

Conjuntos y Sistemas Difusos

(Lógica Difusa y Aplicaciones)

8. Control Difuso: Metodología de Diseño, Estructura, Controladores Adaptativos (Ajuste) y Ejemplos

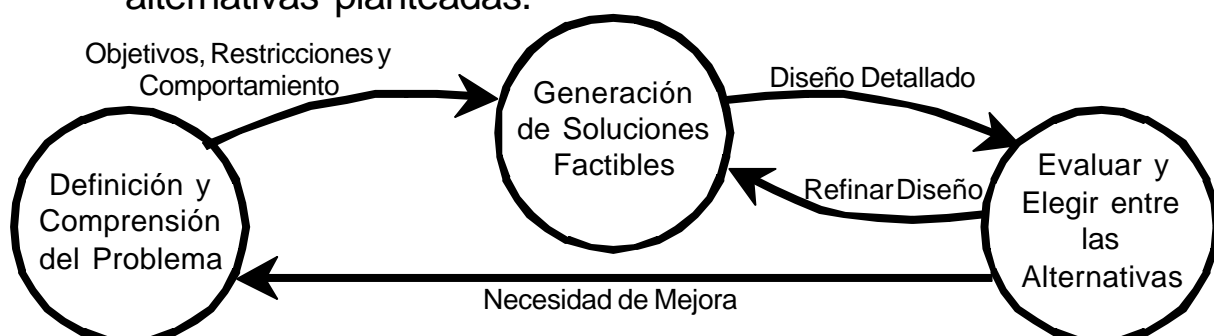


E.T.S.I. Informática

J. Galindo Gómez

ANÁLISIS y DISEÑO

- **Aplicaciones de Ingeniería** (*Engineering Applications*):
 - Consisten en un objetivo que debe conseguirse bajo restricciones de diverso tipo (técnicas, económicas, sociales...).
 - Deben tomarse decisiones en situaciones donde los criterios de decisión no son evidentes y la incertidumbre es mayor de la deseable.
 - Incorporan dos tareas principales para la planificación, organización y desarrollo: **Análisis y Diseño**.
 - **Análisis**: Definir y comprender un problema determinado para conseguir, de forma clara y explícita, expresar: Los objetivos deseados, las restricciones y las características del comportamiento del sistema.
 - **Diseño**: Idear soluciones factibles, evaluarlas y elegir entre las alternativas planteadas.



ANÁLISIS y DISEÑO

- **Conocimiento:**

- Resulta fundamental en la solución de problemas de ingeniería:
 - **Adquisición:** Puede ser conocimiento básico de ingeniería, procedimientos, experiencia y conocimiento experto.
 - **Representación:** Existen diversas formas, como son imágenes, escritura, reglas... que dependen del tipo de problema.
 - **Organización:** Es clave para solucionar el problema eficientemente, ya que será muy habitual la operación de recuperación de cierta porción del conocimiento.
 - **Manipulación:** Engloba las tareas quizás más importantes, pues consiste en definir los procedimientos o técnicas que utilizarán el conocimiento almacenado.
- Debe ser exacto, completo, libre de inconsistencias... por lo que la adquisición del conocimiento no es tarea fácil.

3

ANÁLISIS y DISEÑO

- **Ciclo de Análisis y Diseño usando Lógica Difusa:**

- **Análisis:**
 - 1. Definir los Objetivos, las Restricciones y el Comportamiento del Sistema.
 - 2. Identificar las variables de Entrada y Salida:
Variables lingüísticas y sus etiquetas lingüísticas.
 - 3. Definir procedimientos y criterios para la prueba y validación.
- **Diseño:**
 - 4. Definir los conjuntos difusos de cada etiqueta lingüística.
 - 5. Definir el marco de representación de la solución
(representación del conocimiento, reglas...).
 - 6. Definir el marco de los procedimientos empleados (Inferencia).
 - 7. Especificar la forma requerida de la salida del sistema
(decodificación).
 - 8. Ejecutar pruebas para validar el sistema.
 - 9. Verificar si la solución es compatible con el paso 1:
 - Refinar el Diseño: Ir al paso 4.
 - Necesidad de Mejora: Ir al paso 1.

4

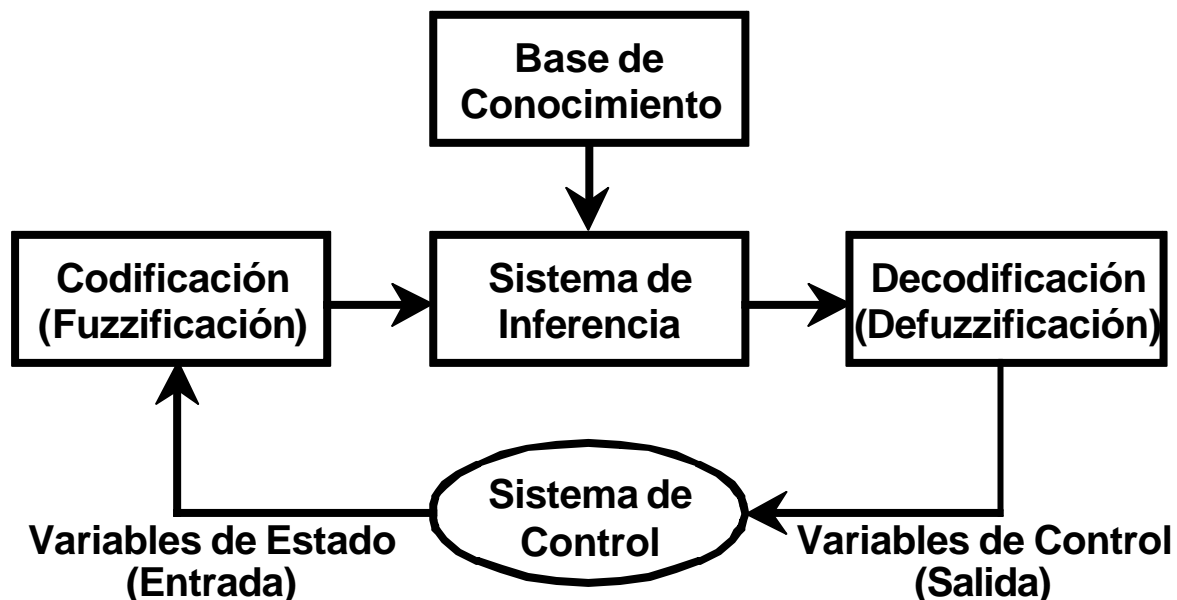
Adquisición del Conocimiento

- **1. Conocimiento de Sentido Común** (*Commonsense Knowledge*): Es conocimiento intuitivo, fácil y rápido de obtener y de estructurar.
 - **REGLAS para problemas relativamente pequeños y con pocas variables:** Cuantas más variables existan, más difícil será conseguir reglas importantes y transparentes y más fácil será obtener protocolos de control incompletos o inconsistentes (con reglas conflictivas).
 - **REGLAS que cumplen, más o menos, con nuestra intuición sobre cómo aplicar acciones de control:** Son reglas generales de comportamiento que deben cumplirse. En sistemas complejos (con retardo, por ejemplo) estas reglas son más difíciles de obtener.
- **2. Conocimiento a través de simulaciones interactivas con ordenador:** La simulación es un método potente y flexible de adquirir conocimiento.
 - Probando distintas simulaciones y distintos protocolos de control, se va aprendiendo (comportamiento, valores...).
 - Tras muchos experimentos se puede obtener conocimiento suficientemente refinado que se traducirá en reglas de control.

5

Estructura de un Controlador Difuso

- **Estructura genérica de un Controlador Difuso** (presentada por Lee, 1990): Tiene **4 componentes principales** (Driankov, Hellendoorn, Reinfrank, 1993; Pedrycz, 1993; Yager, Filev, 1994):
 - **Base de Conocimiento.**
 - **Sistema de Inferencia.**
 - **Sistema de Codificación.**
 - **Sistema de Decodificación.**



6

Estructura de un Controlador Difuso

- **Base de Conocimiento:**

- Contiene el conocimiento asociado al dominio de la aplicación y los objetivos del control.
- Está formada por una base de datos y un conjunto de REGLAS DIFUSAS de CONTROL de la forma:
SI $(X_1 \text{ es } A_1)$ y $(X_2 \text{ es } A_2)$ y ... $(X_n \text{ es } A_n)$ ENTONCES $(Y \text{ es } B)$
donde:
 - Los X_i son las Variables de Estado del sistema a controlar.
 - Y es una Variable de Control del sistema a controlar.
 - Los A_i y B son etiquetas lingüísticas con una función de pertenencia asociada que dan valor a sus variables.
- **Dos objetivos principales:**
 - Proporciona las definiciones necesarias para determinar las reglas lingüísticas de control y manipulación de los datos difusos del controlador.
 - Almacena los objetivos y la política de control (como un experto en el dominio).

7

Estructura de un Controlador Difuso

- **Sistema de Codificación, Difuminación o Fuzzificación:**

- Obtiene los valores de las variables de entrada al controlador difuso.
- Convierte los datos reales (*crisp*) de entrada en conjuntos difusos, lo cual permite ser tratados como tales.
- La función de Codificación más simple consiste en no difuminar (el valor *crisp* será el único valor del soporte y del núcleo del conjunto difuso): Conjunto difuso de tipo “*singleton*”.
- Lo más usual es difuminar mediante un conjunto difuso triangular.
- **Ventajas de la Difuminación** (*fuzzification*):
 - Permite minimizar posibles cambios ligeros en las variables de entrada. Por ejemplo, si medimos 25°C de temperatura, ésta puede variar mientras se efectúa la inferencia, por lo que puede ser más exacto considerar que la temperatura es “aproximadamente 25°C”.
 - Permite minimizar los posibles errores al tomar los datos
 - Permite suavizar el comportamiento del sistema: Ampliando el rango de influencia de la variable.

8

Estructura de un Controlador Difuso

- **Sistema de Inferencia:**
 - Es el núcleo del controlador difuso: Infiere las acciones de control simulando el proceso de decisión humano usando una implicación difusa y las reglas de inferencia de la lógica difusa.
 - Utiliza las técnicas de los Sistemas Basados en Reglas para la inferencia de los resultados.
- **Sistema de Decodificación, Concisión o Defuzzificación:**
 - Convierte los valores difusos de las variables de salida en valores concretos dentro del universo de discurso correspondiente.
 - Genera una acción no difusa a partir de la acción difusa resultante del sistema de inferencia.
 - Existen **diversos métodos**, estudiados anteriormente (*defuzzification methods*):
 - Usando la **agregación de todos los conjuntos difusos** resultantes de todas las reglas: Centro de Gravedad (CoG), Punto de Máximo Criterio (PMC o Media de Máximos), Centro de Área...
 - Usando los **conjuntos difusos** resultantes de cada regla **individualmente**: CoG (o PMC) ponderado por el área o por la altura, Media de PMC, Media del mínimo y máximo PMC, CoG (o PMC) del de mayor área o del de mayor altura...

9

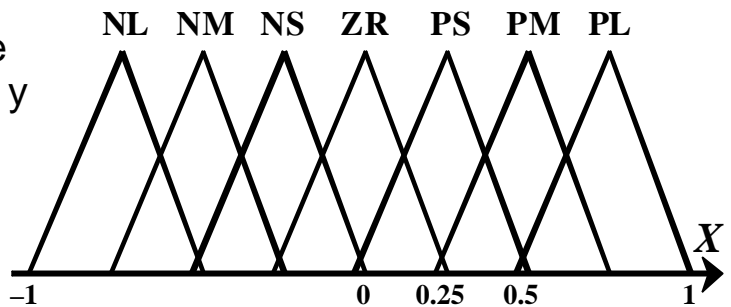
Controlador Difuso Adaptativo

- **Controladores Adaptativos:** Son controladores que se reajustan automáticamente para adaptarse a nuevas características del proceso a controlar.
- **Componentes:**
 - **Monitor del Proceso:** Encargado de detectar los cambios en las características del proceso. Puede ser:
 - Una medida del rendimiento que refleja la bondad de la actuación del controlador.
 - Un parámetro basado en el estado del proceso.
 - **Mecanismo de Adaptación:** Utiliza la información del Monitor del Proceso para actualizar los **Parámetros del Controlador:**
 - **Factor de escala de cada variable.**
 - **Conjunto difuso de cada etiqueta lingüística.**
 - **Reglas de la Base de Conocimiento.** → Controladores Autoorganizativos
- Esos 3 parámetros son invariantes en un controlador no adaptativo.
- Los **autoorganizativos** pueden partir sin reglas para aprenderlas.

→ Controladores Autoajustables

Mecanismos de Adaptación

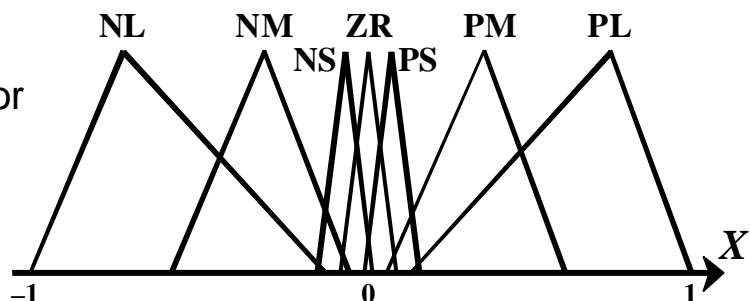
- **Factor de Escala (FE):** Las entradas y salidas del controlador pueden escalarse variando los límites de su universo de discurso y proporcionando las etiquetas.
 - Normalmente las etiquetas se definen en el **intervalo $[-1,1]$** y luego se escala al intervalo deseado.
 - En el caso de **variables de Entrada**, lo que se hace es multiplicar el valor de entrada por un **valor de escala** en el intervalo **$[0,1]$** , para escalar la entrada de su intervalo real al intervalo **$[-1,1]$** .
 - **Ejemplo:**
 - Intervalo real de la entrada es **$[-200,200]$** se debería multiplicar el valor de entrada por **0.005** ($1/200$): El **valor 100** se clasifica principalmente como **PM**, ya que $100 \cdot 0.005 = 0.5$.
 - Si ahora escalamos a un intervalo el doble de grande, **$[-400,400]$** debemos multiplicar por **0.0025** ($1/400$): El **valor 100** se clasifica ahora principalmente como **PS**, ya que $100 \cdot 0.0025 = 0.25$.



11

Mecanismos de Adaptación

- **Modificación de los Conjuntos Difusos:** Se trata de modificar la definición de las etiquetas lingüísticas.
 - Mientras que el cambio en el Factor de Escala consigue una alteración uniforme en todo el universo, con este tipo de cambio podemos aumentar la **sensibilidad (ganancia)** del controlador para valores de cierta zona del universo.
 - **Ejemplo:** Incrementar la sensibilidad del controlador en los valores cercanos al cero (valores centrales de universo de discurso):



12

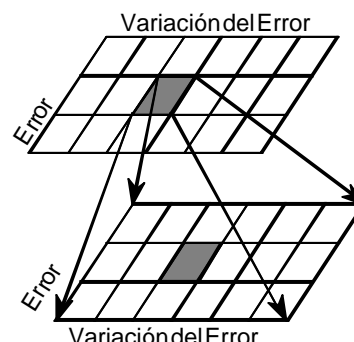
Mecanismos de Adaptación

- **Controladores Autoorganizativos, Modificación de las Reglas de la Base de Conocimiento:**
 - Una regla puede no ser siempre aplicable, de la misma forma.
 - A veces es preciso modificarla para adaptarse a la situación cambiante del sistema.
 - En ocasiones, una solución a este problema consiste en añadir una nueva variable de entrada al controlador y añadir nuevas condiciones en el antecedente de algunas reglas, basadas en la nueva variable.
 - Existen muchas formas de modificar una regla. Por ejemplo, modificar la etiqueta lingüística de alguna variable (del antecedente o del consecuente de la regla).
 - **Ejemplo:**
 - SI Humedad es GRANDE, ENTONCES Apertura_Riego es **POCO**. Podría pasar a la siguiente regla (si, por ejemplo, es verano):
 - SI Humedad es GRANDE, ENTONCES Apertura_Riego es **MODERADA**.

13

Mecanismos de Adaptación

- **Efecto Ventana** (*Windowing Effect*): Cuando la salida de un sistema de control difuso está en cierto rango, entonces se cambia el banco de reglas para conseguir mayor especificidad.
 - Normalmente la salida que se usa en este caso es una medida del **error** y/o de la **variación del error**.
 - Así, si el error es suficientemente pequeño, se intenta minimizar aún más con otro conjunto de reglas distinto.
 - Esto se puede aplicar sucesivamente en **varias etapas**, haciendo que cada etapa sea más fina y minuciosa:
Control multirresolución.



14

Controladores Difusos

- **Características de los Controladores Difusos** (Sur, Omron, 1997):
 - **Son bastante Intuitivos:** La posibilidad de usar expresiones con imprecisión genera modelos intuitivos.
 - **Tolerancia al Ruido:** En general, como una salida depende de varias reglas no se verá muy afectada si se produce una perturbación (ruido).
 - **Estabilidad:** Son sistemas robustos.
 - En caso de caída del sistema ésta se produce lentamente, dando tiempo a tomar medidas.
 - Pueden alcanzar rápidamente la estabilidad en etapas transitorias.
 - **No necesita un modelo matemático** preciso del sistema a controlar.
 - Permiten controlar sistemas que son imposibles de controlar con los sistemas de control clásicos.
 - **Ejemplo:** Péndulo Invertido (Yamakawa, 1989). Requiere gran precisión debido a las importantes restricciones temporales que existen.
 - **Permiten gran Precisión:** Similar a los sistemas no difusos.

15

Ejemplos de Aplicaciones

- **Aplicaciones del Control Difuso** (Pedrycz, F. Gomide, 1998):
 - **Controlador del Tráfico en una Intersección:** El objetivo es minimizar el tiempo de espera de los coches y la longitud de la cola.
 - Refs.: (Pappis, Mamdani, 1977; Favilla et al., 1993; Nakamiti, et al., 1994).
 - **Controlador de un Grupo de Ascensores:** El objetivo es minimizar el tiempo de espera de los pasajeros (dentro y fuera del ascensor).
 - Refs.: (Gudwin et al., 1996).
 - **Controlador de un Motor de Inducción:** Son sistemas difíciles de controlar porque son dinámicos, no lineales y variantes en el tiempo.
 - Refs.: (Mir, Zinger, Elbuluk, 1994).
 - **Planificación en una Red de Comunicaciones:** Transmitir la información de forma rápida, minimizando los nodos por los que pasa.
 - Refs.: (Figueiredo et al. 1996).
 - **Diagnóstico de Fallos en Sistemas Dinámicos usando Redes Neuronales Difusas:** • Refs.: (Caminhas, Tavares, Gomide, 1996).
 - **Planificación del Transporte en Tren de Multitud de Productos:** Consiste en optimizar el transporte ferroviario de distintos tipos de mercancías que requieren ciertos tipos de vagones y más requisitos.
 - Refs.: (Mendes, Yamakami, Gomide, 1996).
 - **Software de Simulación de Controladores Difusos:**
 - Refs: (Duarte, Pérez, 1999).

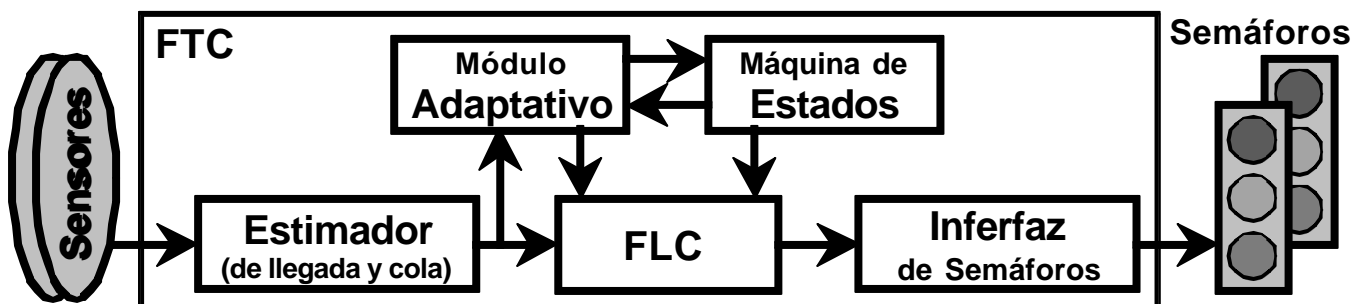
16

Ejemplo: Controlador de Tráfico

- **Políticas aplicables:**
 - **Sistemas de tiempo fijo** (*Fixed-time systems*): Se estudian diversas planificaciones según diversas etapas del día y éstas son aplicadas ciegamente en esas etapas. Requiere la actualización de esas políticas según posibles cambios.
 - **Sistemas dinámicos** (*on-line systems*): La planificación es generada por el sistema de control dependiendo del estado actual del sistema a controlar. Esta política es actualizada continuamente por el controlador, el cual necesita **sensores** para detectar el estado del sistema (el tráfico de vehículos en este caso).
- **Mejores resultados:** Pappis y Mamdani (1977) mostraron que un controlador difuso conseguía tiempos de espera menores que si se usaba otro tipo de controlador convencional (no difuso).
- **Variables de Entrada (o de Estado):**
 - **A:** Ritmo de llegada (*arrival*) de coches (en la fase verde del semáforo).
 - **Q:** Longitud de la cola (*queue*) de coches (en la fase roja).
- **Variable de Salida (o de Control):**
 - **T:** Tiempo de la **fase verde** del semáforo (con un valor máximo prefijado). 17

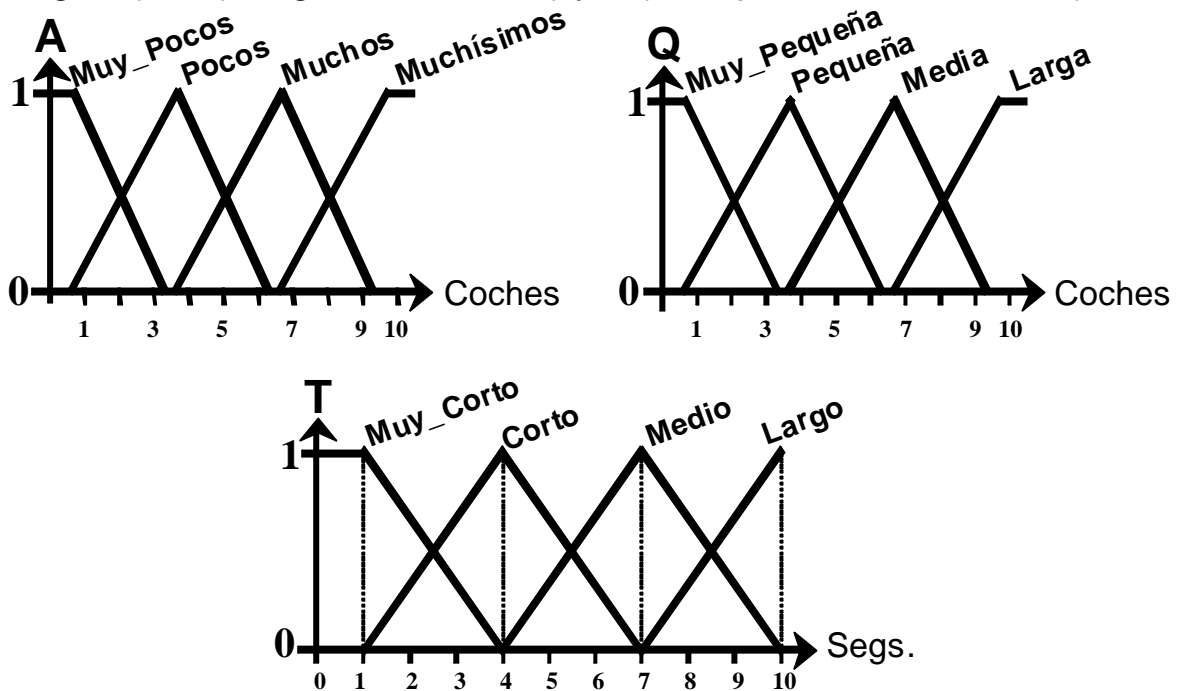
Ejemplo: Controlador de Tráfico FTC

- **Diagrama de un Controlador Difuso Adaptativo de Tráfico para una intersección regulada con semáforos (FTC, Fuzzy Traffic Controller):**
 - **1. Sensores** (*Sensing Devices*): Para detectar cada vehículo y su velocidad.
 - **2. Estimador** (*Estimator*): Según la velocidad de cada vehículo calcula el tiempo que tarda en cruzar la intersección, especialmente al final de la fase verde. También estima el ritmo de llegada y la longitud de la cola.
 - **3. Controlador de Lógica Difusa (FLC, Fuzzy Logic Controller)**: Determina la duración de la **fase verde** del semáforo.
 - **4. Máquina de Estados** (*State Machine*): Controla la secuencia de estados por los que debe pasar el FTC.
 - **5. Módulo Adaptativo** (*Adaptive Module*): Cambia las características del FLC para ajustar su ejecución.
 - **6. Interfaz con los Semáforos**: Circuitos para encender/apagar semáforos.



Ejemplo: Controlador de Tráfico FTC

- **Controlador de Lógica Difusa** (FLC, *Fuzzy Logic Controller*):
 - Definir las etiquetas lingüísticas de cada variable: **A** (Ritmo de llegada), **Q** (Longitud de la cola) y **T** (Tiempo de la fase verde):



19

Ejemplo: Controlador de Tráfico FTC

- **Definir las Reglas Difusas de Control:** Se resumen en la siguiente tabla de 16 reglas, aunque son necesarias menos reglas, pues algunas pueden sintetizarse en una única regla.
 - En el antecedente aparecen las variables **Q** y **A** y en el consecuente **T**.

Q/A	Muy_Pocos	Pocos	Muchos	Muchísimos
Larga	Muy_Corto	Corto	Medio	Largo
Media	Muy_Corto	Muy_Corto	Corto	Medio
Pequeña	Muy_Corto	Muy_Corto	Muy_Corto	Corto
Muy_Pequeña	Muy_Corto	Muy_Corto	Muy_Corto	Muy_Corto

- Se encontró experimentalmente que el sistema se comportaba convenientemente con los siguientes parámetros:
 - t-norma del mínimo para definir el operador de conjunción (y).
 - t-norma del mínimo para el significado de cada regla, o sea el significado de la Implicación.
 - t-norma del mínimo para la Regla Composicional de Inferencia.
 - s-norma del máximo (unión) para el operador de Agregación.
 - Centro de Área como método de Concisión (*Defuzzificación*).

20

Ejemplo: Controlador de Tráfico FTC

- **Máquina de Estados** (*State Machine*):
 - Controla el cumplimiento de la secuencia de estados obligatoria para cada semáforo (rojo, amarillo, verde).
 - Puede establecerse un estado por defecto (verde) para cuando no se detecte tráfico.
 - También puede establecerse un tiempo máximo para cada estado de forma que se fuerce a cambiar de estado cuando se supere ese tiempo.
- **Módulo Adaptativo** (*Adaptive Module*): Utiliza dos métodos, el **Método Adaptativo-Estadístico** y el **Método Adaptativo-Difuso**:
 - **Método Adaptativo-Estadístico** (*Statistical-Adaptive Method*):
 - El significado de las etiquetas de las **Variables de Entrada** **depende del contexto** (del nivel de tráfico) en el que se apliquen.
 - Usa un **Factor de Escala** que modifica la escala de las variables de Entrada: Modifica el límite superior cuyo valor inicial y mínimo es 10.
 - Aplica la escala durante **3 minutos** según los datos de los 3 minutos anteriores: Esto puede resultar ineficiente en ciertos casos.

21

Ejemplo: Controlador de Tráfico FTC

- **Método Adaptativo-Estadístico** (*continuación*):
 - Cada **10 segundos** los sensores envían información sobre el **número de coches que llegan a cada línea o carril** de la intersección.
 - Guarda el **máximo de esos valores** y vuelve a calcular de nuevo repitiendo el proceso **18 veces** (180 segundos = 3 minutos).
 - Con esos 18 valores calcula:
 - La media M .
 - La desviación típica s .
 - El **nuevo límite superior (LS)** para las **Variables de Entrada** se calcula con el siguiente **algoritmo**:
$$LS = M + 3s;$$
$$\text{if } (LS \leq 10)$$
$$\quad \text{nuevo_LS} = LS;$$
$$\text{else}$$
$$\quad \text{nuevo_LS} = \text{actual_LS};$$

22

Ejemplo: Controlador de Tráfico FTC

– Método Adaptativo-Difuso (*Fuzzy-Adaptive Method*):

- Aplica un **Factor de Escala** modificando el **Límite Superior** de la Variable de Salida **T**.
- Para calcular ese **Límite Superior** utilizan un **Monitor Difuso** que se comporta, a su vez, como un **Controlador Difuso** con los mismos parámetros que el principal y con las siguientes variables:
 - **Variables de Entrada:**
 - » **D**: Cola de coches que queda al final de la fase verde, con las etiquetas {Pocos, Normal, Muchos}.
 - » **V**: Variación de la cola durante la fase verde, con las etiquetas {Poco, Medio, Mucho}.
 - **Variable de Salida:**
 - » **UL** (*UpperLimit*): Límite superior de la variable **T** (variable de Salida del Controlador Difuso principal), con las etiquetas {Reducir, Mantener, Aumentar}.
- Por supuesto, en zonas de mucho tráfico con varias intersecciones que dependen mutuamente el sistema es más complejo (Nakamiti, et al., 1994), pero la mejor solución es fomentar el uso del transporte público, ir andando o en bicicleta.

23

Bibliografía

- K. Astrom, B. Wittenmark, "Computer Controlled Systems: Theory and Design". Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1984.
- W. Caminhas, H. Tavares, F. Gomide, "A Neurofuzzy Approach for Fault Diagnosis of Dynamic Systems". Proc. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 2032-2037, New Orleans, LA, 1996.
- D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank, "An Introduction to Fuzzy Control". Ed. Springer-Verlag, 1993.
- O.G. Duarte, G. Pérez, "UNFUZZY: Fuzzy Logic System Analysis, Design, Simulation and Implementation Software". EUSFLAT-ESTYLF Joint Conference (European Society for Fuzzy Logic and Technology), pp. 251-254, Palma de Mallorca (Spain), September 1999 (ohm.ingsala.unal.edu.co/ogduarte).
- J. Favilla, A. Machion, F. Gomide, "Fuzzy Traffic Control: Adaptative strategies". Proc. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 506-511, San Francisco, CA, 1993.
- M. Figueiredo, W. Caminhas, H. Tavares, F. Gomide, "Self-Organizing Fuzzy Clustering in Communication Network Planning". RT-DCA Internal Report, Unicamp, Campinas, São Paulo, Brazil, 1996.
- R. Gudwin, F. Gomide, M. Andrade Netto, M. Magalhães, "Knowledge Processing in Control Systems". IEEE Trans. on Knowledge and Data Engin., 8(1), pp. 106-119, 1996.
- F. Herrera, M. Lozano, J.L. Verdegay, "Algoritmos Genéticos con Parámetros Reales". V Congreso de la A. Española de Inteligencia Artificial, CAEPIA'93, pp. 41-50, 1993.
- C.C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controllers". IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, 20, Part I pp. 404-435, Part II pp. 419-433, 1990.

24

Bibliografía

- R. Mendes, A. Yamakami, F. Gomide, “Fuzzy Multicommodity Transportation Problem: Modeling and Application”. Internal Report RT-DT-DCA, Unicamp, Campinas, São Paulo, Brazil, 1996.
- S. Mir, D. Zinger, M. Elbuluk, “Fuzzy Controller for Inverter Fed Induction Machines”. IEEE Transactions on Industry Applications, 30(1), pp. 78-84, 1994.
- G. Nakamiti, R. Freitas, J. Prado, F. Gomide, “Fuzzy Distributed Artificial Intelligence Systems”. Proc. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, pp. 462-467, Orlando, FL, 1994.
- C. Pappis, E. Mamdani, “A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Intersection”. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, SMC-7, pp. 707-717, 1977.
- W. Pedrycz, “Fuzzy Control and Fuzzy Systems”. Research Studies Press/J. Wiley, New York, 1993.
- W. Pedrycz, F. Gomide, “An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design”. A Bradford Book. The MIT Press, Massachusetts, 1998. ISBN 0-262-16171-0.
- Sur A&C, Omron Electronics, S.A., “Lógica Fuzzy para Principiantes”. Ed. I. Hernández, 1997. ISBN 84-920326-3-4.
- R. Yager, D. Filev, “Essentials of Fuzzy Modeling and Control”. Wiley Interscience, New York, 1994.
- T. Yamakawa, “Stabilization of an Inverted Pendulum by a High-Speed Fuzzy Logic Controller Hardware System”. Fuzzy Sets and Systems, 32, pp. 161-180, 1989.