

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

Departamento de Informática y Automática



VNiVERSiDAD
D SALAMANCA

TESIS DOCTORAL Mención Internacional

Embedding smart software agents in resource
constrained Internet of Things devices

Autor:

Daniel Hernández de la Iglesia

Directores:

Dr. Juan Francisco De Paz Santana

Dr. Gabriel Villarrubia González

2018

Departamento de Informática y Automática
Facultad de Ciencias
Universidad de Salamanca

AUTOR:

Daniel Hernández de la Iglesia

DIRECTORES:

Dr. Juan Francisco De Paz Santana

Dr. Gabriel Villarrubia González

2018

A man provided with paper, pencil, and rubber, and subject to strict discipline, is in effect a universal machine.

(Alan Turing, 1948)

Agradecimientos

A lo largo del tiempo empleado para el desarrollo de este trabajo han sido muchas las personas que me han acompañado y de quienes he podido aprender. A todos ellos deseo expresarles mi agradecimiento:

En primer lugar, a Fran y Gabriel por acompañarme desde el primer día que entré a formar parte del grupo de investigación, por sus consejos y su atención permanente en cada etapa de este viaje. A Javier Bajo, por su ayuda y consejo durante toda esta etapa.

A todos mis compañeros del grupo de investigación, a los que están y a los que se fueron. Muchas gracias por todo lo que he aprendido de vosotros tanto a nivel profesional como a nivel personal.

A mis compañeros de doctorado Loza y Barri con quienes tantos momentos he tenido la suerte de compartir a lo largo de estos años.

A mi familia, a mis hermanos Alejandro y Begoña por ayudarme en todo lo que está en sus manos. Gracias por vuestro apoyo. A mis padres José Luis y Begoña, por su lucha, trabajo y constante sacrificio por brindarnos siempre lo mejor, por inculcarnos el afán de superación y legarnos la más permanente de las herencias: la educación. A Bea, por su cariño, su paciencia y su apoyo incondicional que nunca me ha faltado.

A todos aquellos que han contribuido a que este trabajo llegara a buen término, mi más sincera gratitud.

Salamanca, Junio de 2018

Índice

1.	Introducción.....	23
1.1.	Motivación.....	26
1.2.	Metodología de la investigación.....	27
1.3.	Hipótesis y objetivos.....	29
1.4.	Estructura de la memoria.....	29
2.	Estado del Arte.....	33
2.1.	Agentes y sistemas multi-agentes.....	34
2.1.1.	Concepto de agente.....	34
2.1.2.	Sistemas multi-agentes.....	35
2.1.3.	Agente Móvil.....	36
2.2.	Internet of Things e Internet of Agents.....	37
2.3.	Dispositivos hardware limitados.....	39
2.4.	Arquitecturas multi-agentes e IoT.....	44
2.4.1.	Antecedentes previos disponibles en la literatura.....	44
2.4.2.	Agentes software embebidos en dispositivos hardware.....	56
3.	Arquitectura propuesta.....	61
3.1.	Motivación.....	62
3.2.	Descripción de la arquitectura.....	63
3.3.	Middleware para dispositivos tipo A.....	66
3.3.1.	Configuración previa de los dispositivos.....	67
3.3.2.	Registro del dispositivo en el sistema.....	67
3.3.3.	Notificación de los servicios del dispositivo.....	68
3.3.4.	Protocolo de comunicación sobre MQTT.....	69
3.4.	Gateway para dispositivos tipo B.....	72
3.4.1.	Agente móvil como Gateway.....	73

3.4.2.	Clonación de agente móvil.....	74
3.4.3.	Migración de agente móvil.....	74
3.5.	Arquitectura Multi-Agente para IoT	75
3.5.1.	Descripción de la arquitectura	75
3.5.2.	Capa de seguridad	80
3.5.3.	Capa de gestión de representantes.....	81
3.5.4.	Capa de control	82
3.5.5.	Capa de servicios	84
3.5.6.	Análisis	85
3.5.7.	Diseño	87
3.5.8.	Modelado AUML	88
4.	Caso de estudio.....	97
4.1.	Introducción al caso de estudio.....	97
4.2.	Bicicleta eléctrica asistida.....	101
4.3.	Sistema propuesto.....	102
4.3.1.	División del recorrido en segmentos.....	108
4.3.2.	Cálculo de consumo	110
4.3.3.	Algoritmo de optimización.....	112
4.4.	Implantación del caso de estudio	116
5.	Conclusiones y líneas de trabajo futuras.....	125
5.1.	Contribuciones de la investigación.....	127
5.2.	Líneas de trabajo futuras	128
6.	Research Overview	131
6.1.	Introduction.....	131
6.1.1.	Motivation	132
6.1.2.	Hypothesis and objectives.....	132
6.2.	State of the Art	133
6.2.1.	Agent concept.....	133

6.2.2.	Multi-agent system	134
6.2.3.	Mobile Agent	134
6.2.4.	Internet of Things and Internet of Agents.....	135
6.2.5.	Resource constrained hardware devices	135
6.2.6.	Multi-agent architectures and IoT.....	136
6.3.	Proposed architecture	137
6.3.1.	Description of the architecture	138
6.3.2.	Middleware for type A devices	140
6.3.3.	Gateway for type B devices	141
6.3.4.	Multi-Agent architecture for IoT.....	143
6.3.5.	Analysis	150
6.3.6.	Design	151
6.3.7.	Modeling with AUML.....	151
6.4.	Case of study	152
6.4.1.	Introduction to the case study.....	152
6.4.2.	Electric bicycle assisted	153
6.4.3.	Proposed system	154
6.4.4.	Route Segmentation.....	158
6.4.5.	Energy Consumption Calculation	160
6.4.6.	Optimization Algorithm	162
6.4.7.	Implementation of the case study	165
6.5.	Conclusions and future lines of work	170
6.5.1.	Future lines of work.....	172
7.	Referencias.....	175
8.	Siglas y acrónimos	189
	ANEXO I.....	191
	ANEXO II	237

Lista de figuras

Figura 1: Modelo de agente	35
Figura 2: Arquitectura de un agente móvil.....	37
Figura 3: Arquitectura básica de un dispositivo IoT	40
Figura 4: Placas hardware; (a) <i>Arduino</i> ; (b) <i>Raspberry Pi</i>	41
Figura 5: Comparativa de tamaño entre un dispositivo WeMos (a) y un Arduino UNO (b).....	43
Figura 6: Ejemplo de agente embebido en un dispositivo físico.....	62
Figura 7: Diagrama general del sistema propuesto	65
Figura 8: Secuencia de registro de un dispositivo en el sistema.....	68
Figura 9: Comunicación entre agente móvil y arquitectura IoT	73
Figura 10: Clonación de agente móvil.....	74
Figura 11: Migración de agente móvil	75
Figura 12: Acceso de un agente externo en una sociedad semi-abierta.	77
Figura 13: Creación de un agente representante en una sociedad semi-cerrada.....	78
Figura 14: Esquema general para la arquitectura propuesta	79
Figura 15: Integración de Gaia + AUML	89
Figura 16: Diagrama de clases Agente Coordinador Seguridad	90
Figura 17: Diagrama de secuencias para la validación de mensajes externos	91
Figura 18: Diagrama de estados para el agente con rol Coordinador de seguridad	92
Figura 19: Diagrama de protocolos entre un agente externo y el agente coordinado de seguridad	93
Figura 20: Ejemplo de tres controles de asistencia comerciales: (a) Bafang; (b) ebikemotion; (c) BionX.	102

Figura 21: Esquema general del sistema propuesto	103
Figura 22: Capa de servicios para el caso de estudio.....	104
Figura 23: Red de sensores desplegada sobre la e-bike	105
Figura 24: Esquema de conexión de los dispositivos hardware	107
Figura 25: Dispositivo Hub bluetooth.....	107
Figura 26: Segmentación de una ruta.....	108
Figura 27: Algoritmo de segmentación de rutas	109
Figura 28: Ejemplo de segmentación de ruta.....	110
Figura 29: Captura de pantalla del backend de ebikemotion	118
Figura 30: Perfil de la ruta.....	118
Figura 31: División del recorrido en segmentos	119
Figura 32: Ubicación de los segmentos sobre google maps	119
Figura 33: Función objetivo.....	120
Figura 34: Consumo de energía antes y después de la optimización	122

Autorización de los directores de Tesis



VNIVERSIDAD
D SALAMANCA

CAMPUS OF INTERNATIONAL EXCELLENCE

Departamento de Informática y Automática

Facultad de Ciencias

Plaza de la Merced s/n 37008, Salamanca

Dr. **Juan Francisco de Paz Santana**, profesor Titular de Universidad del Departamento de Informática y Automática de la Universidad de Salamanca y el Dr. **Gabriel Villarrubia González**, profesor Ayudante Doctor del Departamento de Informática y Automática de la Universidad de Salamanca

HACEN CONSTAR:

Que como directores de la tesis doctoral de **D. Daniel Hernández de la Iglesia** con DNI 70900083F autorizan a presentar la tesis doctoral titulada “*Embedding smart software agents in resource constrained Internet of Things devices*”.

Dr. Juan F. de Paz Santana

Dr. Gabriel Villarrubia González

En Salamanca, 25 de Mayo de 2018

Abstract

Sensorization systems in combination with treatment tools and intelligent management of information, constitute the basis on which to build cities and urban environments of the future. Progress in the research and development of these new and smart scenarios, it is essential to achieve the objectives of efficiency, integration, sustainability and quality of life of the people that live in our cities. To reach these objectives, it is essential to investigate the development of cheaper, accurate and intelligent hardware devices, which will form the basis of the intelligent environments of the future. Due to the forecasts for the next few years, the number of devices connected to the Internet will be up to 7 devices per person on the planet. This amount of devices will be associated with an avalanche of data that may have to be handled and stored by the data processing centers. For all these reasons, advance in the design of tools for intelligent data processing, as well as in new sensing devices, it is a task of vital importance for the future viability of the connected environments.

Thus, in this thesis it is proposed a system based on intelligent agents embedded in wireless devices with resource constrained capabilities (memory and computing capacity limited), for Internet environments of Things (IoT) where it can be possible an intelligent data processing. In particular, it presents an original multi-agent architecture focused on the management of the data generated by the IoT devices, on which to build a layer of services tailored to the different needs of different environments where it will be possible to deploy the sensing system.

With the objective to validate the proposed system, it has designed a case of study based on sensor networks in an IoT efficiency through the optimization of battery power consumption in an electric bike.

Resumen

Los sistemas de sensorización en combinación con herramientas de tratamiento y gestión inteligente de información, constituyen la base sobre la que se construirán las ciudades y entornos urbanos del futuro. Avanzar en la investigación y desarrollo de estos nuevos escenarios inteligentes, es fundamental a la hora de alcanzar los objetivos de eficiencia, integración, sostenibilidad y calidad de vida de las personas que habitan nuestras ciudades. Para alcanzar estos objetivos, es fundamental indagar en el desarrollo de dispositivos hardware más baratos, precisos e inteligentes que serán la base de los entornos inteligentes del futuro. Debido a las previsiones realizadas para los próximos años, la cantidad de dispositivos conectados a Internet será de hasta 7 dispositivos por cada persona en el planeta. Esta avalancha de dispositivos llevará asociada una avalancha de datos que tendrán que ser manejados y almacenados por los centros de procesamiento de datos. Por todo ello, avanzar en el diseño de herramientas para el procesamiento de datos inteligente, así como en nuevos dispositivos de sensorización, es una tarea de vital importancia para la viabilidad futura de los entornos conectados.

Por ello, en este trabajo de tesis doctoral se propone un sistema inteligente basado en agentes embebidos en dispositivos inalámbricos con capacidades reducidas (memoria y capacidad de cómputo limitada), para entornos del Internet de las cosas (IoT) donde sea posible un procesamiento inteligente de datos. En particular, se presenta una novedosa arquitectura multi-agente enfocada a la gestión de los datos generados por los dispositivos IoT, sobre la que construir una capa de servicios adaptada a las diferentes necesidades de los distintos entornos donde será posible desplegar el sistema de sensorización.

Con el objetivo de validar el sistema propuesto, se ha diseñado un caso de estudio basado en redes de sensores en un entorno IoT de eficiencia energética a través de la optimización del consumo de batería de una bicicleta eléctrica.

CAPÍTULO I.

Introducción

1. Introducción

Este primer capítulo sirve como introducción del presente documento, presentando la problemática que se aborda en el trabajo y la motivación principal de su desarrollo. También se definen los retos y objetivos actuales en entornos IoT, así como las hipótesis y objetivos concretos de este trabajo de investigación.

En la actualidad vivimos en un mundo global donde personas y objetos están cada día más interconectados, independientemente del lugar geográfico donde se encuentren. Edificios, ciudades, vehículos, Smartphones y otros dispositivos se encuentran ya equipados con sensores digitales capaces de registrar grandes cantidades de datos (Han, Liang, and Zhang 2015). Los sistemas de sensorización representan un elemento fundamental en la era de la información en la que vivimos. Gracias a ellos se puede medir el mundo real y obtener valores precisos que antes era imposible medir. Estos nuevos datos han supuesto una revolución en la forma en la que los usuarios interactúan con el entorno. En gran medida, este avance ha sido motivado por el precio de los sensores que ha ido disminuyendo durante los últimos diez años. Las estimaciones indican que los procesos de fabricación y diseño de sensores se abaratarán aproximadamente un 5% por año en la próxima década (Deloitte 2017). Esta caída prolongada de precios supondrá un ahorro importante a la hora de instalar sensores a gran escala en distintos entornos como, por ejemplo, los necesarios para conectar una gran cantidad de dispositivos en una “ciudad inteligente”.

El término “ciudad inteligente” o “Smart City”, se puede resumir como el uso de las TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación) y otras nuevas tecnologías para mejorar la sostenibilidad, la eficiencia, la calidad de los servicios públicos, mejorando el nivel de vida de los ciudadanos. Una ciudad inteligente constituye, por lo tanto, un ecosistema cohesivo en el que diversos servicios inteligentes pueden interactuar de manera efectiva y no como un

conjunto de soluciones aisladas. Algunos autores proponen distintas definiciones del término “Smart City” en la literatura actual:

- “Se define Smart City como una ciudad avanzada de alta tecnología que conecta personas, información y elementos de la ciudad utilizando nuevas tecnologías para crear una ciudad sostenible y más ecológica, un comercio competitivo e innovador y una mayor calidad de vida.” (Bakıcı, Almirall, and Wareham 2013)
- “Ser una ciudad inteligente significa utilizar toda la tecnología y los recursos disponibles de una manera inteligente y coordinada para desarrollar centros urbanos que sean a la vez integrados, habitables y sostenibles.” (Barrionuevo, Berrone, and Ricart 2012)
- “Una ciudad es inteligente cuando las inversiones en capital humano y social y la infraestructura de comunicación tradicional (transporte) y moderna (TIC) alimentan el crecimiento económico sostenible y una alta calidad de vida, con una gestión racional de los recursos naturales, a través del gobierno participativo” (Caragliu, Del Bo, and Nijkamp 2011)
- “El uso de tecnologías de computación inteligente para hacer que los componentes y servicios de infraestructura críticos de una ciudad - que incluyen la administración de la ciudad, educación, salud, seguridad pública, bienes raíces, transporte y servicios públicos- sean más inteligentes, interconectados y eficientes.” (Washburn and Sindhu 2009)

La ciudad, por tanto, desempeña un papel fundamental a la hora de proporcionar las infraestructuras básicas y el acceso a los datos necesarios para gestionar estos nuevos servicios inteligentes (De Paz et al. 2016). Es posible decir que la ciudad puede trabajar de manera activa en la creación de un ecosistema del que se puedan beneficiar los ciudadanos, las empresas y la sociedad en general. Las cuatro definiciones anteriores de “Smart City” resaltan las diferencias que distintos autores tienen sobre el concepto de ciudad inteligente. Para (Bakıcı, Almirall, and Wareham 2013) la alta tecnología está encargada de diseñar ciudades más ecológicas y sostenibles para los ciudadanos al igual que para (Barrionuevo, Berrone, and Ricart 2012) que resalta la sostenibilidad e integración de los entornos urbanos. Para (Caragliu, Del Bo, and Nijkamp 2011) y (Washburn and Sindhu 2009) las infraestructuras son clave a la hora de definir los servicios inteligentes que deben vertebrar una ciudad avanzada, eficiente y de calidad para sus ciudadanos.

Se asume por tanto que el futuro de nuestras ciudades pasa por realizar una inversión tecnológica en nuevas infraestructuras y plataformas globales que sean la base para el desarrollo de servicios inteligentes. De entre estas tecnologías clave a la hora de diseñar ciudades y entornos avanzados se puede destacar el auge del Internet of Things (IoT), los sistemas de comunicación inalámbrica, el Big Data y los servicios en la nube o Cloud Services. Todos ellos suponen elementos fundamentales a la hora de conceptualizar el futuro más próximo en sistemas inteligentes para entornos urbanos o Smart Cities.

El concepto Internet of Things, es uno de los más utilizados en los últimos años para referirse a todos esos dispositivos conectados que componen entornos inteligentes. Uno de los principales problemas que tienen los entornos IoT es la cantidad de datos que recolectan sus dispositivos y con los cuales, en muchas ocasiones, no se hace nada. Estos datos son generalmente enviados a servidores centrales en la nube donde se procede a su análisis para obtener información derivada o activar ciertos eventos. Por esta razón han surgido conceptos como el Edge Computing (Shi et al. 2016) o el Fog Computing (Patil 2015; Chen, Zhang, and Shi 2017) que buscan cambiar ese comportamiento pasivo de los nodos IoT y convertir a los dispositivos en una parte activa del sistema. Al dotar a estos dispositivos de mecanismos de análisis de datos, se consigue un procesamiento de los datos más cercanos al lugar en el que se crean en vez de ser enviados a través de largos recorridos para que lleguen a centros de datos externos.

Este procesamiento local tiene aún más sentido si se analizan las previsiones de crecimiento para los próximos años en el número de dispositivos conectados a Internet que generan datos. Según el informe (Evans 2011), se espera que para el año 2020 el número de dispositivos conectados supere los 50 billones, lo que supondrá que por cada ciudadano, existirán casi 7 dispositivos conectados y emitiendo datos. Por tanto, es importante que esos datos sean procesados en los propios dispositivos para evitar una saturación de la red, una redundancia innecesaria y un coste en el almacenamiento de datos mayor. Este procesamiento local mejorará en eficiencia al no tener que transmitir todos esos datos a la nube, suponiendo un importante ahorro de costes. Para determinados sectores como la industria, la salud, el transporte, las telecomunicaciones o las finanzas entre otros, el análisis en tiempo real de los datos es una necesidad fundamental que se consigue con un procesamiento más rápido de los datos registrados.

En este trabajo doctoral, se propone el *diseño de un sistema inteligente basado en agentes software embebidos en dispositivos de sensorización inalámbricos limitados computacionalmente*. Gracias a la introducción de estos mecanismos, se consigue dotar de una cierta inteligencia a los dispositivos IoT para conseguir un procesamiento previo de los datos y una mayor eficiencia a la hora de procesar los datos en el propio dispositivo. Todo ello apoyado por un sistema multi-agente central con capacidades para la gestión de los datos. De esta manera, se consigue una mayor seguridad en el tratamiento de la información, una eficiencia y ahorro de costes y una escalabilidad mayor para los sistemas IoT.

1.1. Motivación

Actualmente se cuenta con los recursos tecnológicos, los conocimientos y las capacidades técnicas para llevar a cabo una evolución que sea capaz de mejorar la vida de los ciudadanos en los entornos urbanos actuales. Hay disponible un catálogo de sensores y actuadores de bajo coste con capacidad para ser instalados de manera sencilla en distintos escenarios de nuestra vida diaria. Existen también desarrollos en técnicas de gestión inteligente de la información que permiten obtener, analizar y extraer conocimiento de los datos observados. Gracias a ello se puede localizar y predecir eventos que antes no era posible detectar. Implementar estas técnicas en distintos ámbitos lleva a mejorar y optimizar nuestros recursos. Una de las problemáticas existentes en la actualidad, es la falta de inteligencia implementada sobre los propios dispositivos sensores desplegados. En gran medida, esta carencia viene dada por la limitación de recursos computacionales (memoria, capacidad de cómputo y consumo eléctrico) de estos dispositivos. A pesar de que la industria está cada vez más cerca de desarrollar dispositivos ligeros, eficientes y con altas capacidades, la realidad es que, en este momento, la mayoría de sensores y actuadores disponibles se encuentran limitados computacionalmente. Para lograr una revolución real del mundo analógico a un mundo digital con entornos inteligentes, es necesario incorporar capacidades y mecanismos de inteligencia sobre los dispositivos existentes en el día a día. Al conseguir este objetivo, se conseguirán entornos inteligentes viables tecnológica y económicamente. Por ello, este trabajo de tesis doctoral busca aportar un mecanismo para dotar de inteligencia a estos dispositivos disponibles en la actualidad.

En este trabajo se lleva a cabo un caso de estudio centrado en el transporte alternativo y la eficiencia energética como método de validación del sistema propuesto, y como ejemplo claro de entorno IoT que debe ser implementado de manera masiva en el futuro.

Uno de los principales problemas que presentan las ciudades hoy en día es la gestión del tráfico rodado. Las congestiones, contaminación y falta de seguridad han llevado a los gobiernos de muchas ciudades del mundo a restringir el acceso de las vías principales a vehículos contaminantes. Investigar en el desarrollo de infraestructuras y vehículos más eficientes y menos contaminantes será clave para el futuro a medio plazo. Reduciendo el consumo de combustibles fósiles, se consigue reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera que son las grandes responsables del llamado efecto invernadero y que acarrearán como consecuencia el cambio climático. Al conseguir esta reducción, fomentamos la sostenibilidad en nuestras ciudades, clave para un futuro en el que la demanda energética puede exceder a los recursos energéticos existentes.

1.2. Metodología de la investigación

El proceso de trabajo llevado a cabo durante el desarrollo del trabajo de investigación, se fundamenta en la metodología de *Action Research*. En esta metodología, se identifica y formula el problema a partir de una hipótesis, partiendo de unos conceptos definidos dentro de un modelo cuantitativo de la realidad. Entonces, se realiza una recopilación, organización y análisis de la información, continuando con el diseño de una propuesta enfocada a solucionar el problema. Finalmente, se formulan las conclusiones respectivas tras evaluar los resultados obtenidos de la investigación.

Para seguir esta metodología, es necesario definir una serie de actividades que permitan alcanzar los objetivos planteados, así como demostrar la hipótesis. Las actividades planteadas son las siguientes:

1. **Definición de la problemática:** planteamiento del problema junto con el entorno que lo define para poder establecer los objetivos y la hipótesis de la investigación.
2. **Revisión del estado del arte:** análisis de la problemática y soluciones en entornos similares que se han llevado a cabo por parte de otros investigadores. El proceso de revisión se centrará tanto en las técnicas

aplicadas en análisis de expresión como en las alternativas y métodos para llevar a cabo la planificación automática. La revisión del estado del arte debe ser un proceso continuo a lo largo de la investigación.

3. **Proposición de modelos y validación del cumplimiento de los objetivos a medida que se concretan los diferentes componentes.** Los modelos se descomponen en una serie de componentes para facilitar el proceso de validación y mejorar así el proceso de investigación.
4. **Estudio de los resultados obtenidos** mediante la comparación con otros procedimientos y así determinar si se han alcanzado los objetivos y la hipótesis inicialmente planteada.
5. **Publicación de los resultados obtenidos** a lo largo de la investigación tanto en congresos como en revistas. La publicación en congresos es de gran importancia porque permite la asistencia a conferencias que facilitan el intercambio de ideas de primera mano.

Las actividades anteriores se ejecutan iterativamente a lo largo del proceso de investigación, es por ello por lo que se puede considerar un proceso iterativo e incremental al igual que metodologías usadas en ingeniería del software como el proceso unificado.

Gracias a la aplicación de este método de investigación se ha obtenido un doble objetivo, en primer lugar, generar un beneficio como resultado de la investigación para la implantación en entornos reales. Y, en segundo lugar, generar conocimiento relevante, aplicable a otros ámbitos.

Se ha llevado a cabo la elaboración de diferentes artículos científicos que incluyen distintos casos de estudio aplicando los resultados obtenidos en la fase de investigación. Estos artículos han sido publicados en revistas científicas con factor de impacto en el área de realización la tesis doctoral.

Se han realizado tareas de planificadas a lo largo del tiempo y se han establecido hitos con el objetivo de medir la evolución de estas tareas y realizar acciones correctoras si fuese necesario.

Se han establecido contactos con investigadores nacionales y extranjeros que han proporcionado ideas y nuevos enfoques, enriqueciendo la investigación realizada. Adicionalmente, se ha realizado una estancia de investigación en un centro extranjero con el fin de ampliar los horizontes y disponer de una mayor relación con otros investigadores que se encuentran actualmente trabajando en áreas de investigación similares.

1.3. Hipótesis y objetivos

La **hipótesis** de partida de este trabajo es que es posible diseñar y desarrollar un sistema inteligente basado en agentes embebidos en dispositivos inalámbricos con capacidades reducidas (memoria y capacidad de cómputo limitada), en entornos de Internet de las cosas (IoT). De cara a validar la propuesta, se diseñará un caso de estudio para la gestión de información procedente de una bicicleta eléctrica con el objetivo de optimizar el consumo de energía empleada.

Más concretamente, los objetivos que se perseguirán en este trabajo son:

- Diseño de nuevos mecanismos de representación de agentes inteligentes embebidos en dispositivos limitados computacionalmente capaces de comunicarse con una plataforma de agentes distribuida.
- Diseño de un sistema middleware de control y comunicación el cual permita la comunicación e intercambio de información entre los distintos agentes embebidos y el sistema multi-agente distribuido.
- Diseño de mecanismos de seguridad y confianza para una comunicación segura y estable ente los distintos agentes embebidos y la organización de agentes central.
- Diseño de un agente desplegado en un dispositivo móvil Smartphone que actúe como Gateway entre la plataforma y los agentes embebidos que no dispongan de una interfaz de comunicación directa a Internet.
- Diseño de un caso de estudio a través de agentes inteligentes embebidos para la gestión inteligente de componentes hardware de la bicicleta eléctrica con el objetivo de optimizar la energía empleada en realizar un recorrido.

1.4. Estructura de la memoria

El presente documento, que constituye la memoria del trabajo de investigación realizado, se encuentra organizado de la siguiente forma:

Capítulo I: Este capítulo sirve como introducción del presente documento, presentando la problemática que se aborda en el trabajo. También se definen los retos y objetivos actuales en entornos IoT, así como los objetivos concretos de este trabajo de investigación.

Capítulo II: En este capítulo se describen los principales conceptos a tratar en la presente tesis doctoral. Se detallan términos como agente software y sistema multi-agente, Internet of Things e Internet of Agents y dispositivos hardware limitados computacionalmente. También se presenta un completo estado del arte sobre trabajos que abordan el diseño de arquitecturas multi-agente enfocadas a resolver los principales retos abiertos a la hora de diseñar y gestionar sistemas IoT complejos.

Capítulo III: Una vez analizadas las principales investigaciones que existen en la literatura actual, y tras haber constatado las carencias y necesidades de los sistemas propuestos hasta ahora, se procede en este capítulo a detallar la arquitectura desarrollada que busca dar soluciones a los problemas planteados. En este capítulo, se incluye una descripción completa de cada una de las partes que componen el sistema final diseñado, así como una descripción general del conjunto final de la solución planteada.

Capítulo IV: En este capítulo se presenta el caso de estudio llevado a cabo en un entorno IoT real donde se ha desplegado el sistema propuesto en el capítulo III. Se propone un sistema inteligente de gestión del motor para bicicletas eléctricas que utiliza la información recogida por los diferentes sensores de bajo coste desplegados en una bicicleta eléctrica (e-bike) para optimizar la energía de la batería y el tiempo empleado en realizar un recorrido sin que la experiencia en el usuario se vea afectada.

Capítulo V: En el capítulo V se presentan las principales conclusiones alcanzadas una vez finalizado el trabajo de investigación llevado a cabo en este trabajo de tesis doctoral. Se enumeran también las principales contribuciones alcanzadas y, por último, se plantean las diferentes líneas de trabajo futuras que serán llevadas a cabo partiendo del trabajo realizado.

Capítulo VI: En este capítulo se presenta un resumen del trabajo en inglés con el objetivo de divulgar el sistema propuesto y los resultados obtenidos en el caso de estudio a la comunidad científica internacional.

Por último, se detalla la relación de referencias bibliográficas y un anexo con todos los diagramas y documentación para el modelado del sistema propuesto junto con un anexo que enumera las publicaciones realizadas durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Referencias

7. Referencias

- Ahmed, Adeel, Abul Quasem Al-Amin, Angelina F. Ambrose, and R. Saidur. 2016. 'Hydrogen Fuel and Transport System: A Sustainable and Environmental Future'. *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (3). Elsevier Ltd: 1369–80. doi:10.1016/j.ijhydene.2015.11.084.
- Aiello, Francesco, Giancarlo Fortino, Stefano Galzarano, and Antonio Vittorioso. 2011. 'TinyMAPS: A Lightweight Java-Based Mobile Agent System for Wireless Sensor Networks'. *Studies in Computational Intelligence* 382: 161–70. doi:10.1007/978-3-642-24013-3_16.
- Aiello, Francesco, Giancarlo Fortino, Antonio Guerrieri, and Raffaele Gravina. 2009. 'MAPS: A Mobile Agent Platform for WSNs Based on Java Sun Spots'. *Proceedings of the Third International Workshop on Agent Technology for Sensor Networks (ATSN)*, no. May 2014.
- Alaf, M., U. Tocoglu, M. Kartal, and H. Akbulut. 2015. 'Graphene Supported Heterogeneous Catalysts for Li-O₂ Batteries'. *Applied Surface Science* 380. Elsevier B.V.: 185–92. doi:10.1016/j.apsusc.2016.01.207.
- Alcaraz, Cristina, Pablo Najera, Javier Lopez, and Rodrigo Roman. 2010. 'Wireless Sensor Networks and the Internet of Things: Do We Need a Complete Integration?' *1st International Workshop on the Security of the Internet of Things (SecIoT'10)*.
- Amor, Mercedes, and Lidia Fuentes. 2009. 'Malaca: A Component and Aspect-Oriented Agent Architecture'. *Information and Software Technology* 51 (6). Elsevier: 1052–65. doi:10.1016/J.INFSOF.2008.12.004.
- Argente, Estefanía, Vicent Botti, and Vicente Julian. 2011. 'GORMAS: An Organizational-Oriented Methodological Guideline for Open MAS'. In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. doi:10.1007/978-3-642-19208-1_3.

- Argente Villaplana, Estefanía. 2008. ‘Gormas: Guías Para El Desarrollo de Sistemas Multiagente Abiertos Basados En Organizaciones’. *Riunet*. Valencia (Spain): Universitat Politècnica de València. doi:10.4995/Thesis/10251/2481.
- Artikis, Alexander, and Jeremy Pitt. 2001. ‘A Formal Model of Open Agent Societies’. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Autonomous Agents - AGENTS '01*, 192–93. New York, New York, USA: ACM Press. doi:10.1145/375735.376108.
- Ayala, Inmaculada, Mercedes Amor, and Lidia Fuentes. 2012. ‘Self-StarMAS: A Multi-Agent System for the Self-Management of AAL Applications’. *Proceedings - 6th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing, IMIS 2012*, 901–6. doi:10.1109/IMIS.2012.28.
- . 2015. ‘The Sol Agent Platform: Enabling Group Communication and Interoperability of Self-Configuring Agents in the Internet of Things’. *Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments* 7 (2): 243–69. doi:10.3233/AIS-150304.
- Aziz, Haris. 2010. ‘Multiagent Systems’. *ACM SIGACT News* 41 (1): 34. doi:10.1145/1753171.1753181.
- Bajo, J., J.F. De Paz, G. Villarrubia, and J.M. Corchado. 2015. ‘Self-Organizing Architecture for Information Fusion in Distributed Sensor Networks’. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. doi:10.1155/2015/231073.
- Bakıcı, Tuba, Esteve Almirall, and Jonathan Wareham. 2013. ‘A Smart City Initiative: The Case of Barcelona’. *Journal of the Knowledge Economy* 4 (2). Springer US: 135–48. doi:10.1007/s13132-012-0084-9.
- Barrionuevo, Juan M, Pascual Berrone, and Joan E Ricart. 2012. ‘Smart Cities, Sustainable Progress’. *EXPERT Insight*, no. 14: 50–57.
- Bauer, B., Huget, M. P. 2003. *FIPA Modeling: Agent Class Diagrams*.
- Bauer, B., J. P. Müller, and J. Odell. 2000. ‘An Extension of UML by Protocols for Multi-Agent Interaction’. In *Proceedings - 4th International Conference on MultiAgent Systems, ICMAS 2000*. doi:10.1109/ICMAS.2000.858455.
- Bellifemine, Fabio, Agostino Poggi, and Giovanni Rimassa. 1999. ‘JADE–A FIPA-Compliant Agent Framework’. *Proceedings of PAAM*, 97–108.

doi:10.1145/375735.376120.

- Bor, Martin, John Vidler, and Utz Roedig. 2016. ‘LoRa for the Internet of Things’. In *Proceedings of the 2016 International Conference on Embedded Wireless Systems and Networks*.
- Brennan, Robert W. 2017. ‘An Embedded Multi-Agent Systems Based Industrial Wireless Sensor Network’. *Sensors* 17 (9): 2112. doi:10.3390/s17092112.
- Cao, Bu-Qing, Bing Li, and Qi-Ming Xia. 2009. ‘A Service-Oriented QoS-Assured and Multi-Agent Cloud Computing Architecture’. In , 644–49. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-10665-1_66.
- Cao, Jiannong, and Sajal K. Das, eds. 2012. *Mobile Agents in Networking and Distributed Computing*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9781118135617.
- Caragliu, Andrea, Chiara Del Bo, and Peter Nijkamp. 2011. ‘Smart Cities in Europe’. *Journal of Urban Technology* 18 (2). Routledge : 65–82. doi:10.1080/10630732.2011.601117.
- Carrascosa, C., J. Bajo, V. Julian, J. M. Corchado, and V. Botti. 2008. ‘Hybrid Multi-Agent Architecture as a Real-Time Problem-Solving Model’. *Expert Systems with Applications*. doi:10.1016/j.eswa.2006.08.031.
- Centenaro, Marco, Lorenzo Vangelista, Andrea Zanella, and Michele Zorzi. 2016. ‘Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios’. *IEEE Wireless Communications* 23 (5): 60–67. doi:10.1109/MWC.2016.7721743.
- Cernuzzi, Luca, and Franco Zambonelli. 2006. ‘Dealing with Adaptive Multi-Agent Organizations in the Gaia Methodology’. In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. doi:10.1007/11752660_9.
- Chen, Songqing, Tao Zhang, and Weisong Shi. 2017. ‘Fog Computing’. *IEEE Internet Computing* 21 (2): 4–6. doi:10.1109/MIC.2017.39.
- Cheng, Bin, Salvatore Longo, Flavio Cirillo, Martin Bauer, and Ernoe Kovacs. 2015. ‘Building a Big Data Platform for Smart Cities: Experience and Lessons from Santander’. *Proceedings - 2015 IEEE International Congress on Big Data, BigData Congress 2015*, 592–99.

doi:10.1109/BigDataCongress.2015.91.

- Cicirelli, Franco, Antonio Guerrieri, Giandomenico Spezzano, Andrea Vinci, Orazio Briante, and Giuseppe Ruggeri. 2017. 'ISapiens: A Platform for Social and Pervasive Smart Environments'. *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2016*, 365–70. doi:10.1109/WF-IoT.2016.7845502.
- Collis, Jaron C, Divine T Ndumu, Hyacinth S Nwana, and Lyndon C Lee. 1998. 'The Zeus Agent Building Tool-Kit'. *BT Technology Journal* 16 (3). Springer: 60–68.
- Davidsson, Paul. 2000. 'Emergen Societies of Information Agents'. *International Workshop on Cooperative Information Agents*. Springer, Berlin, Heidelberg, 143–53. doi:10.1007/978-3-540-45012-2_14.
- . 2001. 'Categories of Artificial Societies'. *Analysis*, 1–9.
- De Paz, Juan F., Javier Bajo, Sara Rodríguez, Gabriel Villarrubia, and Juan M. Corchado. 2016. 'Intelligent System for Lighting Control in Smart Cities'. *Information Sciences*. doi:10.1016/j.ins.2016.08.045.
- De Paz, Juan F., Dante I. Tapia, Ricardo S. Alonso, Cristian I. Pinzón, Javier Bajo, and Juan M. Corchado. 2013. 'Mitigation of the Ground Reflection Effect in Real-Time Locating Systems Based on Wireless Sensor Networks by Using Artificial Neural Networks'. *Knowledge and Information Systems* 34 (1). Springer-Verlag: 193–217. doi:10.1007/s10115-012-0479-8.
- Decker, Keith, Anandeeep Pannu, Katia Sycara, and Mike Williamson. 1997. 'Designing Behaviors for Information Agents'. In *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents - AGENTS '97*, 404–12. New York, New York, USA: ACM Press. doi:10.1145/267658.267748.
- Deloach, Scott A. 1999. 'Multiagent Systems Engineering: A Methodology And Language for Designing Agent Systems'. *Agent-Oriented Information Systems*.
- Deloitte. 2017. 'Smart Cities The Importance of a Smart ICT Infrastructure for Smart Cities'.
- do Nascimento, Nathalia Moraes, and Carlos José Pereira de Lucena. 2017. 'FIoT: An Agent-Based Framework for Self-Adaptive and Self-Organizing Applications Based on the Internet of Things'. *Information*

Sciences 378: 161–76. doi:10.1016/j.ins.2016.10.031.

- Ehsani, Mehrdad., Yimin Gao, and Ali. Emadi. 2010. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press.
- Esparcia, Sergio, Estefanía Argente, Vicente Julián, and Vicente Botti. 2014. ‘GORMAS: A Methodological Guideline for Organizational-Oriented Open MAS’. In *Handbook on Agent-Oriented Design Processes*. doi:10.1007/978-3-642-39975-6__7.
- Evans, Dave. 2011. ‘The Internet of Things - How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything’. *CISCO White Paper*. doi:10.1109/IEEESTD.2007.373646.
- Fernández, Roberto Álvarez, Fernando Beltrán Cilleruelo, and Iñaki Villar Martínez. 2016. ‘A New Approach to Battery Powered Electric Vehicles: A Hydrogen Fuel-Cell-Based Range Extender System’. *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (8): 4808–19. doi:10.1016/j.ijhydene.2016.01.035.
- FIPA. 2018. ‘The Foundation for Intelligent Physical Agents’. Accessed May 7. <http://www.fipa.org/>.
- Fishman, Elliot, and Christopher Cherry. 2016. ‘E-Bikes in the Mainstream: Reviewing a Decade of Research’. *Transport Reviews* 36 (1). Routledge: 72–91. doi:10.1080/01441647.2015.1069907.
- Fleming, Michael, Michael Fleming, Eb A, and Robin Cohen. 2004. ‘A Decision Procedure for Autonomous Agents to Reason about Interaction with Humans’. In *Aaai Spring Symp. On Interaction between Humans and Autonomous Systems over Extended Operation*.
- Flores, Carlos, Vicente Milanés, Joshue Perez, David Gonzalez, and Fawzi Nashashibi. 2015. ‘Optimal Energy Consumption Algorithm Based on Speed Reference Generation for Urban Electric Vehicles’. In *IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings, 2015–August*:730–35. IEEE. doi:10.1109/IVS.2015.7225771.
- Fok, Chien-Liang, Gruiua-Catalin Roman, and Chenyang Lu. 2009. ‘Agilla’. *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems* 4 (3): 1–26. doi:10.1145/1552297.1552299.
- Graham-Rowe, Ella, Benjamin Gardner, Charles Abraham, Stephen Skippon, Helga Dittmar, Rebecca Hutchins, and Jenny Stannard. 2012.

- ‘Mainstream Consumers Driving Plug-in Battery-Electric and Plug-in Hybrid Electric Cars: A Qualitative Analysis of Responses and Evaluations’. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 46 (1). Elsevier Ltd: 140–53. doi:10.1016/j.tra.2011.09.008.
- Guinard, Dominique, Vlad Trifa, Thomas Pham, and Olivier Liechti. 2009. ‘Towards Physical Mashups in the Web of Things’. In *INSS2009 - 6th International Conference on Networked Sensing Systems*, 196–99. IEEE. doi:10.1109/INSS.2009.5409925.
- Han, Qilong, Shuang Liang, and Hongli Zhang. 2015. ‘Mobile Cloud Sensing, Big Data, and 5G Networks Make an Intelligent and Smart World’. *IEEE Network* 29 (2): 40–45. doi:10.1109/MNET.2015.7064901.
- Hashem, Ibrahim Abaker Targio, Victor Chang, Nor Badrul Anuar, Kayode Adewole, Ibrar Yaqoob, Abdullah Gani, Ejaz Ahmed, and Haruna Chiroma. 2016. ‘The Role of Big Data in Smart City’. *International Journal of Information Management* 36 (5). Pergamon: 748–58. doi:10.1016/J.IJINFOMGT.2016.05.002.
- Hunkeler, Urs, Hong Linh Truong, and Andy Stanford-Clark. 2008. ‘MQTT-S — A Publish/subscribe Protocol for Wireless Sensor Networks’. In *2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08)*, 791–98. IEEE. doi:10.1109/COMSWA.2008.4554519.
- Issarny, Valerie, Mauro Caporuscio, and Nikolaos Georgantas. 2007. ‘A Perspective on the Future of Middleware-Based Software Engineering’. In *Future of Software Engineering (FOSE '07)*, 244–58. IEEE. doi:10.1109/FOSE.2007.2.
- Jeschke, Sabina, Christian Brecher, Tobias Meisen, Denis Özdemir, and Tim Eschert. 2017. ‘Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems’. In , 3–19. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-42559-7_1.
- Johansson, Stefan J., and Johan Kummeneje. 2001. ‘A Preference-Driven Approach to Designing Agent Systems’. In *Intelligent Agent Technology*, 80–85. WORLD SCIENTIFIC. doi:10.1142/9789812811042_0011.
- Karnouskos, Stamatis, and Thiago Nass De Holanda. 2009. ‘Simulation of a Smart Grid City with Software Agents’. *EMS 2009 - UKSim 3rd European Modelling Symposium on Computer Modelling and Simulation*, 424–29. doi:10.1109/EMS.2009.53.

- Katasonov, Artem, Olena Kaykova, Oleksiy Khriyenko, Sergiy Nikitin, and Vagan Terziyan. 2008. ‘Smart Semantic Middleware for the Internet of Things’. *Proceedings of the Fifth International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics Service*, 169–78. doi:10.5220/0001489001690178.
- Kato, Takumi, Ryo Chiba, Hideyuki Takahashi, and Tetsuo Kinoshita. 2015. ‘Agent-Oriented Cooperation of IoT Devices towards Advanced Logistics’. *Proceedings - International Computer Software and Applications Conference 3*: 223–27. doi:10.1109/COMPSAC.2015.237.
- Kato, Takumi, Hideyuki Takahashi, and Tetsuo Kinoshita. 2017. ‘Multiagent-Based Autonomic and Resilient Service Provisioning Architecture for the Internet of Things Multiagent-Based Autonomic and Resilient Service Provisioning Architecture for the Internet of Things’ 17 (June): 36–58.
- Kennedy, James, James F. Kennedy, Russell C. Eberhart, and Yuhui Shi. 2001. *Swarm Intelligence*.
- Kiljander, J, A D’elia, F Morandi, P Hyttinen, J Takalo-Mattila, A Ylisaukko-Oja, J.-P. Soininen, and T S Cinotti. 2014. ‘Semantic Interoperability Architecture for Pervasive Computing and Internet of Things’. *Access, IEEE 2*: 856–73. doi:10.1109/ACCESS.2014.2347992.
- Kiritsis, Dimitris. 2011. ‘Closed-Loop PLM for Intelligent Products in the Era of the Internet of Things’. *Computer-Aided Design* 43 (5). Elsevier: 479–501. doi:10.1016/J.CAD.2010.03.002.
- Larrodé Pellicer, Emilio, Juan Bautista Arroyo García, Victoria Muerza Marín, and B. Albesa. 2016. ‘Procedure for Optimization of a Modular Set of Batteries in a High Autonomy Electric Vehicle Regarding Control, Maintenance and Performance’. In , 239–51. Springer International Publishing. doi:10.1007/978-3-319-44766-7_20.
- Leppänen, Teemu, José Álvarez Lacasia, Yoshito Tobe, Kaoru Sezaki, and Jukka Rieki. 2017. *Mobile Crowdsensing with Mobile Agents. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. Vol. 31. Springer US. doi:10.1007/s10458-015-9311-7.
- Leppänen, Teemu, Jukka Rieki, Meirong Liu, Erkki Harjula, and Timo Ojala. 2014. ‘Mobile Agents-Based Smart Objects for the Internet of Things’. In , 29–48. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-00491-4_2.

- Lesser, Victor R. 1998. ‘Reflections on the Nature of Multi-Agent Coordination and Its Implications for an Agent Architecture’. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 1 (1). Kluwer Academic Publishers: 89–111. doi:10.1023/A:1010046623013.
- Li, Shancang, Li Da Xu, and Shanshan Zhao. 2015. ‘The Internet of Things: A Survey’. *Information Systems Frontiers* 17 (2). Springer US: 243–59. doi:10.1007/s10796-014-9492-7.
- Lihong Jiang, Li Da Xu, Hongming Cai, Zuhai Jiang, Fenglin Bu, and Boyi Xu. 2014. ‘An IoT-Oriented Data Storage Framework in Cloud Computing Platform’. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10 (2): 1443–51. doi:10.1109/TII.2014.2306384.
- Maes, Pattie. 1995. ‘Artificial Life Meets Entertainment: Lifelike Autonomous Agents’. *Communications of the ACM* 38 (11). ACM: 108–14. doi:10.1145/219717.219808.
- Mamei, Marco., and Franco Zambonelli. 2006. *Field-Based Coordination for Pervasive Multiagent Systems*. Springer.
- Manate, Bogdan, Florin Fortiș, and Philip Moore. 2014. ‘Applying the Prometheus Methodology for an Internet of Things Architecture’. *Proceedings - 2014 IEEE/ACM 7th International Conference on Utility and Cloud Computing, UCC 2014*, 435–42. doi:10.1109/UCC.2014.55.
- Manaté, Bogdan, Victor Ion Munteanu, and Teodor Florin Fortiș. 2013. ‘Towards a Scalable Multi-Agent Architecture for Managing IoT Data’. *Proceedings - 2013 8th International Conference on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing, 3PGCIC 2013*, 270–75. doi:10.1109/3PGCIC.2013.46.
- Miorandi, Daniele, Sabrina Sicari, Francesco De Pellegrini, and Imrich Chlamtac. 2012. ‘Internet of Things: Vision, Applications and Research Challenges’. *Ad Hoc Networks* 10 (7). Elsevier: 1497–1516. doi:10.1016/J.ADHO.2012.02.016.
- Moraitis, P, and N I Spanoudakis. 2004. ‘Combining Gaia and Jade for Multi-Agent Systems Development’. *forge.zia.net*.
- Moraitis, Pavlos, and Nikolaos Spanoudakis. 2006. ‘The Gaia2JADE Process for Multi-Agent Systems Development’. *Applied Artificial Intelligence*. doi:10.1080/08839510500484249.
- Morris, Alexis, Paolo Giorgini, and Sameh Abdel-Naby. 2009. ‘Simulating

- BDI-Based Wireless Sensor Networks'. *Proceedings - 2009 IEEE/WIC/ACM International Conference on Intelligent Agent Technology, IAT 2009* 2: 78–81. doi:10.1109/WI-IAT.2009.131.
- Mzahm, Anas M., Mohd Sharifuddin Ahmad, and Alicia Y.C. Tang. 2014. 'Agents of Things (AoT): An Intelligent Operational Concept of the Internet of Things (IoT)'. *International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, ISDA*, 159–64. doi:10.1109/ISDA.2013.6920728.
- Nwana, Hyacinth S., Divine T. Ndumu, Lyndon C. Lee, and Jaron C. Collis. 1999. 'Zeus: A Toolkit for Building Distributed Multiagent Systems'. *Applied Artificial Intelligence*. doi:10.1080/088395199117513.
- O'Brien, P. D., and R. C. Nicol. n.d. 'FIPA — Towards a Standard for Software Agents'. *BT Technology Journal* 16 (3). Kluwer Academic Publishers: 51–59. doi:10.1023/A:1009621729979.
- O'Hare, G. M. P., and Nick. Jennings. 1996. *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. *Foundations of Distributed Artificial Intelligence*. Wiley. doi:10.1108/k.1999.28.3.310.1.
- Omg, and Omg. 1998. 'Unified Modeling Language (OMG UML), Infrastructure'. *Uml*. doi:10.1007/s002870050092.
- Omicini, Andrea. 2001. 'SODA: Societies and Infrastructures in the Analysis and Design of Agent-Based Systems'. In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. doi:10.1007/3-540-44564-1_12.
- Patil, P. V. 2015. 'FOG Computing'. *International Journal of Computer Applications*. doi:10.4010/2016.634.
- Pavón, Juan, Jorge Gómez-Sanz, and Rubén Fuentes. 2005. 'The INGENIAS Methodology and Tools'. *Agent-Oriented Methodologies*. doi:10.4018/978-1-59140-581-8.
- Pujolle, G. 2006. 'An Autonomic-Oriented Architecture for the Internet of Things'. *Modern Computing, 2006. JVA'06. IEEE John Vincent Atanasoff 2006 International Symposium on*, 163–68.
- Rao, Anand S., and Michael P. Georgeff. 1995. 'BDI Agents: From Theory to Practice'. *Proceedings of the First International Conference on Multiagent Systems* 95: 312–19. doi:10.1.1.51.9247.

- Razzaque, Mohammad Abdur, Marija Milojevic-Jevric, Andrei Palade, and Siobhan Clarke. 2016. 'Middleware for Internet of Things: A Survey'. *IEEE Internet of Things Journal* 3 (1): 70–95. doi:10.1109/JIOT.2015.2498900.
- RDF. 2009. 'Resource Description Framework'. *Handbook on Ontologies*. doi:10.1007/978-3-540-92673-3.
- Rose, Geoffrey. 2012. 'E-Bikes and Urban Transportation: Emerging Issues and Unresolved Questions'. *Transportation* 39 (1): 81–96. doi:10.1007/s11116-011-9328-y.
- Rumbaugh, J, I Jacobson, and G Booch. 1999. 'El Lenguaje Unificado de Modelado'. *Elements*. doi:1852 - 4516.
- Russell, D.E. & Norvig. 2010. 'Artificial Intelligence: A Modern Approach'. *LIBRARY JOURNAL* 140 (6). Prentice Hall: 65–162. doi:10.1049/me:19950308.
- Ruta, Michele, Floriano Scioscia, Giuseppe Loseto, and Eugenio Di Sciascio. 2014. 'Semantic-Based Resource Discovery and Orchestration in Home and Building Automation: A Multi-Agent Approach'. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 10 (1): 730–41. doi:10.1109/TII.2013.2273433.
- Savaglio, Claudio, and Università Calabria. 2018. 'Intelligent Distributed Computing XI' 737 (October 2017). doi:10.1007/978-3-319-66379-1.
- Savaglio, Claudio, Giancarlo Fortino, and Mengchu Zhou. 2017. 'Towards Interoperable, Cognitive and Autonomic IoT Systems: An Agent-Based Approach'. *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2016*, 58–63. doi:10.1109/WF-IoT.2016.7845459.
- Semwal, Tushar, S Nikhil, Shashi Shekhar Jha, and Shivashankar B Nair. 2016. 'TARTARUS: A Multi-Agent Platform for Bridging the Gap between Cyber and Physical Systems (Demonstration)'. *Aamas 2016*, 1493–95.
- Shehory, Onn, and Arnon Sturm. 2014. *Agent-Oriented Software Engineering: Reflections on Architectures, Methodologies, Languages, and Frameworks*. *Agent-Oriented Software Engineering: Reflections on Architectures, Methodologies, Languages, and Frameworks*. Vol. 9783642544. doi:10.1007/978-3-642-54432-3.
- Shi, Weisong, Jie Cao, Quan Zhang, Youhuizi Li, and Lanyu Xu. 2016. 'Edge

- Computing: Vision and Challenges’. *IEEE Internet of Things Journal* 3 (5): 637–46. doi:10.1109/JIOT.2016.2579198.
- Spanoudakis, Nikolaos, and Pavlos Moraitis. 2009. ‘Gaia Agents Implementation through Models Transformation’. In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*. doi:10.1007/978-3-642-11161-7_9.
- Steels, Luc., and Rodney Allen. Brooks. 1995. *The Artificial Life Route to Artificial Intelligence : Building Embodied, Situated Agents*. L. Erlbaum Associates.
- Steinberg, Alan N., Christopher L. Bowman, and Franklin E. White. 1999. ‘Revisions to the JDL Data Fusion Model’. In , edited by Belur V. Dasarathy, 430. doi:10.1117/12.341367.
- Villarrubia, G., J.F. De Paz, J. Bajo, and J.M. Corchado. 2014. ‘Open Multi-Agent Architecture for Information Fusion’. In *FUSION 2014 - 17th International Conference on Information Fusion*.
- Vlacheas, Panagiotis, Raffaele Giaffreda, Vera Stavroulaki, Dimitris Kelaidonis, Vassilis Foteinos, George Poullos, Panagiotis Demestichas, Andrey Somov, Abdur Biswas, and Klaus Moessner. 2013. ‘Enabling Smart Cities through a Cognitive Management Framework for the Internet of Things’. *IEEE Communications Magazine* 51 (6): 102–11. doi:10.1109/MCOM.2013.6525602.
- Vögler, Michael, Johannes M. Schleicher, Christian Inzinger, Stefan Nastic, Sanjin Sehic, and Schahram Dustdar. 2015. ‘LEONORE - Large-Scale Provisioning of Resource-Constrained IoT Deployments’. *Proceedings - 9th IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering, IEEE SOSE 2015* 30: 78–87. doi:10.1109/SOSE.2015.23.
- Walter, Brenner, Rudiger Zarnekow, and Harmut Wittig. 1998. ‘Intelligent Software Agents’. In *Intelligent Software Agents*, 1–34. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-80484-7.
- Washburn, Doug, and Usman Sindhu. 2009. ‘Helping CIOs Understand “Smart City” Initiatives’. *Growth*, 17.
- Werner, Eric. 1989. ‘Cooperating Agents: A Unified Theory of Communication and Social Structure’. In *Distributed Artificial Intelligence*, 3–36. Elsevier. doi:10.1016/B978-1-55860-092-8.50005-8.

- Wooldridge, Michael, Nicholas R. Jennings, and David Kinny. 2000. 'The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design'. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 3 (3). Kluwer Academic Publishers: 285–312. doi:10.1023/A:1010071910869.
- Wu, Qihui, Senior Member, Guoru Ding, Student Member, Yuhua Xu, and Student Member. 2014. 'Cognitive Internet of Things : A New Paradigm Beyond Connection' 1 (2): 129–43.
- Xu, X., N. Bessis, and J. Cao. 2013. 'An Autonomic Agent Trust Model for IoT Systems'. *Procedia Computer Science* 21: 107–13. doi:10.1016/j.procs.2013.09.016.
- Yilmaz, Murat, and Philip T. Krein. 2013. 'Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles'. *IEEE Transactions on Power Electronics* 28 (5). IEEE: 2151–69. doi:10.1109/TPEL.2012.2212917.
- Zambonelli, Franco, Nicholas R. Jennings, and Michael Wooldridge. 2001. 'Organisational Abstractions for the Analysis and Design of Multi-Agent Systems'. In *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 1957 LNCS:235–51. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/3-540-44564-1_16.
- . 2003. 'Developing Multiagent Systems: The Gaia Methodology'. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*. doi:10.1145/958961.958963.
- Zanella, Andrea, Nicola Bui, Angelo Castellani, Lorenzo Vangelista, and Michele Zorzi. 2014. 'Internet of Things for Smart Cities'. *IEEE Internet of Things Journal* 1 (1): 22–32. doi:10.1109/JIOT.2014.2306328.
- Zhang, Xiangyu, Rajendra Adhikari, Manisa Pipattanasomporn, Murat Kuzlu, and Saifur Rahman Bradley. 2017. 'Deploying IoT Devices to Make Buildings Smart: Performance Evaluation and Deployment Experience'. *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2016*, 530–35. doi:10.1109/WF-IoT.2016.7845464.

Siglas y acrónimos

8. Siglas y acrónimos

- API: Application Programming Interface
- AUML: Agent Unified Modeling Language
- BBDD: Base de Datos
- BDI: Beliefs (creencias), Desires (deseos) e Intentions (intenciones)
- E-BIKE: Bicicleta Eléctrica
- EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
- FIPA-ACL: Agent Communication Language
- FIPA: Foundation for Intelligent Physical Agents
- GPS: Global Positioning System
- HEV: Hybrid Electric Vehicle
- HMI: Human Machine Interface
- IDE: Integrated Development Environment
- IIoT: Industrial Internet of Things
- IoA: Internet of Agents
- IoT: Internet of Things
- JDL: Joint Directors of Laboratories
- JSON: JavaScript Object Notation
- LoRa: Long Range
- MAS: Multi-Agent System
- MIDP: Mobile Information Device Profile
- MQTT: Message Queue Telemetry Transport
- NFC: Near Field Communication
- PAS: Pedal Assist System
- PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle
- PSO: Particle Swarm Optimization
- QoS: Quality of Service
- RAM: Random Access Memory
- RFID: Radio Frequency Identification
- SO: Smart objects
- SSL/TLS: Secure Sockets Layer / Transport Layer Security
- TCP/IP: Transmission Control Protocol / Internet Protocol
- TIC: Tecnologías de Información y Comunicación

- WoT: Web Of Things
- WSN: Wireless Sensor Network