

**INTELLIGENT SUPERVISORY CONTROL OF CONTINUOUS PROCESSES EXPOSED
TO FAILURES****CONTROL SUPERVISORIO INTELIGENTE DE PROCESOS CONTINUOS
EXPUESTOS A FALLAS**

MSc. Carlos Arturo Parra Ortega*, PhD. Eliecer Colina Morles
PhD. Edgar Chacon Ramírez****

*** Universidad de Pamplona**

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia.

Tel.: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303, Ext. 156

E-mail: carapa@unipamplona.edu.co

**** Universidad de Los Andes**

Facultad de Ingenierías, Mérida, Venezuela.

E-mail: {ecolina, echacon}@ula.ve

Abstract: To carry out the Supervisory Control in continuous process systems exposed to failures the requirement is to provide an intelligent oversight mechanism because of the need to identify the variety of failures, their source and anticipate the consequences of their occurrence. In this paper we propose to extend the multi-resolutional model of Sanz (1990) and bring it to a supervisory scheme with events' detection based on fuzzy logic and agents' technology. This paper also presents a mechanism to validate the implementation using simulation of discrete events.

Resumen: Para llevar a cabo el Control Supervisorio en sistemas de proceso continuo expuestos a fallas se requiere proporcionar inteligencia al mecanismo de supervisión, debido a la necesidad de identificar la diversidad de fallas, la fuente de las mismas, y anticipar las consecuencias que se derivan de su ocurrencia. En este artículo proponemos extender el modelo multi-resolucional de Sanz (1990) y llevarlo a un esquema de supervisión con detección de eventos basado en lógica difusa y tecnología de agentes. En este trabajo se presenta también un mecanismo para validar la implementación utilizando simulación a eventos discretos.

Keywords: Intelligent supervisory control, multi-resolutional model, failure detection, fuzzy logic, multi-agent systems

1. INTRODUCCIÓN

El control automatizado de procesos industriales continuos es una labor crítica, debido a que un proceso no se puede detener mientras se presentan diversas situaciones que afectan la configuración,

como cambios en las especificaciones del producto o en el flujo de materia prima, por ejemplo. Entre las situaciones que justifican una parada de planta se encuentran las condiciones de falla, causadas por mal funcionamiento de diversos dispositivos, errores en la medición de variables, insumos

deficientes o una combinación de los anteriores factores. Si se detecta a tiempo a veces no hace necesaria la detención de un proceso, y el costo de su reparación es menor que el costo de lo que se deja de producir debido a la parada de planta.

Los Sistemas de Control Supervisorio (SCS, de aquí en adelante) están diseñados para controlar a un alto nivel aquellos procesos en condiciones normales, y en ocasiones no prevén la ocurrencia de fallas. El objetivo de este trabajo es el de presentar una propuesta de supervisión de un sistema de producción continua expuesto a fallas, de manera que no sea necesario detener el proceso, y además se pueda diagnosticar el tipo de falla para proponer una medida que permita resolver en la medida de lo posible, esta condición de falla generada por el mismo sistema en una forma automática o semiautomática. Para lograr la especificación anteriormente mencionada proponemos un enfoque que haga converger las metodologías de síntesis de SCS basada en lenguajes formales, métodos derivados de la Lógica Difusa para detectar eventos y condiciones de falla, el modelo de razonamiento multiresolucional para obtener leyes de control a partir de condiciones de operación observadas, y los sistemas multi-agente para implementar tanto a supervisores como detectores de eventos, dentro de un entorno distribuido. El diseño resultante lo validamos por medio de modelado y simulación de sistemas a eventos discretos, aplicados a un ejemplo típico.

Algunos trabajos se han desarrollado en esta área, relacionados con nuestra investigación: Cerrada et al (2006) proponen un diseño basado en agentes para la detección de fallas en procesos industriales (2) con roles específicos para cada tipo de agente, y basado en especificación general (reglas puntuales). Guillén et al (2005) proponen métodos para detectar fallas utilizando transformada wavelet en procesos químicos, Altamiranda *et al.* (2005) proponen una arquitectura del sistema de soporte a la toma de decisiones en control, utilizando el modelo multiresolucional de Sanz (1990) junto con técnicas basadas en lógica difusa, aplicada a sistemas de control híbrido. Este documento está organizado como sigue: en la sección dos presentamos el problema que origina este trabajo, luego presentamos una propuesta de solución de este problema en la sección tres. En la sección cuatro presentamos un caso de estudio, el mecanismo de validación lo describimos en la sección cinco, mientras que en la sección seis

mostramos los resultados de simulación obtenidos. Posteriormente se presentan las conclusiones derivadas de la realización de este trabajo.

2. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

Dentro de procesos de producción continua una de las condiciones ideales del control de procesos es obtener la confiabilidad máxima, es decir de un valor cercano al ciento por ciento. Desafortunadamente las condiciones de falla están dentro de los eventos con los que tenemos que contar dentro del control de un proceso, debido a un malfuncionamiento del equipamiento industrial, presencia de perturbaciones en el proceso de medición de variables, o interpretación errónea del estado en que se encuentra un proceso, llevando a procedimientos inadecuados sobre los insumos, o a una combinación entre algunos de los factores ya mencionados. En procesos de producción continua esta situación es crítica, ya que implica detener el proceso para llevar a cabo las acciones correctivas necesarias y luego re-arrancar el mismo, con las consiguientes pérdidas en tiempo y económicas.

Cuando se trabaja con estos sistemas de producción continua es necesario monitorear las variables pertenecientes al proceso que se está controlando para detectar la ocurrencia de eventos. Algunas veces las mediciones de las variables están sujetas a perturbaciones, que son inherentes a la naturaleza de las variables a medir, por ejemplo la ocurrencia de oleaje en depósitos sujetos a flujo de entrada y salida, variaciones en las magnitudes o en la sensibilidad de los dispositivos de medición, por citar algunos casos. Dado que en los sistemas de producción las variables de estado del proceso son de naturaleza discreta, hay una función de proyección de variables continuas a estados discretos. Para sistemas con las características de perturbación mencionadas anteriormente no pueden utilizarse reglas puntuales para determinar cambios en la región de operación, ya que puede ocurrir que durante un período de tiempo se conmute sucesivamente de una región a otra, de acuerdo al período de muestreo de los dispositivos de medición, ocasionando que se tomen medidas de control inadecuadas, lo cual no es recomendable en misiones de control críticas. Además, algunos elementos que pertenecen al sistema de producción también pueden presentar fallas, que de alguna manera se reflejan en las variables medidas y cuya ocurrencia es difícil de detectar de manera directa.

A partir del modelo racional se aplican unas funciones de concreción de razonamiento, en forma de actualización de los estados tanto del modelo cualitativo global (cuando se recupera una falla), como del modelo cualitativo local (operación en condiciones normales). A partir del modelo cualitativo local se generan las reglas $F_{c_{CN}}$ del control regulatorio hacia el proceso físico, que se traduce en consignas al controlador para inducir cambios en las propiedades físicas del proceso, que a su vez afectan al modelo numérico, y aquí el ciclo se reinicia con procesos de medición y detección de eventos.

3.2 Implementación computacional

Aunque existen varias maneras de implementar un Sistema de Control Supervisorio con las especificaciones de diseño mencionadas anteriormente, decidimos utilizar tecnología de agentes, ya que permite operar sobre un entorno distribuido, como lo es una planta industrial con dispositivos y computadores interconectados por medio de una red de campo.

Uno de los agentes implementa al detector de eventos, y su misión es la de recibir las lecturas de sensores que miden el proceso físico, en el cual existen dispositivos que tienen una probabilidad de fallar. Otro agente implementará al supervisor.

De acuerdo a la tendencia de los datos medidos, el detector de eventos aplicará un conjunto de reglas difusas para determinar a) los datos sugieren que se está en una región de operación determinada, b) los datos sugieren que ocurrió un cambio de región de operación, y c) los datos indican que algún dispositivo de medición, actuación o físico presenta algún tipo de falla. Ambos agentes cargan desde un archivo las reglas de razonamiento, con lo que se gana capacidad de conmutación y flexibilidad por si cambian las condiciones del sistema. Más adelante indicaremos la forma en que se implementa el supervisor y detector de eventos utilizando tecnología de agentes.

4. CASO DE ESTUDIO

Un caso de estudio para diseñar y evaluar el control supervisorio sobre un proceso continuo sujeto a fallas se tiene en el problema del control de un sistema hidroneumático. El sistema que se quiere supervisar tiene los siguientes componentes: un

depósito que tiene forma de un cilindro acostado, el cual contiene agua y aire, una fuente externa de suministro de agua, una motobomba y un compresor. El objetivo global del sistema consiste en suministrar agua a los usuarios, manteniendo los niveles de su depósito y presión de aire dentro del rango de valores adecuado. La presión del aire determina la calidad de suministro a la demanda de agua de los usuarios del servicio, por lo tanto se debe controlar también. El nivel del agua se controla encendiendo o apagando una motobomba, modificando así el flujo de entrada de agua al depósito. La medición del nivel del agua tiene oleajes, de manera que se trata de una medición perturbada. Por otra parte, el compresor, la motobomba y los sensores de nivel y presión pueden presentar fallas en cualquier momento, que se traducen en resultados que no corresponden de acuerdo al comportamiento esperado del sistema, como lo establece el Control Supervisorio.

4.1 Modelo Numérico

Para describir el comportamiento físico del sistema se considerará como variables de estado el nivel de agua y la presión en el tanque cilíndrico acostado. Estas variables las podemos representar por medio de ecuaciones diferenciales ordinarias, las cuales se presentan a continuación:

El nivel del depósito lo podemos expresar con la siguiente ecuación:

$$h'(t) = \frac{I(t) - m(t)}{r^2 \cos^{-1}(1 - h/r) - (r - h)\sqrt{2rh - h^2}} \quad (1)$$

Donde $h'(t)$ es la tasa de cambio del nivel de agua en el tanque y h es la altura instantánea.

El cambio de presión se da por la expresión

$$P_1 = P_0 (V_0 / V_1) \quad (2)$$

P_1 es la presión en un instante t , P_0 es la presión en el instante $t = 0$, V_1 y V_0 son los volúmenes ocupados por el agua en el instante actual y $t = 0$, respectivamente.

4.2 Modelo cualitativo local

Este modelo describe los estados discretos en operación normal. Para ello se han definido nueve regiones de operación para las variables de nivel y presión en abscisas y ordenadas respectivamente, como se pueden apreciar en la figura 3.

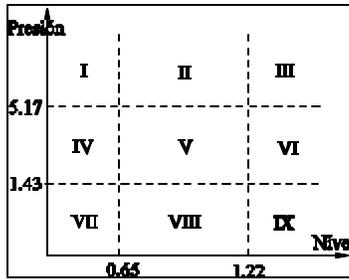


Fig. 3. Regiones de operación en condiciones normales

Estas regiones de operación proyectan a un autómata de estados finitos, como el de la figura 4.

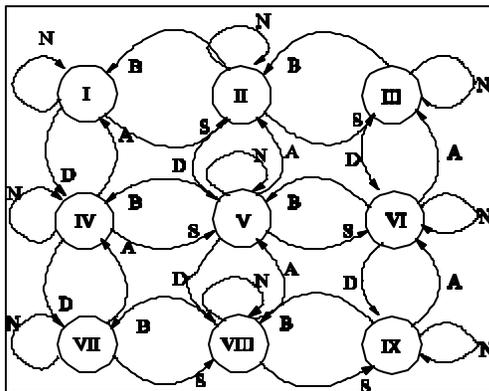


Figura 4. Autómata que describe la operación normal del depósito

Donde cada estado corresponde a una región de operación, y hay nueve estados. Las transiciones posibles son:

N: Los cambios en los valores de las variables indica que no ocurrió evento alguno.

S: Cambios en los valores de las variables indican que ocurrió un ascenso de nivel

B: Los cambios en los valores de las variables indican que hubo un descenso de nivel

A: La cualificación de las variables indica que subió la presión

D: La evolución de las variables sugiere que la presión disminuyó, pasando de una región de mayor presión a una de menor presión.

Un cambio de región diferente al contemplado aquí indicará una posible ocurrencia de falla, por ejemplo, pasar del estado IX al I en un período corto de tiempo.

Determinación del estado de operación en que se encuentra el sistema de producción – función $F_{a_{NC}}$. Para evitar cambios de estado innecesarios debido a la imprecisión de los dispositivos de

medición o a efectos del oleaje dentro del depósito, se hace necesario un esquema basado en lógica difusa, que permita mapear de una forma más segura los valores numéricos resultado de las mediciones de variables hacia unas variables lingüísticas que representan a los estados del sistema. La figura 5 muestra el esquema de difusificación para la variable presión, proyectada a tres valores: bajo, medio y alto.

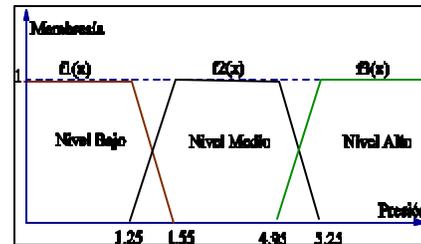


Fig. 5. Funciones difusas para hallar el estado en que se encuentra la variable presión

La tabla 1 resume la clasificación para deducir en que región de operación se encuentra el sistema, dados los valores del nivel de agua y su presión.

Tabla 1. Clasificación para hallar región de operación

N \ P	Bajo	Normal	Alto
Bajo	VII	VIII	IX
Normal	IV	V	VI
Alto	I	II	III

Reglas para determinar la ocurrencia de eventos. Tienen la forma:

Si rango de operaciones es V y la presión baja, hay cambio de región a VIII (Evento D)

Exhaustivamente para cada región de operación se pueden definir estas reglas por medio de una tabla, como la tabla 2.

Tabla 2. Reglas para detectar eventos

Región	Cualidad de variable	Evento
I	Nivel bajo, presión alta	N
I	Nivel medio, presión alta	S
I	Nivel bajo, presión media	D
I	Otros valores	falla
II	Nivel medio, presión alta	N
II	Nivel medio, presión media	D
II	Nivel bajo, presión alta	B
II	Nivel alto, presión alta	S
II	Otros valores	falla

IX	Nivel alto, presión baja	N
IX	Nivel medio, presión baja	B
IX	Nivel alto, presión media	A
IX	Otros valores	falla

Fallas que se pueden presentar. Dado que el sistema hidroneumático se compone de dispositivos mecánicos, eléctricos y electrónicos de precisión, algunas fallas pueden presentarse, modificando su normal funcionamiento. Entre las más comunes tenemos:

- Falla en el compresor o existe un escape de aire (a pesar de estar encendido, la presión no aumenta, aún sin haber consumo de agua)
- Falla en la motobomba o en el ducto del depósito externo al principal, la bomba no enciende o no hay agua en el tanque externo (a pesar de estar encendida, el nivel sigue bajando).
- Falla en el sensor de nivel de agua o en el medidor de presión (lecturas perturbadas irregulares)

Descripción del comportamiento global del sistema sujeto a fallos – modelo cualitativo global. El sistema hidroneumático tiene un estado normal, donde operan todas las condiciones de operación que se han mencionado anteriormente. Cuando ocurre una falla, no es válido considerar las regiones de operación de la figura 4, ya que cambiaron las condiciones del sistema. La dinámica global de este sistema sujeto a fallos se muestra en la figura 6, utilizando una máquina de estados finitos. El estado inicial es el que se etiqueta como “normal”, donde es válido considerar las regiones de operación planteadas anteriormente, ciertos eventos detectados en ella permiten que se considere el sistema global en estado normal, mientras que otros eventos sugieren que se ha presentado una condición de falla. Una vez ocurre el evento F (falla) el sistema entra al estado “Falla”, y a partir de este estado pueden ocurrir otros dos eventos: la falla es muy grave, por lo que el sistema pasa a estado “no disponible”, ocurriendo el evento E, o la falla puede repararse sin desmontar el sistema, indicando que ocurrió el evento G, que lleva al estado de reparación. Si este proceso de reparación es exitoso, el sistema entra a operación normal nuevamente, por medio del evento K. Ciertos procesos de reparación implican que el sistema se reinicie, por lo tanto se lleva a una condición de “parada”, a partir del cual el sistema

arranca (evento A) para volver a operación normal. Un ejemplo de arranque consiste en el reemplazo de una motobomba defectuosa, el depósito debe vaciarse para instalar la motobomba, y luego bombear agua y aire hasta que se coloquen en los valores de operación normal.

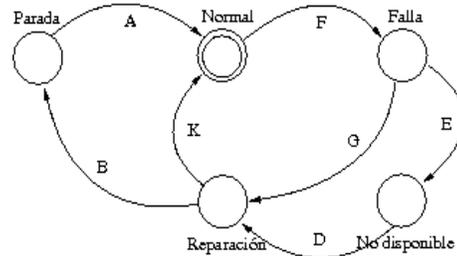


Fig. 6. Autómata para modelar el comportamiento global del sistema hidroneumático

Aplicando los conceptos de control supervisorio utilizando teoría de lenguajes, hay que caracterizar el comportamiento del sistema a controlar definiendo para ello el lenguaje marcado del sistema. El lenguaje de este autómata es:

$$L_m(G) = (F(G + ED)K + BA) \quad (3)$$

Los eventos controlables son K, A, D y G, mientras que los eventos F, B y E son no controlables.

4.3 Supervisión

El único estado deseable es el de operación normal, pero dado que no se puede inhibir el evento F, entonces hay que considerar al estado falla, parada y reparación. Así mismo, el evento E es no controlable y no se puede inhibir, por lo tanto el estado no disponible tampoco se puede descartar. En razón a lo anterior, la supervisión solo ocurre generando eventos luego de la falla: cada vez que ocurra un evento F, entonces hacer que ocurra G y K, o si ocurre la secuencia de eventos F-E, entonces procurar generar la secuencia de eventos D-K, y así para las otras combinaciones.

4.4 Cambio en la configuración del sistema de producción (Esquema R):

La configuración del sistema de producción la podemos establecer sobre los valores discretos de dos variables que corresponden a la motobomba y al compresor. Estos valores corresponden a 0 (apagado) y 1 (encendido). Esta configuración debe variar de acuerdo a la región de operación en que se encuentra el sistema, de acuerdo al último evento

detectado, y el estado en que se encuentra la motobomba y el compresor. En general, opera en forma de reglas de tipo condición – acción, de las cuales se muestra un ejemplo.

Si variable no se ha manipulado y región es 5, entonces no manipular

Si la variable no se ha manipulado, y la región es otra, manipular de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 3. Modelo de Razonamiento para la configuración del sistema hidroneumático

Z	B=0	C=0	B=1	C=1
1	-	-	-	C → 0
2	-	-	-	C → 0
3	-	-	B → 0	C → 0
4	-	-	-	-
5	-	-	-	-
6	-	-	-	-
7	B → 1	-	-	-
8	-	-	-	-
9	-	C → 1	-	-

Donde “-” indica no manipular o modificar la configuración del sistema, → 0 indica que se debe apagar el dispositivo que esté encendido, y → 1 indica lo contrario.

5. VALIDACIÓN DEL DISEÑO

El esquema de validación tiene la forma que se aprecia en la figura 7. Un simulador basado en el formalismo DEVS para eventos discretos representa a los elementos del sistema hidroneumático, y para ello se seleccionó la plataforma de simulación Galatea (6), desarrollada en Java. En el entorno multi-agente JADE (7) se van a implementar los agentes Detector y Supervisor. Ambos agentes proyectarán sus acciones sobre el simulador DEVS a través de una interfaz desarrollada en lenguaje Java.

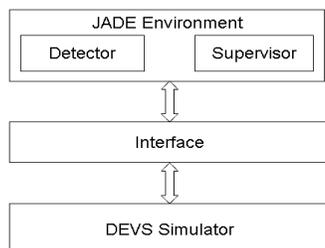


Fig. 7. Esquema de implementación

Una vez implementada la plataforma de prueba con los agentes, el simulador DEVS y la interfaz, se ejecutaron las simulaciones, bajo las siguientes condiciones iniciales:

- Alturas de referencia para el nivel: 0.5 y 1.2 m.
- Presión de referencia: 1.47 y 5.17 Kg-f/cm².
- Flujo de entrada: 0.01 m³/seg (10 litros/seg)
- Flujo de salida variable: alrededor de 0.001 m³/seg.
- Presión inicial: 2.067 Kg-f/cm².
- Tiempo entre observaciones del agente detector de eventos: 2 segundos.

6. RESULTADOS

Luego de ejecutar varias simulaciones, se obtuvieron trazas que representan el comportamiento de las variables del sistema bajo diversos escenarios: una operación normal, una falla en un sensor y una falla en el accionamiento de la motobomba. Además de la traza de variables continuas también se muestra la traza de la evolución de los estados que representan cualitativamente tanto el nivel como la presión, así como la evolución del estado global de la planta y se hace un seguimiento de los cambios en las configuraciones de la planta. Una traza del nivel de agua se muestra en la figura 8, y un comportamiento similar exhibe la variable presión. Se puede observar primero la operación en modo normal, con los niveles del agua oscilando entre los valores máximo y mínimo, y luego se produjo una condición de falla en la motobomba, que hizo necesario un cierre de válvula de salida con el consiguiente tiempo que duró la reparación. El nivel estuvo estable durante el período de reparación debido a que no había ningún flujo tanto de entrada como de salida.

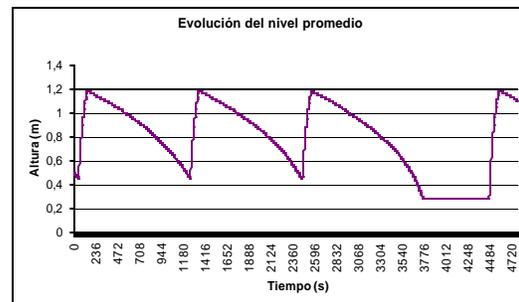


Fig. 8. Evolución del nivel de agua en el depósito

Otra forma de analizar el comportamiento del sistema consiste en registrar las trayectorias de los estados globales del sistema, al igual que las

regiones cualitativas en que se encuentra el proceso en todo momento. Esto permitirá hacer un seguimiento y confrontar en que momento ocurrió una situación de falla, y revisar el comportamiento del sistema hasta ese momento, en todas sus variables. En la figura 9 podemos apreciar esta traza. No sin antes aclarar que la escala de tiempo se modificó para representar con mayor claridad los cambios de eventos ocurridos.



Fig. 9. Traza del comportamiento de las regiones de operación y el estado del sistema

7. CONCLUSIONES

Durante el proceso de diseño del mecanismo de supervisión expuesto a fallas combinando diversas metodologías, su implementación, y durante el proceso modelado y simulación, se recogieron algunas experiencias, que mencionamos a continuación:

- Se logró combinar la metodología del modelo multiresolucional con las técnicas de lógica difusa en detección de eventos, y con la teoría de control supervisorio basado en máquinas de estado finito y lenguajes formales.
- La simulación de eventos discretos es un método adecuado para validar el diseño de un sistema de control supervisorio, y además permite medir el desempeño del mecanismo de control de alto nivel.
- Con la aplicación de técnicas de lógica difusa se logra detectar eventos en variables perturbadas, que observadas de manera directa no supondrían una base sólida para indicar el estado en que se encuentra un proceso industrial.
- Los elementos principales del control supervisorio pueden implementarse por medio de tecnología de agentes, además quedan potenciados para desempeñar labores de comunicación entre sí y con otros sistemas, bien sea automáticos o con personas.

REFERENCIAS

- Sanz R. (1990). *Arquitectura de Control Inteligente de Procesos*. PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid.
- Jennings, N (1994). *Cooperation in Industrial Multi-agent system*. World Scientific Publishing, Singapore
- Cerrada M, Aguilar J, Cardillo J, Faneite R. (2006). Agent-based design for fault management system in industrial processes, *Revista Técnica de Ingeniería, Universidad del Zulia*, Vol. 29, No. 3, pp. 258-268
- Guillén P, Paredes M, Camacho O. (2005). A proposal method for fault detection and diagnosis in chemical processes instrumentation using wavelet transform, *Revista Técnica de Ingeniería, Universidad del Zulia*, Vol. 28, No.1, pp. 68-77.
- Altamiranda E, Colina E, Chacón E. (2005). Intelligent Supervisory Systems for Industrial Process Control. *WSEAS Transactions on Systems*, Vol. 4, No. 7, pp. 945 – 949.
- Ramadge J, Wonham M. (1987). Supervisory Control of a class of Discrete-Event Process. *SIAM Journal of Control and Optimization*, Vol. 25, No. 1, pp. 206 – 230.
- Zadeh L, (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics*, 3, 28-44.
- Mamdani E, (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, *Proceedings IEEE*, Vol.121, 1585-1588.
- Uzcátegui, M. (2002). GALATEA, a multi-agent simulation language. MSc thesis. Universidad de Los Andes.
- JADE. (2002). Technical Report. Available in url: <http://www.tilab.com>.