

Sistema experto para control inteligente de las variables ambientales de un edificio energéticamente eficiente

Enrique A. Sierra[†], Alejandro A. Hossian[†], Ramón García Martínez[‡] y Pablo D. Marino[†]

[†]Departamento Electrotecnia
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional del Comahue
Buenos Aires 1400 – (8300) – Neuquen - Argentina
esierra@uncoma.edu.ar

[‡]Centro de Ingeniería del Software e Ingeniería del Conocimiento (CAPIS)
Escuela de Postgrado. Instituto Tecnológico de Buenos Aires
Avda Eduardo Madero 399 – Buenos Aires - Argentina
rgm@itba.edu.ar

Resumen— El rápido desarrollo de las tecnologías digitales ha contribuido a que la industria de la edificación adopte cada vez más estrategias de automatización sofisticadas para el control de las variables ambientales presentes en las diferentes partes de un edificio provisto de elevadas prestaciones desde el punto de vista tanto del confort humano como en los aspectos energético y ambiental. Dichas estrategias de control pueden expresarse mediante reglas que podrán ser ingresadas en el motor de inferencias de un sistema experto. Las reglas de automatización presentes en este sistema permitirán una mejor integración de dispositivos y facilitará su interacción con los elementos que definen las prestaciones de un edificio inteligente. Según el paradigma distribuido vigente actualmente en automatización de edificios, el sistema experto residente en el computador de supervisión ejercerá funciones específicas de cooperación y coordinación inteligente, reservando las estrategias de control propias de cada sector del edificio a los controladores locales. Tal como se ilustra en el presente trabajo, el empleo de tecnologías basadas en sistemas inteligentes para modelar y controlar el comportamiento de los sistemas involucrados en la automatización de edificios contribuye a optimizar significativamente sus prestaciones en cuanto a confort, seguridad y ahorro de energía.

Palabras Clave— Sistemas Expertos – Control Distribuido- Automatización – Edificios

I. INTRODUCCIÓN

En el actual paradigma distribuido de control de edificios, las funciones de supervisión y monitoreo están reservadas al computador central, mientras que los aspectos del control derivados de estrategias locales se delegan en los controladores zonales. En este sentido, es importante poder modelar el control central mediante un conjunto de reglas interactuantes, pues de este modo

pueden las estrategias de automatización organizarse y estructurarse de un modo jerárquico. Además, es posible modificar con mayor facilidad las políticas de control, dotando al mismo de una alta flexibilidad. Al modelar el control mediante un sistema experto, es posible también capturar el conocimiento embebido en expertos controladores humanos y formalizar sus heurísticas en reglas generales de control. Esto último puede realizarse mediante las técnicas y métodos de la ingeniería del conocimiento. El principal aporte de este artículo consiste en demostrar que este modelado es posible y que contribuye a formalizar el complejo proceso inherente al control de las variables ambientales de un edificio tales como temperatura, humedad, iluminación, accesibilidad, todo ello bajo un esquema que optimice el ahorro energético, a fin de reducir los perfiles de carga que requieren mucho abastecimiento convencional de energía.

II. ESTADO DE LA CUESTIÓN

El término domótica procede de la palabra francesa “domotique” que podría definirse como: “El conjunto de servicios proporcionados por sistemas tecnológicos integrados para satisfacer las necesidades básicas de seguridad, comunicación, gestión energética y confort, del hombre y de su entorno más cercano” (Krainier, 1996). El término domótica, procedente de doméstico e informático, no trata de dar nombre a una nueva tecnología, sino a un conjunto de servicios integrados en la vivienda para una mejor gestión en aspectos tales como el confort, la seguridad, la gestión energética, las comunicaciones, la información y la flexibilidad. En este sentido, la domótica puede entenderse como la disciplina que estudia el desarrollo de infraestructuras inteligentes, así como las tecnologías de la información en edificios.

En los últimos años se viene utilizando, de manera indiscriminada, términos como inteligente o domótica sin que en muchas ocasiones su utilización esté del todo

justificada o sea correctamente comprendida. El sector informático fue quien comenzó a utilizar el término inteligente para distinguir aquellos terminales con capacidad de procesamiento de datos de aquellos sin esa capacidad (no inteligentes). Generalmente el término utilizado es domótica cuando va aplicado al hogar y edificios inteligentes cuando va aplicado a edificios. A comienzos de los '80, las revistas especializadas comenzaron a referirse a edificios con características particulares en cuanto a prestaciones de confort en sintonía con su entorno tales como "edificios inteligentes", "edificios listos", "edificios automatizados", o inclusive "edificios electrónicamente optimizados". Sin embargo, no existe una definición estandarizada de lo que es un edificio inteligente.

Una definición acordada en el Simposio Internacional de la especialidad llevado a cabo en 1985 en Toronto es: "Un edificio inteligente combina innovaciones, tecnológicas o no, con una gestión competente a efectos de maximizar el retorno de la inversión" (Harrison, 1998). Una definición aportada por el AIBI (American Intelligent Building Institute) es: "Un edificio que usa los cuatro elementos fundamentales de la construcción: estructura, sistemas, servicios y gestión, como así también su interacción optimizada a efectos de maximizar el retorno en la inversión y proveer un ambiente de trabajo altamente eficiente, confortable y conveniente". Otra definición del EIBG (European Intelligent Building Group) consiste en: "Un edificio que le permita a los usuarios desarrollar su máxima eficiencia al menor costo de operación posible y que usa eficientemente sus recursos. Esto significa que el edificio debe proveer respuesta rápida, altamente eficiente y de generación de un ambiente de soporte al usuario para la consecución de sus objetivos de negocio" (Sidwell, 1996). Otra definición aportada por el DEGW (An international building design consultancy company) es la siguiente: "un edificio inteligente es uno que brinda adecuadas respuestas al usuario y tiene la habilidad de adaptarse a las nuevas tecnologías o cambios en las estructuras organizacionales" (So, 1999).

Los edificios inteligentes, además de ajustar su funcionamiento a determinados parámetros de acuerdo con programas establecidos, cuentan con todos los recursos de las comunicaciones y la informática avanzada. Para ello agregan a la pura automatización de gestión, seguridad y ahorro energético, una infraestructura integrada que permite las máximas prestaciones en los campos de las telecomunicaciones y la automatización de oficinas. En síntesis, los edificios inteligentes resultan de una conjunción de tecnología y entorno con vistas a la consecución de las mejores estrategias de confort ambiental posibles.

Puede afirmarse que la tendencia actual en automatización inteligente consiste en el empleo de control distribuido (Sierra *et al*, 2004). Para ello se procede a la distribución en el edificio inteligente de

reguladores autónomos que se comunican con un computador central. En este esquema, las funciones asignadas a los controladores son las de regulación, monitorización, cálculos y ahorro de energía (Wong, 2001). Para el computador central se reservan funciones no cruciales tales como auditoría, visualización, optimización y mantenimiento.

Los sistemas inteligentes exhiben características que comúnmente se asocian con el comportamiento humano inteligente (García Martínez y Borrajo, 1997, 1998, 2000). Sus enfoques abordan el modelado, con base en distintas arquitecturas, de distintos procesos propios del pensamiento humano tales como: la toma de decisiones, el razonamiento o el aprendizaje. Entre las arquitecturas consideradas en la edificación inteligente se encuentran los sistemas expertos, el aprendizaje automático, las redes neuronales, las redes bayesianas y los algoritmos genéticos (García-Martínez *et al*, 2003).

Se pueden definir los sistemas expertos como una clase de programas que son capaces de manejar problemas que normalmente requieren para su resolución la intervención humana especializada (García Martínez y Britos, 2004). Son desarrollados con la ayuda de expertos de campo, los cuales revelan información acerca de aquellos procesos que le permiten solucionar los distintos problemas. Los expertos aportan conocimiento sobre cómo solucionar problemas mal definidos y desestructurados, los cuales generalmente involucran diagnóstico o planificación.

Las tecnologías de sistemas expertos son particularmente útiles cuando, mediante técnicas adecuadas de ingeniería del conocimiento pueden capturar el conocimiento de un experto y sistematizarlo adecuadamente para su empleo en tareas de automatización y control (Daniel Borrajo *et al.*, 1993). El sistema experto es pues capaz de reflejar, con las limitaciones propias de un mecanismo automatizado, la experticia en el empleo de estrategias de regulación y control adquiridas por expertos humanos al cabo de haber incorporado en sus estructuras cognitivas múltiples experiencias situacionales en la resolución de diferentes problemas de automatización y control.

Además, las tecnologías de sistemas expertos podrían ser útiles en el diagnóstico de posibles causas de problemas, por ejemplo en diagnósticos de fallas en equipos de climatización. También los sistemas expertos podrían emplearse en climatización para la selección de tipos de equipos a ser instalados en un edificio en función del clima, ubicación, requisitos de mantenimiento, provisión de espacios para planta, presupuesto, consideraciones de ahorro energético, preferencias individuales, etc. Los sistemas expertos también constituyen una tecnología que podría utilizarse como herramienta de asistencia o guía en el

mantenimiento preventivo de los diversos sistemas instalados en un edificio (Hossian, 2003).

En síntesis, los sistemas inteligentes han sido usados en muchos sistemas de decisiones, control y automatización en los últimos veinte años. El campo de automatización de edificios se presenta como un campo propicio para explorar desarrollos en este sentido y puede considerarse que los diseños realizados en la especialidad no han alcanzado todavía una madurez suficiente que garantice una efectiva instrumentación y difusión en los sistemas domóticos dedicados, entendiendo por tales a los específicos para un edificio determinado (Sierra *et al*, 2004).

II. EL SISTEMA EXPERTO

A. Características Generales

Las raíces de los sistemas expertos abarcan muchas disciplinas; en particular, una de las raíces principales de los sistemas expertos es el área del procesamiento de la información en la mente humana, denominada ciencia cognitiva (Berlanga *et al*, 1999). La cognición es el estudio de la manera en que los humanos procesan la información. En otras palabras, la cognición es el estudio de la manera en que las personas piensan, especialmente cuando resuelven problemas.

En este sentido, el estudio de la cognición es muy importante si se pretende lograr que las computadoras emulen a los expertos humanos. En particular, en el sistema experto desarrollado en el presente trabajo, se emplearon técnicas específicas de educación de conocimiento tales como análisis de protocolo y emparillado a efectos de inferir el conocimiento de expertos en automatización de edificios y modelar estos conocimientos operativos en términos de reglas de producción (Gómez *et al*, 1997).

El sistema experto desarrollado se basa por lo tanto en reglas de producción orientadas a modelar estrategias de control. En un sistema basado en reglas, la base de conocimientos contiene el conocimiento del dominio necesario para resolver los problemas codificado en forma de reglas.

Una solución basada en reglas de producción para modelar el conocimiento de un dominio intentará representar mediante las mismas tanto los conocimientos de hechos y procedimientos (conocimiento factual y procedimental) como las heurísticas empleadas por los expertos en la resolución de problemas, en este caso el de automatizar adecuadamente la operación de un edificio a efectos de optimizar la calidad de sus prestaciones en términos de confort y eficiencia energética.

B. Estructura del Sistema

El sistema experto desarrollado contempla los siguientes aspectos generales inherentes a la automatización global de un edificio:

- a) Sistema de gestión del confort
- b) Sistema de gestión de la seguridad
- c) Sistema de gestión del ahorro energético

a) *Sistema de gestión del confort*

Este sistema está constituido por el sistema de control de la iluminación y por el sistema de control de temperatura del edificio

El sistema de control de iluminación está a su vez compuesto por dos sensores de iluminación; uno es un sensor de iluminación natural colocado cerca de las ventanas en los diferentes ambientes, el cual determina cuál es el nivel de iluminación proveniente del exterior, y el otro es un sensor de iluminación artificial colocado en el techo aproximadamente en el centro del ambiente para determinar cuál es el nivel de iluminación proveniente de las lámparas de cada ambiente o habitación considerada.

El otro componente del sistema de control de iluminación es un sensor de presencia que determina si hay personas presentes en la habitación.

El sistema primero determina si hay personas en la habitación y si las hay luego toma el valor del sensor de iluminación natural y determina cuantas lámparas de la habitación hay que activar para tener un cierto nivel de iluminación dentro de la habitación.

Por ejemplo, si es de noche el sensor de iluminación natural acusará que no hay radiación proveniente del exterior y el sistema prenderá todas las lámparas.

Si es de día, y el nivel de radiación proveniente de la luz solar cae dentro de los rangos de confortabilidad de una persona, entonces el sistema de control de iluminación determinará que no es necesario encender ninguna lámpara.

En cualquiera de los casos mencionados, es el actuador correspondiente el encargado de encender o no la cantidades de luces que determine el programa.

En general, excepto ligeras variantes, en un ambiente dado, el sistema de control de temperatura está compuesto por un termostato, un indicador de temperatura, una válvula de agua caliente, una la válvula de agua fría y un damper o cortina de aire exterior.

El sistema toma el valor del sensor de temperatura y de acuerdo a este valor abre o no el damper de aire exterior, la válvula de agua fría o caliente.

Por ejemplo, si la temperatura en la habitación es de 10 grados centígrados, la válvula de agua caliente estará medio abierta, el damper de aire exterior estará abierto y la válvula de agua fría estará totalmente cerrada.

Otro ejemplo es que el sensor este marcando que la temperatura es de 35 grados centígrados; en este caso se abre el damper de aire exterior, se cierra totalmente la válvula de agua caliente y la válvula de agua fría estará abierta en una posición intermedia.

b) Sistema de gestión de la seguridad

El sistema de gestión de la seguridad se compone de un sistema de control de presencia y de un sistema de gestión de seguridad.

El sistema de control de presencia esta compuesto por:

- ✓ Sensor de apertura de la puerta de acceso
- ✓ Sensor de apertura de ventana
- ✓ Sensor de rotura de cristales
- ✓ Sensor de control de acceso
- ✓ Sistema de simulación
- ✓ MODEM
- ✓ Alarma

Este sistema determina si alguien quiso forzar una puerta para ingresar a un determinado ambiente del edificio o si alguien quiere abrir una ventana con el mismo fin.

Del mismo modo determina si alguien rompió una ventana para ingresar o si la persona que está ingresando a una habitación no esta habilitada para poder hacerlo.

El sistema de control de presencia actúa de la siguiente manera: si alguien forzara una ventana, el sensor correspondiente se activará y enviará una señal que hará sonar una alarma y activará un MODEM que estará conectado con la estación de policía mas cercana.

Lo mismo ocurriría si alguien fuerza una puerta de acceso o rompe una ventana.

El sensor de control de acceso determina si la persona que esta ingresando a la habitación está habilitada para tal situación; si no fuera así , el sensor se activara y hará sonar una alarma para avisar al personal de seguridad del edificio.

El sistema de gestión de seguridad esta compuesto por:

- ✓ Sensor de nivel de agua
- ✓ Sensor humo
- ✓ Sensor de llama
- ✓ Sensor de gas
- ✓ Llave térmica

- ✓ Electroválvula de gas
- ✓ Controlador de apertura de puertas
- ✓ Controlador de aire acondicionado
- ✓ Electroválvula de agua
- ✓ Sistema de extinción de incendio
- ✓ Controlador de apertura de ventanas
- ✓ MODEM

El sistema de gestión de la seguridad actúa de la siguiente manera:

Si en una determinada habitación se genera un incendio, el sensor de llama y el de humo se activarán y enviarán una señal para que se cierre la electroválvula de gas, se desactive la llave térmica para cortar el suministro de energía, se apague el aire acondicionado para evitar propagar el incendio y se active el MODEM para que realice una llamada a la estación de bomberos.

Si existe una perdida de gas, el sensor que mide la composición del aire se activará y enviará una señal para que el sistema cierre la electroválvula de gas, abra las ventanas y puertas y desconecte la llave térmica.

Si existe una pérdida de agua en el edificio, se activará el sensor que mide el nivel de agua, lo que provocará que se cierre la electroválvula de agua y se desconecte la llave térmica para prevenir posibles riesgos en las personas que ocupan el edificio.

c) Sistema de gestión de ahorro de energía

El sistema de gestión de ahorro energético se compone de:

- ✓ Sensor de presencia
- ✓ Reloj
- ✓ Sistema de acumulación
- ✓ Controlador del sistema de iluminación
- ✓ Conmutador de llave térmica
- ✓ Conmutador del sistema de calefacción

El sistema de gestión de ahorro energético funciona de la siguiente manera:

El sistema de acumulación se compone de un banco de baterías que se cargan entre la una y las siete de la mañana cuando la tarifa de la compañía eléctrica es mas económica.

El resto del día el sistema de acumulación se utiliza para activar el sistema eléctrico y para calentar el tanque de agua caliente que provee de agua caliente a todo el edificio.

Mientras el sistema de acumulación se está cargando el edificio se encuentra conectado a la red eléctrica para suministrar energía a todo el edificio.

Además, cada persona posee una tarjeta magnética para ingresar a la habitación y cuando entra a la habitación se debe colocar la tarjeta en una cerradura especial y cuando sale de la habitación se debe extraer la tarjeta.

Cuando la persona se retira de la habitación y saca la tarjeta automáticamente se desactiva la llave térmica y se corta el suministro de energía a esa habitación; así se consigue que cuando no haya personas en una habitación no quede ningún artefacto encendido.

III. IMPLEMENTACIÓN

El programa de control inteligente para un edificio energéticamente eficiente ha sido diseñado empleando la herramienta de ingeniería de software KAPPA-PC, especialmente orientada al desarrollo de sistemas expertos. La Fig. 1 ilustra la pantalla de interfase de usuario inicial de la aplicación.

La siguiente imagen, exhibida en la Fig. 2 presenta una vista en planta del edificio donde se muestra la disposición física de las oficinas, del laboratorio, del hall central, de la oficina de computación y de la sala de máquinas.

además, se muestra cual es la orientación del edificio indicando el polo norte y el polo sur.

También contiene dos botones que permiten al personal que opere el sistema volver a la imagen principal para realizar otro control como por ejemplo el asociado al sistema de seguridad.

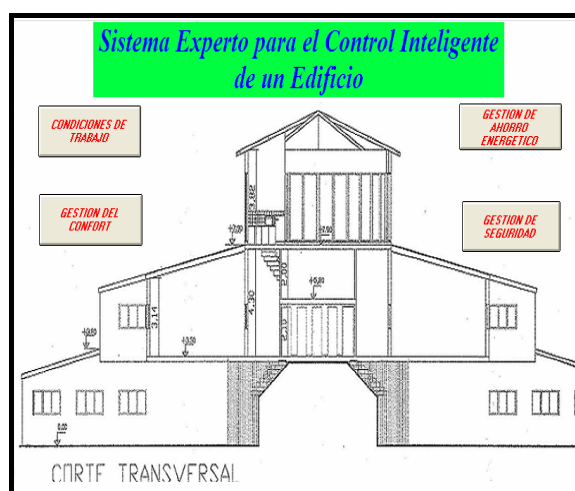


Figura 1: Pantalla de inicio del sistema de control

La imagen siguiente presentada en la Fig. 3 ofrece una representación de uno de los laboratorios del edificio donde se muestra cual sería la disposición física del

sensor de iluminación natural, del sensor de iluminación artificial, del sensor de presencia y del sensor de temperatura.

Además, presenta los botones que permiten acceder al sistema de control de iluminación, al sistema del control de temperatura, al sistema de control de seguridad y al sistema de control de presencia.

También presenta dos botones de acceso, uno que permite volver a la imagen anterior, es decir, a la imagen de vista en planta del edificio y el otro botón permite volver a la imagen principal, es decir, a la imagen que muestra la vista principal del edificio.

La siguiente imagen, representada en la Fig. 4, muestra el sistema de control de temperatura donde se presenta el medidor de temperatura y una termocupla, y los actuadores tales como el control del damper exterior con sus dos estados, el actuador que controla el nivel de apertura de la electroválvula de agua caliente, el actuador que controla el nivel de apertura de la electroválvula de agua fría y una imagen que muestra el sistema de control de temperatura. Además, muestra el botón que permite acceder a la imagen anterior, es decir, a la imagen que contiene la vista interna del laboratorio.

III. CONCLUSIONES

Las técnicas de la inteligencia artificial han sido usadas en muchas decisiones, controles y sistemas de automatización en los últimos veinte años. Los sistemas para automatizar edificios no han sido una excepción. En esta dirección, el sistema inteligente que se propone en este artículo trata de contribuir en el campo de la optimización de los edificios inteligentes, transformándolos en un espacio dinámico, con elevados estándares de confort y de satisfacción para sus ocupantes. En este sentido, las habilidades inherentes de los sistemas inteligentes que son capaces de capturar el conocimiento de expertos y aprender de su entorno juega un rol muy importante en el logro de una alta optimización de los objetivos. Esto se debe a que el sistema experto basado en reglas captura adecuadamente las dependencias e interacciones entre componentes ubicados en distintos sectores, facilitando de este modo la gestión de los procesos propios de la automatización. De modo que, futuros trabajos de investigación y desarrollo en el campo despiertan particular atención.

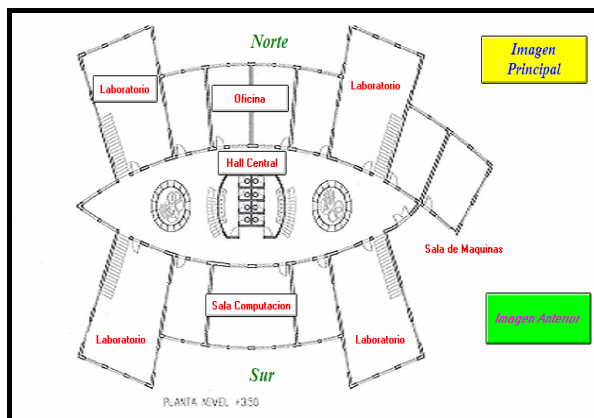


Fig. 2: Pantalla de acceso a los principales ambientes

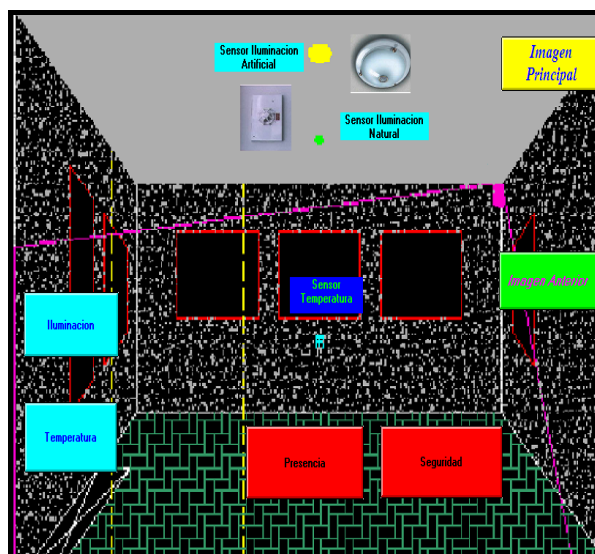


Fig. 3 Indicación de sensores y actuadores en laboratorios

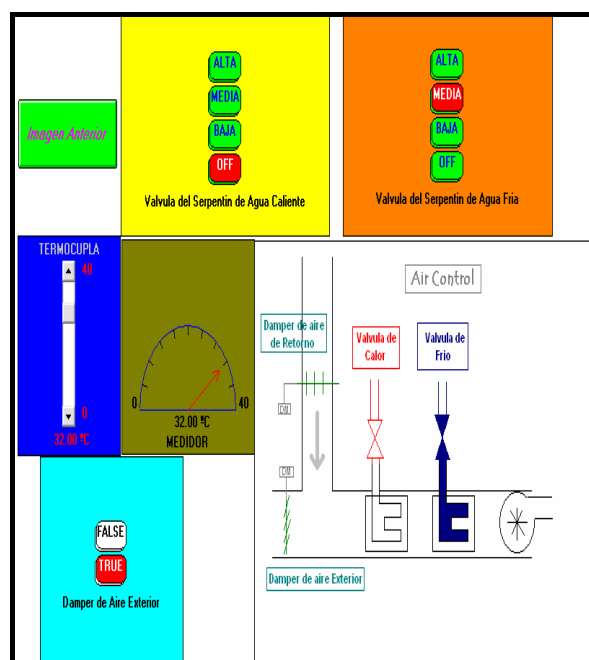


Fig. 4 . Pantalla de acceso al control de temperatura

REFERENCIAS

Berlanga, A., Borrajo, D., Fernández, F., García Martínez R., Molina, J.& Sanchis, A. “Robótica Cognoscitiva y Aprendizaje Automático”. *Conferencia de la Asociacion Española para la Inteligencia Artificial. VIII.* 1-8. Murcia. España. (1999)

Borrajo D., Juristo N., Martínez B., Pazos J., *Inteligencia Artificial. Métodos y Técnicas.* Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid (1993)

García Martínez, R. y Borrajo, D. “Planning, Learning and Executing in Autonomous Systems”. *Lecture Notes in Artificial Intelligence.* 1348, 208-210. Springer-Verlag (1997).

García Martínez, R. & Borrajo Millán, D. “Learning in Unknown Environments by Knowledge Sharing”. *European Workshop on Learning Robots.* VII. 22-32. University of Edinburg Press. Edinburgo. Escocia. (1998).

García Martínez R., Borrajo D., “An integrated approach of planning, learning and executing”. *Journal of intelligent and robotic systems,* 29, 1, 47-48. Editorial Kluwer Academic Press (2000).

García Martínez R., Britos P, *Ingeniería de Sistemas Expertos.* Editorial Nueva Librería. Buenos Aires. (2004)

García Martínez, R., Servente, M. y Pasquini, D. *Sistemas Inteligentes.* 347 páginas. Editorial Nueva Librería. (2003).

Gómez, A., Juristo N., Montes C., Pazos, J., *Ingeniería del Conocimiento* Editorial Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid (1997)

Harrison A., *Intelligent buildings in South Asia,* E & F. Spon (1998).

Hossian, A. *Sistema de asistencia para la selección de estrategias y actividades instruccionales.* Tesis de Magíster en Ingeniería del Software. Instituto Tecnológico de Buenos Aires. (2003).

Krainier A, *Towards smart buildings.* Architectural Assian Graduate School. Environment & Energy Studies Program (1996).

Sidwell, A. *Australia’s intelligent home.* Construction Industry Insititute. Australia. (1996).

Sierra, E. Quiroga J., Fernández R., Monte G., “An intelligent maintenance system for earth-based failure analysis and self - repairing of micro-satellites”, *Journal Acta Astronautica* ,55, 61-67, Editorial Pergamon Press. (2004).

So, A. *Intelligent Building Systems*. Editorial Kluwer Academic Press. (1999).

Wong K., *The intelligent building index*. Assian Institute of Intelligent Buildings. Hong Kong. (2001).