

# **CIRCUITOS DIFUSOS ANALÓGICO-DIGITALES PARA APLICACIONES ESPECÍFICAS**

S. Sánchez Solano

Instituto de Microelectrónica de Sevilla - Centro Nacional de Microelectrónica  
Avda. Reina Mercedes s/n, (Edif. CICA)  
E-41012, Sevilla, Spain

*Seminario del Programa Nacional de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones  
(TEDEA2000), pp. 39-43, Almagro, Septiembre 25-26, 2000*

This material is presented to ensure timely dissemination of scholarly and technical work. Copyright and all rights therein are retained by authors or by other copyright holders. All persons copying this information are expected to adhere to the terms and constraints invoked by each author's copyright. In most cases, these works may not be reposted without the explicit permission of the copyright holder.

# Circuitos Difusos Analógico-Digitales para Aplicaciones Específicas

S. Sánchez Solano

*Instituto de Microelectrónica de Sevilla. CNM-CSIC*

*E-mail: santiago@imse.cnm.es*

## Abstract

*El Proyecto que se describe en esta comunicación pretende potenciar la aplicación industrial de técnicas de razonamiento basadas en lógica difusa a través del desarrollo de una metodología de diseño de circuitos difusos para aplicaciones específicas. Las distintas actividades realizadas se centran tanto en aspectos arquitecturales como de implementación microelectrónica y contemplar, asimismo, el desarrollo de herramientas de descripción, verificación y síntesis que faciliten el camino entre la concepción de un sistema difuso y su implementación microelectrónica.*

## 1. Introducción

El formalismo matemático proporcionado por la lógica difusa emula el esquema de deducción humano, permitiendo la aplicación de técnicas de razonamiento aproximado a partir de reglas expresadas en lenguaje natural [1]. Esta característica, junto con el hecho de que determinados tipos de sistemas difusos son aproximadores universales [2], hacen que los mecanismos de inferencia difusos sean de gran utilidad en diferentes campos de la ingeniería y las ciencias sociales (en aplicaciones como el control de sistemas, el reconocimiento de patrones o los sistemas de diagnóstico empleados en medicina o economía) [3].

A lo largo de la última década se han reportado múltiples soluciones para implementar algoritmos difusos mediante software y hardware [4]. Las soluciones software proporcionan una gran flexibilidad para definir la base de conocimiento, seleccionar los operadores difusos y escoger los algoritmos de inferencia. Sin embargo, aquellos problemas que demandan una alta velocidad de operación o en los que el consumo de área y potencia impone restricciones importantes, requieren la adopción de soluciones hardware.

Las implementaciones hardware pueden ser clasificadas en dos categorías de acuerdo con la estrategia de realización adoptada [5]: 1) Coprocesadores difusos, que cooperan con microprocesadores estándares para acelerar

algunas de las operaciones difusas como el cálculo de mínimos o la defuzzificación (la mayoría de los circuitos difusos disponibles comercialmente corresponden a esta categoría [6]); y 2) Circuitos difusos para aplicaciones específicas, que implementan en un circuito integrado el algoritmo difuso que mejor se adapta a una determinada aplicación [7]. Mientras que los coprocesadores difusos proporcionan una solución de propósito general para determinados problemas, la utilización de hardware específico da lugar a soluciones a medida, más eficientes, y que presentan gran atractivo desde el punto de vista comercial.

Según la técnica de implementación utilizada, los circuitos difusos para aplicaciones específicas pueden dividirse en dos grandes grupos [8]. El uso de técnicas analógicas permite la realización de circuitos con una buena relación “área de silicio/velocidad de inferencia” y elimina la necesidad de introducir interfases para conectar sensores y actuadores analógicos [9]. Por otra parte, los procedimientos digitales ofrecen las ventajas que resultan del uso de metodologías de diseño bien establecidas, que facilitan la programabilidad de los sistemas y su interconexión con entornos de procesamiento convencionales [10]. Con objeto de cubrir un amplio espectro de aplicaciones es imprescindible considerar ambas posibilidades o, mejor aún, recurrir al uso de técnicas mixtas analógico/digitales para aprovechar lo mejor de ambos mundos y obtener realizaciones microelectrónicas eficientes desde las perspectivas de área de silicio, velocidad de inferencia, capacidad de interfaz, facilidad de programación y coste de realización [11][12].

## 2. Objetivos y organización del Proyecto

El Proyecto de Investigación bajo desarrollo pretende potenciar y facilitar la realización microelectrónica de sistemas de inferencia basados en lógica difusa mediante la búsqueda de metodologías de diseño que permitan una implementación microelectrónica más ambiciosa y favorable del concepto de sistema difuso. Para ello, el conjunto de acciones que hemos abordado en los dos últimos años trata de cubrir este objetivo desde tres perspectivas diferentes:

- Desde el punto de vista arquitectural, analizando diferentes estrategias de realización de sistemas difusos y proponiendo soluciones que permitan incrementar la complejidad de los mismos y facilitar su aplicación.
- Desde el punto de vista de diseño de circuitos integrados, mediante la utilización de técnicas híbridas analógico/digitales, capaces de adaptar mejor el hardware a las características de los sistemas difusos y que permiten compatibilizar estos sistemas con los estándares digitales y con las tecnologías de integración CMOS convencionales.
- Desde el punto de vista de aplicación, proporcionando el conjunto de herramientas de CAD necesarias para acelerar las tareas de diseño de los sistemas y facilitar el desarrollo de aplicaciones.

En los siguientes apartados se presentan, de forma muy resumida, los principales resultados obtenidos en cada una de las líneas de progresión anteriores.

### 3. Línea-1: Arquitectura

Aunque en la base de reglas que define el comportamiento de un sistema difuso se emplean términos del lenguaje natural para representar información que puede resultar imprecisa o incompleta, el formalismo matemático que permite aplicar técnicas de razonamiento aproximado a partir de dicha información es totalmente determinista. Un sistema difuso proporciona una relación, en general no lineal, entre los espacios de entrada y salida. Los factores que determinan esta relación entrada-salida incluyen la selección de las variables del sistema, la definición de la base de conocimiento y la elección de los diferentes tipos de operadores difusos (conectivo de antecedentes, función de implicación, mecanismo de agregación y método de defuzzificación) [8].

De acuerdo con las consideraciones anteriores, el espacio de diseño de sistemas difusos resulta muy amplio. Por ello, a la hora de abordar la implementación hardware de sistemas difusos se han explorado diferentes estrategias que difieren básicamente en el tipo de recursos que utilizan (memoria frente a bloques computacionales específicos) y en las prestaciones que proporcionan (flexibilidad frente a coste) [8], [13]-[15]. La conclusión general que puede derivarse de dichos estudios es que las estrategias basadas en memoria proporcionan una gran versatilidad a la hora de definir la base de conocimiento y elegir los operadores difusos (ya que gran parte del proceso de inferencia puede realizarse *off-line*), pero encuentran su principal limitación en el crecimiento exponencial de los recursos cuando se incrementa el número de entradas o el número de elementos de los universos de discurso.

Por otra parte, la implementación de sistemas difusos mediante estrategias basadas en bloques computacionales que realizan *on-line* el proceso de inferencia requiere la utilización de arquitecturas de procesamiento específicas para simplificar la circuitería y proporcionar una alta velocidad de inferencia. La causa principal de este requerimiento es el elevado grado de paralelismo inherente al proceso de inferencia que surge como consecuencia de la activación simultánea de varias reglas con distintos antecedentes. Además, si se emplean métodos de defuzzificación convencionales es preciso recorrer todo el universo de discurso de la salida para obtener una conclusión. (Este último inconveniente suele evitarse mediante la utilización de métodos de defuzzificación simplificados que reducen el mecanismo de inferencia al cálculo de una media ponderada.) Las arquitecturas reportadas en la literatura difieren fundamentalmente en la táctica utilizada para evaluar las reglas (evaluación en paralelo, en serie o de reglas activas). En el contexto de este Proyecto se han propuesto y desarrollado soluciones arquitecturales para la realización del proceso de inferencia (fuzzificación, procesamiento de reglas y defuzzificación) mediante una arquitectura de reglas activas, cuyos diagramas de bloques para los casos analógico y digital se esquematizan en la Figura 1. [16][17]

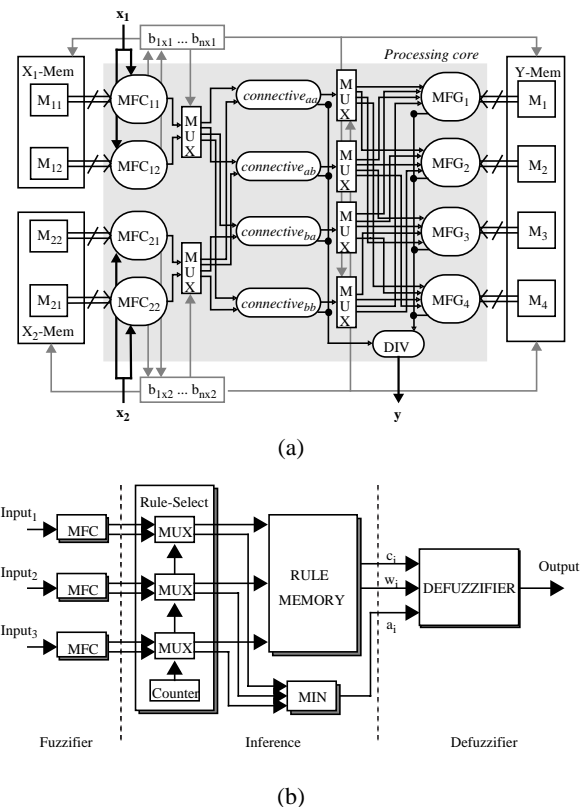


Fig. 1: Arquitectura de reglas activas para la implementación de sistemas difusos analógicos (a) y digitales (b).

## 4. Línea-2: Circuitos

Las actividades desarrolladas dentro del Proyecto en relación con el diseño a nivel de circuitos han seguido dos orientaciones diferentes en función de la técnica de diseño considerada.

En el caso digital el objetivo prioritario ha consistido en automatizar el proceso de diseño mediante el uso de herramientas de síntesis automática [18]. Para ello, los distintos elementos que aparecen en el diagrama de bloques de la Figura 2-b han sido descritos en VHDL e incluidos en una librería de celdas parametrizadas. El código utilizado en dichas descripciones es compatible con las restricciones al lenguaje impuestas por las herramientas de síntesis de Synopsys y Mentor Graphics [17]. A la hora de realizar un sistema difuso mediante un circuito microelectrónico, el diseñador puede elegir entre diferentes opciones de implementación: 1) utilización de procedimientos vectoriales o aritméticos para los circuitos de función de pertenencia (MFC); 2) empleo de memoria RAM o ROM para almacenar la base de conocimiento; y 3) uso de uno de entre cuatro métodos de defuzzificación simplificados. Se han previsto dos técnicas de implementación diferentes. La primera de ellas (muy útil para tareas de prototipado, como consecuencia de la facilidad para cambiar la funcionalidad del sistema mediante programación) consiste en el uso de FPGAs. La segunda alternativa es diseñar circuitos integrados para aplicaciones específicas (ASICs) utilizando un entorno de diseño de ICs semi-custom y la librería tecnológica proporcionada por un fabricante de silicio. La Figura 2 compara los tamaños de los ASICs resultantes para distintas opciones de diseño.

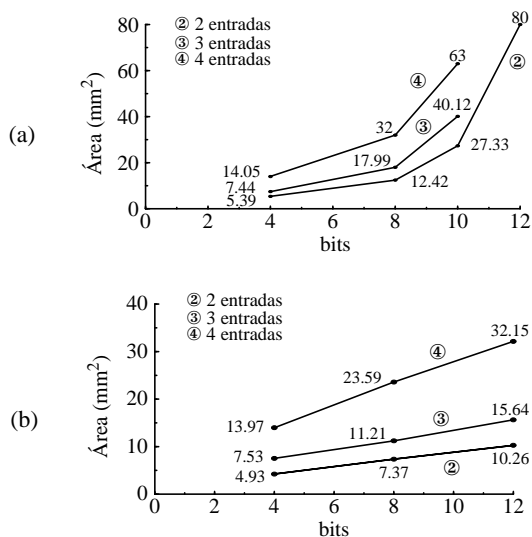


Fig. 2: Comparación de fuzzy ASICs programables en términos de área. MFCs basados en memoria (a) y aritméticos (b).

Las tareas de diseño relacionadas con el empleo de técnicas analógicas y mixtas han seguido una orientación bastante diferente. Las actividades llevadas a cabo se han encaminado básicamente a explorar la utilización de diferentes estilos de diseño en tiempo continuo y en tiempo discreto para implementar los distintos bloques de circuito de la Figura 1-a.

Los circuitos en modo de tensión o en modo de corriente diseñados con técnicas de tiempo continuo proporcionan, en general, la mejor relación área/velocidad de inferencia, evitando la necesidad de emplear señales de control. En particular, los circuitos en modo de corriente son especialmente adecuados para la realización de sistemas difusos, ya que permiten implementar los operadores básicos con muy pocos transistores [19]. Estos circuitos ofrecen ventajas adicionales como son: su independencia de la temperatura en primera aproximación, la robustez frente al escalado de las tecnologías de fabricación y la posibilidad de operar con valores bajos de tensión. Sin embargo, aunque determinados sensores y actuadores operan en modo de corriente, la mayoría de los dispositivos electrónicos convencionales utilizan voltajes como señales de entrada y salida. Por este motivo, con independencia de que el procesamiento interno del sistema difuso se lleve a cabo en modo de corriente, resulta conveniente disponer de bloques de entrada salida que admitan y proporcionen señales de tensión [20].

Las técnicas de tiempo discreto en modo de tensión proporcionan una solución intermedia entre la flexibilidad, fiabilidad y alta capacidad de automatización de las técnicas digitales y el bajo consumo de área y potencia y el proceso manual de diseño típico de las técnicas analógicas en tiempo continuo.

Por otra parte, aunque la base de conocimiento de un sistema difuso puede ser definida a partir de la experiencia de un operador experto, en numerosas ocasiones esta información suele ser obtenida, contrastada o ajustada mediante un conjunto de datos de entrada-salida que definen el comportamiento esperado del sistema. La utilización de algoritmos de aprendizaje supervisado (principalmente los basados en gradiente descendente o perturbación de pesos) permite llevar a cabo simultáneamente las operaciones de inferencia y ajuste, posibilitando la construcción de sistemas difusos adaptativos. Debido a que muchos de los mecanismos de aprendizaje utilizados habitualmente provienen del mundo de las redes neuronales, estos sistemas son también conocidos como sistemas neuro-difusos o "neuro-fuzzy".

Muchas de las actividades de diseño realizadas en el Proyecto se han focalizado hacia el estudio de estructuras de circuito que permitan implementar en silicio de forma eficiente los algoritmos de aprendizaje utilizados por los sistemas difusos adaptativos [21][22].

## 5. Línea-3: Herramientas de CAD

Cualquier actividad de diseño de circuitos integrados requiere la utilización de herramientas de CAD que faciliten las sucesivas tareas de descripción, verificación y síntesis. Esta afirmación es especialmente válida en el caso de los sistemas basados en lógica difusa, como consecuencia del enorme espacio de diseño que surge al considerar las distintas opciones de implementación tanto a nivel arquitectural como a nivel de circuitos. Por este motivo, las actividades de CAD incluidas en el Proyecto han tenido como objetivo la puesta a punto de un entorno de desarrollo formado por un conjunto de herramientas que simplifiquen la realización de las diferentes etapas del proceso de diseño de sistemas difusos [23].

La Figura 3 ilustra las etapas de diseño de un sistema difuso con las herramientas proporcionadas por el entorno Xfuzzy [24]. Siguiendo una metodología top-down [25], el diseño comienza con la descripción del sistema mediante un lenguaje de especificación formal (XFL) [26]. La especificación XFL contiene información sobre la base de conocimiento (reglas difusas y funciones de pertenencia de antecedentes y consecuentes) y sobre el mecanismo de inferencia utilizado (conectivos, función de implicación y método de defuzzificación). Si se dispone de un conjunto de datos de entrenamiento, la especificación puede ser ajustada mediante una herramienta de aprendizaje supervisado capaz de ajustar los parámetros de especificaciones XFL. En la etapa de verificación, Xfuzzy proporciona herramientas para simular el comportamiento del motor de inferencia en lazo abierto, así como para verificar su funcionamiento en lazo cerrado con un modelo C de la planta

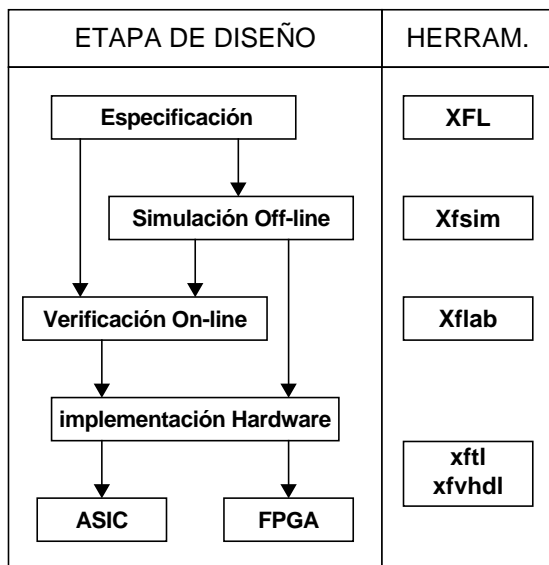


Fig. 3: Etapas de diseño y herramientas de CAD de Xfuzzy.

bajo control o conectando la planta real a través de una tarjeta de adquisición de datos [27]. Por último las herramientas de síntesis de Xfuzzy permiten obtener implementaciones del sistema difuso mediante software (como código C o Java) y mediante hardware (como código VHDL que puede ser sintetizado de forma automática en una FPGA o un ASIC).

Hasta el momento, el énfasis de las actividades de CAD se ha dirigido fundamentalmente hacia la automatización del proceso de diseño mediante técnicas digitales. No obstante, se han dado también los primeros pasos para desarrollar herramientas que faciliten el diseño de sistemas difusos mediante técnicas analógicas y mixtas [28].

## 6. Conclusiones y actividades previstas

Los resultados obtenidos han permitido desarrollar una serie de arquitecturas y circuitos que proporcionan realizaciones eficientes de sistemas difusos para aplicaciones específicas, así como proponer una metodología de diseño para este tipo de sistemas. Las actividades que se desarrollarán durante el próximo año tendrán como objetivo verificar la aplicación práctica de las arquitecturas y circuitos desarrollados hasta ahora. Para ello consideraremos dos tipos de aplicaciones. La primera consistirá en el diseño de un automatismo de control para la regulación del nivel de líquido en tanques [29] (Figura 4). La segunda aplicación surge como consecuencia de la participación del grupo en otros proyectos de investigación y está relacionada con el desarrollo de sistemas de detección de olores con aplicaciones en las áreas de tecnología de alimentos y control medioambiental.



Fig. 4: Planta prototipo para controlador de nivel fuzzy.

## 7. Referencias

- [1] L. A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes", *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybern.*, N. 3, pp. 28-44, 1973.
- [2] X.-J. Zeng, M. G. Singh, "Approximation accuracy analysis of fuzzy systems as function approximators", *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, V. 4, N. 1, pp. 44-63, 1996.
- [3] T. Terano, K. Asai, M. Sugeno, Eds., *Applied Fuzzy Systems*, Academic Press, 1994.
- [4] T. Munakata, Y. Jani, "Fuzzy Systems: An Overview", *Communications of the ACM*, V. 37, N. 3, pp. 69-76, 1994.
- [5] A. Costa, A. De Gloria, P. Faraboschi, A. Pagni, G. Rizzotto, "Hardware solutions for fuzzy control", *Proc. of the IEEE*, V. 83, N. 3, pp. 422-434, 1995.
- [6] K. Nakamura, N. Sakasmita, Y. Nitta, K. Shimomura, T. Tokuda. "Fuzzy Inference and Fuzzy Inference Processors". *IEEE Micro*, V. 13, N. 5, pp. 37-48, 1993.
- [7] D. L. Hung. "Dedicated Digital Fuzzy Hardware". *IEEE Micro*, V. 15, N. 4, pp. 31-39, 1995.
- [8] I. Baturone, A. Barriga, S. Sánchez Solano, C. J. Jiménez Fernández, D. R. López, *Microelectronic Design of Fuzzy Logic-Based Systems*, CRC Press, 2000.
- [9] J. L. Huertas, S. Sánchez Solano, I. Baturone, A. Barriga, "Integrated Circuit Implementation of Fuzzy Controllers", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, V. 31, N. 7, pp. 1051-1058, 1996.
- [10] S. Sánchez Solano, A. Barriga, C. J. Jiménez, J. L. Huertas, "Design and Application of Digital Fuzzy Controllers", in *Proc. IEEE 6th Int. Conf. on Fuzzy Systems*, V. 2, pp. 869-874, 1997.
- [11] I. Baturone, S. Sánchez Solano, A. Barriga, J. L. Huertas, "Implementation of CMOS Fuzzy Controllers as Mixed-Signal Integrated Circuits", *Trans. on Fuzzy Systems*, V. 5, N. 1, pp. 1-19, 1997.
- [12] I. Baturone, S. Sánchez Solano, J. L. Huertas, "Mixed-Signal VLSI Design of Adaptive Fuzzy Systems", in *Proc. 7th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, pp. 25-30, 1998.
- [13] I. Baturone, S. Sánchez Solano, A. Barriga, J. L. Huertas, "Design Issues for the VLSI Implementation of Universal Approximator Fuzzy Systems", in *Computational Intelligence and Applications*, pp. 150-155, Ed. by World Scientific and Engineering Society Press, 1999.
- [14] I. Baturone, G. Hernández, S. Sánchez Solano, "VLSI Design of Universal Approximator Systems", in *Proc. IPMU2000*, V. 1, pp. 36-43, 2000.
- [15] I. Baturone, S. Sánchez Solano, "Microelectronic design of universal fuzzy controllers", in *Proc. ESTYLF2000*, pp. 247-252, 2000.
- [16] I. Baturone, A. Barriga, S. Sánchez Solano, J. L. Huertas, "Mixed-Signal Design of a Fully Parallel Fuzzy Processor", *Electronics Letters*, V. 34, N. 5, pp. 437-438, 1998.
- [17] C. J. Jiménez Fernández, "Desarrollo en hardware digital de sistemas difusos con una arquitectura optimizada", *Memoria de Tesis Doctoral*. Universidad de Sevilla, 2000.
- [18] E. Lago, C. J. Jiménez, D. R. López, S. Sánchez Solano, A. Barriga, "XFVHDL: A Tool for the Synthesis of Fuzzy Logic Controllers", in *Proc. Design, Automation and Test in Europe*, pp. 102-107, 1998.
- [19] I. Baturone, S. Sánchez Solano, J. L. Huertas. "Towards the IC Implementation of Adaptive Fuzzy Systems", *IEICE Trans. on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, V. E81-A, N. 9, pp. 1877-1885, 1998.
- [20] I. Baturone, S. Sánchez Solano, J. L. Huertas, "CMOS Design of a Current-Mode Multiplier/Divider Circuit with Applications to Fuzzy Controllers", *Analog Integrated Circuit and Signal Processing*, V. 23, N. 3, pp. 199-210, Kluwer Academic publisher, 2000.
- [21] I. Baturone, S. Sánchez Solano, A. Barriga, J. L. Huertas, "Optimization of Adaptive Fuzzy Processor Design", in *Proc. XIII Conf. on Design of Circuits and Integrated Systems*, pp. 316-321, 1998.
- [22] I. Baturone, S. Sánchez Solano, J. L. Huertas, "Hardware Implementation of Neuro-Fuzzy Systems", *Int. Journal of Chaos Theory and Applications* (Pendiente publicación).
- [23] D. R. López, C. J. Jiménez, I. Baturone, A. Barriga, S. Sánchez Solano, "Xfuzzy: A Design Environment for Fuzzy Systems", in *Proc. 7th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, pp. 1060-1065, 1998.
- [24] I. Baturone, S. Sánchez Solano, A. Barriga, C. J. Jiménez, D. R. López, "A Fuzzy System Development Environment", in *Proc. 2nd World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, 1998.
- [25] A. Barriga, R. Senhadji, C. J. Jiménez, I. Baturone, S. Sánchez Solano, "A Design Methodology for Application Specific Fuzzy Integrated Circuits", in *Proc. 5th IEEE Int. Conf. on Electronics, Circuits and Systems*, V. 1, pp. 431-434, 1998.
- [26] F. J. Moreno Velo, S. Sánchez Solano, A. Barriga Barros, I. Baturone Castillo, D. R. López García, "XFL3: Un nuevo lenguaje de especificación de sistemas difusos", in *Proc. ESTYLF2000*, pp. 509-514, 2000.
- [27] R. Senhadji, S. Sánchez Solano, D. R. López, A. Barriga, "Xflab: An On-line Verification Tool for Fuzzy Controllers", in *Proc. IPMU2000*, V. 1, pp. 44-49, 2000.
- [28] G. Hernández, "FMCSIM: Un simulador para chips mixtos difusos". *Proyecto Fin de Carrera*, Facultad de Informática y Estadística, 1999.
- [29] R. Senhadji, I. Álvarez, A. Barriga, S. Sánchez Solano, "Controlador de nivel basado en lógica difusa", in *Proc. ESTYLF2000*, pp. 455-460, 2000.