



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID  
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

TESIS DOCTORAL

TECNOLOGÍAS MIDDLEWARE  
PARA EL DESARROLLO DE SERVICIOS  
EN ENTORNOS DE  
COMPUTACIÓN UBIQUA

Autora: **M<sup>a</sup> Celeste Campo Vázquez**  
Ingeniero de Telecomunicación

Director: **Andrés Marín López**  
Doctor Ingeniero de Telecomunicación

2004

# Índice

<b>1. Resumen tesis</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Motivación de la tesis . . . . .	2
1.3. Principales contribuciones . . . . .	3
1.4. Conclusiones y aplicación práctica . . . . .	14
<b>2. Datos de la autora</b>	<b>15</b>
<b>3. Datos de la tesis doctoral</b>	<b>16</b>
<b>4. Relación cronológica de publicaciones y otros méritos</b>	<b>17</b>
4.1. Publicaciones Internacionales . . . . .	17
4.2. Publicaciones Nacionales . . . . .	17
4.3. Contribuciones al grupo de estandarización FIPA Ad-Hoc . . . . .	18
4.4. Proyectos de investigación relacionados . . . . .	18
4.5. Estancias en centros de investigación . . . . .	18
4.6. Referencias por parte de otros investigadores . . . . .	19
4.7. Becas . . . . .	20
4.8. Información adicional . . . . .	20

# 1. Resumen tesis

## 1.1. Introducción

Weiser, en su artículo “The Computer for the 21st Century”, describe entornos saturados de elementos con capacidades de cómputo y comunicación, totalmente integrados en nuestras vidas y que nos proporcionan información asociada a nuestras necesidades y al entorno en el que nos encontramos en cada momento, de forma transparente. A esta nueva era de la computación imaginada por Weiser se denomina computación ubicua, y en nuestros días podemos decir que comienza a ser una realidad. Esto es así, gracias fundamentalmente a los avances realizados en la microelectrónica, que permiten introducir capacidad de cómputo en un mayor número de dispositivos que se pueden embeber en el mundo físico que nos rodea, y a los avances en el desarrollo de protocolos inalámbricos, que dotan a estos dispositivos de capacidad de comunicación sin necesidad de cableados. Pero para que realmente la visión de Weiser se haga realidad, es necesario realizar un gran esfuerzo de investigación, centrado en aportar soluciones para que la tecnología software nos dé el soporte adecuado para desarrollar servicios en estos entornos.

En esta tesis doctoral realizamos contribuciones en el campo de la definición de tecnologías middleware para el desarrollo de servicios en entornos de computación ubicua. En primer lugar, abordamos el problema del descubrimiento de servicios, que permitirá que de forma automática un dispositivo descubra los servicios ofrecidos por otros dispositivos que le rodean. Aunque existen propuestas en este sentido, desde nuestro punto de vista no cubren todas las necesidades que imponen estos nuevos entornos de computación, por lo que hemos definido un nuevo mecanismo de descubrimiento: Pervasive Discovery Protocol (PDP). PDP es un protocolo de ámbito local, totalmente distribuido en el que tanto las peticiones como las respuestas se envían por difusión, cada dispositivo almacena en una caché local los anuncios recibidos, cuyo contenido comparte con los dispositivos que le rodean. PDP consigue minimizar el número de mensajes transmitidos por búsqueda, manteniendo tasas de descubrimiento de servicios altas, además permite que los dispositivos con mayor tiempo de disponibilidad transmitan un mayor número de respuestas, minimizando el consumo energético de los más limitados.

En segundo lugar, proponemos el uso de la tecnología de agentes móviles como middleware para el desarrollo de servicios en entornos ubicuos. Los agentes se caracterizan porque su comportamiento se orienta a alcanzar ciertas metas, por ser autónomos, por su capacidad de cooperar con otros sistemas y si poseen la característica de movilidad, por ser capaces de moverse a sistemas remotos para realizar sus tareas, y de esta forma minimizar el coste de las comunicaciones. Estas características se adaptan a las restricciones que impone la computación ubicua. En esta línea, contribuimos a la adaptación del estándar de agentes FIPA para su funcionamiento en estos entornos, y en concreto, nos centramos en el servicio de páginas amarillas, denominado Directory Facilitator (DF). Nuestra solución consiste en definir un nuevo agente, Service Discovery Agent (SDA), que utiliza una implementación subyacente del protocolo de servicios PDP para realizar búsquedas eficientes de servicios remotos, eliminando el mecanismo de federación de DFs definido por FIPA. Estas propuestas nos han llevado a participar de forma activa en el comité técnico FIPA Ad-Hoc.

## 1.2. Motivación de la tesis

En la actualidad, gracias a la evolución de la tecnología hardware, existen un mayor número de dispositivos: teléfonos móviles, PDAs, pagers, que nos acompañan en todo momento debido a su reducido tamaño. Estos dispositivos tienen capacidad de cómputo y además pueden comunicarse con otros elementos sin necesidad de conexiones físicas, gracias al desarrollo y evolución de los protocolos inalámbricos, tanto en redes celulares, GPRS y UMTS, como en redes locales, WLAN y Bluetooth. Así, ya es más o menos habitual que estos dispositivos nos proporcionen nuevas aplicaciones además de las que propiamente tenían asociadas, por ejemplo, desde un móvil no sólo mantenemos una conversación telefónica, sino que también podemos ver la información del tiempo, localizar la farmacia más cercana o incluso, algo menos común, pero posible, programar la lavadora.

La primera aproximación que la tecnología ha dado a la visión de Weiser es lo que se denomina “*anytime, anywhere*”, es decir, ha permitido a los usuarios, a través de sus nuevos dispositivos personales inalámbricos, acceder a las mismas aplicaciones que utilizan habitualmente en sus PCs, pero en cualquier momento y desde cualquier lugar. Así, los usuarios a través de ellos pueden navegar por Internet, WAP o i-Mode, pueden consultar su correo electrónico, pueden sincronizar la información almacenada entre sus dispositivos, SyncML, para poder gestionar automáticamente las diversas actualizaciones realizadas en diferentes momentos desde diferentes dispositivos.

Pero la visión de Weiser va mucho más allá, involucra introducir capacidad de cómputo y de comunicación en el mundo físico: en sensores, que capturen información del entorno o del propio usuario, en actuadores que nos permitan ejecutar acciones de forma remota sobre elementos físicos (puertas, interruptores, . . .), en electrodomésticos del hogar (lavadoras, neveras, . . .) o de oficinas (impresoras, faxes, aire acondicionado, proyectores, . . .) y en sistemas de transporte (coches, autobuses, . . .). Además será preciso que estos dispositivos tengan la capacidad de operar sin infraestructura de red fija, lo que implica no sólo la necesidad de emplear protocolos inalámbricos, sino que también será necesario proporcionarles autonomía, es decir, que puedan comunicarse con otros dispositivos directamente sin necesidad de dispositivos intermedios (típicamente PCs) para construir nuevos servicios.

En estos nuevos entornos, los dispositivos personales de los usuarios permitirán que el mundo físico se configure según sus necesidades y preferencias, así no sólo podrá utilizar estos dispositivos como un ordenador portátil sino como un mando a distancia que le permita controlar su entorno físico más próximo. Por ejemplo, podemos pensar que la PDA de un usuario al entrar en una sala le indique al aire acondicionado que la temperatura ideal es 25 grados y que sea el propio aire acondicionado el que interaccione con los sensores de temperatura para que, a partir de sus mediciones, pueda mantener la temperatura indicada.

Para que esta visión se haga realidad es necesario realizar un gran esfuerzo de investigación, centrado en aportar soluciones para que la tecnología software nos dé el soporte adecuado para desarrollar aplicaciones en lo que se denominan entornos de computación móvil y ubicua. Las nuevas restricciones y características que imponen estos entornos, nos lleva a cambiar los conceptos tradicionales que se han aplicado en entornos de redes fijas en las que los nodos eran computadores. Parece claro que no es eficiente migrar soluciones tradicionales a estos nuevos sistemas, existe una mayor diversidad de dispositivos, con diferentes limitaciones hardware para ejecutar aplicaciones y en los que hay que tener en cuenta que las comunicaciones pueden ser costosas y las distancias mucho más significativas que en las redes tradicionales. Además, la mayoría de estos nuevos dispositivos no son multipropósito, sino que proporcionan un serie de servicios concretos, pero de manera espontánea, cuando entran en contacto unos con otros

a través de algún protocolo de comunicación, es posible que se compongan estos servicios de forma inteligente, para ofrecer un nuevo servicio que satisfaga las expectativas del usuario de manera transparente al mismo, como quería Weiser.

### 1.3. Principales contribuciones

Las principales contribuciones que se han realizado en esta tesis doctoral son las siguientes:

#### 1. Estudio de los nuevos retos impuestos por los entornos de computación ubicua.

La computación ubicua es una evolución de la computación móvil, pero plantea algunos nuevos retos que no se habían abordado hasta ahora: definición de nuevos protocolos de red inalámbrica para la comunicación entre dispositivos, nuevos protocolos que permitan que los dispositivos formen redes sin necesidad de infraestructura ni configuraciones de administradores, desarrollo de servicios adaptados al contexto y a las propias preferencias del usuario, para que el entorno se adapte a sus necesidades de manera transparente, estudio de nuevos mecanismos de interacción hombre-máquina,...

En la motivación de la tesis doctoral se detallan estos nuevos retos partiendo de una clasificación de los nuevos tipos de dispositivos existentes: personales, de función específica y sensores/actuadores, y describiendo algunos de los nuevos escenarios de aplicación, que ilustran las posibilidades de la computación ubicua.

#### 2. Estudio de mecanismos de descubrimiento de servicios.

El problema del descubrimiento de servicios no es algo nuevo, a lo largo de estos últimos años han aparecido diversas propuestas al respecto, más o menos extendidas en entornos de redes fijas. El objetivo principal con el que surgieron fue facilitar a un dispositivo móvil el descubrimiento, configuración y uso de los servicios que se ofrecían en la nueva red a la que se conectaba. En general, las diferentes propuestas abordan el problema de distintas formas, desde las que han sido diseñadas para su uso con un determinado protocolo de red, hasta las que están asociadas a un determinado lenguaje de programación. En el estado del arte de la tesis, se describen brevemente algunos de los más destacados mecanismos de descubrimiento de servicios definidos en los últimos años.

En la tesis realizamos un estudio teórico y detallado del problema de descubrimiento, planteamos de forma genérica el problema y enumeramos las diferentes soluciones teóricas existentes, denominadas: modo *pull*, modo *push* y basado en directorio. El modo *pull* en el que los clientes realizan peticiones y los servicios se descubran bajo demanda. El modo *push* en el que los servicios se anuncian periódicamente y los clientes escuchan y almacenan estos anuncios para seleccionar posteriormente el servicio que les interesa. Y basado en directorio, que es un nuevo elemento en la red que sirve de intermediario entre clientes y servidores, los servidores registran sus servicios en el directorio, y los clientes le consultan cuando quieren descubrir un servicio.

Los mecanismos de descubrimiento existentes basan su funcionamiento en alguna o en varias de estas soluciones teóricas, y para ilustrarlo, en la tesis describimos de forma detallada cómo funcionan las propuestas existentes en Internet: SLP, SSDP y DNS-SD.

#### 3. Estudio analítico y mediante técnicas de simulación de las prestaciones de los protocolos de descubrimiento.

En la tesis abordamos el estudio de prestaciones de los mecanismos de descubrimiento de servicios, respecto a tres variables:

- Número de mensajes por búsqueda, que nos permite comparar los diferentes protocolos desde el punto de vista de su consumo energético (existen varios trabajos que demuestran que las comunicaciones son lo que más batería consume en un dispositivo).
- Tasa de descubrimiento de servicios, que nos permite comparar los diferentes protocolos desde el punto de vista de eficiencia, lo ideal es que el protocolo nos permita obtener tasas de descubrimiento de servicios del 100 %.
- Tasa de descubrimiento de servicios falsos, que nos permite comparar los diferentes protocolos desde el punto de vista de eficiencia, lo ideal es que el protocolo nos permita obtener tasas de descubrimiento de servicios falsos del 0 %.

En el caso de los protocolos teóricos, *push* y *pull*, obtuvimos mediante análisis matemático el valor de estos tres parámetros.

El método *pull* proporciona tasas de descubrimiento de servicios del 100 % y tasas de descubrimiento de servicios falsos del 0 %. En cuanto al número de mensajes transmitidos, dependerá si el dispositivo que realiza la búsqueda ofrece o no el servicio, así en la tesis demostramos que si el número de servicios distintos ofrecidos en la red es  $k$ , la media de dispositivos es  $n$ , y cada dispositivo ofrece un único servicio que se le asigna de forma uniforme entre los  $k$  posibles, habrá en la red una media de  $n/k$  dispositivos que ofrecen el mismo tipo de servicio, entonces el número de mensajes transmitidos es:

$$\text{NumeroMensajes} = \frac{k + n - 1}{k} \quad (1)$$

En cuanto a las prestaciones del método *push*, si consideramos que el tiempo entre anuncios de los servicios ofrecidos por los dispositivos es  $T_a$  y que los dispositivos realizan una petición según una distribución exponencial de media  $\nu$ , el número de mensajes por búsqueda será:

$$\text{NumeroMensajes} = \frac{\nu}{T_a} \quad (2)$$

Para obtener el valor de la tasa de descubrimiento de servicios y la tasa de servicios falsos, suponemos que el tiempo de vida de los dispositivos sigue una distribución exponencial de media  $\mu$ . En la tesis se demuestra que:

$$\text{TasaDescubrimientoServicios} = 100 * \frac{\mu}{T_a} (1 - e^{-\frac{T_a}{\mu}}) \quad (3)$$

$$\text{TasaServiciosFalsos} = 100 * (1 - \frac{\mu}{T_a} (1 - e^{-\frac{T_a}{\mu}})) \quad (4)$$

Para algunos de los protocolos propuestos en Internet, como SLP y SSDP, el análisis se ha realizado empleando técnicas de simulación, para lo cual se ha utilizado el lenguaje de simulación MODSIM y se han aplicado métodos de medias por bloques para determinar el final de simulación. Todos los resultados se han realizado con un intervalo de confianza del 10 % y un nivel de confianza del 90 %.

#### 4. Propuesta de nuevos mecanismos para mejorar las prestaciones de protocolos de descubrimiento en entornos ubicuos.

El análisis realizado sobre las características de los entornos ubicuos, nos llevó a determinar una serie de requisitos que se deben imponer a la hora de definir protocolos de descubrimiento que operen en estos entornos. Estos requisitos se enumeran a continuación:

- Minimizar número de transmisiones: para que reduzca el consumo energético y se adapte a las restricciones de los protocolos inalámbricos.
- Funcionar sin infraestructura fija: para que pueda funcionar en redes ad-hoc en las que los dispositivos entran y salen de forma espontánea, y en las que el funcionamiento de la red no depende de ningún elemento central que precise administración.
- Adaptarse tanto a entornos dinámicos como estáticos: para que se puedan obtener las mejores prestaciones adaptándose al entorno en el que se encuentra.
- Adaptarse a las características de las aplicaciones: para mejorar las prestaciones teniendo en cuenta las necesidades de las aplicaciones que realizan las búsquedas.
- Maximizar la cooperación entre los dispositivos: para obtener un mayor beneficio común reduciendo el coste global.
- Simple y poco costoso computacionalmente: para que sea implementable en dispositivos con restricciones de memoria y capacidad de proceso.

Partiendo de los análisis teóricos del modo *push* y el modo *pull*, hemos propuesto, como mejor solución para entornos ubicuos, realizar un mezcla de ambos modos, beneficiándose de sus ventajas e intentando compensar sus inconvenientes. Así, hemos propuesto una serie de mecanismos que nos permiten mejorar las prestaciones de los protocolos de descubrimiento en entornos ubicuos y por lo tanto, verificar los requisitos enumerados anteriormente:

- No emplear servicios de directorio.  
El protocolo debe tener un funcionamiento totalmente distribuido de tal manera que pueda operar en una red sin infraestructura y sin administración.
- Introducir tiempo de disponibilidad en los dispositivos.  
En entornos ubicuos un gran número de dispositivos serán móviles, por lo tanto es necesario que anuncien sus servicios indicando el tiempo de vida asociado a ellos. En esta tesis proponemos emplear un tiempo de disponibilidad asociado al dispositivo, cuyo valor depende de sus características de movilidad.
- Introducir caché de servicios remotos.  
Se introduce una caché en los dispositivos, en la que se almacenan de forma local los servicios que se anuncian en la red. Cuando una aplicación solicita la búsqueda de un servicio se comprueba si existe en la caché y si es así, no se transmite ninguna petición de búsqueda.  
Con este mecanismo se consigue disminuir el número de mensajes por búsqueda. Por ejemplo, al introducir en un modo *pull* una caché de tamaño 35, el número de mensajes por búsqueda en un escenario con 20 dispositivos y 5 tipos distintos de servicios, se reduce de 4,8 a 1,8.  
El principal inconveniente al introducir una caché es que las tasas de servicios descubiertos y de servicios falsos empeora, siendo en el ejemplo considerado del 71 % y del 14 %, respectivamente.

- Mensajes de respuesta por difusión.  
 Cuando un dispositivo responde a un mensaje de búsqueda envía su respuesta por difusión, de tal forma que todos los dispositivos pueden incluir en sus cachés este nuevo servicio.  
 Con este mecanismo se reduce el número de mensajes por búsqueda, ya que la caché de los dispositivos está más actualizada, y por lo tanto, se satisfacen más búsquedas con los servicios almacenados en la caché. Siguiendo con el ejemplo anterior, al permitir que los mensajes de respuesta se transmitan por difusión, el número de mensajes por búsqueda se reduce de 1,8 a 0,48.  
 Con este mecanismo se mejora la tasa de servicios descubiertos, ya que la caché está más actualizada, aunque la tasa de servicios falsos empeora ligeramente, en el ejemplo considerado los valores son del 86 % y del 28 %, respectivamente.
- Incluir servicios ya conocidos en los mensajes de respuesta.  
 Con el objetivo de mejorar las tasas de servicios descubiertos y servicios falsos, cuando se solicita una búsqueda, el dispositivo transmite una petición a la red incluyendo los servicios que conoce, es decir, que están almacenados en su caché, de manera que sólo responden los dispositivos que ofrecen servicios que no están incluidos en el propio mensaje de petición.  
 Con este mecanismo se consigue mejorar las tasas de servicios descubiertos y servicios falsos, obteniéndose en el ejemplo considerado un valor del 99,5 % y del 10 %, respectivamente.
- Responder con los mensajes almacenados en las cachés.  
 Cuando se busca un servicio no sólo responde el dispositivo que ofrece el servicio, sino todos aquellos que tienen almacenado ese servicio en sus cachés. Y un dispositivo sólo responde si alguno de los servicios de los que conoce no han sido anunciados previamente por otros.  
 Este mecanismo, basado en maximizar la cooperación de los dispositivos, permite disminuir el número de mensajes por búsqueda. Además, si priorizamos que responda el dispositivo que conoce más servicios todavía se obtiene un mejor resultado. Para hacer esto, hemos propuesto que los dispositivos que tienen un mayor tiempo de disponibilidad y conozcan a un mayor número de servicios del tipo solicitado respondan antes, para ello retardan sus respuestas un tiempo aleatorio inversamente proporcional a estos dos valores.  
 En el ejemplo considerado, al introducir este mecanismo se pasa de tener 0,49 mensajes por búsqueda a 0,36.
- Actualizar la caché con servicios incluidos en los mensajes de petición.  
 Con este mecanismo los dispositivos no sólo almacenan en sus cachés servicios incluidos en los mensajes de respuesta, sino también en los mensajes de petición. De esta forma se disminuye ligeramente el número de mensajes por búsqueda y se reduce la tasa de servicios falsos.  
 En el ejemplo considerado, al introducir este mecanismo se pasa de tener 0,36 mensajes por búsqueda a 0,16.
- Introducir mecanismos de consistencia de cachés.  
 Al introducir una caché de servicios remotos, se consigue disminuir el número de mensajes por petición, pero provoca que se descubran servicios que no están disponibles realmente en la red, por ello es importante introducir mecanismos que permitan disminuir el número de servicios falsos que existen en la cachés. Los mecanismos que hemos propuesto son los siguientes:



- Los dispositivos cuando anuncian un servicio local incluyen su tiempo de disponibilidad en la descripción del servicio. Los dispositivos remotos que escuchan este anuncio, almacenan el servicio en su caché durante un tiempo que es el mínimo entre el tiempo de disponibilidad del dispositivo que lo anuncia y el tiempo de disponibilidad del dispositivo que lo almacena.
- Cuando los dispositivos detectan un cambio de red o apagado del dispositivo, envían un mensaje especial que indica a los demás dispositivos de la red que esos servicios dejan de estar disponibles, y por lo tanto, los borran de sus cachés. Del mismo modo, si un dispositivo al intentar acceder a un servicio que acaba de descubrir detecta que no está disponible, puede enviar un mensaje indicándolo a los demás dispositivos de la red, para que del mismo modo borren estas entradas de sus cachés.

Al introducir estos mecanismos en el protocolo, se consigue que las cachés estén actualizadas alcanzándose tasas de servicios falsos descubiertos próximas al 0 %, que es el valor deseable.

- Optimizar según la utilización que hacen las aplicaciones de los servicios descubiertos. Hemos realizado una clasificación de las aplicaciones según el uso que realizan de los servicios descubiertos, con el objetivo de mejorar la eficiencia de los protocolos, así hemos definido tres grupos:
  - Aplicaciones que quieren localizar algún dispositivo que ofrece un determinado servicio, pero sin importar cuál es el dispositivo que lo ofrece. Para ello definimos un tipo de petición denominada “una petición–una respuesta”. En este caso, cuando se realiza una búsqueda si existe el servicio solicitado en la caché se responde con él y en caso de realizar una consulta a la red sólo responde un dispositivo.
  - Aplicaciones que quieren localizar todos los dispositivos que ofrecen un determinado servicio en el entorno. Para ello definimos un tipo de petición denominada “una petición–varias respuestas”.
  - Aplicaciones tipo buscador, que quieren localizar todos los servicios que se ofrecen en el entorno. Para ello definimos un nuevo tipo de servicio denominado ALL.

En los mensajes de petición se incluye el tipo de búsqueda que se realiza para que los dispositivos que conocen los servicios solicitados generen sus respuestas consecuentemente. A modo de ejemplo, al distinguir peticiones del tipo “una petición–una respuesta” se obtiene una reducción en el número de mensajes de hasta el 86 %.

## 5. Diseño de un nuevo protocolo de descubrimiento de servicios: Pervasive Discovery Protocol.

Algunos de los mecanismos propuestos en la tesis doctoral pueden ser aplicados a los protocolos de descubrimiento de servicios existentes en la actualidad, siempre que soporten un modo funcionamiento distribuido, como por ejemplo SLP, SSDP y DNS-SD. De esta forma, se obtiene una versión del protocolo más eficiente para su aplicación en entornos de computación ubicua.

Partiendo de un modo *pull* puro e introduciendo todos los mecanismos propuestos, hemos definido un nuevo protocolo, que hemos denominado Pervasive Discovery Protocol. En la tesis se ha realizado una formalización del mismo, describiéndolo en forma de algoritmo. Para facilitar su implementación en dispositivos reales y garantizar la interoperabilidad

entre diferentes implementaciones hemos realizado una descripción detallada del mismo, que se incluye como anexo a la tesis doctoral.

## 6. Estudio de prestaciones de PDP respecto a propuestas teóricas y de Internet.

En esta tesis se ha realizado un estudio de prestaciones del protocolo diseñado, PDP, respecto a una serie de parámetros:

- Tiempo de disponibilidad.

El tiempo de disponibilidad de los dispositivos es un parámetro importante dentro del protocolo PDP. Inicialmente, este tiempo se configura manualmente dependiendo de la características de movilidad del dispositivo, por ejemplo, dispositivos personales y móviles tendrán tiempos de disponibilidad bajos, mientras que los dispositivos tipo PC tendrán tiempos más altos.

Hemos realizado una serie de simulaciones para comprobar qué efecto tiene que este tiempo de disponibilidad no esté ajustado realmente al tiempo de vida de los dispositivos. Las principales conclusiones es que si se introducen mecanismos de consistencia de cachés las desviaciones de este parámetro no afectan demasiado a las prestaciones del protocolo, y en caso de no existir estos mecanismos, es mejor estimar a la baja este valor.

- Número de dispositivos.

En cuanto a las prestaciones del protocolo respecto al número de dispositivos, depende principalmente del tamaño relativo de la caché empleada.

- Tamaño de la caché.

En las simulaciones realizadas en distintos tipos de escenarios, modificando tanto el tiempo de disponibilidad de los dispositivos como su número, hemos observado que las prestaciones del protocolo dependen fundamentalmente del tamaño de la caché de los dispositivos.

De los análisis realizados mediante simulación, podemos concluir que existe un tamaño óptimo de caché en PDP que se corresponde con el número de servicios que existen en la red. Por lo tanto, un mayor tamaño de la caché no mejora las prestaciones del protocolo, lo cual es deseable debido a la restricciones de memoria que pueden presentar algunos de los dispositivos.

En la Figura 1 se muestran las prestaciones obtenidas variando el tamaño de la caché.

Además de este análisis, también hemos realizado un estudio de prestaciones del PDP respecto a otros protocolos de descubrimiento, tanto teóricos como algunos propuestos en Internet, en diferentes escenarios. En los escenarios homogéneos y heterogéneos, comparamos el protocolo respecto a mecanismos de descubrimiento distribuidos como el modo *pull*, *push* y SLP. En escenarios con un dispositivo fijo, añadimos además mecanismos de descubrimiento que hacen uso de directorios.

- Escenarios homogéneos.

En escenarios homogéneos, en los que todos los dispositivos tienen el mismo tiempo de disponibilidad, se obtiene que las prestaciones de PDP en cuanto a número de mensajes están muy por debajo de los protocolos tipo *pull* como SLP, aproximadamente un 80 %, y que es sólo comparable con un modo *push* con una baja frecuencia de anuncios. En cuanto a la tasa de servicios descubiertos y servicios falsos, PDP se aproxima a las obtenidas en los modos *pull*, es decir, muy próximas al 100 % y al 0 %, respectivamente, mientras que en el modo *push* con una baja frecuencia de anuncios, la tasa de servicios descubiertos es menor.

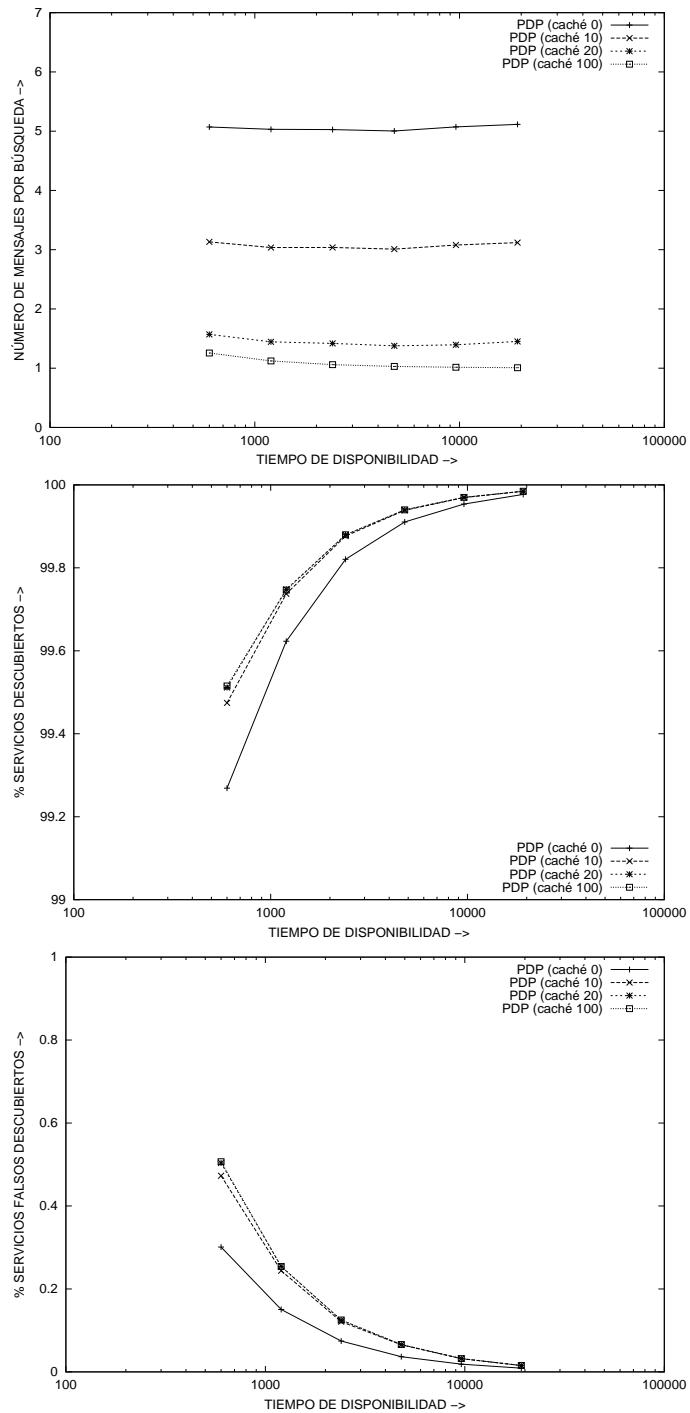


Figura 1: Prestaciones de PDP respecto al tiempo de disponibilidad para cachés de tamaños 0, 10, 20 y 100.

- Escenarios heterogéneos.

En escenarios heterogéneos, en los que existe un porcentaje de dispositivos con distintos tiempos de disponibilidad, las prestaciones de PDP respecto a los otros protocolos se mantienen respecto a las obtenidas en escenarios homogéneos.

La principal ventaja de PDP en estos entornos, es que los dispositivos con mayor tiempo de disponibilidad son los que responden a un mayor número de peticiones, lo que permite que los dispositivos más limitados y por lo tanto, con mayores restricciones de consumo energético, realicen menos transmisiones.

Por ejemplo, en un escenario con 40 dispositivos con cinco tiempos de disponibilidad distintos: 500, 2500, 4500, 6500 y 9500 segundos, en el que el porcentaje de dispositivos de cada tipo es uniforme, por lo tanto un 20%, los dispositivos con tiempo de disponibilidad de 9500 segundos, porcentualmente responden a casi el 50% de los mensajes de búsqueda.

- Escenarios con un dispositivo fijo.

En estos escenarios comparamos el protocolo con mecanismos de descubrimiento distribuidos y centralizados, como SLP con directorio o un directorio teórico. Los resultados obtenidos muestran que PDP consigue disminuir el número de mensajes por búsqueda incluso respecto a las soluciones centralizadas.

- Soporte a aplicaciones tipo “buscador”

Hemos comparado las prestaciones de PDP respecto a mecanismos de descubrimiento que dan soporte a aplicaciones tipo buscador, como son SLP y SSDP. Los resultados obtenidos son mucho más favorables a PDP en cuanto a número de mensajes, ya que reduce su valor en aproximadamente un 97% respecto a SLP y a un 95% respecto a SSDP, manteniéndose las tasas de servicios descubiertos y servicios falsos obtenidas.

En la Figura 2 se muestran las prestaciones de PDP en un entorno heterogéneo.

Una de las principales ventajas de PDP, se observa en la Figura 3 y es que los dispositivos con mayor tiempo de disponibilidad, menos limitados, responden a más mensajes de búsqueda que los de menor tiempo de disponibilidad, más limitado. Si el retardo para responder a un mensaje se calculase independientemente del tiempo de disponibilidad, el porcentaje de mensajes de respuesta se distribuiría de forma uniforme entre los diferentes tipos de dispositivos, de tal forma, que los dispositivos con menores tiempos de disponibilidad responderían el mismo porcentaje de mensajes de búsqueda que los dispositivos con mayores tiempos de disponibilidad. Observar que la suma de los porcentajes obtenidos es aproximadamente del 70%, esto es así, porque en PDP algunas peticiones de búsqueda no generan mensajes de repuesta<sup>1</sup>, por lo tanto los dispositivos con un tiempo de disponibilidad de 9500 segundos, porcentualmente, responden a casi el 50% de las peticiones de búsqueda.

También se observa en la gráfica, que los dispositivos con menor tiempo de disponibilidad responden más que los que tienen valores intermedios, este resultado era esperable, ya que al cambiar continuamente de red, en cada nuevo entorno tienen que responder a peticiones de sus propios servicios para darlos a conocer, ya que el resto de los dispositivos que existen a su alrededor todavía no los tienen almacenados en su cachés.

## 7. Implementación de referencia de PDP en J2ME.

Para validar el requisito impuesto de que el protocolo sea simple y poco costoso computacionalmente, hemos llevado a cabo una implementación del protocolo empleando el

---

<sup>1</sup>La lista de servicios conocidos incluidos en el mensaje de petición está actualizada.

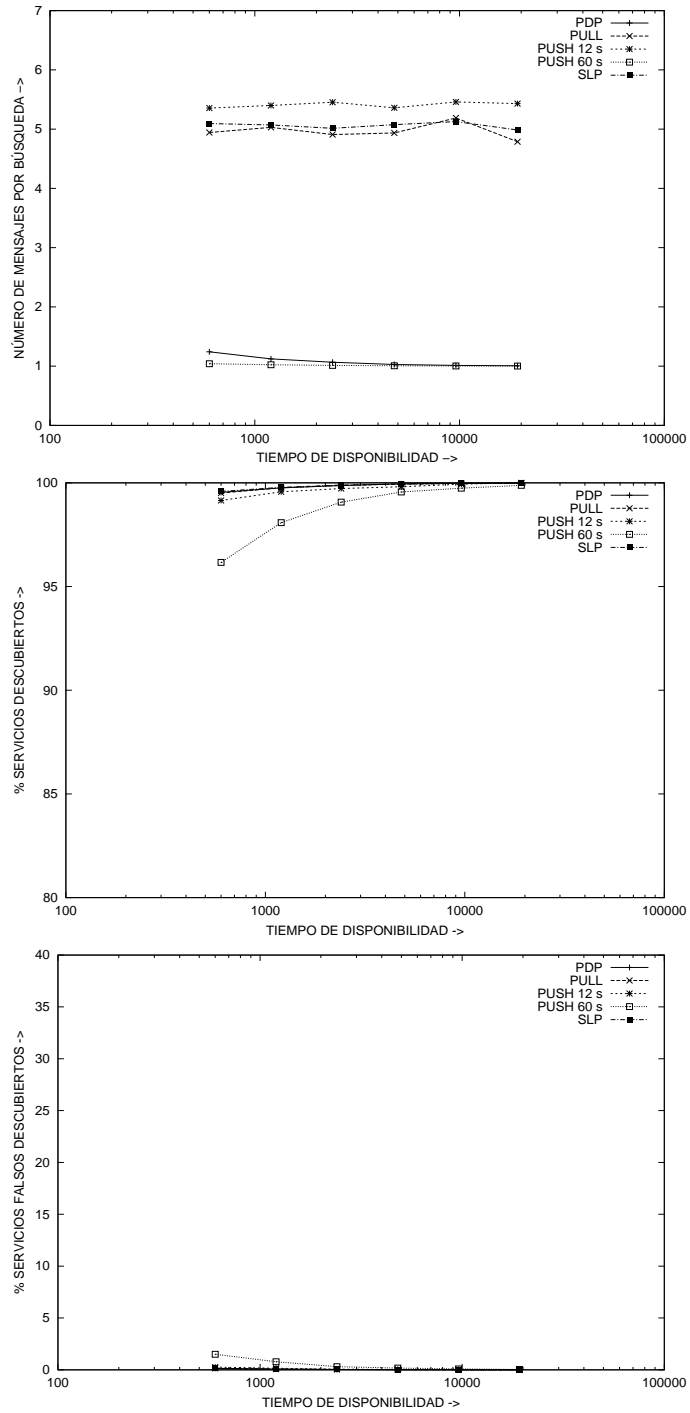


Figura 2: Prestaciones de PDP en un escenario heterogéneo.

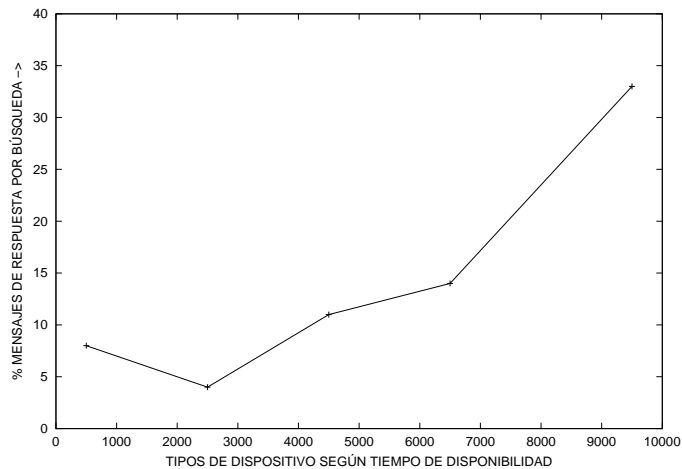


Figura 3: Porcentaje de mensajes de respuesta transmitidos por búsqueda respecto a tipos de dispositivos (según su tiempo de disponibilidad) en un escenario heterogéneo.

lenguaje de programación J2ME en concreto empleando la máquina virtual J9 desarrollada por IBM <sup>2</sup> y sobre el Personal Profile para tener soporte multicast. El ejecutable ocupa 22 KB sin emplear ninguna técnica para optimizar su tamaño y se ha probado satisfactoriamente en un Pocket PC.

También se ha realizado una implementación de PDP en el simulador de red Network Simulator<sup>3</sup> ns-2.

## 8. Adaptación de la especificaciones FIPA a entornos ad-hoc.

En esta tesis, se propone emplear como tecnología middleware para el desarrollo de servicios en entornos ubicuos el paradigma de agentes, justificándose la validez de esta aproximación, apoyada en la literatura por otros proyectos e iniciativas.

Uno de los objetivos marcados es que las contribuciones realizadas en esta temática estuvieran basadas en las especificaciones FIPA, estándares de facto en agentes en la actualidad. Para ello realizamos un estudio detallado de los servicios definidos en el modelo de referencia FIPA y propusimos las siguientes modificaciones:

- En cuanto al servicio de páginas amarillas, DF, proponemos eliminar la federación de DFs como mecanismo para descubrir agentes en plataformas remotas. Como mecanismo alternativo proponemos la introducción de un agente, el SDA, que emplea el DF para realizar búsquedas en redes ad-hoc. A su vez el SDA emplea un sistema de descubrimiento de servicios genérico, que después de analizar diversas alternativas, hemos propuesto que fuese el PDP.

Esta propuesta se ha convertido en la contribución más importante en esta temática.

- En cuanto al AMS, en una primera aproximación, reducimos su funcionalidad a la gestión de agentes locales a la plataforma y eliminamos el servicio de páginas blancas.
- En cuanto al MTS, en una primera aproximación, proponemos que se utilice el MTP estándar HTTP, por ser un protocolo sencillo, fácil de implementar en dispositivos limitados y del que ya existe una especificación FIPA.

<sup>2</sup><http://www-306.ibm.com/software/wireless/wssd/>

<sup>3</sup><http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

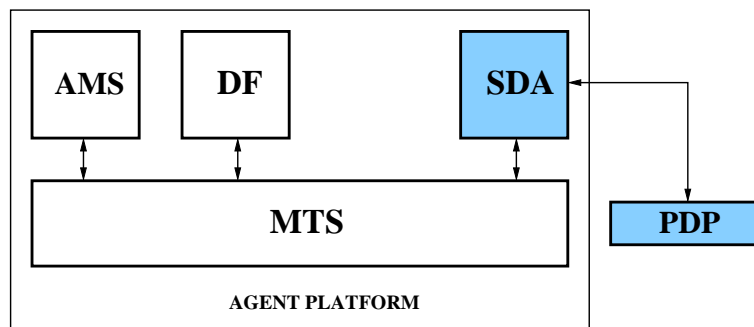


Figura 4: Propuesta de arquitectura para FIPA Ad-hoc.

En la Figura 4 se muestra la arquitectura propuesta para FIPA Ad-Hoc.

### 9. Participación en el comité técnico FIPA Ad-hoc.

Las propuestas realizadas en cuanto a la adaptación de las especificaciones FIPA a entornos ad-hoc, han sido llevadas al comité técnico del FIPA Ad-hoc, realizando las siguientes contribuciones:

- Respuesta al Call For Technology FIPA Ad-hoc, donde exponíamos nuestras primeras ideas sobre la adaptación del servicio de páginas amarillas a entornos ad-hoc. Este documento se encuentra en <http://www.fipa.org/docs/input/f-in-00063/>.
- Invitación a FIPA 26 celebrado en Helsinki para exponer ante el comité técnico nuestras contribuciones, para ello realizamos un documento más detallado que se encuentra en <http://www.fipa.org/docs/input/f-in-00070/>.
- Contribuciones al White Paper: *Agents in Ad-hoc environments*, escrito con el objetivo de realizar un estudio sobre las diferentes alternativas propuestas y un estado del arte en las diferentes tecnologías existentes para el descubrimiento de servicios. En él se incluye parte de nuestro estudio realizado sobre algunos protocolos de descubrimiento de servicios, entre ellos el propuesto por nosotros, PDP, y también algunas consideraciones sobre los requisitos que debe verificar la propuesta realizada. Este documento se encuentra en <http://www.fipa.org/docs/input/f-in-00068/f-in-00068A.htm>.
- Contribuciones a las especificaciones para descubrimiento de agentes en entornos ad-hoc, que se están discutiendo en la actualidad.

### 10. Estudio de la implementación de plataformas de agentes en dispositivos limitados con J2ME.

Junto al diseño de la adaptación de las especificaciones de FIPA, hemos llevado a cabo una serie de desarrollos, con el objetivo de implementar la plataforma de agentes en dispositivos reales:

- Implementación del perfil TAgentsP, que complementa al perfil estándar MIDP, pero que incluye soporte a:
  - Serialización.
  - Implementación de un servidor HTTP, para basar la comunicación de agentes y su migración en el protocolo HTTP.

- Implementación de una plataforma de agentes según nuestra propuesta para FIPA Ad-hoc, basada en la modificación de la plataforma LEAP. Este desarrollo se está llevando a cabo en la actualidad tomando como base el perfil anterior.

#### 1.4. Conclusiones y aplicación práctica

En esta tesis doctoral se ha contribuido a la definición de tecnologías middleware para el desarrollo de nuevos servicios en entornos de computación ubicua. Inicialmente nuestra investigación se centró en la adaptación de la tecnología de agentes para utilizarla como middleware para el desarrollo de estos nuevos servicios. Su análisis basado en los estándares FIPA, nos llevó a descubrir y a abordar un nuevo problema, que fue el diseño de un protocolo de descubrimiento de servicios adaptado a las restricciones que imponen los entornos ubicuos. Los resultados obtenidos se aplicaron al problema inicial, en concreto a la adaptación del servicio de páginas amarillas definido en FIPA, denominado Directory Facilitator.

Las contribuciones realizadas en esta tesis doctoral tienen un gran interés práctico, ya que a día de hoy los usuarios demandan una mayor “transparencia” de la tecnología, que permitirá que puedan interactuar con los nuevos entornos inteligentes que le rodean sin necesidad de configuraciones previas. En este sentido, la propuesta de un protocolo de descubrimiento de servicios, como PDP, que además de adaptarse al dinamismo de estos entornos, minimiza el consumo energético de los dispositivos móviles, nos permitirá que la movilidad de los usuarios sea una realidad y además, que la tecnología llegue a un mayor número de usuarios sobre todo a aquellos que no tienen los conocimientos técnicos adecuados para reconfigurar sus dispositivos cada vez que se cambian de entorno.



## 2. Datos de la autora

**Nombre:** M<sup>a</sup> Celeste Campo Vázquez

### 3. Datos de la tesis doctoral

<b>Título:</b>	Tecnologías middleware para el desarrollo de servicios en entornos de computación ubicua
<b>Director:</b>	Dr. Andrés Marín López
<b>Departamento:</b>	Departamento de Ingeniería Telemática. Universidad Carlos III de Madrid
<b>Fecha de la lectura:</b>	7 de Mayo de 2004
<b>Calificación:</b>	Sobresaliente Cum Laude por unanimidad del tribunal

## 4. Relación cronológica de publicaciones y otros méritos

Se incluyen a continuación las publicaciones relacionadas exclusivamente con la tesis doctoral, para ver un listado completo de todas las publicaciones de la autora: <http://www.it.uc3m.es/celeste/papers/papers.html>

### 4.1. Publicaciones Internacionales

- “PDP and GSDL: A New Service Discovery Middleware to Support Spontaneous Interactions in Pervasive Systems”. C. Campo, M. Muñoz, J.C. Perea, A. Marín, C. García-Rubio. In IEEE Middleware Support for Pervasive Computing (PerWare 2005) at the 3rd IEEE Conference on Pervasive Computing (PerCom 2005). March 8, 2005. (To appear).
- “Design of a FIPA compliant agent platform for limited devices”. Guillermo Díez-Andino Sancho, Rosa M García Rioja, C. Campo. MATA 2003 5th International Workshop on Mobile Agents for Telecommunications Applications, Morocco, October 8-10, 2003. Lecture Notes in Computer Science 2881. ISSN 0302-9743.
- “SPDP: A Secure Service Discovery Protocol for Ad-hoc Networks”. F. Almenárez, C. Campo. EUNICE 2003 9th Open European Summer School and IFIP Workshop on Next Generation Networks. Hungary, Budapest - Balatonfüred 8-10 September 2003. ISBN: 963-421-576-9.
- “TAgentsP y PDP: propuestas para una plataforma de agentes en computación ubicua”. C. Campo, C. García-Rubio, F. Almenárez, A. Marín, and C. Delgado. In Segundo Congreso Iberoamericano de Telemática CITA 2001, Mérida, Venezuela. ISBN 98023721X. Septiembre 2002.
- “Service Discovery in Pervasive Multi-Agent Systems”. C. Campo, A. Marín, C. García-Rubio, P.T. Breuer . In Tim Finin and Zakaria Maamar, editors, AAMAS Workshop on Ubiquitous Agents on embedded, wearable, and mobile agents, Bologna, Italy. July 2002.

### 4.2. Publicaciones Nacionales

- “Mecanismos de serialización J2ME”. C. Campo, Rosa M García Rioja, Guillermo Díez-Andino Sancho. I Congreso JavaHispano, Leganés (Madrid). 22 y 23 de Octubre de 2003. ISBN 84-688-8080-0.
- “Servidor HTTP para J2ME”. Guillermo Díez-Andino Sancho, C. Campo, Rosa M García Rioja. I Congreso JavaHispano, Leganés (Madrid). 22 y 23 de Octubre de 2003. ISBN 84-688-8080-0.
- “Diseño de una plataforma de agentes compatible con FIPA para dispositivos limitados”. Guillermo Díez-Andino Sancho, Rosa M García Rioja, C. Campo. IV Jornadas de Ingeniería Telemática. JITEL 2003. Gran Canaria 15-17 de Septiembre 2003. ISBN: 84-96131-38-6.
- “Agentes móviles en computación ubicua”. C. Campo. In Ignacio Aedo Cuevas, Paloma Díaz Pérez, and Camino Fernández Llamas, editors, Actas del Tercer Congreso Interacción Persona-Ordenador. Interacción 2002, pages 215-219, Leganés. Mayo 2002. ISBN 84-607-4501-5.

- “Plataformas de Agentes en Terminales de Telefonía Móvil”. C. Campo, C. García-Rubio, A. Marín, C. Delgado. XI Jornadas de I+D en Telecomunicaciones. Madrid, 21-22 de Noviembre de 2001.
- “Tecnología de agentes en los sistemas de telefonía móvil”. C. Campo, C. García-Rubio, A. Marín, C. Delgado. III Jornadas de Ingeniería Telemática. JITEL 2001. Barcelona, 19-21 Septiembre 2001. ISBN 84-7653-783-2.

### 4.3. Contribuciones al grupo de estandarización FIPA Ad-Hoc

La autora de la tesis ha participado de forma activa en el grupo de estandarización FIPA Ad-Hoc, y ha contribuido con los siguientes documentos:

- “Distributed Directory Facilitator: A proposal for the FIPA Ad-hoc First CFT”. (f-in-00063). C. Campo, A. Marín, C. García-Rubio, and P.T. Breuer. FIPA Ad-hoc Technical Committee. June 2002. <http://www.fipa.org/docs/input/f-in-00063/>
- “Directory Facilitator and Service Discovery Agent” (f-in-00070). C. Campo. FIPA Ad-hoc. Technical Committee. July 2002. <http://www.fipa.org/docs/input/f-in-00070/>

Además ha contribuido al documento de trabajo:

- “Agents in Ad Hoc Environments. A Whitepaper.” Working Group FIPA Ad-Hoc. 2002. <http://www.fipa.org/docs/input/f-in-00068/f-in-00068A.htm>.

### 4.4. Proyectos de investigación relacionados

- EasyWireless. Programa EUREKA - Cluster ITEA. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Enero 2004 - Marzo 2005.
- UBISEC: Ubiquitous Networks with a Secure Provision of Services, and Context Delivery. Sixth Framework Programme. Contract no. 506929. Enero 2004 - Diciembre 2005.
- Trust-Es. Programa EUREKA - Cluster MEDEA +. Ministerio de Ciencia y Tecnología. Enero 2004 - Marzo 2005.
- Everyware: servicios personalizados en un entorno de computación ubicua. MCyT TIC2003-08995-C02-01. Diciembre 2003 - Diciembre 2006.

### 4.5. Estancias en centros de investigación

Dentro del marco del proyecto UBISEC y relacionado con las contribuciones a protocolos de descubrimiento de servicios en entornos ubicuos, la autora ha realizado una estancia de un mes en el centro de investigación INRIA Rocquencourt en Francia en el grupo de investigación Arles, liderado por Valery Issarny (<http://www-rocq.inria.fr/arles/>).

## 4.6. Referencias por parte de otros investigadores

- Se cita el artículo: “*Service Discovery in Pervasive Multi-Agent Systems*”. C. Campo, A. Marín, C. García-Rubio, P.T. Breuer . In Tim Finin and Zakaria Maamar, editors, *AA-MAS Workshop on Ubiquitous Agents on embedded, wearable, and mobile agents, Bologna, Italy. July 2002* en los siguientes artículos:
  1. “An Agent Middleware for Supporting Ambient Intelligence for Healthcare” Marcela Rodríguez, Jesus Favela, Alfredo Preciado and Aurora Vizcaíno. 16th Euroepan Conference on Artificial Intelligence. Valencia (Spain). August 22nd - 27th 2004.
  2. “An Approach for FIPA Agent Service Discovery in Mobile Ad Hoc Environments”. Michael Pirker, Michael Berger and Michael Watzke. Workshop on Agents for Ubiquitous Computing held in conjunction with the 2004 Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. July 20, 2004. Columbia University, New York City.
  3. “Towards a FIPA Approach for Mobile Ad hoc Environments”. Michael Berger, Michael Watzke and Heikki Helin. 8th International Conference on Intelligence in next generation Networks. Bordeaux - France. 31 March - 3 April 2003.
- Se cita el artículo: “*Service Discovery in Pervasive Multi-Agent Systems*”. C. Campo, A. Marín, C. García-Rubio, P.T. Breuer . In Tim Finin and Zakaria Maamar, editors, *AA-MAS Workshop on Ubiquitous Agents on embedded, wearable, and mobile agents, Bologna, Italy. July 2002* en los siguientes trabajos de investigación:
  1. “Reconfigurable Application Networks through Peer Discovery and Handovers”. Roberto Gioacchino Cascella. Master of Science Thesis. Royal Institute of Technology (KTH), Dept. of Microelectronics and Information Technology Stockholm, Sweden - Wireless Center, Research Center at KTH Stockholm, Sweden - Politecnico di Torino, Dept. of Telecommunication Turin, Italy. June 2003
  2. “Dynamic Software Updates within Ad-Hoc Connected Environment”. Adrian Ryan. PhD Research Proposal. School of Network Computing - Monas Huniversity. April 2003.
- Se cita el artículo “*SPDP: A Secure Service Discovery Protocol for Ad-hoc Networks*”. F. Almenárez, C. Campo. *EUNICE 2003 9th Open European Summer School and IFIP Workshop on Next Generation Networks. Hungary, Budapest - Balatonfüred 8-10 September 2003. ISBN: 963-421-576-9.* en el siguiente artículo:
  1. “Secure Overlay for Service Centric Wireless Sensor Networks” Hans-Joachim Hof, Erik-Oliver Blaß, Martina Zitterbart. 1st European Workshop on Security in Ad-Hoc and Sensor Networks (ESAS 2004). 5-6. August, 2004. Heidelberg, Germany.
- Se cita el artículo “*SPDP: A Secure Service Discovery Protocol for Ad-hoc Networks*”. F. Almenárez, C. Campo. *EUNICE 2003 9th Open European Summer School and IFIP Workshop on Next Generation Networks. Hungary, Budapest - Balatonfüred 8-10 September 2003. ISBN: 963-421-576-9.* en el siguiente trabajo de investigación:
  1. “Sicheres Service Discovery in Mobile Ad-Hoc Networks”. Prof. Dr. C. Eckert. Technische Universität Darmstadt Fachbereich Informatik Fachgebiet Sicherheit in der Informationstechnik. 2004

#### **4.7. Becas**

La realización de la tesis doctoral estuvo parcialmente financiada por una beca doctoral de la Cátedra Nokia-Universidad Carlos III de Madrid.

#### **4.8. Información adicional**

Además de la memoria de la tesis, se ha construido una página web en la que se centraliza toda la información relacionada con la misma: <http://www.it.uc3m.es/celeste/tesis/>.