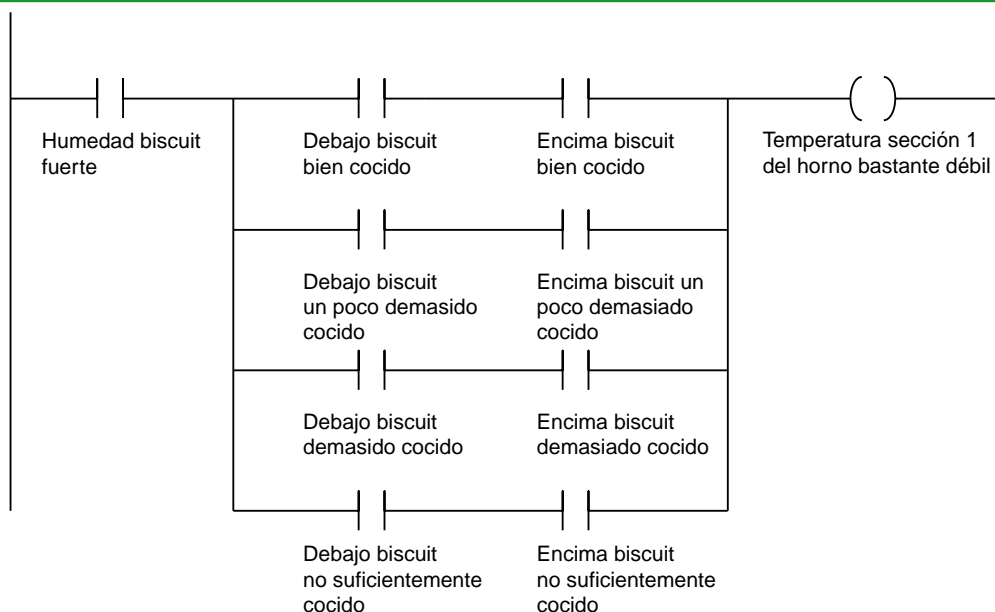


Fig. 29: Contactos difusos de diagnóstico de las desviaciones de calidad.

Otros ejemplos

■ Automatismos

Los correctores G.P.C. (Global Predictive Controllers) están muy logrados, pero necesitan el reglaje de cuatro parámetros N1, N2, Un, I (horizontes de mando, de predicción, coeficiente de ponderación). Este reglaje es largo y difícil, y necesita habitualmente un experto. La filial NUM de Schneider desarrolla los comandos numéricos y desea utilizar los correctores G.P.C. en sus futuras realizaciones.

Schneider ha desarrollado para ello un método de reglaje automático de los parámetros de estos correctores. Esto se efectúa por la ayuda de una base de reglas difusas. Una veintena de reglas bastan para asegurar un reglaje rápido y fiable de los parámetros. De otra parte, la presencia de un especialista de control-mando no es necesaria, aunque es difícil de asegurar en el contexto de la instalación de mando numérico.

■ Automóvil

Renault y Peugeot (PSA) anuncian una caja de cambio automática que gracias a la lógica difusa, se adapta al tipo de conducción al que toma el volante.

■ Cementeras

La primera aplicación industrial de la lógica difusa, recuperada más tarde por los otros constructores, ha sido realizada por la sociedad F.L. Smidth Automation de Dinamarca en la regulación de los hornos de cemento. Este proceso toma en cuenta numerosas variables, en particular las influencias climáticas sobre los hornos que miden muchas decenas de metros.

■ Electrodoméstico y electrónica de consumo

Principalmente en el Japón, numerosas aplicaciones alcanzan al gran público. Por ejemplo, las máquinas numéricas, ultraligeras, son muy sensibles a los cambios. La lógica difusa pilota el sistema electrónico anti-cambio de estos aparatos.

6 Conclusión

- Clasificación entre las técnicas de inteligencia artificial, la lógica difusa permite diseñar después de sustituir el informe de conducción de procesos, informe que proviene del diseñador o del utilizador.
- Útil de mejora de la calidad, de la productividad, procura unas ventajas competitivas para la industria en busca de la optimización técnico-económica.
- Este cuaderno técnico ha mostrado en qué campos esta aproximación interesante se aplicaba con éxito.
- Gracias a los autómatas adaptados y los útiles conviviendo, la lógica difusa se mantiene accesible a toda automatización deseando aumentar el campo de sus competencias y el resultado de sus realizaciones. Tales herramientas están disponibles en el entorno del desarrollo de ciertos autómatas programables (figura 30).

Las posibilidades de evaluación se ofrecen por estos útiles.

- Una evaluación limitada a la puesta en común con las herramientas útiles tradicionales de control no tiene interés: estas herramientas, tales como los reguladores PID, guardan su lugar y sus terrenos de aplicaciones.

- La lógica difusa tiene sus campos de predilección donde ha hecho maravillas, desde que entran en juego un informe, una toma de decisión matizada, la toma en cuenta de fenómenos no lineales, de parámetros subjetivos, ciertamente unos factores de decisión contradictorios. Un contacto con un especialista de Schneider permitirá para un utilizador o un diseñador encontrar respuesta caso por caso, a su legítima interrogación:

«¿Qué ventajas decisivas la lógica difusa aportaría en mi aplicación?»

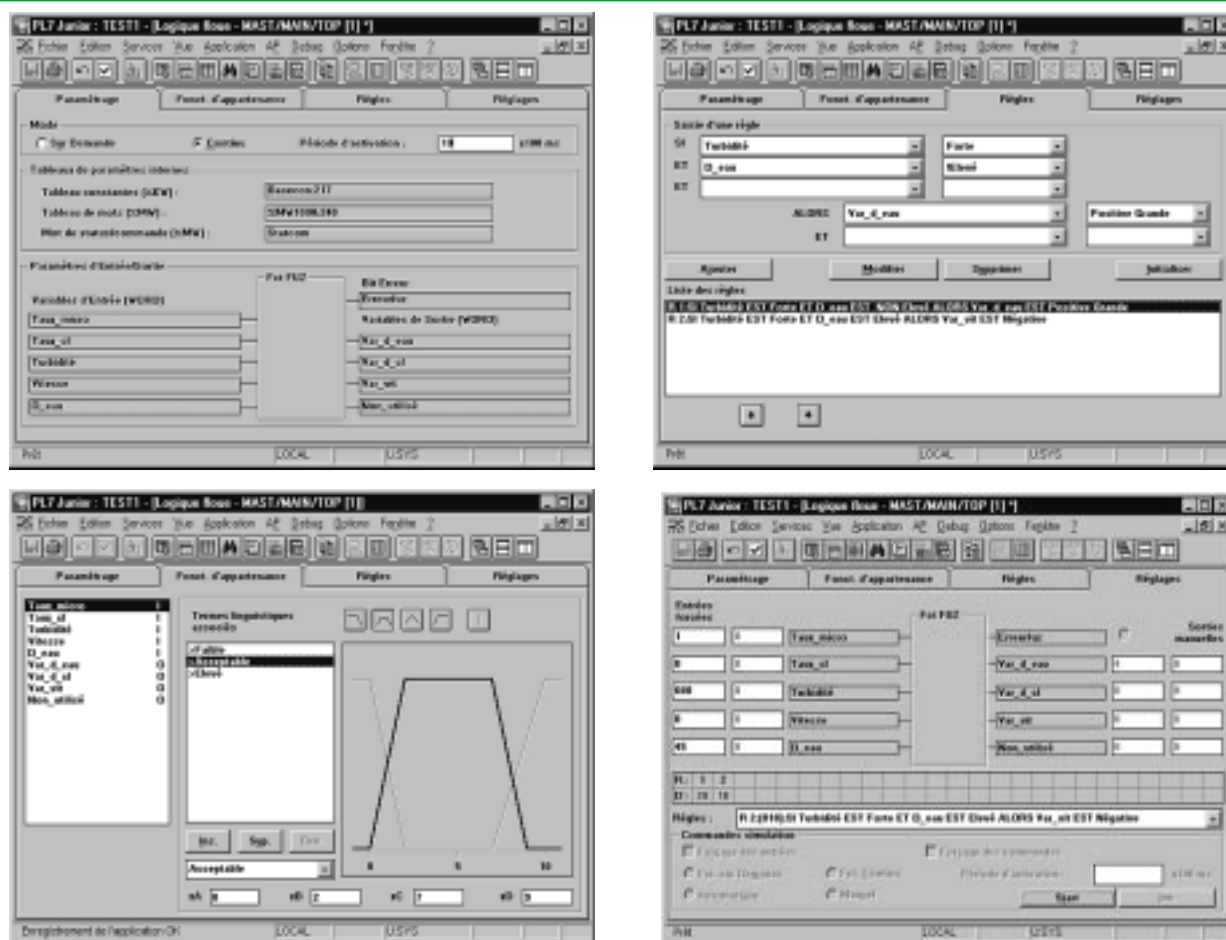


Fig. 30: Para la lógica fluida, los autómatas Schneider disponen de herramientas de desarrollo compatibles PC.

Operadores entre conjuntos difusos

La tabla de la **figura 31** presenta los diferentes operadores de ZADEH.

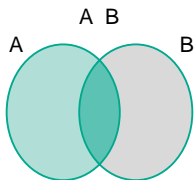
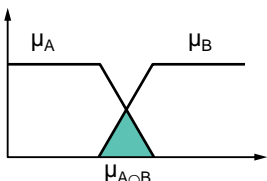
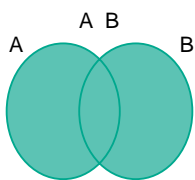
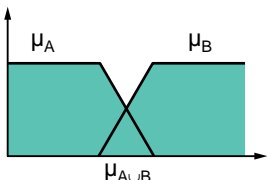
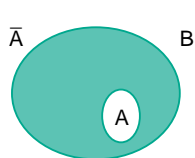
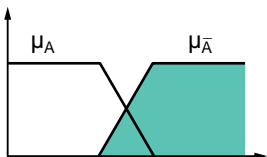
		Operador de ZADEH	Operación lógica	
Intersección			Y	
Unión			O	
Negación			NO	

Fig. 31: Operadores entre conjuntos difusos.

Las funciones de pertenencia de salida singletons

Las funciones de pertenencia «singletons» están a menudo utilizadas como funciones de pertenencia de salida para las reglas difusas. En efecto, permiten el mismo efecto de interpolación entre las reglas que en el caso de las funciones de pertenencia triangulares por ejemplo, para los cálculos bastante más simples. No es necesario calcular el máximo de las funciones de pertenencia de salida (asociación) y el centro de gravedad está igualmente simplificado. La **figura 32** ilustra este cálculo.

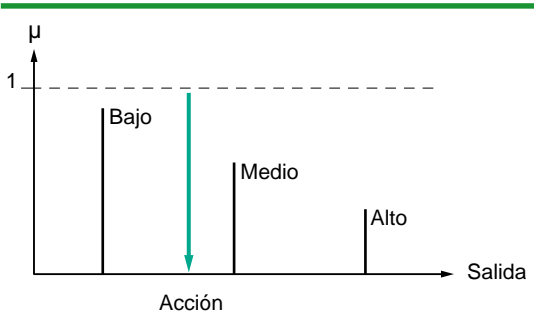


Fig. 32: Defuzificación de funciones de pertenencia singleton.

Las inferencias difusas: implicación difusa y Modus Ponens Generalizado

Como muestra la **figura 33**, el mecanismo clásico de inferencia por «anticipación» o «modus ponens» consiste a partir de reglas, también llamadas implicaciones y de un mecanismo de deducción (el modus ponens) para deducir las conclusiones a partir de los hechos observados.

La implicación « $A \Rightarrow B$ » está considerada verdadera tanto no está invalidada (A verdadera y B falsa): ver **figura 34**. El modus ponens, sabiendo si la implicación es verdadera o falsa, permite deducir una conclusión B' a partir de una observación A'.

El mismo principio teórico puede ser generalizado en lógica difusa. El esquema general se da en la **figura 35**.

El mecanismo generalizando la implicación se llama «implicación difusa». Existen diversos operadores de implicación difusa, mencionados seguidamente:

MAMDANI: $\mu_{A \Rightarrow B} = \min(\mu_A, \mu_B)$

LARSEN: $\mu_{A \Rightarrow B} = \mu_A \cdot \mu_B$

LUKASIEWICZ: $\mu_{A \Rightarrow B} = \min(1, 1 - \mu_A + \mu_B)$

La implicación difusa funciona como la implicación clásica, A y B siendo unos conjuntos difusos.

El mecanismo generalizando el modus ponens se llama «modus ponens generalizado». Obedece a la fórmula que sigue y permite determinar un conjunto difuso conclusión B'.

Más a menudo el operador T utilizado es el mínimo (llamado operador de Zadeh).

$$\mu_{B'}(y) = \max_x (T(\mu_{A'}(x), \mu_{A \Rightarrow B}(x, y)))$$

donde T: operador de modus ponens (t - norma).

El operador de Lukasiewicz se comporta como la implicación clásica cuando se restringe a unos valores booleanos. Éste no es el caso de los operadores de Larsen y Mamdani, utilizados en las bases de las reglas de Mamdani. Estos operadores son los más comúnmente utilizados porque.

- se constata su buena robustez en las aplicaciones,
- los cálculos son considerablemente simplificados y permiten una interpretación gráfica simple (ver capítulo 2.4). Los cálculos sobre la entrada x y la salida y están desacopladas, como muestra la fórmula siguiente:

$$\begin{aligned} \mu_{B'}(y) &= \max_x (\min(\mu_{A'}(x), \mu_A(x), \mu_B(y))) \\ &= \min(\mu_B(y), \max_x (\min(\mu_A(x), \mu_{A'}(x))) \end{aligned}$$

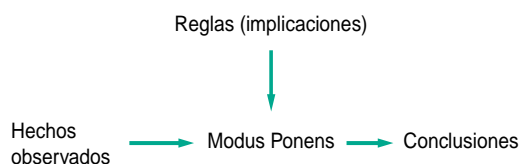


Fig. 33: Principio de inferencia por anticipación.

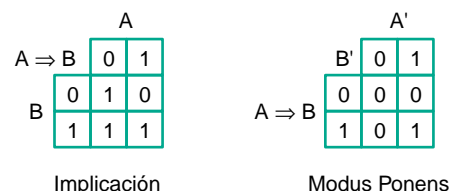


Fig. 34: Principio de implicación y de Modus Ponens.

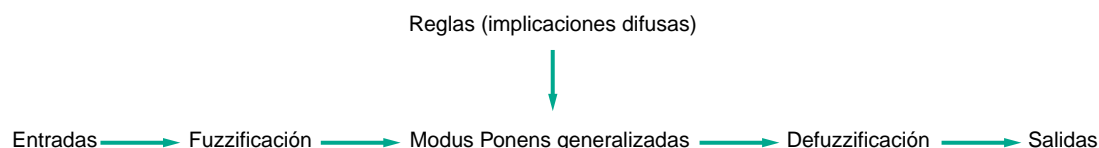


Fig. 35: Principio de las interferencias difusas.

Bibliografía

Normas

IEC 61131-7. Programmable Controllers. Part 7. Fuzzy Control Programming.

Obras diversas

- Fuzzy models for pattern recognition. James C. BEZDEK & Sanker K. PAL, IEEE Press, 1992.
- Fuzzy sets and systems: Theory and applications, D. DUBOIS, H. PRADE, Academic Press 1980, Mathematics in Sciences and Engineering vol. 144.
- Evaluation subjective; méthodes, applications et enjeux, les cahiers des clubs CRIN, club CRIN logique floue.
- A.I. and expert system myths, legends and facts, M.S. FOX, IEEE Expert 02/90, pp 8-20, 29 réf.
- La logique floue et ses applications, Bernadette BOUCHON-MEUNIER, Addison-Wesley, 1995.

Internet

- <http://pages.pratique.fr/~bmantel/pages/logfloue.html> (simple et didactique)
- http://www.ipl.fr/ecam/laborato/logique_floue.html (brève présentation)
- <http://www.cs.nthu.edu.tw/~jang/nfsc.htm> (bibliographie, liens vers ressources en anglais)
- <http://maxwell.univale.edu.co/~paulo/fuzzy/bibliografia.html> (bibliographie)
- <http://mijuno.larc.nasa.gov/dfc/tec/fuzsysB.html> (bibliographie)