

# Una arquitectura multiagente para un Laboratorio de Inteligencia Ambiental en Fabricación

Loreto Susperregi<sup>1</sup>, Iñaki Mautua<sup>1</sup>, Carlos Tubío<sup>1</sup>, Miguel Angel Pérez<sup>1</sup>, Iñigo Segovia<sup>1</sup> y Basilio Sierra<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fundación TEKNIKER  
Avda. Otaola 20, 20600 Eibar, Gipuzkoa  
e-mail: lsusperregi@tekniker.es (Loreto Susperregi)  
<http://www.tekniker.es>

<sup>2</sup> Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial  
UPV/EHU <http://www.sc.ehu.es/ccwrobot/>

**Resumen** En este artículo describimos la arquitectura multiagente, AMICO, desarrollada en el Laboratorio de Inteligencia Ambiental de TEKNIKER. AMICO es capaz de seguir al usuario en su recorrido por el Laboratorio ofreciéndole la información que necesita en cada momento y en el dispositivo más adecuado para cada caso.

**Keywords** Sistemas Multiagente, Inteligencia Ambiental, Interacción Persona-entorno.

## 1. Introducción

El desarrollo de sistemas multiagente es objeto de permanente debate en el área de investigación sobre Agentes. Tanto la aplicación dentro área de Ingeniería de Software como la necesidad de generación de nuevos métodos y herramientas específicas para el desarrollo de agentes son temas que suscitan el interés de la comunidad.

Básicamente, un agente es una entidad de software que exhibe un comportamiento autónomo y un sistema multiagente un conjunto de agentes que tienen la capacidad de interactuar en un entorno común para lo cual deben poseer capacidades de comunicación, negociación y coordinación [12]. Otras características que podemos encontrar son la movilidad y la necesidad de interacción con usuarios y el consiguiente aprendizaje a partir de de su comportamiento.

Las diferentes características que pueden poseer han permitido la definición de diferentes tipos de agentes. Así, los agentes móviles son aquellos que pueden moverse en una red distribuyendo su ejecución. Los agentes de interfaz son aquellos que asisten a usuarios aprendiendo de ellos a partir de instrucciones explícitas o de la observación de su comportamiento.

El fuerte interés suscitado por la tecnología de agentes en la comunidad científica debe trasladarse al ámbito industrial. Sin embargo, a pesar del rápido desarrollo de teorías, arquitecturas y lenguajes de agentes, se ha realizado muy poco trabajo en la especificación (y aplicación) de técnicas para desarrollar aplicaciones empleando tecnología de agentes [12, 19, 13, 18, 9].

Por otra parte, en los últimos años se ha acuñado un término que ya resulta familiar en el entorno de los investigadores en temas relacionados con las tecnologías de la información y las comunicaciones, principalmente en el ámbito europeo. El término en cuestión es “Ambient Intelligence” o Inteligencia Ambiental (AmI). El concepto de Inteligencia Ambiental plantea una nueva forma de entender el modo en el que las personas interactúan con la tecnología y de describir un ambiente que percibe, se adapta y responde a la presencia de personas.

Actualmente, la Inteligencia Ambiental cubre un amplio espectro de aplicación, principalmente porque se encuentra en las primeras fases de desarrollo tecnológico. Los entornos AmI muestran situaciones donde los individuos interactúan con dispositivos tecnológicamente complejos, en ámbitos médicos, el hogar, los espacios públicos y los espacios de aprendizaje como los museos y escuelas. En la literatura técnica se pueden encontrar diversas referencias a proyectos relacionados con el concepto de Inteligencia Ambiental (AmI) [14, 11, 7, 4, 17, 8, 1].

Uno de los requisitos para que AmI ofrezca todas sus potencialidades radica en la necesidad de que el “ambiente” reconozca la presencia de las personas, sea capaz de ubicarlas en un contexto, tanto geográfico como de actividad. Ello permite ofrecer la información que se estima necesaria para el desarrollo de una actividad.

Las aplicaciones de Inteligencia Ambiental demandan la integración en el “contexto” cotidiano de aplicaciones computacionales de forma no intrusiva, con modalidades de interacción que se caracterizan por ser naturales, simples y apropiadas para los usuarios individuales y su contexto asociado. Los sistemas AmI deben resolver temas como:

1. Reconocimiento y acomodación a diversidad de dispositivos.
2. Personalización y adaptabilidad de los sistemas.
3. Comprensión de la dinámica del contexto.
4. Soporte a la colaboración y cooperación entre los componentes distribuidos de los sistemas AmI.
5. Desarrollo de sistemas que se caracterizan por su autonomía, ofreciendo así capacidades como auto-gestión y auto-mantenimiento.

En TEKNIKER, centro de investigación centrado en temas relacionados con la fabricación y las microtecnologías, se ha puesto en marcha un Laboratorio para extender el paradigma de la Inteligencia Ambiental al entorno de fabricación, analizando aquellas áreas donde juega un papel importante, definiendo e incorporando los cambios tecnológicos y organizacionales que hagan posible su incorporación a nuestro tejido industrial.

Para lograrlo es necesaria una convergencia de las áreas tradicionalmente vinculadas con la fabricación (calidad, producción, mantenimiento, diseño, seguridad, etc.) y las tecnologías posibilitadoras del AmI (interfaces multimodales, comunicaciones, sistemas de aprendizaje, sistemas embebidos, etc.).

Entre los elementos de investigación críticos a la hora de desarrollar un entorno AmI está la adopción de una arquitectura software que soporte la integración de múltiples dispositivos y sistemas, la localización de elementos y personas, diferentes perfiles de usuario, el intercambio de información, etc.

Por ello, se ha planteado un enfoque basado en la teoría de agentes. El departamento de Ingeniería de Producción de TEKNIKER ha creado un sistema multiagente, cuyo objetivo es crear un espacio de inteligencia ambiental en el ámbito de la fabricación, capaz de utilizar la información de contexto para anticipar las necesidades de los usuarios y ofrecer la solución adecuada.

El presente artículo presenta la forma en que se ha diseñado e implementado el sistema multiagente en un entorno real de laboratorio con el objetivo de facilitar la tarea a los operadores de taller que se encuentran trabajando en el mismo. Este sistema, denominado AMICO, consta de agentes de diferentes tipos (broker, móvil, interfaz) que se coordinan para facilitar el trabajo de las personas que se desenvuelven en un entorno real de producción.

El resto del artículo se estructura de la siguiente forma: en la sección segunda se presentan los conceptos básicos de lo que se ha dado en llamar Inteligencia Ambiental, así como el desarrollo realizado en TEKNIKER en esta área; el capítulo tercero presenta la arquitectura multiagente utilizada, y la sección cuarta finaliza el artículo enunciando las conclusiones y señalando el trabajo futuro a desarrollar.

## **2. Inteligencia Ambiental (AmI): antecedentes y laboratorio experimental**

La Inteligencia Ambiental es un concepto planteado por el “Information Society Technologies Advisory Group” (ISTAG) [5] como una visión de futuro, en un horizonte cercano al año 2010, en el que las personas vivirán en un entorno rodeadas de interfaces intuitivos e inteligentes embebidos en objetos cotidianos creando un “ambiente” capaz de reconocer y responder a la presencia de los humanos [5, 15].

La visión de AmI ubica a la persona en el centro de los desarrollos futuros. Es más, la tecnología debe ser desarrollada para las personas, en lugar de que las personas se adapten a la tecnología [7].

El término AmI en cuestión pretende definir una realidad que se evidencia cercana y en cierto modo presente: los avances tecnológicos nos conducen a nuevas formas de acceso a la información y de relación con los dispositivos que nos rodean, haciendo posible un entorno que nos reconoce y se adapta. Esa idea se sustenta sobre los siguientes pilares:

- Computación ubicua, es decir, la integración de elementos con capacidad de cálculo, procesamiento de información y aprendizaje en los objetos que nos rodean.
- Comunicación ubicua, posibilitando que esos dispositivos se comuniquen entre sí y con el usuario a través de redes básicamente inalámbricas, haciendo posible obtener servicios en cualquier lugar.
- Interfaces inteligentes, para que el usuario interactúe con ellos de la forma más natural posible.
- Transparencia; la tecnología es invisible para el usuario, está en el background, no debe ser intrusiva.

En la literatura técnica podemos encontrar diversas referencias a proyectos relacionados con el concepto AmI, como AmbieSense centrados en los viajeros y turistas como usuarios finales [1], la línea de investigación de Philips Research y su Homelab en Eindhoven para el estudio del AmI en el hogar [8], o el proyecto Oxygen desarrollado por el MIT [17].

Mayoritariamente estos proyectos se centran en aplicaciones ligadas a situaciones cotidianas de un ser humano: en el hogar, en la calle, en el coche, en lugares públicos, ligadas con el ocio y un determinado concepto de calidad de vida [16, 3]. Pero, ¿qué ocurre en el entorno Industrial? En el Laboratorio de Inteligencia Ambiental puesto marcha en TEKNIKER se aborda esta cuestión.

### 2.1. Laboratorio de AmI en TEKNIKER

El laboratorio AmI ofrece un entorno experimental cuyo elemento central es una fresadora de alta velocidad como la mostrada en la Figura 1, con motores lineales y cabezal de sustentación magnética complementándose con diferentes dispositivos y aplicaciones como:

- Tecnología de interfaces: reconocimiento de voz, “head mounted displays” (HMD), “tablet PC”, PDAs, teléfonos con capacidad de cómputo.
- Sistema de localización tanto de personas como dispositivos basados en RFID.
- Aplicaciones/funcionalidades típicas de un entorno de fabricación rediseñadas e implementadas en forma de Agentes: monitorización y manejo de máquina, seguimiento de producción, mantenimiento, localizador de dispositivos y personas
- Sistema de visión artificial para inspección de piezas y acceso a
- Redes de comunicación inalámbricas basadas en 802.11 y Bluetooth. la información.

Se trata, en definitiva, de aprovechar toda la capacidad que los avances tecnológicos implantados nos ofrecen para facilitar el trabajo a un conjunto de operarios. Aunque el laboratorio en el que se realizan los experimentos aborda esta mejora en el proceso de fabricación de piezas, se debe resaltar que la metodología presentada es adaptable a distintos entornos y puede ser aplicada a numerosos ejemplos reales en los que las condiciones de trabajo sean susceptibles de ser mejoradas con un sistema de este tipo.



**Figura1.** En el prototipo desarrollado se interactúa con la fresadora aquí mostrada

### 3. Prototipo AmI en fabricación: AMICO

Uno de los objetivos en el Laboratorio es ofrecer al usuario aplicaciones que utilizan la información de contexto pudiendo anticipar las necesidades de los usuarios y actuar en consecuencia. En la definición de contexto cabe referirse a cualquier hecho relevante en el entorno:

- La posición del usuario y parámetros asociados a la localización: exterior o interior, temperatura, humedad, fecha y hora, época del año, ruido ambiente, estado físico de la persona, actividad de la persona (andando, sentada,...) etc.
- Dispositivos al alcance de la persona: teléfono, PDA, impresora. Sistema operativo y capacidades de comunicación e interacción de los mismos, tamaño del display, memoria, estado de la batería, etc. Redes accesibles, precio y ancho de banda.
- Preferencias del usuario: mensajes hablados o en forma de texto, preferencias de dispositivos, tamaños de font, etc.
- Personas y servicios en el entorno del sujeto, servicios a los que está suscrito el usuario, con quién está interactuando, qué tipo de datos están siendo transmitidos (voz, datos, imagen,...), situación “social”,

En resumen el contexto puede ser cualquier información disponible en el momento de llevar a cabo una interacción, siendo especialmente relevante en un entorno de movilidad.

Para alcanzar este objetivo se ha desarrollado un sistema multiagente denominado AMICO que ofrece un entorno integrado de Inteligencia Ambiental en fabricación. AMICO es capaz de seguir al usuario en su recorrido por el Laboratorio ofreciéndole la información que necesita en cada momento y en el dispositivo más adecuado para cada caso. La actividad se ha centrado en varios perfiles de usuario, el operario de producción, el de mantenimiento, calidad, etc.

Los distintos sub-objetivos planteados a continuación se resuelven mediante agentes que integran la plataforma. Entre las funciones principales (o sub-objetivos) de AMICO cabe destacar:

1. Mostrar información contextual atendiendo a tres criterios: el perfil de usuario, el dispositivo más adecuado, y la ubicación del usuario.  
La adaptación a los distintos usuarios definidos se refleja mostrando diferente información según su perfil. De este modo si el responsable de calidad está dentro del ámbito del Laboratorio se le mostrará información correspondiente a su perfil como, por ejemplo, número de piezas defectuosas; ; si es el responsable de mantenimiento se le mostrarán los mantenimientos pendientes, etc. La figura 2 muestra una imagen de un operario interactuando con el sistema multiagente implementado en TEKNIKER.



**Figura2.** Técnico de mantenimiento en el laboratorio, portando HMD y sistema de reconocimiento de voz

Se pueden adoptar distintos criterios a la hora de considerar el dispositivo más adecuado como la cercanía al usuario, sus preferencias, las capacidades de los dispositivos, etc. Por otra parte, la adaptación al dispositivo se manifiesta adecuando la información a mostrar en pantalla a las características del dispositivo. Hay que tener en cuenta que los dispositivos utilizados son ordenadores “desktops”, portátiles, “Tablet PCs”, PDA’s, HMD y “smartphones”, cada uno de ellos con diferentes potencialidades de cómputo y gráficas tanto en términos de resolución como factores de forma, colores disponibles, etc.

El sistema de localización del Laboratorio, basado en RFID, proporciona la información necesaria para conocer la ubicación tanto de dispositivos como de usuarios alrededor de cuatro zonas distintas de la máquina.

2. Permitir el acceso a funcionalidades de la máquina según la ubicación del usuario.  
Se han caracterizado cinco zonas alrededor de la máquina. Las acciones permitidas a la hora de comandar la máquina se configuran en función de dichas zonas, lo cual permite incrementar su seguridad. Por ejemplo, solamente se permite comandar la máquina desde ubicaciones en las cuales existe una visión directa de la zona de riesgo.
3. Aprender y adaptarse a las preferencias del usuario.  
A modo de ejemplo, ante la disyuntiva de mostrar la información en varios dispositivos accesibles en un momento dado, AMICO utiliza preferencias anteriormente mostradas por los usuarios para elegir la opción más adecuada.

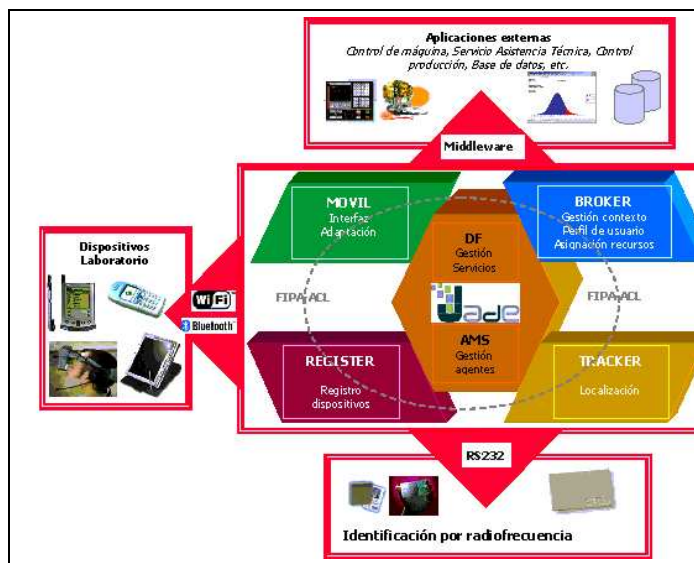


Figura3. Arquitectura del sistema multiagente implementado

### 3.1. Arquitectura multiagente

Como resultado de este planteamiento existen una serie de requisitos que AMICO debe ofrecer, entre otros: movilidad (capaz de moverse de un dispositivo a otro), multiplataforma, autonomía, proactividad, capacidad de comunicación, escalabilidad (integración sencilla de nuevos módulos) y capacidad de adaptación al usuario.

Dado el carácter distribuido del entorno de aplicación se ha seleccionado un sistema multiagente, arquitectura distribuida que implementa estrategias de comunicación permitiendo la futura integración de nuevos módulos. Específicamente se ha adoptado un modelo federado, en el cual un agente Broker se encarga de gestionar el entorno AMICO del laboratorio. El Broker se encarga de recoger las solicitudes de otros agentes, entender la solicitud, buscar los receptores adecuados y enviarles el mensaje. La Figura 3 muestra de forma esquemática los diversos componentes del prototipo multiagente desarrollado, así como los modos de comunicación entre los diferentes tipos de agentes.

### 3.2. Plataforma multiagente

El laboratorio dispone de un sistema de red que soporta tanto WIFI como Bluetooth. La arquitectura se basa en una plataforma JADE en la que conviven diversos agentes distribuidos en los diferentes dispositivos (PDA, HMD, etc.).

El agente Register registra cada uno de los dispositivos del laboratorio en la plataforma, a través de la cual y mediante los agentes AMS y DF, el resto pueden acceder a los mismos.

El sistema de identificación por radiofrecuencia localiza a los usuarios y dispositivos en el ámbito del laboratorio y envía la información vía RS232 al agente Tracker encargado de realizar el seguimiento.

El agente Broker utilizando la información enviada por los otros agentes gestiona el entorno AMICO del laboratorio. En base al perfil y a la localización del usuario envía el agente móvil al dispositivo más adecuado en cada momento. El agente Broker actúa también de "middleware" con aplicaciones externas (control de producción, motor de voz, etc.) con las cuales se comunica mediante sockets.

El agente móvil una vez en el dispositivo indicado por el agente Broker muestra la información de producción o mantenimiento correspondiente al perfil de usuario y características del dispositivo, permitiendo la interacción con el mismo.

Toda la comunicación entre agentes se realiza utilizando los mecanismos que ofrece la plataforma JADE mediante mensajes FIPA-ACL.

A continuación se describen con más detalle los elementos fundamentales de la arquitectura.

### 3.3. La plataforma JADE

Existe una amplia gama de productos comerciales y académicos para el desarrollo de agentes [18, 9, 2, 10]. La plataforma de desarrollo y ejecución de agentes utilizada por TEKNIKER es JADE (Java Agent DEvelopment Framework) [10].

JADE es una plataforma software que simplifica la implementación de sistemas multiagente y asegura la cumplimentación de los estándares FIPA.

La plataforma se puede distribuir en diferentes máquinas independientemente del sistema operativo. Además ofrece una versión reducida compatible con dispositivos móviles. JADE es un software libre (bajo licencia LGPL) distribuido por TILAB. En nuestro laboratorio se utiliza sobre: Windows, Pocket PC y Symbian.

JADE incluye dos agentes especiales llamados "Agent Management System" (AMS) y "Directory Facilitator" (DF) que facilitan la gestión de los agentes. El agente AMS facilita un servicio de información de todos los agentes registrados en la plataforma y el DF ofrece un servicio de páginas amarillas informando de los diferentes servicios registrados en la misma.

En la implementación realizada en el Laboratorio se ha utilizado la versión 3.0 de JADE y Jade-Leap en cada uno de los dispositivos. El sistema se basa en una única plataforma ubicada en un servidor que contiene el "Main-Container" donde se alojan, en principio, el Broker, el Tracker y los Agentes Móviles. Se definen "Containers" por cada uno de los dispositivos activos en el Laboratorio y que contienen su agente Register correspondiente. La figura 4 muestra la interfaz de la plataforma donde pueden verse los distintos containers y sus agentes.

Los desarrollos se han realizado en Java, utilizando JDeveloper 10g. Para la implementación de los agentes se utiliza como base la clase ".Agent", que proporciona JADE, implementando en diversos "Behaviours" las funciones de los agentes que se describen en el apartado 3.3.



- **Register**

Su objetivo es registrar los diversos dispositivos existentes en la plataforma de agentes del Laboratorio. Sus servicios son:

- Registrar el dispositivo en la plataforma multiagente del Laboratorio de forma que se den de “alta” cada uno de los dispositivos accesibles.
- Ofrecer información sobre el dispositivo que se registra, datos necesarios para poder migrar el agente Móvil. Dada la gran variedad de dispositivos existente y teniendo en cuenta su diversidad es necesario que esta información esté disponible dinámicamente para que el Agente Broker conozca en cada momento los recursos disponibles en el entorno AmI.

### 3.5. Comunicación entre agentes

<i>sender</i>	El que envía el mensaje
<i>Receivers</i>	La lista de receptores del mensaje
<i>Performative</i>	El contenido del mensaje REQUEST: si se desea que el receptor realice una acción INFORM: si se desea que el receptor conozca una información QUERY_IF: si el que lo envía desea conocer una información etc.
<i>Content</i>	El contenido del mensaje
<i>Language</i>	Sintaxis utilizada para expresar el contenido
<i>Ontology</i>	El vocabulario y el significado de los símbolos utilizados en el contenido del mensaje

**Cuadro 1.** Estructura de los mensajes

La comunicación, coordinación y cooperación son puntos clave en los sistemas multiagente. Los estándares son indispensables para un escenario de Inteligencia Ambiental que soporte: la comunicación entre agentes, la sintaxis del mensaje, ontologías (los agentes deben compartir una representación formal del conocimiento del contexto) y la interoperabilidad e interacción de distintos dispositivos en un entorno heterogéneo [6]. Todas las comunicaciones entre agentes se realizan a través de paso de mensajes utilizando el estándar FIPA ACL. El mensaje en JADE se implementa como un objeto java que ofrece una serie de métodos para gestionar todos los campos del mensaje. Parte de la estructura de los mensajes se muestra en el cuadro 1.

Para gestionar la comunicación entre agentes se han definido una serie de protocolos tal y como el que se muestra en la figura 5, en el que se representa la comunicación entre el Tracker (que da el servicio de localización) y un agente que desea suscribirse al servicio.

Para el intercambio de información el sistema utiliza la ontología de Movilidad (implementada por JADE) y ontología de Dispositivos definida por FIPA.

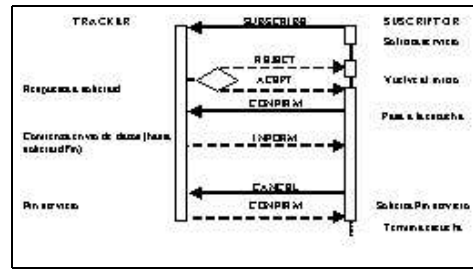


Figura5. Ejemplo de protocolo de comunicación

#### 4. Conclusiones y Perspectivas futuras

AMICO ofrece un nuevo entorno de trabajo tanto a los operarios de producción como a los técnicos de mantenimiento permitiendo el acceso ubicuo a información actual sobre la producción y el equipamiento, en cualquier lugar o momento, así como información contextual, gestión inteligente de recursos, personalización y adaptación al usuario.

El planteamiento basado en sistemas multiagente se ha demostrado como válido si bien con algunas limitaciones como:

1. La falta de una metodología a la hora de desarrollar los agentes.
2. La necesidad de herramientas de “alto nivel” para la definición de los agentes y su desarrollo.
3. La definición de ontologías reutilizables en el ámbito de la Inteligencia Ambiental.
4. Mecanismos para la integración de “legacy systems”.

De cara al futuro deberán superarse diferentes retos tecnológicos como la necesidad de interoperabilidad de diferentes dispositivos y la adopción de una plataforma estándar común de agentes.

Una gestión más inteligente de la información del contexto es el siguiente reto planteado por el equipo de trabajo de AMICO. Se pretende ampliar la plataforma multiagente con nuevos agentes que aporten nuevas funcionalidades.

Por otra parte, se quieren introducir técnicas de aprendizaje automático que permitan una adaptación al usuario y su contexto de forma no supervisada.

## Bibliografía

- [1] AmbieSense. <http://www.ambiesense.com/>
- [2] J.P. Bigus and J. Bigus. *Constructing Intelligent Agents Using Java*. Ed. Wiley, 2001.
- [3] National Research Council Committee on Visionary Manufacturing Challenges. *Visionary Manufacturing Challenges for 2020*. NATIONAL ACADEMY PRESS, Washington, D.C., 1998.
- [4] A. Dey. Understanding and using context. *Personal and ubiquitous computing*, 5, 2001.
- [5] K. Ducatel, M. Bogdanowicz, F. Scapolo, Leijten J., and J.C. Burgelma. Istag: Scenarios for ambient intelligence in 2010. ISTAG 2001 Final Report, 2001.
- [6] D. Fensel. *Ontologies: A Silver Bullet for Knowledge Management and Electronic Commerce*. Ed. Springer, 2000.
- [7] M. Friedewald and O. Da Costa. Science and technology roadmapping: Ambient intelligence in everyday life. JRC/IPTS - ESTO Study, 2003.
- [8] HoleLab. [research.philips.com/technologies/misc/homelab/index.html](http://research.philips.com/technologies/misc/homelab/index.html)
- [9] C.A. Iglesias. Fundamentos de los agentes inteligentes. *Informe Interno. Dept. Ingeniera de Sistemas Telematicos U. P. M.*, 1997.
- [10] JADE. Java agent development framework, 2004.  
URL: <http://jade.cselt.it/index.html>.
- [11] P. Jones. Ambient information for collaboration and discovery: Adapting from information practices in the field. In *Proceedings of the Ambient Intelligence for Scientific Discovery conference*, 2004.
- [12] Monográfico inteligencia artificial distribuida y sistemas multiagentes. *Revista Inteligencia Artificial*, 6, 1998.
- [13] Multi-agent systems and applications. In Springer, editor, *Proceedings of the ECCAI Advance Course*, 2001.
- [14] Ambient intelligence for scientific discovery (aisd). *SIGCHI Workshop, April 25, 2004, Vienna*, 2004.
- [15] G.M.P. O'Hare, M.J. O'Grady, S. Keegan, D. O'Kane, R. Tynan, and D. Marsh. Intelligent agile agents: Active enablers for ambient intelligence. In *Proceedings of the Ambient Intelligence for Scientific Discovery conference*, 2004.
- [16] Expert Group on Competitive & Sustainable Production and Related service Industries in Europe in the Period to 2020. Sustainable production: Challenges & objectives for eu research policy. EU Commission, 2001.
- [17] Oxigen. [Url=http://oxygen.lcs.mit.edu/](http://oxygen.lcs.mit.edu/)
- [18] S. Russel and P. Norvig. *Artificial Intelligence a Modern Approach*. Prentice Hall, 2003.
- [19] W. Shen. *Multi-Agent Systems for Concurrent Intelligent Design and Manufacturing*. Taylor & Francis, 2001.