

DISEÑO DE UN SISTEMA EXPERTO PARA LA TOMA DE DECISIONES TACTICAS NAVALES MEDIANTE REDES DE PETRI DIFUSAS

ALVARO T. LOPEZ^{*}, ROGER V. REYES, PAULO E. MIYAGI[†]

^{*} COPPE, Programa de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Cidade Universitária, IlhadosFundão, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

[#] Servicios Industriales de la Marina S.A., Servicio de Armas y Electrónica, Contralmirante Mora 1102, Callao, Lima, Perú

[†] Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Av. Prof. Mello Moraes, 2231, São Paulo, SP, Brazil

E-mails: alvarolo@pee.coppe.ufrj.br, rvalencia@sima.com.pe, pemiayagi@usp.br

Abstract— This work presents the design and implementation of a decision maker expert system for a navy ship. The decisions here concern with tactical level to support the first commander at the command and control center of the navy unit during trainings and naval confrontations. Techniques that had proven their effectiveness for soft computing and discrete event systems modeling such as fuzzy logic and Petri net are adopted for the design of this system. As a result, we have an intelligent and self-governing hybrid system. This proposal is verified and implemented through Matlab®, using the Simulink® and Stateflow® toolboxes.

Keywords— Expert system, fuzzy logic, Petri net, hybrid system.

Resumen— En este trabajo, se presenta el diseño e implementación de un sistema experto para la toma de decisiones en un buque militar. Las decisiones consideradas están en nivel táctico y el objetivo es dar un soporte al primer comandante en el centro de comando y control de la unidad naval en los entrenamientos y enfrentamientos navales. Para el diseño de este sistema experto se combina técnicas de comprobada efectividad de la softcomputing y del modelamiento de sistemas a eventos discretos, como la lógica difusa y la red de Petri. De esta manera se diseña un sistema híbrido autónomo e inteligente. Esta investigación es probada e implementa mediante el Matlab® utilizando los toolbox de Simulink® y Stateflow®.

Palavras-chave— Sistema experto, lógica difusa, rede de Petri, sistema híbrido.

INTRODUCCIÓN

En los diversos tipos de operaciones llevadas a cabo por un navío militar se puede interactuar con múltiples variables presentes dentro de su área de operaciones, es por ello que la toma de decisiones involucra una gran cantidad de informaciones tal como se muestra en la Figura 1. De hecho, esta toma de decisiones es muy frecuente y su grado de responsabilidad es inconmensurable debido que involucran la vida de personas, teniendo en cuenta que muchas de estas decisiones son afectadas por factores psicológicos, stress, etc. Es por ello que la intervención de la inteligencia artificial con sus últimos avances en softcomputing tiene un papel cada vez más relevante. Existen varias investigaciones para la aplicación de los sistemas expertos para la toma de decisiones, ya que este tipo de sistemas piensan y razonan como un experto lo haría en una

cierta especialidad o campo (Stevens, 1984, Turban, 1992).

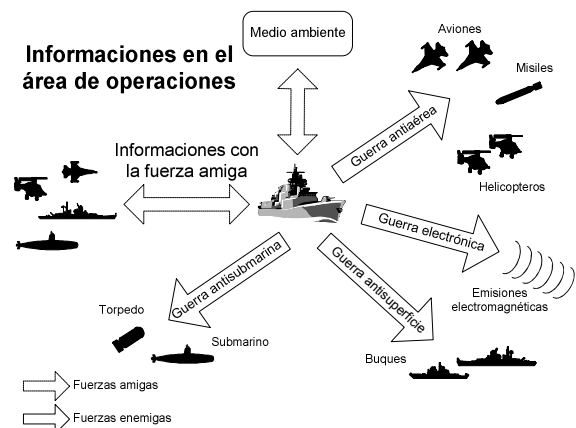


Figura 1. Variables a procesar en el área de operaciones de un navío militar

En este contexto, han sido estudiadas también muchas aplicaciones de simuladores tácticos en el área militar (Savelli, 2004; Kewel, 1998), donde los sistemas expertos ayudan en la toma de decisiones y análisis. Los simuladores con un sistema experto consideran un modelo del escenario militar para la toma de decisiones tácticas, tornándose en herramientas muy útiles para demostrar los efectos de la toma de decisiones.

La presente investigación considera los datos disponibles en el computador del centro de comando y control (C^2) de un buque militar y un sistema experto difuso (SExD) para tratar la incertidumbre envuelta en el proceso de decisión del especialista responsable (primer comandante del buque) dando un soporte on line en la toma de decisión.

Basado en la naturaleza operacional del sistema de comando y control, este es tratado como un sistema a eventos discretos. De esta forma, el flujo de información puede ser descrito a través de una red de Petri, la cual modela los sistemas de los diferentes departamentos involucrados en esta aplicación. La red de Petri representa en forma explícita la transición de los estados en el proceso de decisión, estableciendo el uso de recursos y heurísticas que responden a la gerencia de acciones y operaciones más importantes para las actividades de comando y control dentro del buque. En este texto, se presenta el caso específico del sistema de comando y control responsable de la decisión tomada por el SExD (Valencia, 2004; Valencia, 2005) que tiene como abordaje un híbrido de los sistemas expertos difusos y la red de Petri.

SISTEMA EXPERTO DIFUSO

Los sistemas basados en reglas difusas se presentan como una herramienta muy importante para la implementación de sistemas complejos. Controladores basados en lógica difusa (FLC) son considerados en la actualidad como una de las mayores aplicaciones de los sistemas basados en reglas difusas. Los conjuntos de reglas expresan en forma cualitativa la experiencia de los operadores especialistas como también el conocimiento de las estrategias de control.

Los reportes publicados confirman que la construcción de reglas difusas es uno de los mayores problemas en el desenvolvimiento de sistemas basados en lógica difusa. Generalmente estas son obtenidas a partir de las experiencias de las personas que hacen o diseñan un sistema difuso. Por eso la representación en reglas de conocimiento de un especialista en reglas de tipo “si-entonces” es difícil, debido a las posibilidades de insertar reglas no

utilizadas, incoherentes y contradictorias (Tupac, 2003)

A la entrada del sistema difuso, las variables reales son transformadas en variables difusas mediante un proceso de fuzzificación, que consiste en aplicar las funciones de inclusión de cada uno de los valores lingüísticos propios de la variable de entrada. El proceso de inferencia descrito produce un conjunto difuso. A la salida de un FIS (Fuzzy Inference System), las consecuencias del razonamiento deben de ser convertidas en acciones concretas mediante un proceso denominado defuzzificación. Se conocen diversos métodos para realizar dicha tarea (Del Brio, 2002; Passino, 1998; Sanz, 2000; Talavera, 2004). Este procedimiento se muestra en la Figura 2.

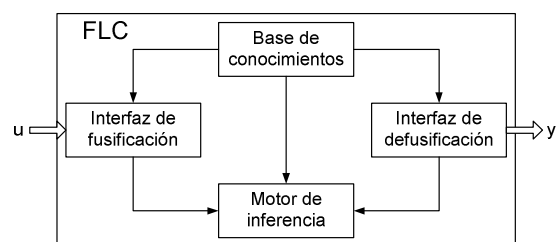


Figura 2. Modelado de controlador de lógica difusa (FLC –Fuzzy Logic Controller) (Saenz, 2002)

RED DE PETRI

Modelos basados en sistemas a eventos discretos son comúnmente utilizados para describir, analizar y controlar procesos observados en diversos ambientes donde la dinámica de su comportamiento es gobernada por la ocurrencia de eventos que no son considerados instantáneos en función al tiempo de manutención de los estados discretos del sistema (Valencia, 2005; Cassandra, 1993).

Los sistemas de comando y control tienen su dinámica definida a través de los cambios de estados discretos debido a la ocurrencia de eventos que pueden ser considerados instantáneos (Griffin, 1999; Zhou, 1995). Estos sistemas cuya dinámica es dirigida por la ocurrencia de eventos instantáneos pueden ser tratados como sistemas a eventos discretos (SED) (Miyagi, 1996; Ramadge, 1989) y actualmente existen diferentes técnicas para su especificación, análisis y control. La Figura 3 muestra el modelo del lanzamiento de un misil ubicado en el departamento de armas. Este modelo también pretende mostrar todos los elementos básicos que intervienen en una red de Petri. En este ejemplo en particular, se tiene una red de Petri tipo condición/evento con arcos habilitadores e inhibidores, y transición temporizada (Miyagi, 1996).

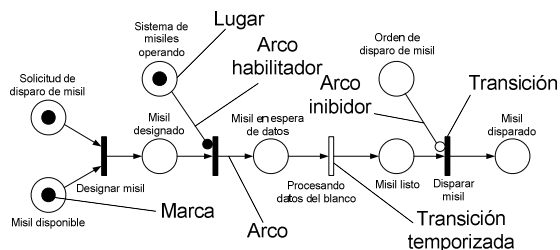


Figura 3. Red de Petri con sus elementos básicos. En esta red los lugares representan las condiciones y las transiciones representan las acciones de un proceso de lanzamiento de un misil.

REDES DE PETRI DIFUSAS

En la actualidad existen propuestas donde se realizan redes de Petri difusas. Algunos trabajos tratan de emular el razonamiento difuso con redes de Petri (Looney, 1988; Lee, 1999; Bordbar, 2000; Cervantes, 2005). Este trabajo es, de esta manera, una contribución para la aplicación práctica del abordaje que integra estas dos metodologías para realizar una toma de decisión inteligente basada en el conocimiento difuso que proporciona una respuesta y envía esta información a un departamento del buque militar, cuyos procesos son modelados mediante una red de Petri. Para este caso, la aplicación práctica se da en el departamento de armas, específicamente en la sección de lanzamiento de misiles como muestra la Figura 3. La figura 4 muestra el modelo general del sistema a través de una red de Petri difusa donde existe una realimentación de la información. En el presente texto se presenta la implementación del modelo mostrado en la Figura 3, debido a que todo el modelo de un buque militar es muy amplio.

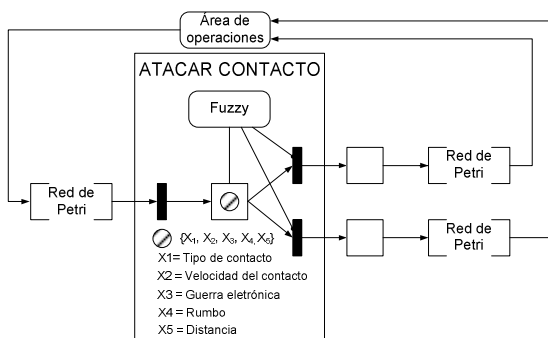


Figura 4. Sistema de red de Petri difusa. En este modelo es utilizado el recurso de un modelamiento jerárquico basado en la técnica del PFS/MFG (Miyagi, 1996), donde los \square son los lugares de capacidad unitaria, los elementos $[\]$ son macro-eventos, y los elementos O son lugares indicadores de condiciones externas gráfico.

La Figuras 5 y 6 muestran la representación en diagramas de flujo de estados mediante el Stateflow® de Matlab®, trabajos similares se muestran en Bordbar, 2000 y Eshuis, 2002. Debido a la simplicidad de representar redes de Petri vía UML o diagramas de estados, esta implementación es ventajosa debido a que a cada estado se le puede agregar condiciones, subprocessos o adicionar ecuaciones que ayuden a identificar con mayor exactitud un modelo, adicionalmente el Stateflow® de Matlab® posee elementos que son trazables hacia una red Petri, lo que permite una implementación bajo ese entorno.

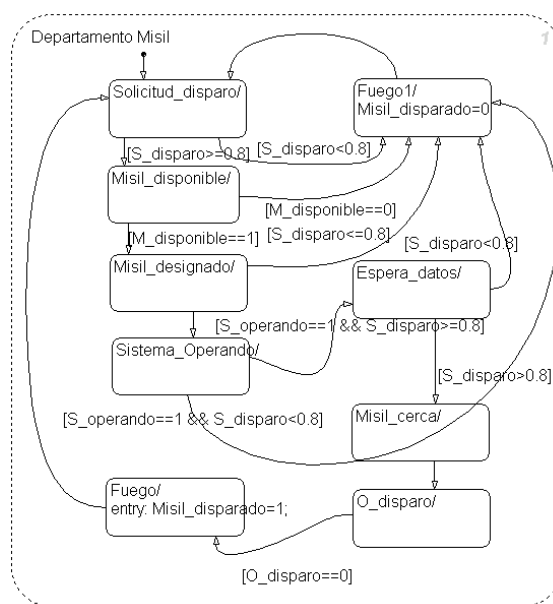


Figura 5. Modelado de la Figura 2 mediante el toolbox Stateflow® de Matlab®

Una ventaja de trabajar con el Stateflow® de Matlab® es que podemos utilizar algunos de los toolbox existentes con la finalidad de aumentar la complejidad y versatilidad al sistema, por ejemplo realizar sistemas híbridos (continuos y discretos), además de que en cada estado del Stateflow® podemos incorporar ordenes específicas, tales como subprocessos, retardos, ecuaciones, etc.

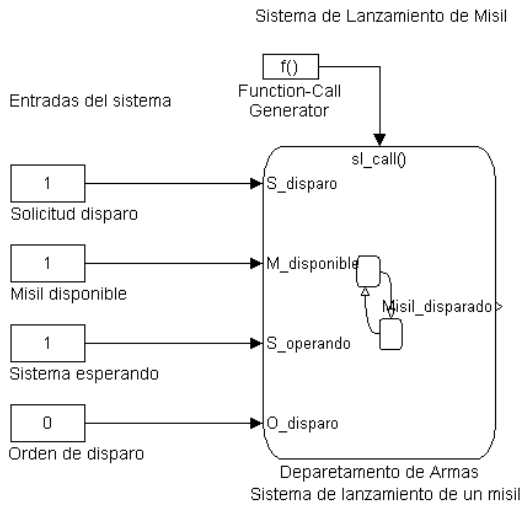


Figura 6. Modelado de la red de Petri en entorno Simulink® con sus entradas y salidas

SISTEMA DESARROLLADO

El sistema difuso que utilizaremos es el de Takagi-Sugeno debido a que la entrada de la red de Petri es booleana (Ke Zeng, 2000), es decir, se realiza la solicitud de disparo o no; no podemos ser imprecisos a la hora de discernir en que departamento del buque entrara en escena debido a la información crítica que se procesa. El tipo de sistema difuso Takagi-Sugeno presenta como defuzzificación valores constantes que el diseñador define y no conjuntos difusos como lo describe Mandami (Hao Ying, 1999). La Figura 7 muestra la función de membrecía de la entrada del sistema difuso.

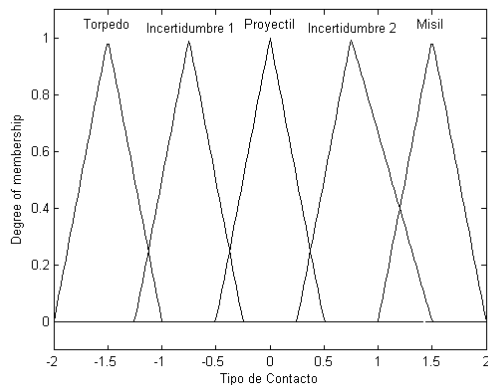


Figura 7. Función de membrecía de entrada

Hay dos conjuntos difusos en la Figura 7 que los denominamos conjuntos de incertidumbre 1 y 2 a estos conjuntos recaerá los datos que no tienen validez y que no es una orden absoluta. Existen también otros tres conjuntos que son las respuestas valederas requeridas por la red de Petri que solo acepta una entrada mayor igual que 0,8 como se muestra en la Figura 5. De esta forma, cuando el sistema difuso escoja la orden de disparar misil y se presenten todas las condiciones para que esto suceda, la red de Petri será activada en el mayor grado de verdad posible. La salida del sistema difuso posee dos posiciones: o dispara con valor de 1 o no dispara con valor de cero. La Figura 8 muestra una simulación del sistema en donde se nota que la red de Petri no reconocerá valores menores a 0,8.

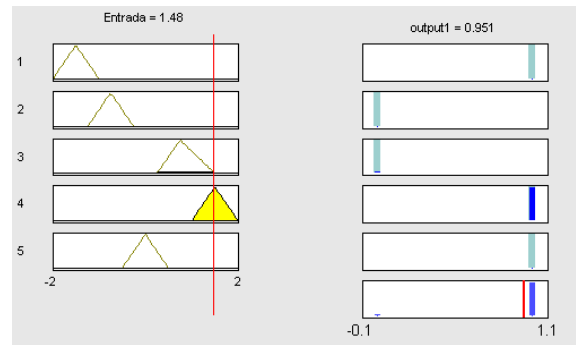


Figura 8. Simulación del sistema difuso

En el diseño de los procesos se implemento unas reglas sencillas enfocándonos solo para el caso del lanzamiento de un misil. Las reglas fueron definidas de la siguiente manera:

1. Si la entrada es torpedo entonces salida dispara.
2. Si la entrada es incertidumbre 1 entonces salida no dispara.
3. Si la entrada es proyectil entonces salida dispara.
4. Si la entrada es incertidumbre 2 entonces salida no dispara.
5. Si la entrada es misil entonces salida dispara.

La Figura 9, muestra la respuesta de todo el sistema, específicamente el resultado de la red de Petri que es la parte final del proceso, esto después que el SExD recomendó la orden de disparar misil.

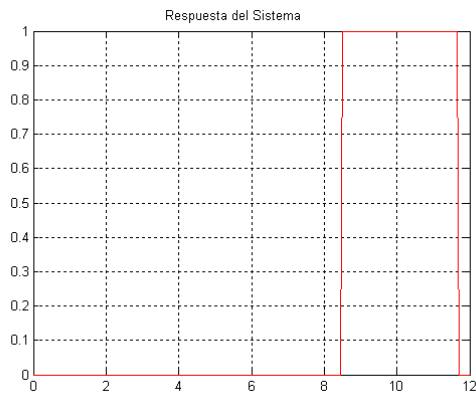


Figura 9. Respuesta de la red de petri difusa

Los datos de la orden de disparo están indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Secuencia de disparo del misil.

Solicitud disparo	Misil disponible	Sistema esperando	Orden dispara	Tiempo (seg)
0	0	0	1	2
1	0	0	1	2
1	1	0	1	2
1	1	1	1	2.2
1	1	1	0	3.45
1	1	1	1	0.35

La Figura 10 muestra como el SExD propuesto integra el calculador, que recibe la información del enemigo, luego esta información es enviada al sistema difuso que concluye o no en realizar la solicitud disparo, finalmente la red de petri realizará todos los procedimientos necesarios para que se realice o no el disparo del misil.

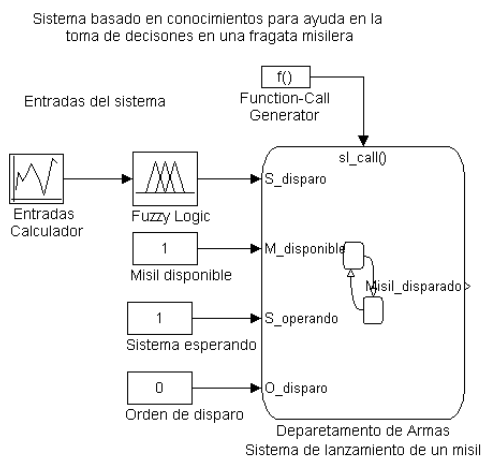


Figura 10. Red de Petri difusa

CONCLUSIONES

Este artículo trata de describir una propuesta para automatizar los procesos de toma de decisiones dentro de un buque militar, mediante la toma de decisiones inteligentes para la resolución de problemas de comando y control que afronta el primer comandante dentro de un área de operaciones. Esta automatización utiliza metodologías inteligentes como lógica difusa y redes de Petri. La red de Petri se muestra como una herramienta de gran utilidad en lo que corresponde al modelamiento del comportamiento del sistema de comando y control, mientras que la lógica difusa permite obtener parámetros de comparación de manera inteligente a los diferentes estados del área de operaciones de un buque militar a través de las variables proporcionadas por la red de Petri. Los resultados obtenidos confirman que estos métodos, trabajando juntos, pueden resolver problemas con gran número de variables. Herramientas como el Stateflow® y otras similares pueden explorar la versatilidad de la red de Petri que por su vez, es comprobadamente efectiva para la especificación del flujo de comando.

Agradecimientos

Se agradece al Servicio Industrial de la Marina del Perú y al Servicio de Armas y Electrónica por el apoyo brindado durante la elaboración del presente artículo y al apoyo parcial del CNPq y CAPES

REFERENCIAS

- B. Bordbar, L. Giacomini and D.J. Holding. "Design of Distributed Manufacturing Systems Using UML and Petri Nets" En *Proceedings of 6th International Federation of Automatic Control (IFAC), Workshop on Algorithms and Architectures for Real-Time Control*, paginas 91-96, Palma de Mallorca, España, Mayo 2000.
- B. Bordbar, L. Giacomini and D.J. Holding. "UML and Petri Nets for Design and Analysis of Distributed Systems" En *IEEE CCA/CACSD*, Alaska, USA, Septiembre 2000.
- Cassandras .C. *Discrete Event Systems: Modeling and performance analysis*: Boston: Irwin Publications, 1993. 790p.
- Cervantes C. Jair. "Representación y aprendizaje de conocimiento con redes de Petri difusas". Departamento de Control Automatico. Centro de investigación y de estudios avanzados del instituto politecnico nacional. Mexico, D.F. 2005

- Eshuis, H., "Semantics and Verification of UML Activity Diagrams for Workflow Modelling," Ph.D. Tesis, CTIT, U. Twente (2002)
- Griffin B. Skinner K. Vulnerability analysis of C3I networks using discrete event simulation and modeling. Proceedings for Information, Decision and Control IDC 99. Adelaide, 1999, pp. 141-144.
- Hao Ying; Yongsheng Ding; Shaokuan Li; Shihuang Shao "Comparison of necessary conditions for typical Takagi-Sugeno and Mamdani fuzzy systems as universal approximators"; IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A, Volume 29, Issue 5, Sept. 1999 Page(s):508 - 514
- Ke Zeng; Nai-Yao Zhang; Wen-Li Xu "A comparative study on sufficient conditions for Takagi-Sugeno fuzzy systems as universal approximators" IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Volume 8, Issue 6, Dec. 2000 Page(s):773 - 780
- Kewley, R. and Embrecht, M. 1998 Fuzzy-Genetic Decision Optimization for Positioning of Military Combat Units. In Proceedings SMC'98, pp. 3658 - 3664, 1998 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, October 11-14, La Jolla, California
- Del Brio Martín, B., Sanz Molina A. "Redes Neuronales y Sistemas Difusos", 2da Edición. Ed. Alfaomega Ra-Ma., Universidad de Zaragoza, España 2002.
- Lee, J.; Liu, K.F.R.; Weiling Chiang, "A fuzzy Petri net-based expert system and its application to damage assessment of bridges". Systems, Man and Cybernetics, Part B, IEEE Transactions on Volume 29, Issue 3, June 1999 Page(s):350 - 370
- Looney, C.G, "Fuzzy Petri nets for rule-based decisionmaking". Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on Volume 18, Issue 1, Jan.-Feb. 1988 Page(s):178 - 183.
- Matlab, The System Identification Toolbox for Use With MATLAB. The Mathworks Version 5.0, Release 12, Inc., Natic-USA. November 2000.
- Miyagi, P. E. Control programável: fundamentos do controle de sistemas a eventos discretos. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1996. 194p.
- Ramadge P.; Wonham W. The control of discrete event systems. Proceedings of the IEEE, 1989, v. 77, n. 1. p. 81-97.
- Passino Kevin M, Yurkovich Stephen. "Fuzzy Control". Ed. Addison-Wesley. The Ohio State University. EEUU 1998.
- Saenz Doris. Logica Difusa, redes neuronales y control predictivo. Seminario AADECA-UBA. Argentina 2002.
- Sanz Alfredo. "Lógica Borrosa: Incidencia en las Aplicaciones Industriales". Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Comunicaciones, Universidad de Zaragoza, España, 2000.
- Savelli, R.M.; Lyrio, G.H.S.O; Seixas, R.B. The Maneuver and Attrition Warfare Simulation System Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha - SPOLM 2004.
- Stevens, L. (1984), Artificial Intelligence. The Search for the Perfect Machine Hayden Book Company, Hasbrouck Heights, N.J.
- Talavera A. "Identificación de Sistemas para el Análisis de Estabilidad del Sistema Difuso de un Motor DC y de un Horno a Gas". Tesis Bch. Arequipa - Peru 2004
- Turban Efraim, "Expert Systems and Applied Artificial Intelligence". Macmillan Publishing Company, New York, 1992
- Tupac Yvan, Marco Aurelio Pacheco, Marley Vellasco, Ricardo Tanscheit. "Controlador Difuso con evolución de Inferencia". Núcleo de Pesquisa ICA. Departamento de Engenharia Elétrica. Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Brazil 2003.
- Valencia Roger. "Decisiones en la organizaciones - Trabajo final". Universidad Sao Paulo 2004. Brasil.
- Valencia Roger. "Modelagem de Sistema C3I para Navios de Guerra a traves de Redes de Petri". Tesis de Maestria, Escuela Politecnica de la Universidad Sao Paulo 2005. Brasil.
- Zhou, M.; Wang, D. Design of Petri Nets objects and their application in command and control systems. In: IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, v. 5, Vancouver, 1995. Intelligent Systems for the 21st Century. p. 3463-3468.