

TESIS DOCTORAL

SISTEMAS MULTIAGENTE PARA LA INTEGRACIÓN  
DE PERSONAS DISCAPACITADAS

---



VNiVERSiDAD  
D SALAMANCA

DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA Y AUTOMÁTICA

FACULTAD DE CIENCIAS

VNIVERSIDAD DE SALAMANCA

AVTØR:

ALBERTO LÓPEZ BARRIVSO



La memoria titulada “Sistemas multiagente para la integración de personas discapacitadas” que presenta D. Alberto López Barriuso para optar al Grado de Doctor por la Universidad de Salamanca ha sido realizada bajo la dirección del profesor Dr. Juan Francisco de Paz Santana, Profesor Titular del Departamento de Informática y Automática de la Universidad de Salamanca, el profesor Dr. Gabriel Villarrubia González, Profesor Ayudante Doctor del Departamento de Informática y Automática de la Universidad de Salamanca y el profesor Dr. Javier Bajo Pérez, Profesor Titular del Departamento de Inteligencia Artificial de la Universidad Politécnica de Madrid.

Salamanca, noviembre de 2018

El Graduado



Fdo: Alberto López Barriuso

Los directores



Fdo.: Dr. Juan Francisco de Paz  
Profesor Titular de Universidad  
Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca



Fdo.: Dr. Gabriel Villarrubia González  
Profesor Ayudante Doctor  
Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca



Fdo.: Dr. Javier Bajo Pérez  
Profesor Titular de Universidad  
Departamento de Inteligencia Artificial, Universidad Politécnica de Madrid



*“Computers are unreliable, but humans are even more unreliable.”*

*(Gilb’s First Law of Reliability)*



# Resumen

Debido a la creciente preocupación de la sociedad por la integración de las personas discapacitadas, en los últimos años han surgido un gran número de iniciativas que tratan de dar apoyo a este colectivo. En este trabajo se presentan un conjunto de herramientas cuyo objetivo es facilitar la integración social en el ámbito de la movilidad, incidiendo tanto en la adaptación del entorno como en los sistemas de control de sillas de ruedas.

Con el objetivo de mejorar la accesibilidad de los entornos, se presenta una herramienta de simulación que pretende detectar a qué dificultades o barreras arquitectónicas se pueden enfrentar los usuarios dentro de un entorno. De esta forma, las simulaciones permiten descubrir de forma anticipada los problemas a los que se enfrentarán las personas con discapacidad antes de que estos problemas sucedan. Esta herramienta se fundamenta en el uso combinado de la simulación social basada en agentes junto con representaciones tridimensionales. La utilización de ambas técnicas hace posible realizar modelados y simulaciones de manera muy próxima a la realidad. El método de simulación definido, se integra en una arquitectura multiagente basada en organizaciones virtuales. En este contexto, los agentes se emplean para la representación de las personas y los diferentes elementos que intervienen en la simulación.

La proliferación de sistemas de control de sillas de ruedas que hacen uso de datos provenientes de redes de sensores y de técnicas de inteligencia artificial, hacen que sean necesarias plataformas que faciliten y automaticen las tareas de recopilación y análisis de datos. En este contexto, se presenta una arquitectura centrada en ofrecer una rápida integración de sistemas de control de sillas de ruedas donde diferentes elementos de computación trabajan de forma distribuida. Dicha arquitectura se cimienta sobre un modelo adaptativo basado en organizaciones virtuales, que permiten la integración de dispositivos inteligentes para el procesado de la información. Además, se presentan un conjunto de métodos de control alternativos.



# Abstract

There is a growing concern from society for the integration of people with disabilities. In recent years there have been many initiatives that try to support this group of people. This work presents a set of tools whose aim is to facilitate the social integration in the field of mobility, through the adaptation of the environment and wheelchair control systems.

In order to improve the accessibility of the environments, a simulation tool is presented. This tool aims to detect which difficulties or architectural barriers can be faced by users within an environment. In this way, the simulations allow to discover in advance the problems that people with disabilities will face before these problems happen. This tool is based on the combined use of agent-based social simulation along with three-dimensional representations. The use of both techniques makes it possible to perform modeling and simulations in a close way to reality. The defined simulation method is integrated into a multi-agent architecture based on virtual organizations. In this context, agents are employed to represent people and the different elements involved in the simulation.

The proliferation of wheelchair control systems that employ data from sensor networks and artificial intelligence techniques, makes it necessary to research on platforms that facilitate and automate the tasks of data collection and analysis. In this context, an architecture focused on offering a fast integration of wheelchair control systems where different computing elements work in a distributed way is presented. This architecture is based on an adaptive model based on virtual organizations, which allows the integration of intelligent devices for the processing of information. In addition, a set of alternative control methods is presented.



# Agradecimientos

*A lo largo de la realización de este trabajo son muchas las personas que me han apoyado, de manera directa o indirecta, y a quienes me gustaría expresar mi agradecimiento por su apoyo y enseñanzas:*

*A mis directores de tesis, Dr. Juan Francisco de Paz Santana, Dr. Gabriel Villarrubia González y Dr. Javier Bajo Pérez, muchas gracias por vuestra amistad y por orientarme en la consecución de este trabajo.*

*A Juan Manuel y a todos los compañeros del grupo de investigación BISITE, de forma especial a los que han aportado su ayuda durante el desarrollo de este trabajo: Pino, Fer, Javi, Diego... y gracias a Santos y Carlos por dar la "chispa" necesaria. No me gustaría olvidarme del resto de compañeros del grupo que me han acompañado a lo largo de estos años, en especial Loza y Dani, con los que más momentos he compartido.*

*Y a aquellos que desinteresadamente han aportado medios materiales y parte de su tiempo para sacar todo adelante; gracias José Francisco por hacer que todo vaya sobre ruedas y a Jesús Parra por su inestimable ayuda.*

*Al resto de las personas que siempre han estado junto a mí cuando lo he necesitado, tanto familiares como amigos. Muy especialmente a mis padres y a Alexandra.*



# Contenido

1	Introducción.....	1
1.1.	Introducción.....	3
1.2.	Hipótesis y objetivos.....	5
1.3.	Motivación.....	8
1.4.	Metodología de investigación.....	9
1.5.	Estructura de la memoria.....	11
2	Accesibilidad.....	13
2.1.	Conceptos básicos en análisis de accesibilidad de los entornos físicos.....	15
2.2.	Sistemas de control de sillas de ruedas.....	22
3	Agentes y sistemas multiagente.....	31
3.1.	El concepto de agente.....	33
3.1.1.	La naturaleza del entorno.....	37
3.1.2.	Arquitecturas de agentes.....	38
3.2.	Sistemas multiagente.....	41
3.2.1.	Organizaciones de agentes.....	44
3.2.2.	Metodologías de desarrollo.....	46
3.3.	Simulación social basada en agentes.....	52
3.3.1.	Clasificación.....	54
3.3.2.	Áreas de aplicación.....	56
4	Simulación social basada en agentes para la integración de personas discapacitadas.....	61
4.1.	Introducción.....	63
4.2.	Propuesta.....	65
4.2.1.	Componentes de la arquitectura propuesta.....	65
4.3.	Caso de estudio.....	76
4.4.	Resultados.....	83
4.5.	Conclusiones.....	86
5	Interfaz inteligente para el control de sillas de ruedas.....	89
5.1.	Introducción.....	91

5.2. Propuesta.....	93
5.2.1. Sistema hardware de control.....	94
5.2.2. Arquitectura multiagente .....	100
5.3. Interfaces de control.....	105
5.3.1. Smartphone .....	106
5.3.2. Control por voz .....	110
5.3.3. EEG.....	111
5.4. Resultados .....	123
5.5. Conclusiones.....	132
6 Conclusiones.....	135
6.1. Contribuciones de la investigación.....	138
6.2. Trabajo futuro .....	140
7 Research overview .....	143
7.1. Introduction.....	145
7.2. Background.....	147
7.2.1. Wheelchair control .....	147
7.2.2. Agent Based Social Simulation.....	151
7.3. ABSS for the integration of disabled people.....	154
7.3.1. Introduction.....	154
7.3.2. Proposal .....	154
7.3.3. Case study.....	166
7.3.4. Conclusions.....	174
7.4. Intelligent Interface for Wheelchair Movement Control .....	175
7.4.1. Introduction.....	175
7.4.2. Proposal .....	176
7.4.3. Control interfaces .....	187
7.4.4. Results .....	198
7.4.5. Conclusions.....	206
7.5. Conclusions.....	208
8 Referencias .....	213
9 Glosario .....	231
10 Apéndice A: Legislación.....	235

10.1. Introducción.....	237
10.1.1. Contexto normativo internacional.....	237
10.1.2. Contexto normativo comunitario .....	239
10.1.3. Contexto normativo nacional .....	241
11 Apéndice B: Esquemas eléctricos .....	259



# Índice de figuras

Figura 1 Interacción entre un agente y su entorno .....	34
Figura 2 Agentes reactivos .....	35
Figura 3 Agentes deliberativos.....	35
Figura 4 Arquitecturas horizontales .....	40
Figura 5 Arquitecturas verticales: (A) de una pasada y (B) de dos pasadas.....	41
Figura 6 Tipología de cooperación de Franklin y Graesser .....	43
Figura 7 Intersección de las áreas que definen la Simulación Social Basada en Agentes .....	53
Figura 8 ABSS: Áreas de aplicación - (A)Evolución de las sociedades (Navarro, Flacher, and Corruble 2011) (B) Sociedades Artificiales (R. L. Axtell et al. 2002)(C) Evacuación (Zia et al. 2013) (D) Transporte y movilidad (Pelechano, Allbeck, and Badler 2007) .....	59
Figura 9 Componentes del SMA .....	67
Figura 10 Entorno de edición 3D .....	68
Figura 11 Módulos del entorno 3D.....	69
Figura 12 Estructura de base de datos .....	70
Figura 13 Estructura de los agentes.....	71
Figura 14 Comunicación JADE-Unity .....	74
Figura 15 Comunicación Unity-JADE.....	75
Figura 16 Trama de comunicación.....	76
Figura 17 Herramienta de simulación .....	82
Figura 18 Detalle de la visualización 3D de una simulación.....	83
Figura 19 Tareas exitosas y fallidas tras las simulaciones. (A) resultados tras la primera simulación; (B) resultados tras la segunda simulación. ....	85
Figura 20 Placa de circuito impreso .....	95
Figura 21 (A) Comportamiento de la silla mediante comandos no proporcionales (B) Rango de valores para el control de la silla .....	96
Figura 22 Componentes del prototipo.....	98
Figura 23 (A) Imagen frontal del prototipo (B) Imagen trasera del prototipo .....	99
Figura 24 Arquitectura multiagente .....	101

Figura 25 Diagrama de colaboración-secuencia para la interfaz de control mediante electroencefalograma (EEG) .....	105
Figura 26 (A) Inclinaciones del teléfono permitidas por el dispositivo móvil (B) Interacción mediante el control táctil .....	107
Figura 27 Posibles estados de transición del control no proporcional basado en la pantalla táctil .....	108
Figura 28 Algoritmos del control no proporcional basado en la pantalla táctil .....	109
Figura 29 . a) Emotiv EPOC+ de b) Distribución de los sensores del EPOC+ en la cabeza de los sujetos.....	112
Figura 30 Señal correspondiente al movimiento "izquierda" del sensor AF4 (a) Señal en el dominio del tiempo; (B) señal en el dominio de la frecuencia.....	115
Figura 31 Evolución del tiempo de formación de los modelos .....	125
Figura 32 Evolución del tiempo de formación de los modelos.....	127
Figura 33 Señal recogida por el sensor AF4 del sujeto 1 en los dos primeros segundos a) Movimiento "izquierda" b) Movimiento "derecha" c) Movimiento "adelante" d) Movimiento "atrás" .....	128
Figura 34 Precisión del sistema de reconocimiento de voz.....	129
Figura 35 (A) Interfaz de la aplicación para smartphone; (B) Interfaz de la aplicación para Tablet.....	130
Figura 36 Esquema eléctrico.....	261

# Índice de tablas

Tabla 1 Principios para el diseño universal.....	16
Tabla 2 Sistemas comerciales de control proporcional .....	23
Tabla 3 Sistemas comerciales de control no proporcional .....	25
Tabla 4 Propiedades de los agentes .....	36
Tabla 5 Relación entre tareas, departamentos y agentes de entorno...	81
Tabla 6 Comandos de voz y respuesta del sistema .....	111
Tabla 7 Comparación de los modelos con pensamientos abstractos..	124
Tabla 8 Comparativa de los modelos en el visionado de imágenes....	126
Tabla 9 Evaluación de los sistemas de control .....	131



---

# CAPÍTULO I

---

## Introducción



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA



*En este capítulo se realiza una introducción al trabajo de investigación, definiendo la hipótesis y los objetivos marcados al comienzo del mismo. En este trabajo se presenta un estudio de diferentes técnicas de Inteligencia Artificial aplicadas a la integración de personas discapacitadas en el campo de la movilidad. Se describen el alcance del trabajo y sus principales características, así como los componentes y conceptos tecnológicos en los que se apoyará el sistema propuesto.*

## 1.1. Introducción

Es por todos conocido el problema con el que se encuentran las personas con discapacidades motoras para desplazarse de forma autónoma en su vida cotidiana. En el caso de personas tetrapléjicas que utilizan sillas de ruedas, este problema es aún de mayor envergadura. De acuerdo con la World Health Organization, en torno al 10% de la población mundial sufre algún tipo de discapacidad (ya sea física o psíquica), de los cuales, alrededor del 10% necesita una silla de ruedas para su desplazamiento (World Health Organization 2010). En Europa, según un informe publicado por la Comisión Europea, el número de personas con discapacidad asciende a 38 millones (16% de la población), y para 2050 se estima que el 30% de la población esté por encima de los 65 años (European Commission 2015), con lo que las discapacidades derivadas del envejecimiento se incrementarán de forma significativa.

Afortunadamente, la sociedad es cada vez más consciente del reto que supone la integración de las personas discapacitadas, especialmente en el campo de la movilidad. Como consecuencia de esta conciencia colectiva, surgen diferentes iniciativas por parte de grandes organizaciones. Una de las iniciativas de mayor repercusión, es la declaración por parte de la Organización de Naciones Unidas de las *Standard Rules on the Equalization of Opportunities for Persons with Disabilities* (United Nations 1994), que ayudó a poner en el punto de mira esta problemática, marcando el camino para la creación de otras nuevas iniciativas en el campo de la integración de personas con discapacidad. Encontramos algunos ejemplos en *European Disability Strategy 2010-2020: A Renewed Commitment to a Barrier-Free Europe* (European Commission 2010)

dentro de la Unión Europea o *Disability Integration Act of 2015* (E. Schumer and U.S. Congress 2015) en Estados Unidos.

Dado que estos colectivos se enfrentan a desventajas claras en mayor o menor medida, se hace necesario realizar todos los esfuerzos posibles para la minimización de estas dificultades. Ante esta problemática, este trabajo busca como objetivo principal favorecer la integración de las personas discapacitadas en el ámbito de la movilidad. Para ello, se busca la adecuación tanto del entorno como de los vehículos que sirven como ayuda técnica para el desplazamiento de estas personas.

Por un lado, las máquinas sociales se sitúan como un modelo computacional adecuado para este campo de investigación, ya que permiten el desarrollo de mecanismos de computación que facilitan la realización de estudios sociales (F.-Y. Wang et al. 2007), así como el desarrollo de sistemas que den soporte al comportamiento social que se produce entre seres humanos y los sistemas (Erickson and Kellogg 2000). En definitiva, permiten la adecuada combinación de contribuciones tanto de humanos (experiencia) como de sistemas computacionales (capacidad computacional) (Robertson and Giunchiglia 2013). En el marco de este trabajo, se propone una plataforma basada en organizaciones virtuales (OV) con capacidad para realizar simulaciones sociales sobre la base que proporciona un entorno tridimensional. El objetivo de dicha plataforma es el de detectar, mediante simulaciones, los posibles problemas de accesibilidad a los que las personas puedan enfrentarse en el entorno representado en la simulación. El uso de sistemas multiagente (SMA) organizativos permite la implementación de máquinas sociales, facilitando el trabajo de humanos y máquinas para la consecución de objetivos comunes. Así mismo, también permite la inclusión de técnicas y algoritmos avanzados como lo son las técnicas de simulación social y el modelado del comportamiento humano. En el marco de la integración laboral de discapacitados, las simulaciones harán posible descubrir de forma anticipada los problemas a los que se enfrentarán las personas con discapacidad antes de que estos problemas sucedan. De este modo, se podrán tomar medidas para adaptar los entornos de manera que se les facilite el desempeño de las tareas cotidianas.

Por otro lado, las personas con limitaciones funcionales graves del aparato locomotor ven necesario apoyarse en el uso de soluciones tecnológicas para poder desplazarse de manera autónoma (fundamentalmente sillas de ruedas). Es importante favorecer la movilidad de este colectivo, buscando la mejor adecuación posible del uso de una silla de ruedas al mayor número de usuarios con problemas de movilidad, independientemente del grado de discapacidad que presenten, para así promover su integración social. Afortunadamente, en los últimos años están surgiendo un creciente número de proyectos de investigación en los que se proponen diferentes métodos de control de sillas de ruedas. A pesar del interés de la comunidad científica en el área, no existe una plataforma que permita una integración de manera sencilla de varios sistemas de control que hagan uso de sensores heterogéneos y algoritmos computacionalmente exigentes. Dentro de este trabajo, se propone una arquitectura basada en organizaciones virtuales de agentes que haga uso de un protocolo de comunicación flexible y escalable, que permita el despliegue de agentes embebidos en dispositivos computacionalmente limitados. Para validar el correcto funcionamiento del sistema propuesto, éste ha sido integrado en una silla de ruedas convencional. Además, se han desarrollado e integrado un conjunto de sistemas de control, incluyendo: un sistema basado en un dispositivo portátil de electroencefalografía, una interfaz de voz o una aplicación de smartphone con múltiples sistemas de control.

Tras la introducción a la problemática que se plantea inicialmente, en la siguiente sección se pasan a definir la hipótesis y los objetivos que se pretenden alcanzar en este trabajo de investigación.

## 1.2. Hipótesis y objetivos

El objetivo principal de esta investigación es el de facilitar la integración de personas con problemas de movilidad a través de herramientas que permitan favorecer su autonomía. Para ello, se buscará, por un lado, mejorar la adecuación de los espacios físicos, de forma que se reduzcan las barreras arquitectónicas que puedan existir mientras que, por otro lado, se investigará en el uso de interfaces de control de sillas de ruedas que se adapten a las

necesidades de cada caso, de manera que se facilite su uso al mayor número de personas posible.

Para mejorar la adecuación de los espacios físicos mediante la reducción de las barreras arquitectónicas del entorno, se tiene como objetivo investigar en nuevos mecanismos y técnicas con las que realizar representaciones tridimensionales de espacios reales. A partir de esta representación de información avanzada, se podrán desarrollar modelos de simulación realistas, adecuados a este campo específico de la simulación. Para ello, se propone un marco de trabajo colaborativo entre máquinas y humanos, donde los expertos puedan modificar interactivamente las simulaciones, mientras que las máquinas tengan la capacidad de proporcionar información adecuada y relevante al problema a simular, como la identificación de las diferentes barreras arquitectónicas.

Para poder investigar en nuevos métodos de control de sillas de ruedas, se buscará diseñar una arquitectura que permita el desarrollo e integración de diferentes interfaces de control basadas en técnicas de inteligencia artificial (IA). Se deberá trabajar en el desarrollo de un dispositivo hardware que actúe como puente entre la capa física y las interfaces de control finales. Gracias a ello, se podrán integrar con facilidad diferentes sistemas de control, lo que facilitará la investigación en este campo. Se buscará llevar a cabo la aplicación de diferentes técnicas, de forma que se ofrezcan diversas soluciones que puedan hacer accesible una silla de ruedas al mayor número de personas, favoreciendo así la autonomía de personas con problemas de movilidad.

La hipótesis que se defiende en el marco de este proyecto de investigación es que *mediante el uso de sistemas multiagente, y haciendo uso de modelos de organizaciones adaptativos que integren interfaces de control inteligentes y métodos de Inteligencia Artificial para el procesado de la información, es posible modelar, simular y gestionar recursos de manera eficiente, de forma que se facilite la integración de personas con capacidades especiales en el desempeño de sus tareas cotidianas.*

Los objetivos que han guiado esta investigación son los siguientes:

- Realizar un análisis del estado del arte en agentes y sistemas multiagente, donde se estudiarán los conceptos básicos relativos al paradigma de agentes, así como de los sistemas multiagente y simulación social basada en agentes.
- Realizar un estudio de los conceptos básicos necesarios para poder analizar la accesibilidad de los entornos físicos, de manera que se pueda definir la relación que existe entre las personas y los entornos físicos en los que se desenvuelven. De esta forma, se podrán estudiar las distintas carencias que se pueden presentar en estos entornos.
- Llevar a cabo un estudio de las actuales alternativas en sistemas de control de sillas de ruedas, tanto a nivel comercial como académico.
- Investigar diferentes técnicas de simulación de agentes que ayuden a determinar los problemas de accesibilidad existentes a partir del modelo de organizaciones de agentes y sus interacciones.
- Aplicar técnicas de simulación social basadas en agentes que incorporen modelos de comportamiento de los usuarios para la detección de barreras de accesibilidad.
- Realizar un modelado adaptativo basado en organizaciones virtuales para la integración de dispositivos inteligentes para el procesado de la información.
- Desarrollar un prototipo hardware que actúe como nodo central para la gestión del control de una silla de ruedas motorizada, permitiendo la recopilación de datos a través de una red de sensores, gestionar el control de los motores de forma proporcional y no proporcional e integrar diferentes sistemas de control inteligentes.
- Aplicar diferentes técnicas de IA para realizar un análisis de datos en tiempo real, recopilados a través de dispositivos inteligentes para la toma de datos de sensores, permitiendo el desarrollo de nuevas interfaces persona-máquina.
- Evaluar empíricamente los resultados obtenidos del trabajo desarrollado.

## 1.3. Motivación

Los grandes avances en los últimos años dentro del campo de la IA han permitido mejorar en gran medida la calidad de la vida de las personas, gracias a su aplicación en distintos campos como la comunicación, los negocios, el entretenimiento o la salud entre otros (Scarcello 2018). En este último, la IA se ha empleado en aplicaciones de diverso ámbito, como robótica para cirugías, herramientas de diagnóstico o análisis genético. Podemos decir que dentro de las aplicaciones basadas en IA en el campo de la salud, se distinguen dos grandes ramas de aplicación: la virtual y la física (Hamet 2017). Dentro del ámbito físico, uno de los campos en los que se han producido grandes avances es en el desarrollo de novedosos sistemas de control para sillas de ruedas motorizadas. Sin embargo, la integración de estos sistemas de control en una silla de ruedas convencional no es sencillo y necesita procesos de adaptación costosos a nivel hardware y software, debido a los requerimientos computacionales que son necesarios para ser desplegados. Dada la falta de sistemas integrados en una silla de ruedas que ofrezcan la posibilidad de recopilar y procesar datos en tiempo real, es manifiesta la necesidad de desarrollar una plataforma que permita el control de cualquier tipo de silla de ruedas independientemente del fabricante, permitiendo el uso de diferentes dispositivos y técnicas de control computacionalmente exigentes. Ante esta necesidad, en este trabajo se propone el desarrollo de una plataforma con estas características, basándose en la utilización de las organizaciones virtuales (OV) como soporte a la misma. El uso de las OV se considera la tecnología más apropiada para este propósito, ya que favorece la distribución eficiente de los recursos y facilita el control de los nodos donde se despliegan los agentes.

A pesar de la mejora que proporcionan los sistemas de control de sillas de ruedas en cuanto a movilidad se refiere, los movimientos de los usuarios se ven muchas veces limitados debido a los diferentes tipos de barreras presentes en el entorno. Ante la falta de sistemas centrados en el análisis y mejora de la accesibilidad de los espacios, se plantea el desarrollo de una herramienta basada en el uso de simulaciones que permita mejorar el proceso de toma de decisiones para mejorar el grado de accesibilidad de diferentes espacios. El uso de simulaciones permite modelar un sistema real o imaginario y realizar experimentos con ese modelo. El objetivo final de los experimentos realizados

mediante la simulación es comprender el comportamiento del sistema. Si el sistema es simple, el modelo puede ser representado y resuelto analíticamente. Sin embargo, los problemas de interés en el mundo real suelen ser mucho más complejos, de forma que en muchas ocasiones no es posible construir un modelo matemático simple para representarlos. En este caso, el comportamiento del sistema debe estimarse con una simulación que se aproxime con un alto grado de fidelidad, suficientemente aceptable para los fines del estudio (Smith 1999). Dependiendo del ámbito de aplicación, el uso de simulaciones permite ser más eficaz, menos peligroso, más rápido o, de otro modo, más práctico que experimentar con un sistema real. Dentro del ámbito de aplicación que se propone, se plantea el uso de simulaciones para descubrir de antemano los posibles problemas de accesibilidad a los que las personas con discapacidad puedan enfrentarse en determinados entornos. Para ello, se plantea el uso combinado de un SMA basado en OV y un entorno de modelado y representación tridimensional. El uso combinado de las dos estrategias permitirá que, por un lado, los agentes puedan implementar diferentes tareas, objetivos, propósitos, etc.; mientras que, por otro lado, el entorno tridimensional permite el modelado físico de diferentes entornos de una manera lo más próxima a la realidad posible.

## 1.4. Metodología de investigación

El proceso de trabajo que se ha diseñado con el fin de llevar a cabo la tesis, se fundamenta en la metodología *Action Research* (R. O'Brien 1998). Esta metodología identifica el problema y, a partir de éste, formula 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. Estos resultados se evalúan junto al tutor para proponer las siguientes iteraciones del proceso de 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:

- 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.
- 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. La revisión del estado del arte debe ser un proceso continuo a lo largo de la investigación.
- 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.
- 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.
- 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 las metodologías usadas en ingeniería del software como el proceso unificado.

Dentro de esta metodología, es necesario realizar reuniones con los directores, que permiten conocer el estado de la investigación. Es importante una vez marcada la problemática inicial, comprobar si el planteamiento que se lleva a cabo es correcto, se necesita alguna variación o incluso se conoce alguna nueva técnica o método que acerque mejor al objetivo marcado. Con ello se pretende que la investigación se vea beneficiada de los siguientes factores:

- Flexibilidad a cambios, capacidad de reacción frente a nuevas tecnologías o técnicas.

- Productividad, permitir flexibilidad en la planificación del trabajo proporciona beneficios, al poder incluir nuevos objetivos que en la etapa de definición del problema no estuvieran marcados.
- Previsión del tiempo, el control del tiempo asociado a cada etapa nos faculta a conocer la existencia o ausencia de riesgo en la planificación.

## 1.5. Estructura de la memoria

Para probar la hipótesis de partida y alcanzar los objetivos establecidos, se ha estructurado esta memoria en siete capítulos y dos apéndices.

En los siguientes dos capítulos se lleva a cabo un estudio del estado del arte acerca de la problemática estudiada, así como de las diferentes técnicas de IA que puedan servir para ofrecer soluciones a dicha problemática. En el capítulo dos, se muestra una visión general acerca de los diferentes problemas de accesibilidad en espacios físicos a los que las personas con discapacidad pueden enfrentarse. Además, en este capítulo se lleva a cabo un análisis de las principales interfaces hombre-máquina presentes actualmente en el mercado que permiten a personas con distinto grado de discapacidad motriz controlar una silla de ruedas. Por otro lado, en el capítulo tres se analiza el estado del arte actual en tecnología de agentes; dentro de este capítulo, se le dedica además especial atención a la simulación social basada en agentes.

Los capítulos cuatro y cinco presentan en detalle las principales funcionalidades de la propuesta realizada en este trabajo, centradas en abordar los problemas en el campo de la movilidad a los que se enfrentan personas discapacitadas. En el capítulo cuatro se presenta una herramienta que permita, a través del uso de técnicas de simulación social basada en agentes, la detección de posibles barreras arquitectónicas presentes en los espacios físicos. Para ello, se expone un caso de estudio aplicado a las simulaciones de un entorno real. Por otra parte, en el capítulo cinco se presenta una arquitectura basada en un dispositivo hardware que permite el despliegue de diferentes sistemas de control para sillas ruedas motorizadas. Gracias a dicha arquitectura, se integran una serie de interfaces de control alternativos basados en el uso de técnicas de IA para el análisis en tiempo real de datos procedentes de sensores

heterogéneos. A través del uso de estas técnicas, se pretenden cubrir las diferentes necesidades del usuario en función de su grado de movilidad.

En el sexto capítulo se recogen una serie de conclusiones obtenidas a partir del análisis del trabajo desarrollado, así como las posibles líneas de trabajo futuro que pueden surgir a partir de esta investigación.

Por último, el séptimo capítulo presenta un resumen del trabajo realizado en inglés y se incorporan las reseñas bibliográficas que se han utilizado como referencia durante el desarrollo de este trabajo. Además, se incluyen dos anexos que recogen aspectos importantes del trabajo realizado. En el primero de ellos, se contextualiza el marco normativo internacional, comunitario y nacional de las políticas en materia de discapacidad, mientras que el segundo incluye los esquemas eléctricos empleados para el desarrollo del sistema hardware de control presentado en el capítulo *Interfaz inteligente para el control de sillas de ruedas*.

---

# CAPÍTULO II

---

## Accesibilidad



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA



*El principal objetivo de este trabajo es el de investigar en distintos mecanismos que permitan mejorar la integración de personas discapacitadas en el campo de la movilidad. Para ello, este trabajo se centra en dos ámbitos: la adecuación de los entornos físicos y de los mecanismos de control de sillas de ruedas a las diferentes necesidades de los usuarios. Por lo tanto, para poder llevar a cabo este trabajo, es necesario realizar un estudio previo de los problemas de accesibilidad que podemos encontrar en los entornos físicos, así como de las diferentes técnicas actuales utilizadas en interfaces de control para sillas de ruedas motorizadas.*

## 2.1. Conceptos básicos en análisis de accesibilidad de los entornos físicos

La accesibilidad es una característica básica del entorno construido. Se trata de la condición que permite llegar, entrar, salir y utilizar las casas, las tiendas, los teatros, los parques, los lugares de trabajo, etc. En definitiva, la accesibilidad permite a las personas participar en las actividades sociales y económicas para las que se ha concebido el entorno construido (Alonso et al. 2002). Es responsabilidad de toda la sociedad modificar el entorno para conseguir una accesibilidad universal, de forma que pueda ser utilizado por todos los ciudadanos en igualdad de condiciones. En cada situación, el éxito o fracaso de la utilización de un entorno por un individuo, dependerá de la interrelación de ambos, que estará determinada por las características del entorno y las capacidades del individuo. Por ello, para garantizar que esta interrelación se produzca de forma satisfactoria es necesario que el diseño de cualquier entorno, producto o servicio permita interactuar al máximo de individuos con capacidades funcionales diferentes (Fundación ONCE and Fundación Arquitectura COAM 2011). Con el objetivo de conseguir un diseño universal, el Centro para el Diseño Universal de la Universidad de Columbia, define siete principios en los que se deben basar los desarrollos de productos, entornos, programas o servicios para integrar las características que responden a las necesidades del mayor número posible de usuarios. En la Tabla 1 se recogen a modo de resumen estos siete principios (Story 1998).

	<b>Principio</b>	<b>Definición</b>
1	Uso universal, para todos	Diseño útil y aprovechable para cualquier grupo de usuarios
2	Flexibilidad en el uso	El diseño se adapta a un amplio abanico de preferencias y capacidades individuales
3	Uso simple e intuitivo	El diseño permite un uso fácil de entender, con independencia de la experiencia del usuario, su conocimiento, habilidad de lenguaje o capacidad de concentración
4	Información perceptible	El diseño aporta la información necesaria de forma efectiva al usuario, con independencia de las condiciones ambientales o las habilidades sensoriales del individuo
5	Tolerancia al error o mal uso	El diseño minimiza daños y consecuencias adversas de las acciones realizadas involuntariamente o por error
6	Bajo esfuerzo físico	El diseño puede ser utilizado eficientemente, de manera confortable y con mínima fatiga
7	Tamaño y espacio para acceso y uso	Tamaño y espacio adecuados para el acceso, alcance, manipulación y uso, independientemente del tamaño corporal del usuario, la postura o movilidad

**Tabla 1 Principios para el diseño universal**

Para poder efectuar un diseño universal, es necesario definir la relación que existe entre las personas y los entornos físicos en los que se desenvuelven. Para ello, se debe tener en cuenta (de Benito Fernández et al. 2011):

- **Los tipos de usuarios:** tratando de decretar, en el marco de las personas discapacitadas, grupos lo más homogéneos posibles en lo que respecta a sus capacidades, para poder así determinar el grado de incidencia que las diferentes barreras suponen en cada caso.
- **Tipos de dificultades:** estableciendo las diferentes dificultades que plantea el entorno construido para conseguir una autonomía completa en los movimientos. En este sentido, las medidas a

aplicar en elementos diferentes serán análogas para necesidades similares.

- **Nivel de exigencia:** determinando distintos niveles de accesibilidad que permitan incorporarla en todos los edificios. Establecer niveles de exigencia adecuados para intervenciones arquitectónicas diferentes pretende garantizar la universalidad de acción evitando excepciones.

En lo relativo a la relación de una persona con su entorno físico, las actividades que se llevan a cabo en el desarrollo de la vida cotidiana son de gran variedad, pero las dificultades de accesibilidad que se presentan al realizarlas se repiten. Es por ello necesario analizar las actividades desde la perspectiva de la accesibilidad para detectar qué dificultades generan y tratar de buscar alternativas.

Tratando esta problemática desde el punto de vista de la accesibilidad, toda actividad que desarrolla una persona tiene dos componentes: el desplazamiento y el uso. El **desplazamiento** es el traslado desde un punto hasta el lugar idóneo para realizar la acción, lo que implica el poder desplazarse por el entorno sin la presencia de limitaciones u obstáculos. El **uso** es el desempeño de la acción en sí (Arjona 2015).

Podemos diferenciar dos tipos de desplazamiento:

- **Horizontal:** son los desplazamientos realizados en habitaciones, pasillos, etc.
- **Vertical:** desplazamientos que implican un cambio en la altura, como pueden ser peldaños, escaleras o rampas.

En cuanto al uso, diferenciamos:

- **Preparación:** proceso de situación o acercamiento al objeto que se desea utilizar.
- **Ejecución:** desempeño de la actividad deseada, se trata del objetivo final del proceso.

Si la persona tiene alguna limitación que dificulte el desempeño de su actividad con respecto a un individuo sin discapacidades, podemos utilizar estas

como referencia para definir las necesidades específicas de estos individuos para poder proyectar los edificios. Pueden aparecer dificultades de distintos tipos:

Atendiendo al desplazamiento:

- **Maniobra:** limitan la capacidad de acceder a los espacios dentro del edificio y de moverse dentro de ellos.
- **Cambio de nivel:** dificultades que se presentan cuando hay que salvar desniveles.

Atendiendo al **uso** de los espacios aparecen las siguientes dificultades:

- **Alcance:** cuando surgen limitaciones en las posibilidades de llegar a objetos y percibir sensaciones.
- **Control:** surgen como consecuencia directa de la pérdida de capacidad para realizar acciones o movimientos precisos con las extremidades.

Con el fin de garantizar el **desplazamiento** por un edificio, es necesario definir itinerarios accesibles que unan los distintos espacios, tanto entre ellos como con el exterior. Estos itinerarios deben reunir cuatro **criterios funcionales básicos**:

- Que sean llanos o con pendiente suave.
- Itinerario lo más corto posible: evitando recorridos largos a las personas que presentan mayores dificultades. Si existe algún itinerario que no sea accesible, será necesario señalizarlo para evitar su recorrido.
- Que estén libres de obstáculos: deben ser suficientemente anchos para que quepan las sillas de ruedas, y que además no existan obstáculos de media altura, puesto que son peligrosos para las personas invidentes.
- Que tengan elementos de soporte y guía seguros: como pavimentos no resbaladizos, elementos de apoyo (por ejemplo, pasamanos), texturas diferenciadas para invidentes, etc.

Por norma general, el incorporar itinerarios accesibles en un edificio ya construido no es barato ni sencillo. La sustitución de una escalera por una

rampa, la incorporación de un ascensor, etc. son operaciones complejas, por lo que los itinerarios accesibles deben incorporarse como una premisa más del diseño, incidiendo bien en el diseño inicial del edificio, en caso de edificios de nueva construcción, o en la elección de un local que permita una introducción sencilla de los itinerarios si se trata de una rehabilitación o cambio de actividad.

Además, para poder garantizar el **uso** de los espacios y objetos de un edificio, se deben tener en cuenta una serie de detalles difíciles de delimitar y cambiantes en el tiempo, considerando tanto las actividades que se pueden desarrollar como las diferentes características de cada persona. Se puede decir que estos detalles han de perseguir cuatro **objetivos funcionales básicos** para cada acción concreta:

- Que también pueda realizarla una persona sentada, pudiendo así desempeñarse por usuarios de sillas de ruedas o personas mayores con dificultades.
- Que se pueda efectuar sin moverse del sitio, ya que gran parte de las personas con limitaciones necesitan utilizar sus extremidades superiores para ayudarse en el desplazamiento; resultando difícil que puedan desplazarse y realizar la acción al mismo tiempo.
- Sin emplear las articulaciones más débiles. Para que los usuarios sin la fuerza y destreza necesarias para manipular elementos como los grifos, interruptores, tiradores de puertas, etc., puedan utilizarlos, es necesario que éstos dispongan de un diseño adaptado.
- Prescindiendo de un sentido básico (vista u oído). Se deben incorporar los medios necesarios para que la información que se percibe a través del sentido deteriorado se reciba a través de los demás sentidos.

Como se ha introducido, la relación entre un usuario y su entorno se define con relación a tres variables: los tipos de usuarios, los tipos de dificultades y el nivel de exigencia. En cuanto a los **tipos de usuarios**, es necesario establecer una serie de características comunes para definir grupos con necesidades de accesibilidad similares. La suma de entornos accesibles para cada uno de los tipos de usuarios dará como conjunto un entorno accesible universal. Definimos los siguientes tipos (de Benito Fernández et al. 2011):

- **Ambulantes:** realizan determinados movimientos con dificultad. En algunos casos podrán valerse de la ayuda de aparatos ortopédicos. Presentan dificultades de desplazamiento a la hora de salvar pendientes pronunciadas, pasar por espacios estrechos o recorrer trayectos largos sin descansar. Además, presentan un mayor riesgo de caídas por resbalones o tropiezos. En cuanto a las dificultades de uso, tienen dificultades a la hora de abrir y cerrar puertas, mantener el equilibrio, sentarse y levantarse o accionar mecanismos que necesiten el uso de dos manos.
- **Usuarios de sillas de ruedas:** aquellos usuarios que necesitan del uso de una silla de ruedas para realizar su actividad, tanto de manera autónoma como con ayuda de terceros. Sus dificultades de desplazamiento son fundamentalmente la imposibilidad de superar desniveles aislados, escaleras y pendientes pronunciadas. Corren el riesgo de volcar con ciertos elementos constructivos, no pueden pasar por lugares estrechos y necesitan de espacios amplios para poder girar o abrir puertas. En lo relativo a las dificultades de uso, se ven limitados en sus áreas de visión, en la posibilidad de alcanzar objetos o por elementos del mobiliario, incompatibles con su silla de ruedas.
- **Sensoriales:** usuarios que tienen dificultades de percepción. Fundamentalmente entran en este grupo personas con limitaciones auditivas y visuales. En cuanto a las personas con deficiencia visual, presentan problemas a la hora de detectar obstáculos y determinar direcciones para el seguimiento de itinerarios, así como a la hora de obtener información gráfica o localizar objetos plurales. En el caso de las personas con deficiencia auditiva, presentan una sensación de aislamiento con respecto al entorno, y tienen limitaciones en captar señales o advertencias acústicas, obtener información o relacionarse con el resto de las personas. Tienen una sensación de aislamiento con respecto al entorno.

En cuanto a los **tipos de dificultades** que una persona puede encontrarse al realizar sus actividades de manera autónoma, pueden determinarse cuatro tipos (Gento Palacios, Ferrándiz Vindel, and Palacios Sánchez 2010):

- **De maniobra:** limitan la capacidad de acceso a espacios y la movilidad dentro de éstos.
- **Para salvar desniveles:** se presentan en el momento que se pretende cambiar de nivel.
- **De alcance:** aparecen como consecuencia de una limitación en las posibilidades de llegar a objetos y percibir sensaciones.
- **De control:** aparecen como consecuencia de la pérdida de capacidad para realizar acciones o movimientos precisos con las extremidades.

En cuanto al **nivel de exigencia**, no existen niveles absolutos que aseguren la completa accesibilidad para el total de la población; además, superar determinados niveles de exigencia puede resultar extremadamente costoso o tecnológicamente complejo. Por ello se establecen tres niveles, entendiendo que un espacio, una instalación o un servicio puede ser (de Benito Fernández et al. 2011):

- **Adaptado:** si se ajusta a los requerimientos funcionales y dimensionales que garantizan su utilización autónoma, cómoda y segura por parte de las personas con limitaciones.
- **Practicable:** si cumple los requerimientos funcionales y dimensionales que permiten su utilización autónoma y segura, en condiciones mínimas, por parte de las personas con limitaciones.
- **Convertible:** si mediante modificaciones de escasa entidad y bajo coste que no afecten a su configuración esencial, puede transformarse, al menos, en practicable.

## 2.2. Sistemas de control de sillas de ruedas

Desde la aparición de los microprocesadores, se han producido mejoras significativas en las interfaces de control para sillas de ruedas motorizadas (Fehr, Langbein, and Skaar 2000), prueba de ello es la gran variedad de opciones que ofrecen actualmente los fabricantes de sillas de ruedas. Dentro de estas interfaces de control, se diferencian claramente dos tipos: los **controles proporcionales** y los **controles no proporcionales** (E.Dicianno, A.Cooper, and Coltellaro 2010).

Los **controles proporcionales** son aquellos que permiten controlar de manera simultánea la velocidad y la dirección. La interfaz de control proporcional más habitual es el *joystick*. Es habitual que, para adaptarse mejor a la mano del usuario y permitir un mejor control, los joysticks permitan cambiar su empuñadura. A pesar de ello, no todos los usuarios de sillas de ruedas son capaces de manejar estos joysticks. Por ello, además de los joysticks tradicionales, existe una gran variedad de joysticks con características específicas que brindan a usuarios con necesidades más específicas la capacidad de controlar las sillas de ruedas. Podemos encontrar algunos ejemplos en los *joysticks sensibles*, cuyo uso está orientado a aquellas personas que pueden realizar movimientos de gran precisión, pero con poca fuerza. Se trata de joysticks muy sensibles y de tamaño reducido. Por otro lado, encontramos los *joysticks sellados*, los cuales son de pequeño tamaño y además es necesario aplicar poca fuerza a la hora de utilizarlos. Al estar sellados, son resistentes a líquidos, por lo que pueden emplearse haciendo uso de la boca.

Además de la gran variedad de joysticks existentes, podemos encontrar otros dispositivos de control dentro de los controles proporcionales. Uno de los dispositivos más extendidos es el *touch pad*, un mando muy similar a los existentes en ordenadores portátiles. Este tipo de control se basa en el tacto, y permite controlar la silla arrastrando un dedo en la dirección deseada. Otra de las técnicas ampliamente empleadas en controles proporcionales es el uso de *sensores de inclinación*, los cuales pueden fijarse a distintas partes del cuerpo del usuario en las que éste controle el movimiento, aunque lo más habitual es el uso de una diadema para realizar el control mediante la cabeza. Con este tipo de control, los usuarios realizan pequeños movimientos para elegir la dirección;

cuanto mayor sea el desplazamiento realizado, mayor será la velocidad a la que se desplace la silla de ruedas. A continuación, en la Tabla 2 se recogen diferentes sistemas de control proporcional que se pueden encontrar en el mercado a día de hoy.

<b>Tipo de Control</b>	<b>Modelo(s)</b>	<b>Referencia(s)</b>
Joystick	Mo-Vis P002 -71	(Mo-Vis 2017)
Joysticks sensibles	Invacare LiNX, Ottobock joystick mini abatible	(Invacare 2017b) (Ottobock 2017)
Joysticks sellados	Permobil Mini Joystick	(Permobil 2017a)
Touch pad	Switch-it Touch Drive 2	(Switch-it 2017b)
Sensores de inclinación	Magitek iZIP	(Magitek 2017)
Control occipital	Head Array	(Permobil 2018b)

**Tabla 2 Sistemas comerciales de control proporcional**

En cuanto a los **controles no proporcionales**, permiten al usuario de la silla de ruedas controlar únicamente la dirección del desplazamiento, no la velocidad. Habitualmente se trata de un conjunto de pulsadores que controlan el movimiento de la silla en cuatro u ocho direcciones. En cuanto a parámetros como la aceleración o la velocidad de la silla de ruedas, deberán ser programadas de antemano, ya que este tipo de controles actúan como meros interruptores. Es de vital importancia que, a la hora de elegir un determinado control, se tengan en cuenta tanto las capacidades del usuario como las demandas físicas y cognitivas que requiere la interfaz de control. Habitualmente los controles no proporcionales tienen una demanda física muy baja, pero una demanda cognitiva muy alta como, por ejemplo, el control a través de un único pulsador.

Algunos ejemplos de controles no proporcionales son los *joysticks reforzados*, que funcionan por micro-interruptores con direcciones de conducción limitadas, habitualmente ocho. Su diseño resistente está indicado para personas que no controlan suficientemente sus movimientos, lo que podría dañar un joystick convencional. Dentro de los joysticks no proporcionales, también encontramos los *mini-joysticks sensibles*, pequeños joysticks que

también funcionan mediante micro-interruptores, pero de mayor sensibilidad que los joysticks reforzados. Además de poder utilizarse con la mano, también suelen disponer de accesorios para ser utilizados con la barbilla u otras partes del cuerpo.

Pensados para aquellos usuarios que no pueden controlar un joystick, surgen otros métodos de control como las *bandejas de pulsadores*, un conjunto de botones que controlan las direcciones de movimiento de la silla de ruedas. Los botones se encuentran en una bandeja plana, que se suele situar en el regazo del usuario, o en una bandeja adicional. En este tipo de controles, el usuario no tiene que mantener la presión sobre los interruptores para controlar la silla. Una variante de este tipo de control es el uso de sensores de proximidad, con los que no es necesario que el usuario aplique presión con las manos para poder utilizarlos. Con la misma filosofía de uso, existen en el mercado los *sistemas de un único pulsador*. Se trata de sistemas en los que es necesario un dispositivo que indique de manera visual y secuencial las diferentes direcciones en las que puede moverse la silla de ruedas. Una vez que aparezca en este dispositivo la dirección en la que el usuario desee desplazarse, deberá accionar el pulsador, que podrá estar colocado en diferentes partes del cuerpo. El usuario debe disponer de una buena capacidad cognitiva y capacidad de respuesta en el tiempo preciso. Para aquellos usuarios con movilidad en la cabeza, existe un tipo de control basado en el uso de *sensores de proximidad* dispuestos en un reposacabezas, que permiten controlar la silla en función de la dirección hacia la que el usuario mueve la cabeza. Finalmente, una de las opciones más empleadas en aquellas personas cuya movilidad es muy limitada en todas sus partes del cuerpo, consiste en un sistema de pulsadores neumáticos, que permiten controlar la silla de ruedas mediante la realización de soplos y aspiraciones.

La Tabla 3 recoge una compilación de los diferentes sistemas de control proporcional para sillas de ruedas más representativos que pueden encontrarse en el mercado actualmente.

<b>Tipo de Control</b>	<b>Modelo(s)</b>	<b>Referencia(s)</b>
Joysticks reforzados	Switch-it Tough Joystick (TJS)	(Switch-it 2017a)
Minis-joysticks sensibles	Invacare Tash Mini Joystick	(Invacare 2017a)
Bandejas de pulsadores	Switch-it lap trays	(Switch-it 2017a)
Sistemas de un único pulsador	Invacare Single Switch Scanner	(Invacare 2017a)
Sensores de proximidad	Invacare ASL proximity switch array, Permobil Head Array	(Invacare 2017a) (Permobil 2018b)
Soplo / aspiración	Invacare Sip N' Puff (SNPM6)	(Invacare 2017a)

**Tabla 3 Sistemas comerciales de control no proporcional**

A pesar de la gran variedad de controles disponibles actualmente en el mercado, la diversidad de condiciones que pueden afectar a los usuarios de sillas de ruedas -tanto a nivel físico como cognitivo- hacen que los dispositivos de control actuales no cubran las necesidades de todos ellos. Por este motivo, la comunidad científica sigue poniendo el foco en la investigación de nuevas técnicas que permitan adecuar el uso de sillas de ruedas motorizadas al mayor número de personas posible. Dentro del estado del arte actual, algunos de los estudios más relevantes en este ámbito se centran en los siguientes campos de aplicación:

- **Control por voz:** el gran avance de las tecnologías de reconocimiento automático del habla durante los últimos años ha hecho que éstas se hayan empleado como base para un gran número de sistemas de interacción hombre-máquina. Existen ejemplos de aplicación en el campo de la medicina (Gundogdu, Bayrakdar, and Yucedag 2017), la industria (Rogowski 2012) o la domótica (Zhu et al. 2010). En la misma línea, existen diversos trabajos en los que se ha empleado la tecnología de reconocimiento automático del habla para el control de sillas de ruedas motorizadas. El tipo de control más habitual mediante la voz se basa en la detección de diferentes palabras claves que

actúan como comandos para efectuar un movimiento en concreto. Podemos encontrar ejemplos de este tipo de sistemas en (Škraba et al. 2015) y (Ruíz-Serrano et al. 2013). Otra alternativa de control de una silla de ruedas mediante la voz se presenta en (Peixoto, Nik, and Charkhkar 2013). En este caso, el control se basa en los zumbidos realizados por el usuario en su garganta. El control de la silla de ruedas se efectúa en base a las variaciones en la frecuencia fundamental del zumbido del usuario, el cual se obtiene a través de un acelerómetro que mide la vibración de sus cuerdas vocales.

- **Visión artificial:** El uso de la visión artificial ha sido ampliamente utilizado en el ámbito de las tecnologías de la asistencia, permitiendo superar ciertas limitaciones en distintas necesidades de los usuarios, tales como funciones mentales, problemas de movilidad, sustitución sensorial o servicios de asistencia (M. Leo et al. 2017). Dentro de este campo, también destaca su uso aplicado como sistema de control de sillas de ruedas. Su uso más extendido está basado en la detección del movimiento de los ojos del usuario, combinado también en ocasiones con la detección del parpadeo de los ojos. El uso combinado de ambos parámetros se emplea como método de control para las sillas de ruedas, como podemos ver en trabajos como (Gajwani and Chhabria 2010) o (Purwanto, Mardiyanto, and Arai 2009).
- **Control deíctico:** en estudios previos como (Frédéric Leishman, Horn, and Bourhis 2010) y (Frederic Leishman et al. 2014), se propone hacer uso de un enfoque deíctico para controlar una silla de ruedas eléctrica. Mediante el uso de dispositivos láser y una cámara web, estos sistemas logran obtener percepción del entorno. Así, el sistema permite al usuario indicar el destino al que desea ir, y que la silla de ruedas se desplace hasta ese punto de manera autónoma.
- **Interfaz cerebral:** La electroencefalografía (EEG) es una técnica que permite el registro de la actividad bioeléctrica del cerebro mediante electrodos aplicados sobre el cuero cabelludo. El uso de esta técnica, combinada con el uso de algoritmos que clasifiquen diferentes patrones en la señal registrada, ha sido también empleado como un

posible sistema de control (Herweg et al. 2016) (Craig and Nguyen 2007).

- **Señales electromiográficas:** de manera análoga al uso de técnicas electroencefalográficas, las señales electromiográficas (producidas por los músculos durante el proceso de contracción y relajación) también han sido estudiadas como posible sistema de control para sillas de ruedas. Encontramos ejemplos en (Yi, Xiaolin, and Yuan 2015), donde se hace un uso combinado de esta técnica con técnicas de visión artificial para detectar gestos realizados con la cabeza; en (Mishra et al. 2017), donde se emplea un sistema de electrooculograma para medir el movimiento de los ojos; o en (Hashimoto, Takahashi, and Shimada 2009), donde se combinan técnicas de electrooculograma y electromiografía para reconocer diferentes gestos de la cabeza del usuario.

- **Sistemas de navegación autónoma:** mediante el uso de diferentes técnicas de *situation awareness*, bien mediante visual tracking (Lei and Li 2013), *beacons* BLE (Miyamoto et al. 2018) u otras, se han conseguido desarrollar sistemas que permiten a las sillas de ruedas desplazarse de manera autónoma en espacios interiores. Dentro de estos sistemas, existen dos tendencias principales: el control de las sillas de ruedas de manera 100% autónoma, sin intervención del usuario de la misma, o el uso de estas técnicas como sistemas de ayuda a la conducción, como por ejemplo para la prevención de colisiones (Yeounggwang, Hwang, and YiKim 2013) o sistemas de conducción semi-autónomos (Pasteau et al. 2016).

Como hemos podido ver, debido a los avances tanto en el desarrollo de sensores como de técnicas de IA aplicadas al control de las sillas de ruedas, el número de interfaces de control ha aumentado notablemente durante los últimos años. Este hecho hace que los enfoques tradicionales a la hora de diseñar sistemas de interacción con sillas de ruedas, los cuales estaban conceptualizados para ser controlados a través de una única interfaz, estén actualmente obsoletos. Por este motivo se espera que, como alternativa, aparezcan nuevas soluciones, similares a las adoptadas en el campo de la robótica, donde han surgido un gran número de propuestas que encapsulan

soluciones a los problemas más recurrentes en este campo: los Robotic Software Frameworks (RSFs). Estos frameworks proponen soluciones integrales para construir sistemas robóticos de propósito general a través de un conjunto de herramientas, librerías y algoritmos. Los RSFs aceleran el desarrollo y despliegue de componentes software y hardware de una manera sencilla (Iñigo-Blasco et al. 2012). Podemos encontrar varios ejemplos de RSFs en la literatura, tales como *Player 2* (Collett, MacDonald, and Gerkey 2005), *Open Robot Control Software (OROCOS)* (Bruyninckx 2001), *Robotic Operating System (ROS)* (Quigley et al. 2009), *OpenRTM* (Ando, Suehiro, and Kotoku 2008) u *OpenRDK* (Calisi et al. 2008). Las principales utilidades que proporcionan este tipo de frameworks están centradas en las siguientes áreas: middleware para robótica distribuida, herramientas de introspección y administración, herramientas de desarrollo avanzadas, interfaces y drivers, algoritmos de robótica y herramientas para la simulación y modelado del sistema (Iñigo-Blasco et al., 2012).

Dentro del campo de la robótica, el uso de SMA ha sido ampliamente aplicado a la definición y construcción de sistemas robóticos, dando lugar al campo de investigación de los Sistemas Robóticos Multi Agente (MARS) durante la década de los 80. Desde entonces, los MARS han sido de gran popularidad a la hora de resolver problemas del mundo real que pueden ser modelados de manera más sencilla utilizando un conjunto de agentes en lugar de un único agente (Cena et al. 2013), estando favorecidos por las características intrínsecas de los SMA, como heterogeneidad, modularidad, escalabilidad, paralelismo, flexibilidad y solidez ante fallos. Este conjunto de características, hacen que los SMA sean especialmente apropiados para la construcción de sistemas complejos (Merdan et al. 2011). Las áreas en las que se aplica el uso de MARS son fundamentalmente dos: (i) sistemas cooperativos multi-robot, donde un conjunto de robots trabajan juntos para resolver tareas complejas, tales como búsqueda y rescate (Marconi et al. 2012), transporte colectivo (Rubenstein et al. 2013), construcción (Ardiny, Witwicki, and Mondada 2015) o exploración y trazado de mapas (Saeedi et al. 2016) y (ii) sistemas de control multi agentes, en los que un grupo de agentes coopera para controlar un único robot de forma distribuida (Y. Wang and de Silva 2010). Esta aproximación se emplea principalmente cuando el robot está compuesto de un gran número de componentes hardware y software que necesitan una arquitectura modular. De

la misma forma que los RSFs, existen diferentes plataformas que permiten crear y diseñar SMA de una forma ágil y sencilla, como JADE (Bellifemine, Poggi, and Rimassa 1999), MASON (Luke et al. 2004) or PANGEA (Zato et al. 2012).



---

# CAPÍTULO III

---

## Agentes y sistemas multiagente



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA



*En este capítulo se introducen los conceptos generales acerca de agentes y sistemas multiagente. Su uso ofrece una serie de características y ventajas que los hacen especialmente útiles en el desarrollo de sistemas con necesidades de heterogeneidad, modularidad, escalabilidad, paralelismo y flexibilidad. Dentro de este estudio, se presta especial atención a las tendencias actuales en el desarrollo de este tipo de sistemas desde un punto de vista organizacional. Por otro lado, se presenta un estudio del estado del arte acerca de una de las disciplinas resultantes de la aplicación de este tipo de sistemas: la simulación social basada en agentes.*

### 3.1. El concepto de agente

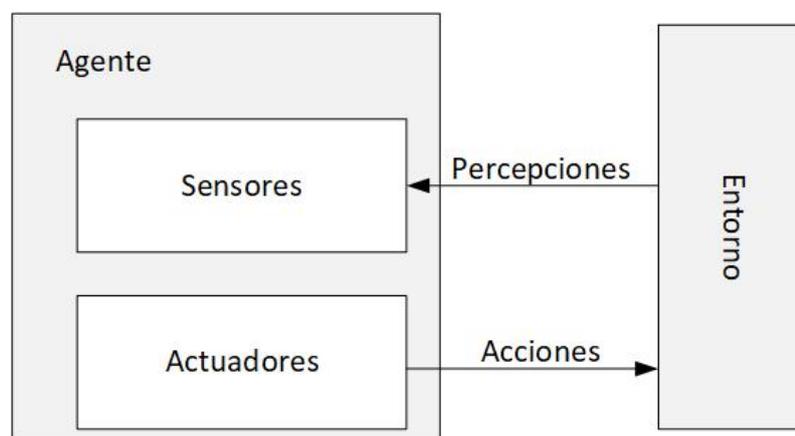
Resulta complicado establecer una definición objetiva y que sea ampliamente aceptada por la comunidad científica del concepto de agente. Esto se debe fundamentalmente a la diversidad de campos de aplicación de los sistemas basados en agentes, por lo que dependiendo del dominio, algunas de las propiedades de los agentes cobran mayor relevancia, dando lugar a diferentes definiciones en función del área de aplicación (Foner 1993). A pesar de la dificultad de establecer una definición que satisfaga a todos, existen una serie de definiciones de carácter general que son ampliamente aceptadas por las comunidades de investigadores, como las propuestas en (Russell and Norvig 1995), (Maes 1995) o (Wooldridge and Jennings 1995).

En (Russell and Norvig 1995) un agente se define como *cualquier cosa que pueda percibir su entorno a través de sensores y pueda actuar sobre dicho entorno mediante efectores.*

Siguiendo con esta definición de Russell y Norving, en el trabajo (Maes 1995) se propone una extensión: *los agentes autónomos son sistemas computacionales que habitan en un entorno dinámico complejo, perciben y actúan de manera autónoma en el entorno y al hacerlo, lo hacen de acuerdo a unos objetivos o tareas para los cuales están diseñados.* La principal aportación de esta definición es la inclusión de tres palabras: computacional, autonomía y objetivos. La palabra computacional indica que estamos interesados en la

ingeniería, ya que la definición de Russell y Norving era ambigua en este sentido. La palabra autonomía implica que los agentes actúan sin intervención directa de otras entidades y que, además, tienen cierto grado de control sobre sus acciones. Asignar objetivos a los agentes implica que sus acciones en el entorno deberían realizarse para conseguir algún propósito y que los agentes muestran un comportamiento racional en cierta medida.

Otra de las definiciones más reconocidas es la de (Wooldridge and Jennings 1995), donde se establece que un agente es *un sistema computacional encapsulado basado en hardware o (más habitualmente) basado en software, situado en algún entorno, que disfruta de las propiedades de autonomía, habilidades sociales, reactividad y proactividad y que actúa en ese entorno para poder alcanzar sus objetivos de diseño*. En esta definición, aparecen nuevos conceptos clave, como son la sociabilidad, la reactividad y la proactividad. La sociabilidad hace referencia a la capacidad de los agentes para interactuar con otros agentes a través de algún lenguaje de comunicación. La reactividad implica que los agentes son capaces de percibir su entorno y de responder a los cambios que ocurren en este. Por último, la proactividad indica que un agente debe ser capaz de tomar la iniciativa en determinados momentos, de manera que pueda así alcanzar los objetivos que éste debe satisfacer.



**Figura 1 Interacción entre un agente y su entorno**

En la Figura 1 podemos ver una visión abstracta de un agente, donde el agente percibe el entorno mediante unos sensores, generando una serie de acciones que afectan de manera directa al entorno. Si un agente simplemente responde, de manera oportuna, a los cambios en el entorno y convierte de

manera reactiva sus entradas sensoriales en acciones, este agente se conoce como reactivo (a veces llamado también agente de reflejo simple). Estos agentes carecen de un modelo simbólico interno de su entorno. Su comportamiento viene determinado por acciones basadas en la respuesta ante estímulos de acuerdo con el estado del entorno en el que se encuentran, por lo que carecen de planificación –no tienen en cuenta estados pasados ni futuros-. Ya que su comportamiento está basado en su percepción del entorno, es necesario que reciban suficiente información de éste para poder operar adecuadamente. Vemos un esquema del comportamiento de un agente reactivo en la Figura 2.

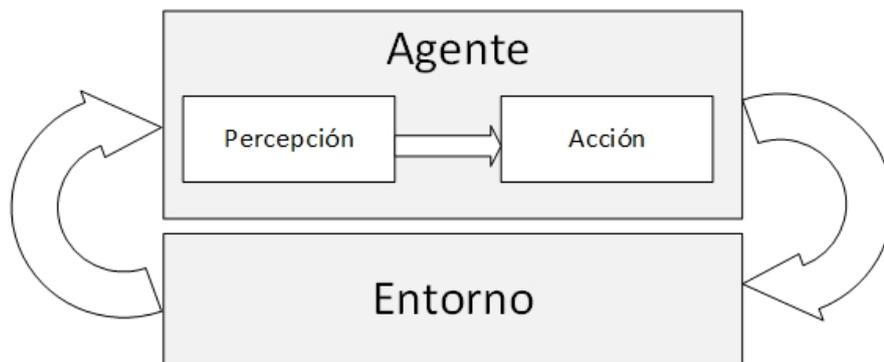


Figura 2 Agentes reactivos

Por otro lado, los agentes deliberativos son aquellos agentes que tienen un modelo de razonamiento simbólico interno. Se encargan de la coordinación con otros agentes mediante la planificación y la negociación. En este tipo de agentes se llevan a cabo dos procesos: uno de deliberación, en el que se decide qué objetivos se van a perseguir y uno de razonamiento, donde se determina cómo alcanzar esos objetivos. A continuación, se observa en la Figura 3 el esquema de un agente deliberativo.

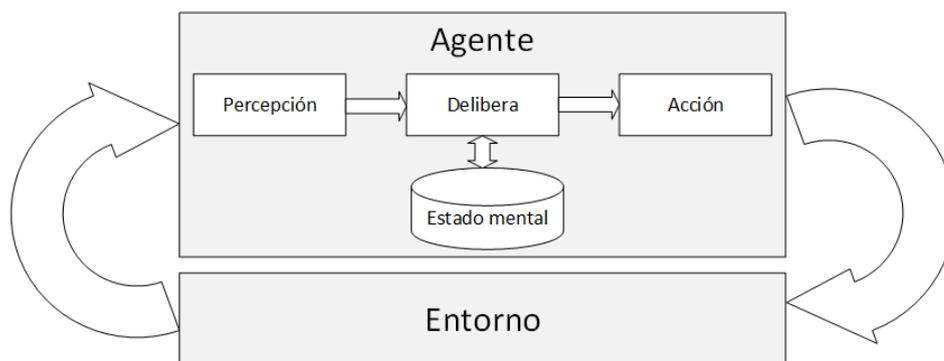


Figura 3 Agentes deliberativos

Como se ha podido comprobar, es habitual que las definiciones del concepto de agente propuestas por los diferentes autores se basen en la asignación de una serie de propiedades o características. A partir de las diferentes definiciones de agentes presentes en la literatura, ha surgido el estudio de su tipología. Dada la gran cantidad de definiciones acerca del concepto de agente, encontramos que los criterios en los que nos podemos basar a la hora de distinguir clasificaciones de agentes son también diversos. Dentro de la literatura, encontramos varios ejemplos de clasificaciones en (Russell and Norvig 1995), (Nwana 1996) o (Cvetković and Parmee 2002). En la Tabla 4 (Glavic 2006) se recogen algunas de las propiedades más representativas que se asocian a la definición del término de agente, que en muchas ocasiones representan la base para establecer cuáles son los distintos tipos de agentes .

<b>Propiedad</b>	<b>Otros nombres</b>	<b>Significado</b>
Reactivo	Reflejo, percepción y actuación	Perciben su entorno y responde a los cambios en un tiempo razonable.
Autónomo		Controla sus propias acciones.
Orientado a objetivos	Proactivo, con intenciones	No actúa únicamente en respuesta al entorno
Temporalmente continuo		Es un proceso en continuo funcionamiento.
Comunicativo	Sociable	Se comunica con otros agentes.
Aprendizaje	Adaptativo	Modifica su comportamiento en base a su experiencia pasada
Móvil		Capaz de moverse en una red de una máquina a otra (asociado a agentes software).
Flexible		Las acciones no están definidas con anterioridad.

**Tabla 4 Propiedades de los agentes**

### 3.1.1. La naturaleza del entorno

Por norma general, un agente dispone de un conjunto de acciones disponibles, que representan las capacidades del agente (sus posibilidades de modificar el entorno). Es importante tener en cuenta que, en la mayoría de los casos, un agente no tendrá control completo sobre su entorno, sino parcial, pudiendo únicamente influir en él. Desde el punto de vista del agente, esto implica que la misma acción llevada a cabo dos veces en circunstancias aparentemente idénticas, pueden dar lugar a efectos distintos; por lo tanto, puede darse la situación en que el agente no logre conseguir el efecto deseado y en consecuencia, debe estar preparado para la posibilidad de fallar (los entornos no son deterministas) (Weiss 1999).

Uno de los principales problemas a los que hay que enfrentarse, se presenta a la hora de decidir qué acciones debe efectuar un agente para llevar a cabo su objetivo satisfactoriamente. Esta toma de decisiones puede verse afectada por las características del entorno en que se encuentre el agente; en el trabajo (Russell and Norvig 1995) se propone una clasificación del entorno de acuerdo con sus características:

- **Totalmente observable o parcialmente observable:** en un entorno totalmente observable, el agente tiene acceso completo al estado del entorno en cualquier momento y de forma precisa. Cuando la complejidad de los entornos aumenta, es más probable que éstos no sean totalmente observables. Una mayor percepción del entorno facilitará la operatividad de los agentes en éste, ya que, si el agente dispone de un entorno totalmente observable, no será necesario que mantenga un estado interno para realizar un seguimiento del entorno.
- **Determinista o estocástico:** un entorno determinístico es aquel en el podemos determinar cuál será el próximo estado del entorno a partir del estado actual y la acción ejecutada por el agente. En caso de no ser así, se trataría de un entorno estocástico.
- **Episódico o secuencial:** en un entorno episódico, el rendimiento de un agente depende de un número de episodios atómicos. Cada episodio consiste en la percepción del entorno por parte del agente para después realizar una única acción. En este caso, el próximo episodio

no depende de las acciones realizadas en episodios previos. Los entornos episódicos son más sencillos de tratar, ya que el agente puede decidir qué reacción efectuar basándose únicamente en el episodio actual, al no ser necesario razonar las interacciones entre este episodio y otros futuros.

- **Estático o dinámico:** un entorno estático es aquel que permanece sin cambios, excepto por la realización de acciones por parte del agente. Un entorno dinámico tiene otros procesos que operan en él, y que pueden modificarlo, por tanto, se pueden producir cambios ajenos a la voluntad del agente.
- **Discreto o continuo:** un entorno es discreto si existe un número finito y conocido de percepciones y acciones en él, (Russell and Norvig 1995) ponen un juego de ajedrez como ejemplo de un entorno discreto -ya que tiene un número finito de estados diferentes-, y la conducción de taxis como un ejemplo de un proceso continuo -la ubicación y velocidad de los taxis varía a lo largo de un rango de valores continuos-.
- **Único agente o multiagente:** la distinción entre estos dos tipos de entorno parece evidente en una primera instancia, pero debemos tener claro qué entidades que actúan dentro del entorno deben ser vistas realmente como un agente y cuáles no.

### 3.1.2. Arquitecturas de agentes

Mientras que la teoría de agentes se centra en la definición de las propiedades de los agentes en un marco lógico, las arquitecturas de agentes tratan de definir una metodología para construir agentes. Estas metodologías definen los componentes de los que está formado un agente, así como las interacciones existentes entre estos componentes. Desde los años 80 han surgido diferentes arquitecturas de agentes, siendo habitual establecer tres grupos claramente diferenciados: arquitecturas deliberativas, arquitecturas reactivas, y arquitecturas híbridas (Orhan 2011).

- **Arquitectura deliberativa:** las arquitecturas deliberativas emplean modelos de representación simbólica del entorno, tomando las decisiones a través del razonamiento lógico -basado en la teoría clásica

de planificación- tomando como fuente la hipótesis de los sistemas de símbolos físicos de (Newell, Simon, and others 1972). Este tipo de agentes parte de un estado inicial donde tienen una serie de planes y, mediante una toma de decisiones lógicas a partir del conocimiento del entorno del que disponen, intentarán llegar a un estado final. Lo más habitual es la implementación de agentes intencionales o BDI (belief, desire, intention), donde se utilizan las creencias, deseos e intenciones del agente para realizar la toma de decisiones (Bratman 1987; Rao and Georgeff 1992). BDI se ha convertido en un estándar para los modelos de agentes, es aceptada por la FIPA y, además -gracias a su carácter genérico- permite el modelado de agentes tanto naturales como artificiales.

- **Arquitectura reactiva:** los agentes reactivos carecen de modelos simbólicos complejos que representen el entorno en el que se encuentran, por lo que pueden actuar de forma rápida y efectiva sin necesidad de procesar una representación simbólica del entorno (Nwana 1996). Este tipo de agentes perciben los estímulos del entorno –según el estado actual del entorno- y reaccionan ante ellos modificando tanto su comportamiento como su entorno (Maes 1990). Al tratarse de agentes sencillos, desaparece en gran medida su capacidad de realizar razonamientos complejos. Su inteligencia proviene de la interacción con su entorno, no de modelos internos –al contrario de lo que ocurre en los agentes deliberativos- (Brenner, Wittig, and Zarnekow 1998).

- **Arquitectura híbrida:** son arquitecturas que comparten características tanto deliberativas como reactivas. Pretenden obtener una solución intermedia para aquellos problemas en los que las arquitecturas puramente deliberativas o reactivas no se adaptan de manera adecuada. El diseño más habitual de los sistemas híbridos es mediante una **arquitectura basada en capas**, donde las capas inferiores tienen una componente más reactiva y las capas superiores son principalmente deliberativas -se emplean para obtener comportamientos más complejos-, dando lugar a un ciclo percepción-decisión-acción. Se puede establecer una clasificación dentro de las arquitecturas basadas en capas atendiendo a si todas las capas tienen acceso a los sensores o actuadores (arquitecturas basadas en capas

horizontales) o si únicamente la capa más baja tiene acceso a éstos (arquitecturas basadas en capas horizontales). En el caso de las **arquitecturas horizontales**, una de sus mayores ventajas es que son conceptualmente simples, implementando tantas capas como comportamientos sean necesarios en el agente. De hecho, cada capa actúa como un agente, produciendo sugerencias acerca de la acción a realizar. (Weiss 1999). El principal inconveniente de esta arquitectura es la competencia que surge entre las capas a la hora de recomendar una acción, por lo que se debe hacer uso de un moderador que decida qué capa tomará el control en cada momento, lo que, al ser una solución centralizada, introduce en el sistema un cuello de botella. Además, es necesario un alto grado de conocimiento para poder controlar la coordinación entre las capas. Podemos ver un esquema de este tipo de arquitectura en la Figura 4.

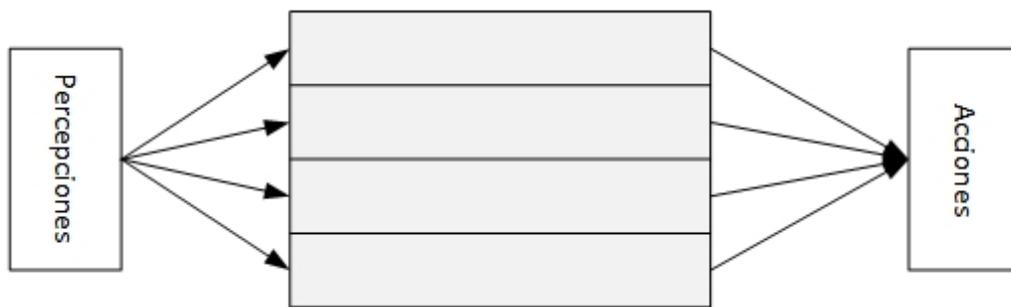


Figura 4 Arquitecturas horizontales

Por otro lado, encontramos las **arquitecturas verticales**, que solucionan parte de los problemas que surgen en las arquitecturas horizontales. Estas arquitecturas se dividen a su vez en dos tipos: arquitecturas de una pasada (ver Figura 5 (A)) y arquitecturas de dos pasadas (ver Figura 5 (B)). En las arquitecturas de una pasada, el control pasa secuencialmente de capa en capa, hasta llegar a la última capa, donde se genera una acción de salida. En las arquitecturas de dos pasadas, la información fluye de capa en capa desde la más baja hacia la más alta (primera pasada) para que después el control baje de nuevo hacia la capa más baja (segunda pasada) (Weiss 1999). La ventaja de estas arquitecturas frente a las horizontales es la reducción de la complejidad de las interacciones entre capas. Como contrapartida, se

trata de una configuración que no tolera los fallos puesto que, ante el fallo en una de las capas, fallarán las demás. Además, debido a la reducción de la complejidad de las interacciones entre las capas, se produce una pérdida de flexibilidad en la toma de decisiones.

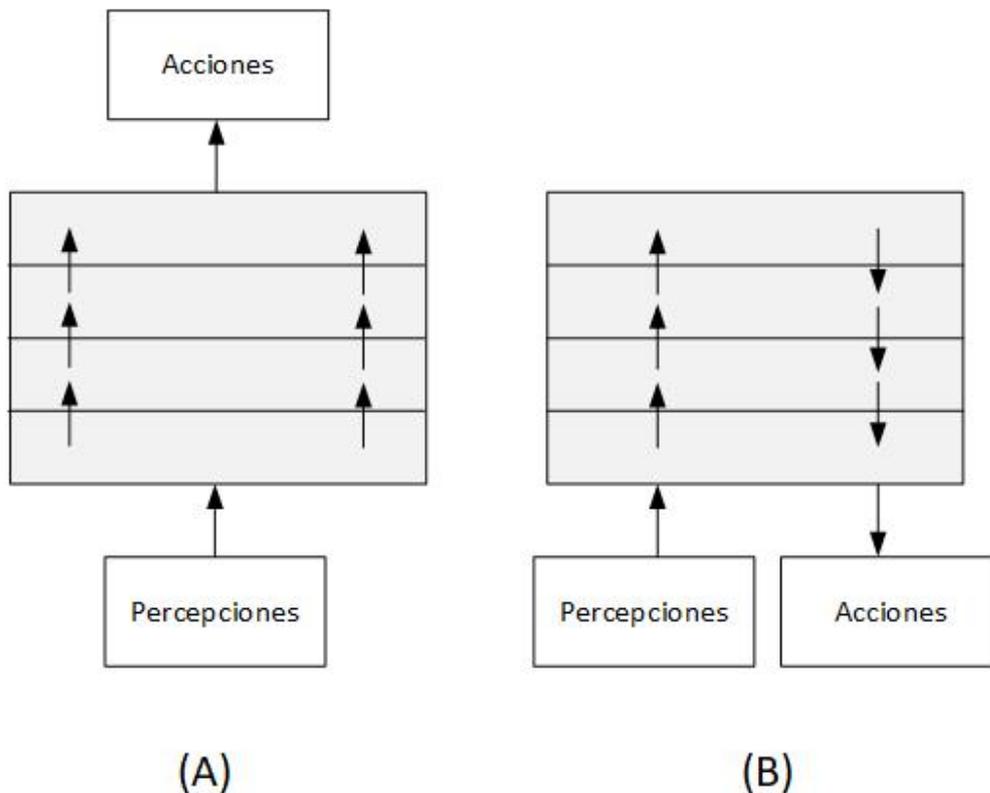


Figura 5 Arquitecturas verticales: (A) de una pasada y (B) de dos pasadas

### 3.2. Sistemas multiagente

El estudio de los sistemas multiagente surge en el campo de la IA distribuida (Bradshaw 1996), aunando conceptos e ideas de varios campos, como la IA, ciencias computacionales, sociología, economía, ciencias organizacionales y la filosofía. Actualmente, es un campo activo no sólo en el ámbito de la investigación y la enseñanza sino, además, de aplicación industrial y comercial. Al igual que ocurre con la definición de agente, podemos encontrar diferentes definiciones acerca de qué es un SMA en función del ámbito de aplicación. Por ejemplo, en el trabajo (Stone and Veloso 2000) define el un SMA como *una red débilmente unida de entidades de resolución de problemas*

*(agentes) que trabajan juntas para encontrar respuestas a problemas que están más allá de las capacidades individuales o el conocimiento de cada entidad (agente).*

Existen varias propiedades que caracterizan un SMA: (i) cada agente tiene un conocimiento o capacidad incompleta para resolver un problema, tiene un punto de vista limitado; (ii) los datos se encuentran descentralizados; (iii) los cálculos se realizan de forma asíncrona, (iv) no existe un control global del sistema o un diseño centralizado y (v) son sistemas generalmente abiertos, en el sentido de que nuevos agentes pueden entrar en el sistema, o agentes existentes pueden salir del mismo (Sycara 1998). Gracias a estas propiedades, el uso de SMAs aporta una serie de ventajas (Mondéjar et al. 2006):

- Gracias a su modularidad, se reduce la complejidad de la programación al trabajar con unidades más pequeñas.
- Aumenta la eficiencia gracias a la distribución de tareas entre agentes, consiguiendo paralelismo.
- Son sistemas fiables, debido a que, si un elemento del sistema deja de funcionar, no implica que el resto lo haga.
- Son sistemas de gran flexibilidad, ya que se pueden introducir y eliminar agentes de manera dinámica.

Uno de los conceptos clave que surgen a la hora de diferenciar los SMA con respecto a otras disciplinas como la computación distribuida, los sistemas orientados a objetos o los sistemas expertos, es el de cooperación. Sin embargo, el uso preciso de este concepto en los SMA es poco claro (Doran et al. 1997). Algunos trabajos existentes en la literatura tratan de dar su punto de vista acerca de este concepto. Por ejemplo, en (Franklin and Graesser 1996) los autores establecen una tipología de SMA en función de los distintos tipos de cooperación que puede existir entre los agentes que conforman el sistema (ver Figura 6). Se entiende como SMA independiente si cada agente sigue su propia agenda, independientemente del resto de agentes. Dentro de esta división, un SMA es discreto si es independiente y no existe relación entre las agendas de los agentes. Sin embargo, cabe la posibilidad de que los agentes cooperen sin intención de hacerlo, desde el punto de vista de

un observador parece que los agentes estén trabajando juntos, pero desde el punto de vista del agente no lo están haciendo. Por otro lado, los agentes cooperativos son aquellos sistemas en los que las agendas de los agentes incluyen algún tipo de cooperación con el resto de agentes. Esta cooperación puede ser comunicativa, en la que aparecen el envío y recepción de mensajes de manera intencional o no comunicativa. En este último caso, los agentes coordinan su actividad cooperativa mediante la observación y reaccionando al comportamiento del resto de agentes. La comunicación intencional puede darse de dos formas: los agentes pueden negociar o deliberar. En los sistemas deliberativos, los agentes planifican conjuntamente sus acciones para cooperar entre sí. Dicha cooperación puede o no implicar coordinación. Los sistemas de negociación son similares a los sistemas deliberativos, excepto que incluyen una dosis adicional de competencia.



**Figura 6 Tipología de cooperación de Franklin y Graesser**

La tendencia actual a la hora de diseñar sistemas multiagente va hacia el modelado desde un punto de vista organizacional. Sin olvidarse del modelado de los agentes en sí, además se ha de definir la organización general del sistema, estableciendo así un nivel de abstracción mayor que define explícitamente la organización en la que conviven los agentes a través de conceptos de reglas, normas, instituciones y estructuras sociales. En este contexto, es necesario

introducir mecanismos de comunicación y coordinación para que los agentes puedan ser capaces de intercambiar servicios e información con el fin de llevar a cabo acciones sociales más complejas. En la siguiente subsección se presentan las principales aspectos y características de las organizaciones de agentes.

### 3.2.1. Organizaciones de agentes

A pesar de que desde su aparición, los SMA hayan sido considerados como sociedades de agentes, inicialmente han tenido mayor relevancia las investigaciones centradas en el agente, en las que el diseño de los sistemas se realiza en base a los estados mentales de un agente (Ferber, Gutknecht, and Michel 2003). La conceptualización de los SMA desde un punto de vista organizativo está claramente inspirada en los conceptos que definen las organizaciones humanas.

De acuerdo con (Das 2016), una organización es una entidad que comprende varias personas, que tiene un objetivo colectivo y está vinculada a un entorno externo. Otra visión complementaria y más detallada del concepto de organización humana es la ofrecida por (Hodge 1996), que le atribuye las siguientes características: (i) está compuesta por personas; (ii) tiene unos objetivos que determinan las actividades de sus miembros mediante mecanismos de coordinación y control; (iii) el trabajo se subdivide entre los individuos a través de la especialización y la división de tareas; (iv) requiere una estructura formal, con unos roles definidos, unas responsabilidades asociados a esos roles y relaciones preestablecidas entre los miembros de la organización; (v) las actividades deben relacionarse con los objetivos globales de la organización y (vi) tiene unos límites bien definidos que determinan quiénes son los miembros de la organización.

Existen varias definiciones del concepto de organización en el campo de los SMA. Para (Gasser 1992), una organización proporciona un marco para la actividad y la interacción a través de la definición de roles, expectativas de comportamiento y relaciones de autoridad (por ejemplo, control). Una visión más práctica desde el punto de vista del diseño, es la ofrecida por (Wooldridge, Jennings, and Kinny 2000), que ven una organización como una colección de roles que se relacionan entre sí y participan mediante patrones de interacción sistemáticos e institucionalizados con otros roles. Siguiendo esta tendencia, será

necesario definir conceptos de reglas (Zambonelli 2001), normas e instituciones (Esteva et al. 2001) y estructuras sociales (Van Dyke Parunak and Odell 2001), que surgen de la necesidad de contar con un nivel de abstracción mayor – independiente del agente-, que defina explícitamente la organización en la que los agentes conviven.

Las arquitecturas empleadas para modelar y construir SMA basados en organizaciones, deben dar soporte a la coordinación entre agentes, de manera que se adapten dinámicamente a cambios en su estructura, objetivos o interacciones (M. V Dignum 2004), permitiendo así la coexistencia de los agentes en entornos compartidos, de tal forma que puedan llevar a cabo sus objetivos. Cuando un agente forma parte de una sociedad de agentes, toma una visión colectivista, por lo que debe tener en cuenta el funcionamiento global del sistema, cómo unos agentes influyen en otros, de forma que no se centre en sí mismo.

Puesto que la concepción organizativa de los SMA está basada en las organizaciones humanas, tratando de simular o representar a éstas, ambos tipos de organizaciones comparten en cierta manera patrones estructurales o tipologías. En (Argente Villaplana 2008) podemos encontrar un estudio de los diferentes tipos de organizaciones, desde un punto de vista humano y del agente. En una primera división, se establecen dos grandes tipos de organizaciones: mecánicas y orgánicas (Robbins, Judge, and others 2001) (Daft 1998). Las organizaciones mecánicas definen de manera rigurosa las tareas, desglosándolas en partes especializadas y separadas. Por otro lado, este tipo de organizaciones presentan una jerarquía clara de autoridad y control, en la que se pueden identificar roles supervisores y roles subordinados entre los cuales se desarrollan las comunicaciones habitualmente de manera vertical. El uso de este tipo de organizaciones es habitual en entornos estables, poco cambiantes. Formarían parte de este tipo de organizaciones la estructura simple, la burocracia o las estructuras matriciales. Por otro lado, en las organizaciones orgánicas las tareas se ajustan y redefinen por medio del trabajo en equipo, existiendo un menor control y una estructura menos jerárquica, permitiendo que el control de las tareas y el conocimiento estén distribuidos. Los miembros contribuyen juntos a la tarea común del departamento. La comunicación entre miembros de la organización se realiza habitualmente de manera horizontal, favoreciendo la rapidez y la flexibilidad en las respuestas. Estas características

hacen que estas organizaciones sean apropiadas para entornos dinámicos en los que se producen cambios con rapidez. El grupo y la organización virtual son ejemplos de este tipo de organización.

### 3.2.2. Metodologías de desarrollo

Las metodologías de desarrollo de software representan procesos de ingeniería de software, y establecen procesos bien estructurados que definen las diferentes fases, actividades, roles, herramientas y artefactos necesarios para el desarrollo de un sistema software (Oktaba and Ibargüengoitia González 1998). Las características propias de los SMA han motivado que se hayan creado nuevas metodologías que sean más adecuadas para este tipo de sistemas, frente a las metodologías de los sistemas tradicionales. De acuerdo con (Boissier, Hübner, and Sichman 2006), los SMA tienen dos niveles descriptivos: el de la organización y el del agente. Atendiendo a esta división, las metodologías de desarrollo de SMA pueden clasificarse en dos grupos: las metodologías orientadas a la organización, y las orientadas al agente. En las siguientes subsecciones se recopilan algunas de las metodologías más representativas de cada grupo.

#### 3.2.2.1. Metodologías orientadas al agente

En el caso de las metodologías orientadas al agente, el diseño se centra en las acciones individuales que realizan los agentes, las interacciones que se producen entre ellos y sus estados. En cuanto a las estructuras sociales del sistema, no se modelan de manera explícita, sino que se forman a partir de la propia interacción entre los agentes. Dentro de este grupo de metodologías, destacan algunas como Gaia (Wooldridge, Jennings, and Kinny 2000), Tropos (Giunchiglia, Mylopoulos, and Perini 2002), Prometheus (Padgham and Winikoff 2002), MaSE (DeLoach 2004) o MASSIVE (Lind 2001).

**Gaia** es una metodología para el análisis y el diseño orientado a agentes la cual busca, mediante un análisis sistemático, pasar de la declaración de requisitos a un diseño lo suficientemente detallado como para poder implementarlo directamente. El concepto central sobre el que se asienta Gaia es el de rol, el cual está definido por cuatro atributos: las responsabilidades, los permisos, las actividades y los protocolos. Una organización estará formada por

un conjunto de roles que mantienen determinadas relaciones e interactúan entre sí. El proceso de modelado propuesto por Gaia viene definido por diferentes modelos conceptuales interrelacionados entre sí, que deben ser establecidos en dos fases: de análisis y diseño. Los principales modelos que introduce Gaia son cinco: en la fase de análisis: (i) *modelo de roles*, que identifica los diferentes roles presentes en el sistema; (ii) *modelo de interacciones*, que define protocolos para cada tipo de interacción entre roles. En la fase de diseño: (iii) *modelo de agente*, que define tanto los tipos de agentes que conformarán el sistema, así como el número de instancias que existirá de cada uno de ellos; (iv) *modelo de servicios*, que determina los servicios que oferta cada tipo de agente en el sistema y (v) *modelo de conocimiento*, que establece los enlaces comunicativos entre los diferentes tipos de agente y además identifica cuáles pueden ser los diferentes problemas de embotellamiento que se puedan producir, como consecuencia del uso de estos canales de comunicación. Gaia sugiere notaciones simples para llevar a cabo la definición de los modelos, aunque es posible emplear notaciones más formales. El resultado final de utilizar esta metodología son modelos con un nivel de detalle muy alto, por lo que es necesario llevar un diseño más profundo posteriormente para implementar los sistemas.

**Tropos** propone una metodología para construir los sistemas en base al modelado de sus requisitos, de forma que se tenga conciencia del entorno operacional del sistema desde las primeras etapas del diseño. Tanto el concepto de agente, como sus ideas mentales, metas y planes, se emplean en todas las fases de esta metodología, en la que distinguimos: (i) *análisis temprano de requisitos*, en la que se definen mediante diagramas los actores sociales y sus intenciones, modeladas como metas; (ii) *análisis tardío de requisitos*, en la que se representa al conjunto del sistema mediante un modelo organizacional que incluye las dependencias entre los actores y el sistema software; (iii) *diseño arquitectónico*, que establece la arquitectura global del sistema mediante la definición de subsistemas y las dependencias que existen entre ellos y finalmente (iv) *diseño detallado*, donde se lleva a cabo una especificación de los agentes en base a sus metas, creencias y capacidades, así como los procesos comunicativos que ocurren entre ellos. En términos generales, Tropos facilita el entendimiento no solo general a un nivel organizacional, sino también a un gran

nivel de detalle para cada actor, lo que favorece la obtención de los requisitos del sistema de software.

**Prometheus** surge con la idea de ser una metodología para el modelado de SMA apta para ser empleada sin tener que ser necesariamente un experto en la tecnología de agentes. Se considera a esta metodología como una de las más prácticas, detalladas y completas, que cubre todas las fases, desde la especificación de requisitos hasta el diseño detallado. Concretamente, Prometheus define tres fases: (i) *especificación del sistema*, en la que se identifican las funciones básicas del sistema, tales como roles, objetivos, escenarios y las entradas y salidas y su procesamiento; (ii) *diseño arquitectónico*, en el que se establecen qué agentes estarán presentes en el sistema y cómo interactuarán entre ellos y (iii) *diseño detallado*, que describe los elementos internos de los agentes, cómo llevarán a cabo sus tareas, y qué capacidades, eventos internos, planes y estructuras de datos internas tiene cada agentes. A pesar de formularse como una metodología válida también para el desarrollo de software de propósito general, su fase de diseño está muy vinculada a la definición de la arquitectura de los agentes.

La metodología **MaSE** (Multi-Agent System Engineering) surge como una abstracción del paradigma de la programación orientada a objetos, en la que los agentes son una especialización de los objetos. Esta metodología parte de una especificación inicial de un sistema, y genera un conjunto de documentos de diseño con un estilo eminentemente gráfico, basado en diagramas. Se trata de una metodología iterativa, en la que a medida que se avanza por sus distintas fases, se desarrolla el nivel de detalle del modelo. MaSE cuenta con dos fases principales: (i) *fase de análisis*, que consta de tres pasos: captura de objetivos, aplicación de los casos de uso y redefinición de roles y (ii) *fase de diseño*, que consta de cuatro pasos: creación de las clases de agentes, construcción de las conversaciones, ensamblado de las clases de agentes y diseño del sistema. Mediante el uso de la herramienta agentTool (DeLoach 2001), es posible llevar a cabo el modelado de las plataformas de agentes de manera semi-automática siguiendo la metodología MaSE, a partir de la definición de los roles y tareas establecidos en la fase de análisis.

**MASSIVE** (Multi-Agent SystemS Iterative View Engineering) plantea una metodología basada en una visión iterativa del desarrollo, en la que se

define un conjunto de siete vistas diferentes del sistema que se desea construir. Las vistas propuestas por MASSIVE son: (i) *entorno*, que analiza el entorno del sistema desde dos puntos de vista (el del agente y el de los desarrolladores); (ii) *tareas*, donde se definen las capacidades de resolución de problemas que tienen las entidades que forman el sistema; (iii) *roles*, que establece a partir de la definición de roles las diferentes funcionalidades que pueden llevar a cabo las entidades que forman el sistema; (iv) *interacciones*, que describe qué interacciones se producen entre agentes, tanto a nivel comunicativo como de resolución de conflictos; (v) *sociedad*, que provee de una estructura a nivel de sociedad de agentes dentro de los objetivos del sistema; (vi) *arquitectura*, en la que se modela la arquitectura del sistema en el contexto de un determinado entorno y (vii) *sistema*, que trata de manera conjunta diferentes aspectos que se tienen en cuenta en otras vistas. MASSIVE parte de la presunción de que los agentes son cooperativos y benevolentes, cuyo objetivo se plantea a nivel global, no individualista.

### 3.2.2.2. Metodologías orientadas a la organización

A diferencia de las metodologías orientadas al agente, las orientadas a la organización se centran en el diseño del sistema a nivel organizativo, definiendo las normas sociales que regulan el comportamiento de los agentes desde una perspectiva global y planteando los objetivos, la estructura, la dinámica y el entorno del sistema a alto nivel. A continuación, se realiza un breve resumen de las siguientes metodologías orientadas a la organización: Gaia v.2 (Zambonelli, Jennings, and Wooldridge 2003), AGR (Ferber, Gutknecht, and Michel 2003), la última versión de TROPOS (Kolp, Giorgini, and Mylopoulos 2006), Opera (M. V Dignum 2004), O-MaSE (DeLoach and Garcia-Ojeda 2014) y GORMAS (Argente, Julian, and Botti 2008).

La segunda versión de Gaia, **Gaia v.2**, surge como una extensión de su primera versión, donde se le da una mayor importancia al concepto de organización, dejando de ser ésta un mero conjunto de roles. Por este motivo, se extiende la primera versión con diferentes abstracciones a nivel organizacional que se usan en las primeras fases del análisis. En esta versión, además de un análisis de los roles y protocolos, se efectúa un análisis del entorno en el que se encuentra el sistema, identificando las entidades y recursos externos con los que el SMA puede interactuar para alcanzar sus objetivos. En cuanto a

las abstracciones a nivel organizacional, se incorporan dos: las *reglas organizacionales* y las *estructuras organizacionales*. Las *reglas organizacionales* establecen las restricciones que con las que la organización tendrá que lidiar. Éstas pueden establecerse a nivel global o en relación a determinados roles. Permiten definir cuándo y bajo qué condiciones un agente puede participar en la organización, cuál es su posición y qué comportamientos puede aceptar como válidos la organización. En cuanto a las *estructuras organizacionales*, permiten especificar la arquitectura general del sistema: la posición de cada rol en la organización y las relaciones existentes entre ellos. Ambos tipos de reglas están relacionadas, ya que las *reglas organizacionales* pueden ayudar en el proceso de identificación de las estructuras que más se adaptan a esas reglas.

**AGR** (Agent/Group/Role) surge con la idea de proponer una metodología válida para los SMA centrados en organizaciones para hacer frente a las carencias de las definiciones basadas en agentes. Esta metodología se centra en la definición de tres conceptos básicos: *agente*, *grupo* y *rol*. Un agente es una entidad activa y comunicativa que desempeña roles en grupos. Un grupo es un conjunto de agentes que comparten unas características comunes y sirve como contexto para determinados patrones de actividades, además de para establecer divisiones dentro de la organización. AGR muestra cómo es posible diseñar sistemas atendiendo a tres principios básicos de los sistemas orientados a agentes: (i) no definir “cómo”, sino “qué”, definiendo estructuras organizacionales de grupos, estructuras y roles, pero no cómo se comportan los agentes; (ii) no definir estados mentales (tales como los que se proponen en los modelos BDI) a la hora de definir el modelo organizacional del sistema, únicamente describir comportamientos esperados por parte de los agentes y (iii) una organización proporciona un método por el que se puede dividir en grupos, donde cada grupo supone un contexto de interacción entre agentes.

De la misma forma que Gaia, la última versión de **TROPOS** presenta una versión extendida de su primera versión, orientada a la definición de SMA basados en el concepto de organización. Esta nueva versión se centra en dos teorías: la *teoría de la organización* y la *teoría de alianzas estratégicas*, que tratan el estudio de las estructuras sociales. La *teoría de la organización* persigue comprender la estructura y diseño de la organización, mientras que la *teoría de las alianzas estratégicas* modela las colaboraciones estratégicas de

elementos independientes de la organización, que comparten una serie de objetivos comunes que buscan satisfacer. A partir de estas dos teorías, resultan diferentes estilos organizacionales, que se definen como meta-clases de estructuras organizacionales que ofrecen un conjunto de parámetros de diseño para coordinar la asignación de objetivos y procesos.

**OperA** describe el comportamiento deseado de la sociedad y su estructura general a través de un modelo de organización, donde se describen los roles, las interacciones y las normas sociales. La dinámica organizacional también se detalla utilizando un *modelo social* y un *modelo de interacción*. En el *modelo social*, los agentes se asignan a roles que utilizan contratos sociales que describen un comportamiento acordado dentro de la sociedad. El *modelo de interacción* describe el comportamiento real de la sociedad durante su ejecución. Estos dos últimos modelos no se pueden definir en la fase de análisis y diseño, ya que son una consecuencia de las interacciones reales del agente; por lo tanto, sólo el modelo organizacional puede definirse claramente. Inicialmente, se selecciona el modelo de coordinación más adecuado. En este modelo de coordinación intervendrán una serie de agentes facilitadores, además de los agentes relacionados con el propio dominio de la aplicación. En lo relativo a los modelos de coordinación, OperA cuenta con tres modelos: mercado, jerarquía y red.

La metodología **O-MaSE** (Organization-based Multiagent Software Engineering) surge como una extensión de MaSE, en la que las conversaciones entre agentes se diseñaban a bajo nivel, lo que hacía difícil comprender los procesos comunicativos de la organización. O-MaSE se basa en la definición de tres estructuras básicas: (i) *metamodelo*, que define los principales conceptos que se usan en los SMA desde un punto de vista organizacional (metas, roles, agentes, modelo de dominio y políticas); (ii) *fragmentos de métodos*, que establecen las actividades a realizar durante el desarrollo del software (definiéndolos en términos de escenarios, unidades de trabajo, productores, productos y lenguajes) y (iii) *guías o pautas*, que combinan los fragmentos de métodos para obtener los procesos finales.

**GORMAS** es metodología para la definición de SMA que se centra en una perspectiva de las organizaciones humanas. Puesto que esta metodología se centra en el concepto de organización, se facilitan el análisis y diseño de los

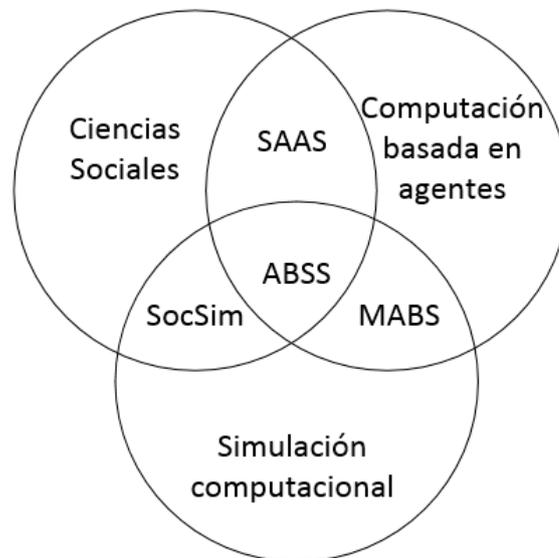
mecanismos de coordinación y colaboración en sistemas abiertos. El diseño de la organización se realiza en ocho fases que cubren el análisis, el diseño de la estructura organizativa y el diseño de la dinámica de la organización. El modelo de la organización resultante se compone de cuatro dimensiones: (i) *dimensión estructural*, que define los elementos del sistema y sus interacciones; (ii) *dimensión funcional*, que define los servicios, tareas y objetivos del sistema, detallando así su funcionalidad; (iii) *dimensión del entorno*, que define los elementos del entorno y cómo se accede a ellos y (iv) *dimensión normativa*, que determina las normas de la organización y los objetivos normativos que deben seguir los agentes.

### 3.3. Simulación social basada en agentes

El modelado basado en agentes es la técnica más apropiada para la simulación de sistemas con un gran número de objetos activos (bien sean personas, unidades de negocio, animales, etc.) que dependen del orden o tiempo en que los eventos ocurren. Esto se debe a que ofrecen la capacidad de capturar entornos dinámicos de alta complejidad, pueden implementarse sin necesidad de tener un gran conocimiento acerca de las interdependencias globales y debido a la facilidad que ofrecen a la hora de construirlos frente a cambios en el modelo, ya que generalmente sólo es necesario realizar cambios locales, no globales (Borshchev and Filippov 2004). Por ello, el uso de técnicas basadas en agentes inteligentes es idóneo para desarrollar sistemas con los que se obtengan simulaciones de entornos cambiantes y complejos, surgiendo así el concepto de simulación social basada en agentes (*ABSS, Agent-Based Social Simulation*).

La simulación social basada en agentes es una disciplina que se ocupa de la simulación de fenómenos sociales, utilizando modelos computacionales multiagentes. En estas simulaciones, se representa a las personas o grupos de personas como agentes. La simulación social basada en agentes es, por tanto, una combinación de ciencias sociales (conjunto de ciencias que estudian la interacción entre entidades sociales), computación basada en agentes y simulación computacional (ver Figura 7) (Li et al. 2008), (Davidsson 2002). El fenómeno a simular es un conjunto de secuencias o eventos en un sistema (natural o artificial), que puede existir o no en el momento en que se realiza la

simulación. Generalmente la simulación se lleva a cabo para obtener un mayor conocimiento del fenómeno que se estudia, pudiendo por ejemplo probar diferentes modelos de sistemas, realizar predicción de comportamientos futuros o realizar experimentos de rendimiento que, de no realizarse mediante una simulación, no podrían llevarse a cabo.



**Figura 7 Intersección de las áreas que definen la Simulación Social Basada en Agentes**

Como se menciona anteriormente, la simulación social basada en agentes puede verse como la intersección de tres áreas de estudio: ciencias sociales, simulación computacional y computación basada en agentes. También surgen otros ámbitos de estudio de la intersección de estas áreas dos a dos (ver Figura 7), definiendo así:

- **Aspectos sociales de los sistemas de agentes** (Social Aspects of Agent Systems, SAAS): surge de la intersección entre las ciencias sociales y la computación basada en agentes. Estudia las normas, instituciones, organizaciones, cooperación, competición, etc.
- **Simulación basada en sistemas multiagentes** (Multi Agent Based Simulation, MABS): intersección entre la computación basada en agentes y la simulación computacional, estudia el uso de la tecnología de agentes para la simulación de cualquier fenómeno en un ordenador.

- **Simulación Social** (Social Simulation, SocSim): corresponde a la intersección entre las ciencias sociales y la simulación computacional. Se relaciona con la simulación de cualquier fenómeno social en ordenadores, empleando cualquier técnica de simulación, generalmente empleando modelos simples de las entidades sociales que realizan interacciones de un nivel muy básico.

### 3.3.1. Clasificación

(R. Axtell 2000) define tres tipos de aplicaciones de la simulación social basada en agentes, atendiendo a la complejidad de los modelos a simular:

- **Modelos con agentes como simulaciones clásicas** (cuando los modelos se pueden formular y resolver completamente): donde se hace un uso muy simple de los modelos computacionales basados en agentes. En este caso, el proceso que es objeto de estudio es describable a través de una o más relaciones matemáticas.
- **Agentes artificiales como complemento a la formulación de teorías matemáticas** (para modelos parcialmente resolubles): en aquellos casos en los que no es posible resolver analíticamente un modelo matemático de manera completa. Se pueden extraer relaciones matemáticas, pero no son directamente solubles, sólo en algunas circunstancias restrictivas el modelo es completamente soluble a partir de manipulaciones analíticas. En estos casos los modelos basados en agentes pueden esclarecer significativamente la estructura de la solución, ilustrar las propiedades dinámicas del modelo, servir para probar la dependencia de los resultados de parámetros y suposiciones, y ser la fuente de numerosos ejemplos.
- **Computación con agentes como herramienta de análisis** (cuando los modelos son intratables o probablemente sin solución): en los casos en que la solución numérica parece ser esencialmente intratable, no en el sentido de ser imposible, pero simplemente no es útil. Esto ocurre cuando las ecuaciones que definen el modelo son de una no linealidad alta. En estos casos no es posible describir un modelo; hay

algunos parámetros y configuraciones que no son estables o que son muy cambiantes, lo que dificulta el análisis.

Desde otra perspectiva en (Marietto et al. 2003), los autores ven la necesidad de establecer otra clasificación de los modelos de ABSS dado el fuerte carácter interdisciplinar de esta especialidad, que conlleva dificultades a la hora de establecer suposiciones en cuanto a términos y métodos. Distinguen cuatro clases de modelos: Social Artificial, Socio-Cognitivo, Socio-Concreto y Prototipos para resolución:

- **Modelos Sociales Artificiales:** el nivel de abstracción dentro de esta corriente es, de forma habitual, meramente teórico. En estos trabajos, las relaciones a priori pueden abstraerse matemática, física, social o psicológicamente. Si se adopta una postura radical de esta tendencia, sin establecer conexiones con lo que concebimos como real u objetivo en el mundo real, no existe ninguna referencia empírica al modelo presentado de la simulación (el comportamiento de la simulación).
- **Modelos Socio-Científicos:** en este tipo de modelos, los investigadores utilizan el marco teórico de las ciencias sociales, naturales y /o ambientales para representar fenómenos sociales. Los modelos que se persigue construir ya se conocen o existe alguna evidencia de su existencia. Dentro de estos modelos, aparecen dos corrientes:
  - **Modelos Socio-Cognitivos:** estos modelos están generalmente basados en la animación digital de formalismos lógicos, que representan agentes y estructuras sociales de acuerdo a una teoría específica. La animación tiene como propósito la comprobación de la consistencia teórica, así como su refinamiento. Estos sistemas están claramente influenciados por la tradición experimental de la IA y la ciencia cognitiva, caracterizada por el uso de arquitecturas de agentes cognitivas que representan el conocimiento de forma explícita.

- **Modelos Socio-Concretos:** en este tipo de modelos se pretenden representar observaciones directas de procesos sociales e institucionales. Tienen como objetivo utilizar la simulación social para describir los sistemas sociales o algunos de sus aspectos y capturar las percepciones – a menudo conflictivas- del sistema social desde el punto de vista de los expertos del dominio estudiado.
- **Prototipos para resolución:** el objetivo de estos modelos es explorar y probar requerimientos técnicos para aplicaciones software basadas en SMA. El modelado del entorno debe ser lo más realista posible, con el fin de que los agentes actúen en unas condiciones similares. En algunos casos, los agentes que intervienen en la simulación pueden interactuar con seres humanos u otros sistemas reales.

### 3.3.2. Áreas de aplicación

La simulación basada en sistemas multiagentes (MABS) es una técnica que ha sido ampliamente empleada en multitud de disciplinas para la resolución de problemas, generalmente grandes y distribuidos, donde los entornos son abiertos y cambiantes. En contraposición con otras técnicas de simulación, donde las características de una población se promedian juntas y el modelo simula los cambios producidos en estas características promediadas para toda la población, MABS se centra en modelar el comportamiento específico de individuos, su comportamiento e iteraciones entre éstos o el entorno en base a un conjunto de reglas.

Como se ha introducido anteriormente, los modelos, arquitecturas e implementaciones software derivados de este campo, pueden ser de gran utilidad a la hora de aplicarlos al campo de la simulación social, dando lugar a la subdisciplina de la ABSS. Lógicamente, el ámbito de estudio de esta disciplina es más reducido, y existen una serie de problemas típicamente estudiados dentro de ésta (Figura 8):

- **Evolución de las sociedades.** Los modelos basados en agentes (ABM) permiten probar diferentes hipótesis y teorías sobre el cambio urbano, lo que permite comprender mejor cómo evolucionan las ciudades (Crooks 2006). Por ejemplo, Crooks presenta un modelo de

ABSS para explorar cómo las ciudades cambian y se desarrollan integrando su modelo con los Sistemas de Información Geográfica. UrbanSim es un modelo de simulación urbana que estudia las dinámicas urbanas y refleja agentes específicos que interactúan con otros agentes, como hogares, empleos y gobiernos (Waddell and Ulfarsson 2004). Para investigar los cambios en la estructura social de Nueva Zelanda, el proyecto Modeling Social Change (MoSC) simuló patrones de cohabitación interétnica utilizando modelos de ABSS poblados con datos censales (Walker 2009). Se puede encontrar una investigación similar en otro modelo basado en agentes para la simulación urbana (Navarro, Flacher, and Corruble 2011) y la simulación de dinámicas residenciales en una ciudad (Bhaduri et al. 2014).

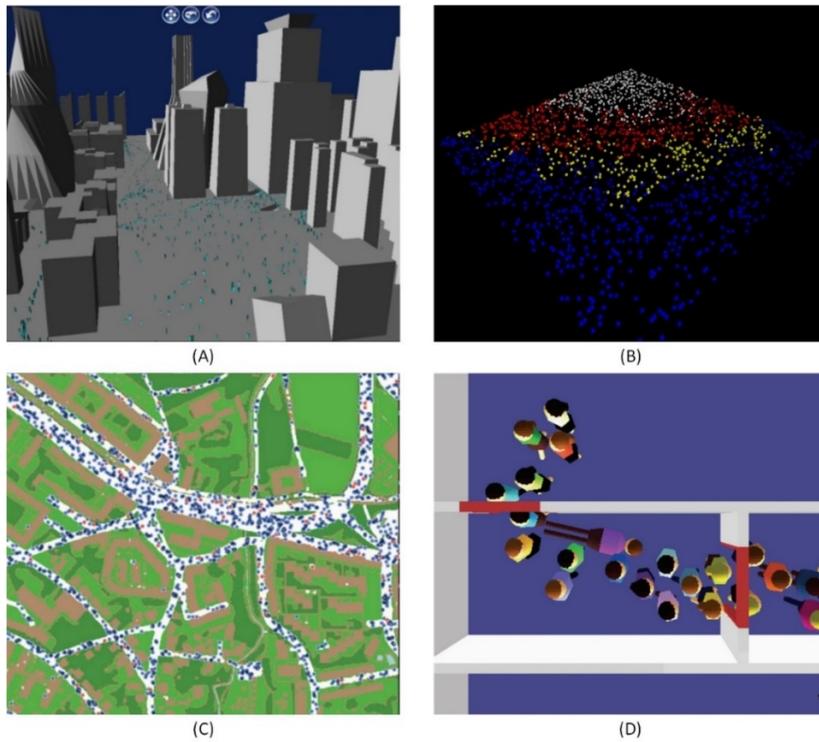
- **Sociedad artificial.** A diferencia de la investigación sobre la evolución de la sociedad, la investigación de la sociedad artificial generalmente abarca un marco de tiempo más corto en comparación con la evolución de la sociedad. Ésta funciona como banco de pruebas fundamental para otras investigaciones de alto nivel y con un dominio específico, como pueden ser las epidemias (Bisset and Marathe 2015), (Gong and Xiao 2007). Una sociedad artificial es una simulación multiagente donde los agentes autónomos llevan a cabo actividades en paralelo, se mueven alrededor de las ubicaciones del entorno y se comunican entre sí (Sawyer 2003). Requiere agentes individuales que representan a los humanos que tienen un determinado comportamiento, junto con las ubicaciones (hogares, escuelas, lugares de trabajo, hospitales, estaciones, etc.) que proporcionan espacio para las actividades de los agentes. Con base en los modelos de ciudades artificiales, los comportamientos colectivos fundamentales "emergen" de la interacción de los agentes individuales siguiendo unas pocas reglas simples (Parker and Epstein 2011).

- **Evacuación.** Los modelos de ABSS sobre evacuación se pueden usar como verificación de los planes de emergencia existentes para evacuación de edificios (Camillen et al. 2009), para predecir las consecuencias de determinados procedimientos y responder de manera óptima a una emergencia a gran escala (Hawe et al. 2012) o para el análisis de modelos realistas de evacuación en grandes ciudades (Zia et

al. 2012). En el estudio de las evacuaciones a gran escala de las ciudades por (Lämmel, Grether, and Nagel 2010), ABSS se utiliza para comprender la interdependencia de las diferentes infraestructuras y sus vulnerabilidades frente a desastres naturales, ataques terroristas, accidentes y otros incidentes.

- **Transporte y movilidad.** Uno de los campos donde existen más trabajos basados en el uso de ABSS es en el estudio del transporte a gran escala. Por ejemplo, la plataforma de simulación de agentes XAXIS se utilizó para implementar una simulación de tráfico a gran escala que se centra en el problema del rendimiento (Suzumura and Kanezashi 2012). El proyecto TRANSIMS (Nagel and Rickert 2001) del Laboratorio Nacional Los Alamos (LANL), ha ayudado a crear modelos de ABSS a gran escala para estudiar el comportamiento de los 7.5 millones de habitantes de Suiza (Raney et al. 2002) y para el análisis de tráfico general en el área metropolitana de Buffalo-Niágara (Zhao and Sadek 2012). Un proyecto de investigación similar fue la simulación de transporte a gran escala basada en agentes para Shanghai (Lun Zhang et al. 2013) utilizando MATSIM (Balmer et al. 2009). La simulación de tráfico basada en agentes también se ha utilizado para determinar los cambios del comportamiento de los conductores en función de diferentes condiciones del tráfico, como por ejemplo el desarrollo de nuevas infraestructuras (Lei Zhang et al. 2012). Además de analizar el transporte, ABSS se ha aplicado en diferentes trabajos para el análisis de modelos de movilidad peatonal (Zia et al. 2013) (Pelechano, Allbeck, and Badler 2007).

- **Otros fenómenos sociales.** Además de los problemas anteriores, la simulación basada en agentes sociales es ampliamente utilizada para analizar otros fenómenos sociales. Por ejemplo, científicos educativos desarrollaron modelos basados en agentes para identificar las implicaciones en el éxito educativo derivadas de pertenecer a una determinada raza (Montes 2012). Encontramos otro ejemplo en (Barbosa Filho, Neto, and Fusco 2013), donde científicos sociales utilizaron modelos de ABSS para reproducir fenómenos migratorios. El objetivo en este trabajo es estudiar la interrelación entre los flujos migratorios, la comunicación y las redes sociales.



**Figura 8 ABSS: Áreas de aplicación - (A)Evolución de las sociedades (Navarro, Flacher, and Corruble 2011) (B) Sociedades Artificiales (R. L. Axtell et al. 2002)(C) Evacuación (Zia et al. 2013) (D) Transporte y movilidad (Pelechano, Allbeck, and Badler 2007)**



---

# CAPÍTULO IV

---

Simulación social basada en agentes  
para la integración de personas  
discapacitadas



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA



*En los capítulos anteriores se ha realizado una introducción a las técnicas de simulación social basadas en agentes, así como a la problemática actual en materia de accesibilidad. En este capítulo se presenta un sistema que trata de dar solución a parte de esta problemática haciendo uso de técnicas de simulación social basadas en agentes, en combinación con representaciones tridimensionales del entorno.*

## 4.1. Introducción

ABSS, en combinación con el uso de representaciones tridimensionales, hace posible realizar modelados y simulaciones de manera muy próxima a la realidad de entornos complejos y cambiantes. En este capítulo se presenta el diseño e implementación de una herramienta que combina el uso de estas dos técnicas con el objetivo de adaptar los entornos a las necesidades de personas con discapacidad. El principal objetivo de esta herramienta es identificar las posibles barreras arquitectónicas que puedan existir en un edificio. De este modo se podrá, a través de simulaciones, descubrir de antemano los posibles problemas de accesibilidad a los que las personas con discapacidad puedan enfrentarse antes de que estos problemas ocurran.

La tendencia actual hacia el desarrollo de sistemas computacionales en entornos de trabajo colaborativos y con una gestión distribuida del conocimiento, ha generado un gran interés en las OV: un conjunto de personas e instituciones que necesitan coordinar recursos y servicios a través de diferentes fronteras institucionales (Foster, Kesselman, and Tuecke 2001). Existe una clara analogía entre las sociedades humanas y las sociedades de agentes. Podemos definir una sociedad humana como una entidad social con un determinado número de miembros donde se hace una diferenciación interna de las funciones que realizan estos miembros (Peiro, Prieto, and Zornoza 1993). Por otro lado, una organización de agentes viene definida por un conjunto de roles, que mantienen ciertas relaciones entre sí, y que toman parte en los patrones de interacción con otros roles de una forma institucionalizada y sistemática (Zambonelli, Jennings, and Wooldridge 2003). Gracias a las capacidades ofrecidas por el uso de las OV, es posible modelar máquinas

sociales, creando sociedades artificiales de humanos y máquinas en las que se compartan tareas, objetivos y normas. Los agentes humanos y artificiales en un SMA intentan llevar a cabo tareas en el entorno del sistema al que pertenecen de manera cooperativa. Las tareas que pueden llevarse a cabo en el sistema vendrán definidas por el conocimiento y el conjunto de habilidades de los agentes, además de las restricciones impuestas por el entorno. En este contexto, los agentes representarán a los diferentes elementos y procesos que se desarrollen. Gracias a ello, será posible modelar diferentes tareas de acuerdo al rol que tengan los agentes, así como las características específicas que puedan tener. Los roles y las características de los agentes influirán en la forma en la que las tareas se lleven a cabo. El objetivo final del sistema es el de minimizar el número de tareas que no se pueden efectuar en su conjunto, de manera que se debe maximizar el cumplimiento de los objetivos marcados individualmente para cada agente.

Uno de los objetivos que se buscó en el momento de desarrollar esta herramienta fue el de modelar los diferentes entornos de una manera flexible y dinámica. Existen diferentes herramientas como MASON (Luke et al. 2004), Repast (North et al. 2005), Pangea (Zato et al. 2012) o Swarm (Gilbert and Terna 2000) que permiten la visualización de las interacciones producidas entre los agentes y entre los agentes con su entorno. Podemos ver una revisión de estas herramientas en (Railsback, Lytinen, and Jackson 2006) o (Lytinen and Railsback 2012). Estos modelos y herramientas permiten modelar una gran variedad de entornos y tareas. Sin embargo, se puede apreciar que todas estas herramientas sufren dificultades a la hora de modelar el entorno físico que se intenta simular, una característica que es especialmente relevante cuando las simulaciones se orientan hacia la integración de personas con discapacidades, puesto que un alto porcentaje de los problemas que se deben resolver están relacionados con la estructura de los edificios o con diferentes barreras físicas (escalones, rampas, ascensores, puertas, servicios, etc.).

Por esta razón, el sistema propuesto se basa en un enfoque novedoso, que consiste en el uso combinado de un SMA basado en OV y un entorno de modelado y representación tridimensional. La combinación de ambas estrategias es clave para que las simulaciones se lleven a cabo ya que, por un lado, los agentes pueden representar a las personas, de forma que implementen diferentes capacidades, tareas, objetivos, propósitos, etc., mientras que el

entorno tridimensional permite el modelado físico de diferentes entornos. De esta forma, este enfoque permite llevar a cabo las simulaciones en el propio entorno, así como la visualización de los resultados de las mismas.

## 4.2. Propuesta

A lo largo de esta sección se describen en detalle las principales características de la plataforma propuesta. La sección se encuentra estructurada en las siguientes subsecciones: (i) componentes de la arquitectura propuesta (ii) estructura de los agentes y (iii) comunicación de la plataforma de agentes con la herramienta de visualización.

### 4.2.1. Componentes de la arquitectura propuesta

La arquitectura general del sistema está compuesta de dos grandes bloques: un SMA y una herramienta para diseñar y visualizar entornos tridimensionales. Por un lado, el SMA está compuesto por un conjunto de agentes inteligentes que permiten realizar la simulación del modelo deseado, donde los agentes representarán a las personas y determinados elementos del entorno simulado. Para llevar a cabo la implementación de este componente se ha utilizado la plataforma JADE (Bellifemine, Poggi, and Rimassa 1999) -tal y como se detallará más adelante-. Se trata de una plataforma *open source* gratuita, ampliamente documentada y utilizada en el desarrollo de un gran número de proyectos de investigación. Esta plataforma simplifica la implementación de SMA a través de un *middleware* que cumple con las especificaciones FIPA (P. D. O'Brien and Nicol 1998) y mediante un conjunto de herramientas que facilitan las labores de depuración y despliegue (Nguyen et al. 2002).

La propuesta realizada está orientada hacia el modelado del sistema multiagente como una OV de agentes, por lo que debemos ser capaces de definir una estructura, roles, así como una serie de normas que regulen las interacciones entre agentes. Para ello, se incluye en el sistema una capa superior a JADE, encargada de la gestión del SMA. A través de ésta, se ha conseguido dotar al sistema de funcionalidades adicionales, que maximizan sus

capacidades, permitiendo una mayor interactividad y configuración por parte de los expertos humanos. Estas funcionalidades se detallan a continuación:

- Capacidad de uso de las **organizaciones virtuales de agentes**, que permiten que los agentes puedan adoptar diferentes topologías (V. Dignum 2009), permitiendo la representación artificial de sociedades humanas. Así, la estructura del SMA en cada simulación podrá variar, generando componentes específicos en función del entorno a modelar. Atendiendo a la simulación que se desee llevar a cabo, será necesario que el SMA pueda adoptar una de estas topologías, teniendo que existir diferentes tipos de agentes. JADE no da soporte a la gestión de organizaciones virtuales de agentes, por lo que ha sido necesario introducir una funcionalidad adicional con la que poder realizar esta tarea. Para dar soporte a esta funcionalidad, se ha incorporado al sistema una base de datos en la que se almacenará la topología de los agentes presentes en el sistema, haciendo así posible su reutilización en el futuro.
- Las tareas que los agentes puedan llevar a cabo, dentro de las sociedades artificiales que se generen en el marco de las simulaciones, pueden variar: aunque los objetivos de los agentes puedan ser los mismos, el proceso de toma de decisiones para realizarlos puede diferir en función del tipo de discapacidad que presente cada agente. De esta forma, se han desarrollado agentes con capacidades para la **planificación del reparto de tareas** atendiendo a las necesidades y configuración de la estructura organizacional. El usuario de la plataforma será responsable, a través de una serie de funcionalidades implementadas en la herramienta de visualización, de modelar los distintos agentes que hagan de actores en representación de los elementos que se quieran representar, permitiendo el trabajo colaborativo humano-artificial. Por ejemplo, a la hora de definir una organización con estructura jerárquica, dispondremos de dos tipos de agentes, donde en los niveles superiores se situarán los agentes encargados de la toma de decisiones -determinando qué tareas es necesario realizar y quién las debe realizar- y en las capas más bajas los agentes que tengan una funcionalidad más básica -encargados de llevar a cabo las tareas designadas-.

- **Comunicación con el entorno 3D**, de manera que se pueden notificar todos los cambios ocurridos, de manera bidireccional, entre la plataforma de agentes y el entorno tridimensional.

La Figura 9 muestra en detalle los diferentes componentes presentes en el SMA, así como las relaciones existentes entre ellos.

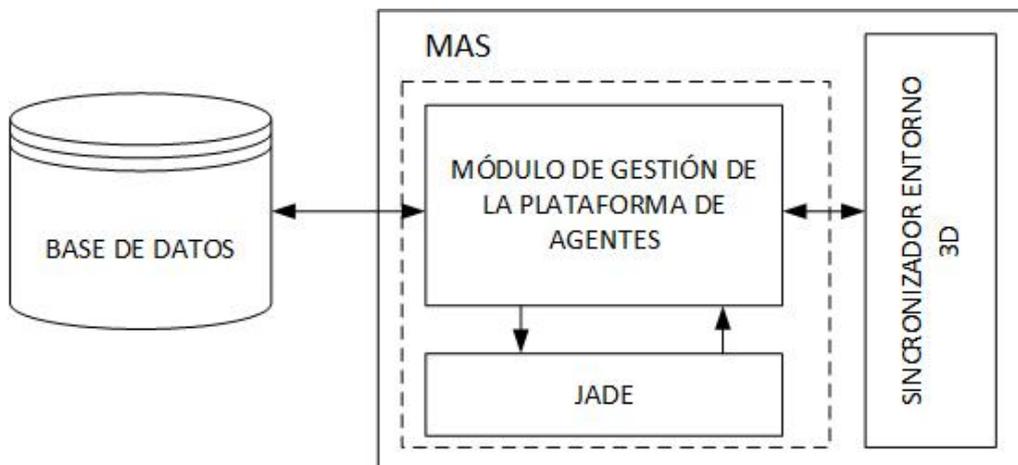


Figura 9 Componentes del SMA

Finalmente, el **entorno 3D**, que permite la representación de información real del entorno a simular, está compuesto por un **editor** y un **visualizador**. Una organización está rodeada de un entorno que se encuentra en continuo cambio. En este caso el modelo del entorno vendrá determinado por la fase de diseño del edificio en que se desarrolle la simulación. Este proceso se realizará a través de una herramienta basada en Unity 3D (“Unity Official Web Page” 2017).

El **entorno de edición 3D** (Figura 10) permite el modelado de entornos virtuales para zonas urbanas (edificios, pisos, apartamentos, jardines, parques, etc.) en tres dimensiones con un gran nivel de realismo y calidad. Esta herramienta permite generar entornos virtuales en 3D en escala, pudiendo definir elementos como plantas, paredes, pisos o suelos, además de incluir una serie de modelos de mobiliario. Este editor utiliza una serie de servicios de una plataforma de *Cloud Computing* (CC) (la Prieta et al. 2015) donde se almacenarán y recuperarán los modelos de los edificios diseñados. Los modelos de los distintos edificios pueden ser codificados en un formato específico, con el propósito de almacenar remotamente la definición del edificio en la plataforma

de CC, de la que se importarán y exportarán los escenarios que formen parte de las simulaciones, dotando así a la plataforma de una alta disponibilidad de la información.

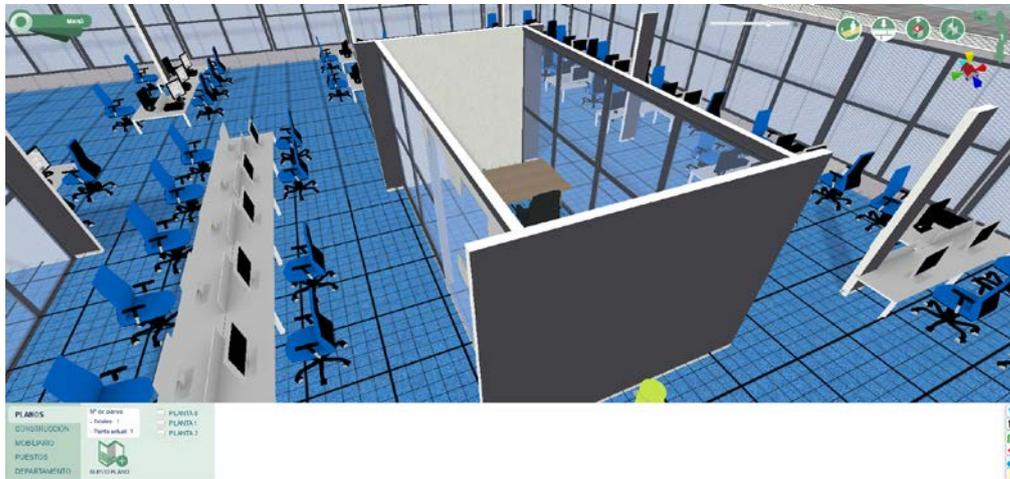


Figura 10 Entorno de edición 3D

El **visualizador 3D** dará el soporte necesario para poder renderizar y representar el entorno y las características definidas previamente en el editor 3D. También se encarga de mostrar los diferentes agentes que forman parte del sistema, haciendo posible visualizar el desempeño de las diferentes actividades de cada agente.

Uno de los principales problemas con los que nos enfrentamos en las escenas 3D es cuando un modelo necesita desplazarse de un punto a otro, por lo que es necesaria la utilización de un algoritmo que calcule la ruta. En este caso se ha hecho uso de CritterAI (“CritterAI Documentation” 2017), un sistema de navegación ideado para ser empleado en Unity. CritterAI ofrece un conjunto de funcionalidad relativa a la generación de mallas de navegación, búsqueda de caminos y administración de movimientos. En cuanto al algoritmo de cálculo de rutas utilizado por esta herramienta, ofrece implementaciones de los algoritmos de búsqueda Dijkstra (Dijkstra 1959) y A\* (Hart, Nilsson, and Raphael 1968). Estos algoritmos se emplean para encontrar el camino de menor coste entre un nodo de origen y uno de destino. Los nodos sobre los que estos algoritmos buscarán el camino de coste mínimo serán los generados en la malla de navegación.

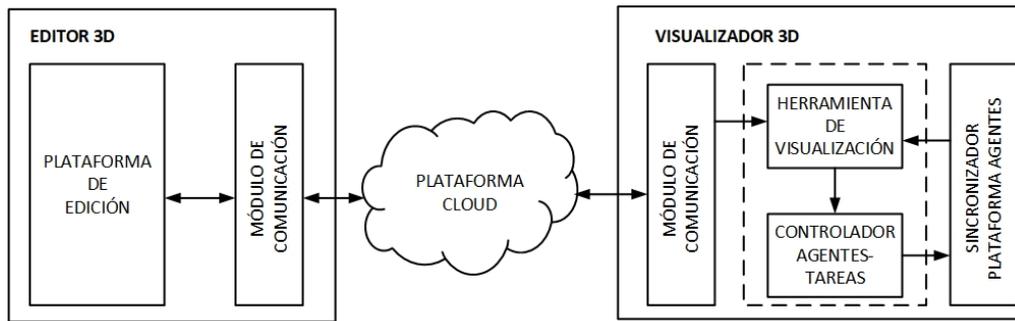


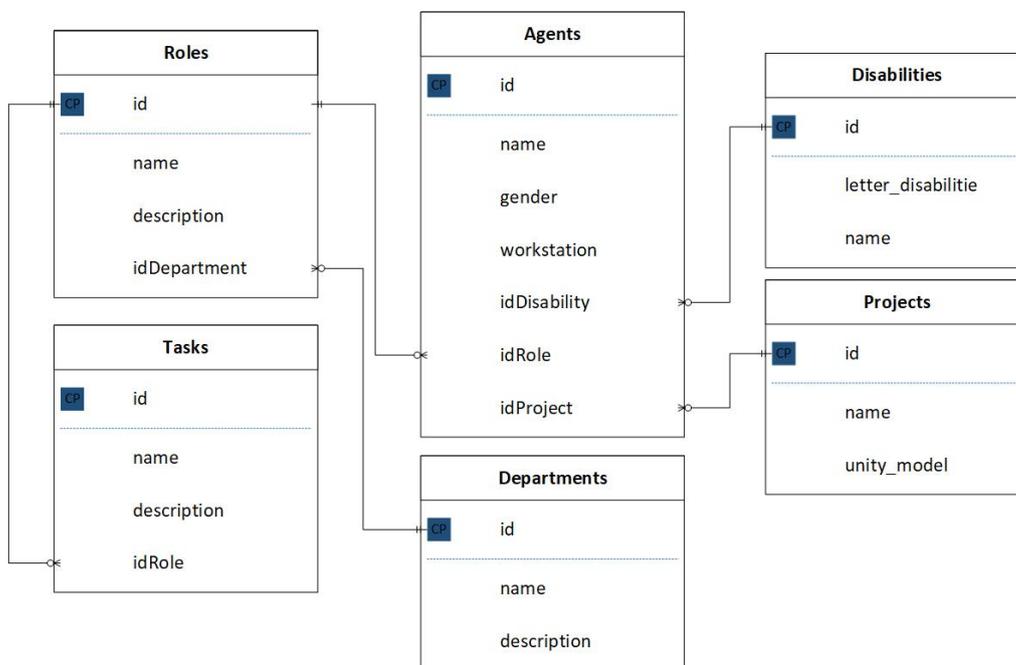
Figura 11 Módulos del entorno 3D

Por otro lado, ha sido necesario añadir mecanismos de sincronización entre el visualizador y la plataforma de agentes, de forma que exista una correspondencia entre lo que ocurra en la plataforma y lo que se visualice en esta herramienta. Además, esta plataforma es el principal medio de interacción entre humanos y máquinas, permitiendo que los usuarios modifiquen las simulaciones en función de sus objetivos. Las operaciones que podemos llevar a cabo serán la de creación y eliminación de agentes y asignación de tareas. Como se ha tratado en el capítulo anterior, todas estas operaciones solicitadas desde el entorno 3D se comunicarán a la plataforma de agentes, que atenderá estas solicitudes y confirmará o no su realización para poder así actualizar en consecuencia el estado de la visualización. La Figura 11 muestra el conjunto de módulos que componen el entorno de edición 3D y el visualizador 3D, previamente explicados.

#### 4.2.1.1. Implementación del modelo organizacional

La plataforma JADE (Bellifemine, Poggi, and Rimassa 1999), se ha tomado como base para la implementación del SMA, adaptándola para permitir la gestión de OV. Así, para la gestión de los agentes existentes en la OV, se utiliza una base de datos especialmente diseñada, que permitirá almacenar sus características: los roles que tienen asignados, los servicios que ofrecen, así como características adicionales que puedan presentar los agentes. El sistema gestor de bases empleado ha sido SQLite (SQLite 2018), un sistema de gestión de bases de datos relacionales con bajos requerimientos de memoria y altas velocidades de lectura/escritura.

El control de la información almacenada en la base de datos y, por lo tanto, de los modelos organizativos empleados en cada simulación, está encapsulado en un agente JADE denominado el Agente Base de Datos (DBA). Este agente ofrece una serie de servicios que facilitan todas las formas de acceso que se tienen sobre la base de datos que almacenará la estructura de la OV, evitando que existan accesos inadecuados por parte de agentes que no debieran poder consultar o modificar el contenido de la base de datos. Dentro de los servicios ofrecidos por este agente, está el de añadir agentes, roles, servicios, etc., así como consultar, modificar o borrar su información. Para el acceso a los diferentes servicios se implementa un módulo para comprobar permisos, haciendo los servicios accesibles únicamente a los agentes que se especifique.



**Figura 12 Estructura de base de datos**

En la Figura 12 se muestra la estructura de la base de datos que se utilizará para almacenar la estructura de la OV, donde a través de un modelo relacional somos capaces de definir los diferentes roles asociados a los agentes, así como las tareas que puede llevar a cabo un agente con un determinado rol. Adicionalmente se han incorporado tres tablas específicas para el caso de estudio en el que se evaluará el modelo propuesto, pudiendo así definir qué agentes intervienen en cada proyecto, si presentan algún tipo de discapacidad y asociar roles con los diferentes departamentos de una empresa.

### 4.2.1.2. Estructura de los agentes

En la Figura 13 se presenta en detalle la estructura de cada uno de los agentes, que constarán de tres grandes bloques: (i) un módulo de comunicación, que permitirá la comunicación del agente con el resto de agentes de la plataforma; (ii) un módulo de razonamiento, que se detalla a continuación; y (iii) un módulo de comunicación del agente con el entorno 3D, formado por un sensor y un efector.

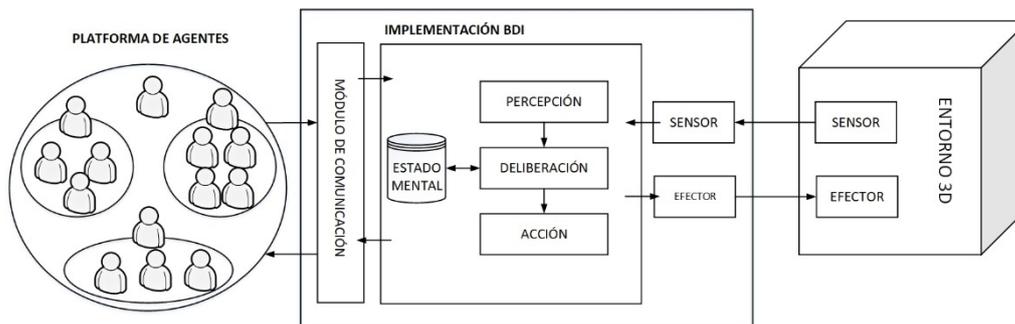


Figura 13 Estructura de los agentes

Para la definición e implementación del módulo de razonamiento de agentes a utilizar dentro de la plataforma, se ha optado por el modelo BDI (Rao, Georgeff, and others 1995). De acuerdo con la definición de este modelo, el comportamiento del sistema viene determinado por las actitudes mentales de los agentes (creencias, deseos e intenciones) y las relaciones existentes entre éstas. Las *creencias* representan el conocimiento del agente: la información de la que dispone acerca de otros agentes, objetivos, actividades y el entorno. Éstas se actualizan en base a la percepción del agente y de la ejecución de sus intenciones. Los *deseos* representan las metas u objetivos a conseguir por parte del agente, representan un estado potencial del entorno en el que se encuentra el agente. Las *intenciones* son el elemento que aporta deliberación al agente, representan los planes que llevan a satisfacer una serie de deseos u objetivos.

La arquitectura propuesta en (Rao, Georgeff, and others 1995) establece tres estructuras de datos dinámicas en representación de las creencias deseos e intenciones junto con una cola de entrada de eventos que se interpretan repetidamente. En cada iteración, la primera acción efectuada por el intérprete es leer la cola de eventos y generar una lista de opciones (posibles metas a conseguir). Después selecciona las mejores de estas acciones, añadiéndolas a la

estructura de intenciones. Si hay alguna intención que realice una acción atómica, el agente la ejecuta. A continuación, los eventos que han ocurrido durante el ciclo de ejecución del intérprete se añaden a la cola de eventos. Por último, el agente modifica las estructuras de intenciones y de deseos, eliminando tanto las intenciones y deseos que se han llevado a cabo con éxito como los deseos imposibles y las intenciones irrealizables. Con este modelo, los sistemas deliberativos se adecúan más a entornos dinámicos y también son más adecuados para aplicaciones que funcionan en tiempo real, por lo que se adapta a la perfección a la plataforma que se presenta.

Además de disponer de un módulo de razonamiento, es necesario introducir dos módulos adicionales que permitan al agente obtener información acerca del medio (**sensor**), así como poder modificarlo (**efector**). Es necesario que estos módulos sean distribuidos, teniendo un componente presente en la propia implementación del agente dentro de la plataforma de agentes, y otro componente dentro del entorno 3D, de tal forma que el agente sea capaz de tener conciencia del estado del entorno tridimensional que se ha renderizado para la simulación en curso, monitorizando los cambios producidos en el mundo virtual.

El modelo de agente presentado anteriormente está ideado para representar a diferentes actores que intervengan en la simulación, en representación de elementos como seres humanos o similares. Sin embargo, es necesario introducir también otro tipo de agentes, los **agentes de entorno**. Éstos representarán elementos del entorno con los que el resto de los agentes pueden interactuar de forma directa. Ejemplos de estos agentes pueden ser teléfonos, ascensores, fotocopiadoras, etc. Estos agentes no son conscientes del entorno que les rodea, sólo serán conscientes de su estado interno, por lo que carecerán de sensores. Cualquier interacción con otros agentes no podrá ser iniciada por un agente de entorno. Cuando un agente solicite una interacción con éstos, éste consultará su estado interno, y le comunicará la información pertinente al agente, quien finalmente determinará en base a esta información si puede llevar a cabo la acción que se le hubiera asignado previamente.

La comunicación entre agentes es necesaria para poder conseguir de una manera más eficiente bien los objetivos del sistema en el que éstos conviven o bien los objetivos del propio agente. Existen una serie de etapas en las que es

evidente la necesidad de la presencia de comunicación entre agentes, por ejemplo, a la hora de definir el problema a solucionar, así como su descomposición y distribución entre los agentes que conforman el sistema. Para llevar a cabo la comunicación entre los agentes, éstos están dotados de un módulo de comunicación FIPA ACL. Gracias al uso de JADE no ha sido necesario redefinir funcionalidad adicional, puesto que esta plataforma facilita una implementación completa de estos protocolos de interacción entre agentes.

#### *4.2.1.3. Comunicación de la plataforma de agentes con la herramienta de visualización*

Una de las tareas esenciales dentro de la plataforma será la de establecer una comunicación entre JADE y el entorno 3D para que exista una correspondencia real entre lo que ocurre en la plataforma de agentes y la visualización que tendrá lugar en la plataforma 3D. Dentro de la plataforma de agentes, existirá un agente encargado de gestionar las comunicaciones en la parte de JADE.

Con este propósito, la comunicación entre la plataforma de agentes y el entorno 3D se realizará mediante sockets TCP, existiendo en Unity un módulo dedicado a la gestión de las peticiones realizadas por la plataforma de agentes y viceversa. Las tareas de creación, eliminación e interacción entre agentes ejecutadas en la plataforma deben ser actualizadas en el entorno 3D, mientras que las tareas de creación, eliminación e interacción entre agentes ejecutadas desde la interfaz 3D, deben llevarse a cabo primero en la plataforma de agentes para pasar a ser posteriormente actualizadas en Unity.

Para la implementación del módulo de comunicación alojado en Unity se hará uso de IKVM.NET, que permite la ejecución de código compilado en Java directamente en MICROSOFT.NET. La comunicación se dividirá en 2 bloques:

1. Sockets dedicados a la realización de las tareas en JADE y su actualización correspondiente en Unity.
2. Sockets dedicados a la realización de las tareas inicializadas desde la interfaz de Unity, que deben realizarse primero en JADE para después actualizarse en Unity.

Para la realización de tareas en JADE, que serán posteriormente actualizadas en Unity, se utilizarán tres elementos: dos sockets, uno para el envío de tareas y otro para la confirmación de las tareas realizadas, y una tabla con la que mantendremos un registro de estas tareas (ver Figura 14).

- **UnityTasks:** que almacena las tareas que aún no han sido actualizadas.
- **JadeProducer:** que, a través de un socket TCP, permite enviar las tareas a Unity, donde existirá un recurso (UnityConsumer) que se encuentra escuchando las peticiones producidas.
- **JadeConsumer:** que abre un socket TCP para recibir la información de las tareas realizadas. En la parte de Unity se encontrará UnityProducer, un cliente que envía las confirmaciones de las tareas.

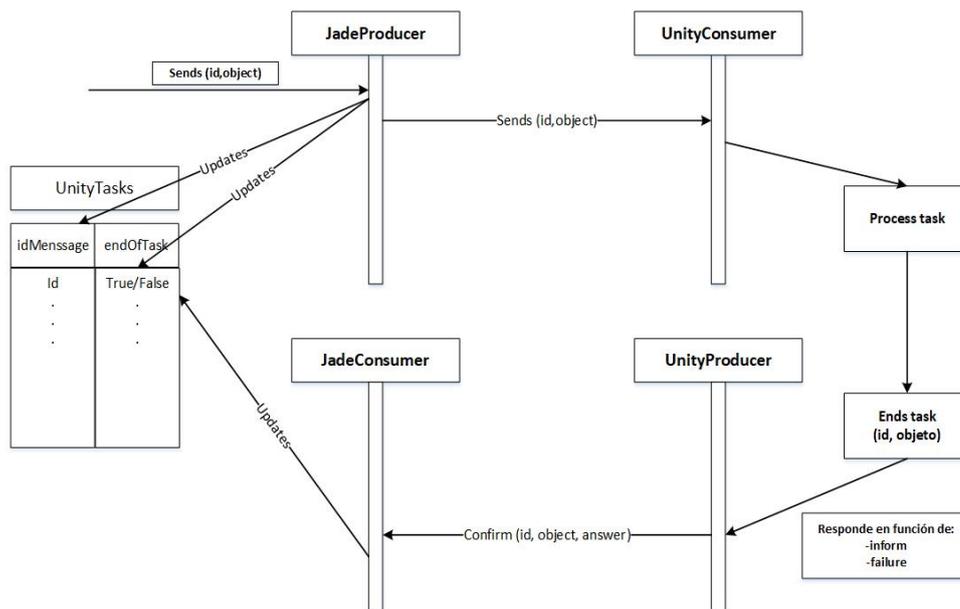


Figura 14 Comunicación JADE-Unity

En lo relativo a la realización de tareas en Unity y actualizadas en JADE, UnityTasks reside en el lado de Unity, ya que es el encargado de realizar las peticiones y debe comprobar que todo lo que se realice en JADE se actualice después en Unity.

En la Figura 15 podemos ver el esquema que sigue esta comunicación, donde se utilizará un socket TCP. JADE será el servidor, que estará a la escucha

de peticiones procedentes de Unity. Cada petición en Unity es un nuevo cliente que pide conexión al servidor, con lo cual, a lo largo de la ejecución, podrán coexistir varios clientes. La petición que se puede realizar desde Unity puede ser de tres tipos: creación de agentes, eliminación de agentes o asignación de tareas a los agentes.

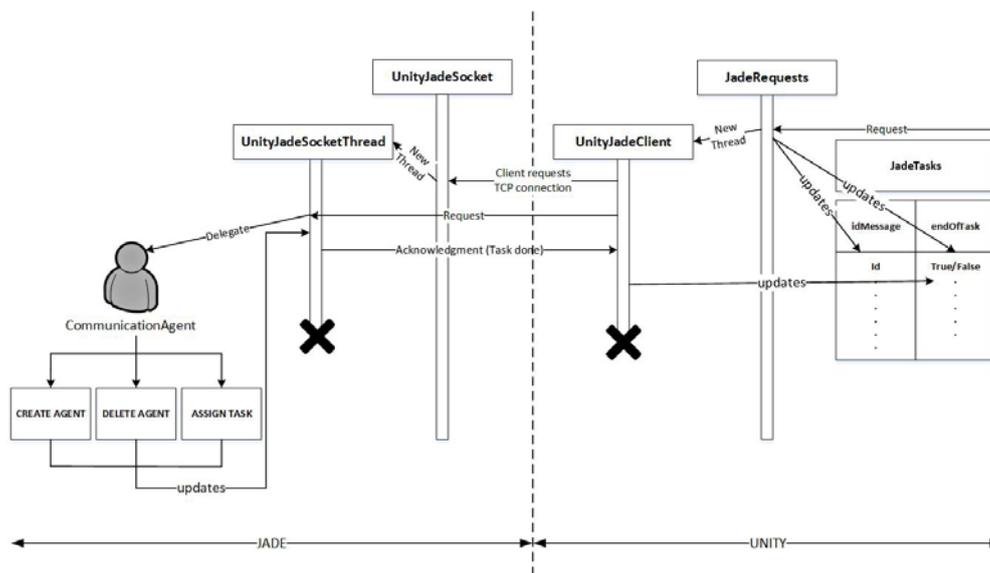


Figura 15 Comunicación Unity-JADE

El **Agente Comunicación (AC)** será el encargado de atender las peticiones que llegan desde Unity, realizando después las tareas que correspondan en función de la trama intercambiada. La trama que se envía en cada petición (ver Figura 16) es una clase con los siguientes componentes:

- **Tipo trama**, que indica el tipo de petición.
- **Id tarea**, que contiene el número de identificación de una trama.
- **Nombre agente**: contiene el nombre del agente al que afecta la petición.
- **Extra1, Extra2**: contendrán la información específica que sea necesaria en cada caso.

Tipo Trama	Id tarea	Nombre agente	Extra 1	Extra 2
<p><b>Tipo Trama:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-“C” para tramas de Creación</li> <li>-“D” para tramas de Eliminación</li> <li>-“T” para asignación de tareas</li> </ul> <p><b>Id tarea:</b> número de identificación</p> <p><b>Nombre agente:</b> nombre del agente que pide la tarea</p>			<p><b>Extra 1:</b> el significado de este campo dependerá del tipo de trama:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Para tramas “C”: Tipo de agente</li> <li>-Para tramas “D”: Valor null</li> <li>-Para tramas “T”: Tipo de tarea a implementar</li> </ul> <p><b>Extra 2:</b> el significado de este campo dependerá del tipo de trama:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-Para tramas “C” : Información extra que se necesite (dependerá del caso de estudio)</li> <li>-Para tramas “D”: Valor null</li> <li>-Para tramas “T”: true/false, indica si la tarea ha terminado de realizarse en Unity</li> </ul>	

**Figura 16 Trama de comunicación**

### 4.3. Caso de estudio

A través de un caso de estudio práctico se podrá evaluar y validar el sistema propuesto. El ámbito de aplicación es el análisis de la accesibilidad de los distintos puestos de trabajo de una empresa real: las oficinas de Indra Sistemas S.A. en Salamanca, para que a través de la realización de una serie de simulaciones se efectúe una extracción de conocimiento acerca de los diferentes problemas que puedan encontrar los trabajadores discapacitados de dicha empresa en su día a día.

Para la realización de las simulaciones, será necesario definir las características de la OV de agentes, de tal forma que ésta sea capaz de modelar los procesos que se llevan a cabo en la empresa de forma lo más fiel a la realidad posible (Corchado et al. 2003). Para ello, se definen los diferentes roles que pueden adquirir los agentes, los servicios necesarios para el correcto funcionamiento de la organización, las normas que regirán la sociedad y los mensajes e iteraciones propios de los agentes.

Además, se debe modelar el entorno en el que se lleve a cabo la simulación, en este caso el edificio de la empresa objeto de estudio. Para ello se hará uso de la herramienta de edición 3D que se ha presentado anteriormente. Gracias a las utilidades implementadas, se podrá efectuar el modelado del edificio a partir de sus planos, de tal forma que el entorno en el que se efectúa

la simulación sea análogo al mundo real. Por otra parte, se deberá clonar la disposición del mobiliario dentro del edificio, para así poder evaluar, para cada puesto de trabajo, si el puesto es accesible para personas con distintos tipos de discapacidad. Posteriormente, se efectuarán una serie de simulaciones que muestren el comportamiento de la organización en diferentes situaciones, pasando finalmente a realizar una validación del modelo propuesto.

En primer lugar, se define el modelo de interacción, analizando las necesidades de los usuarios que utilicen el sistema y la forma en que se realiza el intercambio de información entre los diferentes elementos que participan en la simulación. Se definen los siguientes roles:

- **Usuario:** representa al usuario o cliente del sistema; en este contexto podrá ser el responsable de definir la distribución de elementos en el edificio, el responsable de recursos humanos que asigne los puestos de trabajo a los empleados o el arquitecto encargado de diseñar el edificio en que se llevará a cabo la actividad profesional, con el fin de obtener información acerca de la accesibilidad del entorno.
  - Es el encargado de iniciar el proceso de simulación.
  - Modelará los distintos agentes que hagan de actores en representación de los trabajadores de la empresa, así como las tareas que éstos vayan a realizar durante la simulación.
  - Tiene acceso a la información que se genera tras los procesos que se simulan.
- **Dirección:** este agente se encarga de realizar la planificación de tareas que se llevarán a cabo por el conjunto de la organización. Podrá estar presente o no dependiendo de la estructura organizacional de la empresa a representar.
  - Genera las tareas que representen los objetivos a cumplir por el conjunto de la organización.
  - Delega su distribución a los diferentes responsables de área atendiendo a la naturaleza de la tarea.

- **Responsable de área/departamento:** planifica la distribución de las tareas asignadas al departamento que gestiona.
  - Recibe las tareas de la dirección.
  - Planifica su distribución entre los agentes que forman el departamento atendiendo a su disponibilidad (tendrán mayor prioridad los agentes que tengan asignados un menor número de tareas) y capacidades (no todos los agentes ofrecen los mismos servicios).
- **Trabajador:** agentes que representan a cada uno de los trabajadores que intervienen en la simulación.
  - Los agentes tendrán una pila donde almacenen todas las tareas que deben realizar, previamente asignadas a través del responsable de área.
  - Emitirán información relativa al grado de éxito con que han llevado a cabo cada una de ellas.
  - Todos estos agentes tienen en común una serie de elementos, que definen un conjunto de comportamientos y capacidades cognitivas compartidas entre ellos. Además de estas características comunes, los agentes tendrán características propias, definidas en función de su rol dentro de la organización y su discapacidad.
  - Los roles asignados determinarán las tareas que puedan realizar y comportamientos específicos para cada una de ellas, de manera que puedan modelarse ejecuciones diferentes para una misma tarea atendiendo al tipo de discapacidad del trabajador.
- **Agentes de entorno:** representan aquellos elementos del edificio con los que el agente puede interactuar de manera directa. Podemos encontrar ejemplos dentro de este tipo de agentes en elementos del entorno como pueden ser los teléfonos, ascensores o fotocopiadoras.

- Estos agentes no son conscientes del entorno que les rodea, sólo son conscientes de su estado interno.
- Cualquier interacción con otros agentes será iniciada en cualquier caso por un agente humano.
- Cuando un agente solicite su uso, consultará su estado interno, comprobando si está libre y además tiene los recursos necesarios para que se pueda llevar a cabo la tarea solicitada. Finalmente comunicará esta información al agente, determinando así si puede finalizar la tarea que se le había asignado.
- **Agente Base de Datos:** este agente ofrece una serie de servicios que facilitan todas las formas de acceso que se tienen sobre la base de datos que almacenará la estructura de la OV.
  - Cuidará de accesos inadecuados por parte de agentes que no debieran poder consultar o modificar el contenido de la base de datos. Estos servicios permitirán añadir agentes, roles, servicios, etc. a la base de datos, así como consultar información, modificar, borrar su información.
  - Para el acceso a estos servicios será necesario un pequeño módulo para comprobar permisos, haciendo los servicios accesibles únicamente a los agentes que se especifique.
- **Agente de recursos humanos:** La OV propuesta puede clasificarse dentro de las llamadas **sociedades semi-abiertas**, ya que tendrá un mecanismo que controle la admisión de los agentes, siendo necesario realizar una petición al mecanismo para que este evalúe la entrada o no del agente a la sociedad. Este agente es el encargado de llevar a cabo dicha tarea.
  - Evaluará las candidaturas de los agentes que soliciten acceder a la organización, aprobando las distintas propuestas en función de las plazas vacantes que existan en el departamento al que intente acceder el agente.
  - El número de plazas por departamento vendrá definido por los puestos de trabajo que se definan en el entorno

laboral, que tendrán asociado un departamento y un agente en caso de estar ocupados.

- **Agente comunicación:** encargado de comunicar el SMA con la herramienta de visualización, de forma que facilite el paso de mensajes entre los dos módulos de la arquitectura.
  - Garantiza que exista una correspondencia real entre lo que ocurre en la plataforma de agentes y la visualización que tendrá lugar en el visualizador 3D.
- **Agente supervisor:** analizará los distintos comportamientos y evoluciones de los agentes que intervienen en la simulación para así poder llevar a cabo un análisis de los procesos que tienen lugar en la organización.
  - Se comunicará con el resto de los agentes trabajadores tras la consecución de una tarea, recogiendo si han podido llevarla a cabo o no.
  - En el caso de que una tarea se haya realizado satisfactoriamente se comunicará qué tarea ha sido realizada por qué agente, indicando el tiempo y recursos que han sido necesarios para realizarla. En caso contrario, el agente implicado indicará al agente supervisor los motivos por los cuales ésta no se ha podido realizar.

Dentro de los procesos que se llevan a cabo en la empresa objeto de estudio, se han identificado tres departamentos en base a las tareas que las personas realizan: recepción, administración y mantenimiento. Los agentes de tipo trabajador tendrán asociados una serie de tareas que puedan efectuar atendiendo al departamento al que pertenezcan.

En la siguiente tabla (Tabla 5) se definen cuáles son las posibles tareas a realizar por parte de los agentes trabajadores -así como los agentes de entorno adicionales que puedan ser necesarios para cada una de ellas-:

<b>Tipo de tarea</b>	<b>Departamentos</b>	<b>Agentes de entorno</b>
Hacer fotocopias	Recepción, Administrativo, Mantenimiento	Fotocopiadora
Ir al baño	TODOS	Baño
Alarma de incendios	TODOS	-Por definir-
Contestar Teléfono	Recepción, Administrativo	Teléfono
Llevar cartas	Recepción	-
Tomar café	TODOS	Cafetera
Comer	TODOS	Microondas
Tirar basura	Mantenimiento	Papelera
Recoger documentación	Recepción, Administrativo	
PC	Recepción, Administrativo	
Comprobar ascensor	Mantenimiento	Ascensor
Regar plantas	Mantenimiento	
Barrer	Mantenimiento	
Recoger basura	Mantenimiento	Papelera, contenedor

**Tabla 5 Relación entre tareas, departamentos y agentes de entorno**

Una vez definido el modelo del edificio y el modelo de interacción, se podrá pasar a realizar la simulación. Para ello se debe desplegar la herramienta de visualización, que al iniciarse deberá realizar una serie de operaciones: (i) carga del modelo del edificio, (ii) generación de la malla de navegación, (iii) sincronización con la plataforma de agentes. En la Figura 17 podemos ver una captura de pantalla de la herramienta de simulación.

La ejecución de la simulación vendrá determinada por el conjunto de tareas que el SMA debe llevar a cabo. La definición de estas tareas, así como su proceso de asignación podrá ser efectuado bien por el usuario o bien por el agente de dirección. De manera general, el proceso de simulación vendrá definido por:

- El conjunto de agentes responsable de cada departamento:  $R = \{R_0, \dots, R_i\}$
- El conjunto de agentes trabajadores:  $A = \{A_0, \dots, A_j\}$
- El conjunto de tareas que deben ser realizadas por los agentes trabajadores:  $T = \{T_0, \dots, T_k\}$
- El tipo de recursos:  $l \in \{1, \dots, L\}$
- El conjunto de recursos (agentes de entorno):  $E = \{E_0, \dots, E_m\}$
- La cantidad disponible de recursos de tipo  $n$  en un determinado instante de tiempo  $t$ :  $L_{n,t}$

El espacio de resultados después de la realización de una tarea en concreto por parte de un agente trabajador tiene únicamente dos posibles estados de salida (éxito y fracaso):  $O \in \{0,1\}$ , donde 1 representa el éxito de la realización de una tarea, y 0 representa su fracaso.



**Figura 17 Herramienta de simulación**

## 4.4. Resultados

En primer lugar, se planifica una simulación de 15 minutos. Para la primera configuración de los agentes que representan a los trabajadores de la organización se establece una simulación de 8 agentes. Los departamentos a los que pertenecen los agentes fueron asignados de manera representativa de acuerdo a los trabajadores de los distintos departamentos que intervienen en la compañía -1 recepcionista, 2 de mantenimiento y 5 administrativos-. Tres de ellos presentan problemas de movilidad reducida, tres son deficientes visuales y uno es sordo. La asignación de los puestos de trabajo para cada agente fue realizada de acuerdo con los procesos productivos que tienen lugar en la organización, sin tener en cuenta las posibles barreras arquitectónicas que se pudieran encontrar.



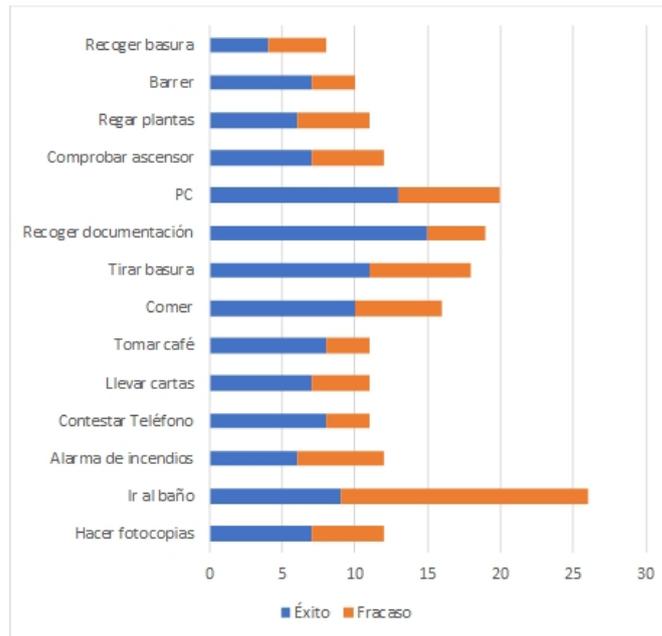
**Figura 18 Detalle de la visualización 3D de una simulación**

Una vez configurados el entorno y la distribución y características de los agentes, la simulación puede llevarse a cabo en el visor 3D (Figura 18). Después de efectuar la simulación, la herramienta genera un informe detallado con los problemas de accesibilidad que los avatares han encontrado, lo que ha impedido el correcto desempeño de las tareas asignadas a los agentes. Del total de tareas, 118 se ejecutaron satisfactoriamente, mientras que 79 no se pudieron realizar (Figura 19 A). Algunas de las deficiencias del entorno que se pudieron encontrar a través de las simulaciones fueron: (i) la falta de baños adaptados en el edificio;

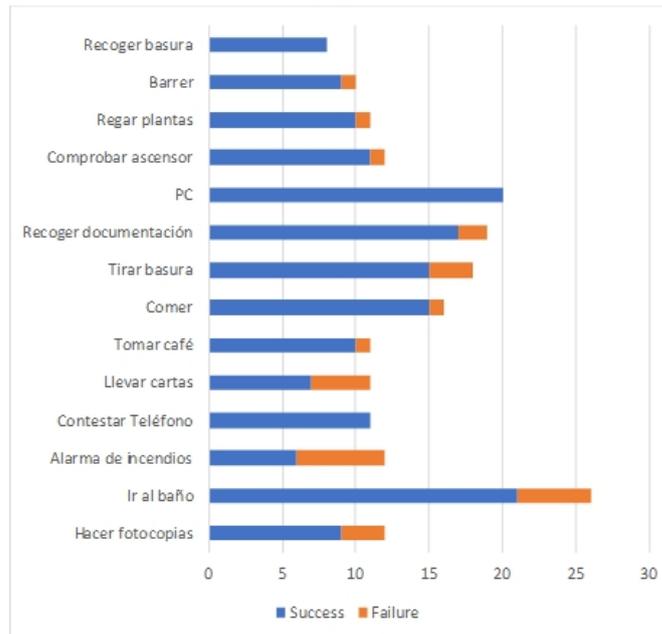
(ii) puestos de trabajo no adaptados para personas con discapacidad visual o auditiva: imposibilidad de realizar tareas como responder al teléfono, o tener conciencia de que la alarma de incendios está activa; (iii) falta de rampas que den acceso a plantas superiores como alternativa al ascensor, que en caso de avería impediría el acceso o salida del edificio; (iv) acceso limitado a determinados puestos de trabajo –espacios no suficientemente amplios para el acceso con silla de ruedas- o (v) elementos del mobiliario –archivadores, fotocopiadoras- no accesibles.

Tras la detección de estos problemas de accesibilidad, toda la información obtenida gracias a la herramienta fue empleada para efectuar varios cambios (tanto en la distribución de los elementos del entorno como de los trabajadores) que pudieran mejorar la accesibilidad del entorno laboral. En primer lugar, el editor 3D fue empleado para llevar a cabo la redistribución de los elementos del mobiliario susceptibles de mejora y la adaptación de los puestos de trabajo para usuarios con deficiencias auditivas y visuales. A continuación, haciendo uso del visualizador 3D, se realizó una reubicación de los puestos de trabajo de aquellos trabajadores usuarios de sillas de ruedas que no pudieron realizar algunas de las tareas que se les había asignado debido a distintos problemas relacionados con el desplazamiento, las maniobras, los cambios de nivel o problemas de alcance. Tras estos cambios, una nueva simulación con los mismos agentes y asignación de tareas fue realizada, obteniendo un resultado total de 169 tareas realizadas de manera satisfactoria y 28 fallidas (Figura 19 B), lo que supone una reducción del 40.1% de tareas fallidas en la simulación inicial al 14.2% en la segunda simulación. Obviamente existen elementos del entorno que continuarán limitando su accesibilidad, como la falta de rampas de acceso o baños adaptados, pero existe la posibilidad de mejorar la accesibilidad del entorno mediante la reestructuración de los puestos de trabajo de los empleados o de los elementos del mobiliario que se han detectado como puntos críticos a través de la simulación. Dado que hay infinitas posibilidades de distribución de muebles, es difícil establecer una solución óptima con respecto a los niveles de accesibilidad de los entornos de trabajo. Sin embargo, sería posible, dada una distribución fija de los elementos del entorno, realizar todas las asignaciones posibles de tipos de empleados, trabajos y tareas, pudiendo así conocer cuál es la distribución óptima de los

empleados bajo una determinada estructura de los elementos y puestos de trabajo del entorno.



(A)



(B)

**Figura 19 Tareas exitosas y fallidas tras las simulaciones. (A) resultados tras la primera simulación; (B) resultados tras la segunda simulación.**

## 4.5. Conclusiones

Una vez presentada y evaluada la plataforma de simulación, se puede afirmar que ésta permite la realización de simulaciones orientadas a la integración laboral de discapacitados, permitiendo no solo analizar las tareas que se llevan a cabo en un entorno laboral, sino también los espacios físicos donde tienen lugar estas tareas.

En primer lugar, ha sido posible modelar una organización real a través de OV con capacidades auto-adaptativas. Este sistema se ha implementado utilizando JADE, pero adaptando esta plataforma a las necesidades específicas de la plataforma. Del mismo modo, se ha creado un entorno 3D que es capaz de modelar y realizar simulaciones en entornos de trabajo. Además, se ha desarrollado un sistema que permite la comunicación entre ambas plataformas, el cual permite compartir información relevante acerca de las diferentes comunicaciones. En definitiva, esta plataforma en su conjunto permite simular los procesos que en ésta se lleven a cabo, con el objeto de determinar los problemas de accesibilidad que puedan ocurrir en el entorno laboral en que se desempeña la actividad de los trabajadores representados, tal y como se ha presentado en el caso de estudio. Gracias a la flexibilidad que aporta la herramienta de edición, que permite un modelado rápido de un entorno de oficinas mediante el uso de modelos especialmente diseñados para un despliegue ágil, la herramienta presentada es válida para este tipo de entornos. De manera más específica, gracias al caso de estudio, la herramienta ha sido capaz de definir problemas de accesibilidad y restricciones arquitectónicas siguiendo criterios específicos de desplazamiento. Esta herramienta ha sido evaluada en una oficina de trabajo, demostrando ser una herramienta útil cuando se trata de identificar problemas de accesibilidad. La definición de los modelos a utilizar y los problemas a detectar en cada tarea, en base a criterios bien definidos, facilita la inclusión del estudio de diferentes nuevas tareas. Es por este motivo que la herramienta permite modelar e incluir nuevas acciones y tareas que puedan ser desempeñadas por parte de los agentes con gran facilidad. Sin embargo, es necesario señalar que la herramienta está destinada a simular procesos dentro de entornos de interior, por lo que su uso se limita actualmente a este ámbito. En el caso de que la herramienta quiera ser empleada para

efectuar simulaciones en un entorno abierto y con actores no humanos, sería necesario incluir funcionalidades adicionales.

En base a los resultados obtenidos, se puede concluir que los objetivos establecidos al comienzo del trabajo se han cumplido. Con la consecución exitosa de este trabajo, es posible obtener información de gran utilidad para facilitar la accesibilidad de los entornos laborales a personas discapacitadas. Ésto ha sido posible gracias al uso de técnicas de ABSS, utilizando conceptos organizacionales para modelar las interacciones entre los actores en un entorno tridimensional. Aunque esta herramienta ha sido empleada en un caso de estudio orientado a la detección de problemas de accesibilidad en entornos de oficina, gracias al modelado genérico de la plataforma y el uso de OV de agentes, se considera que es una herramienta de simulación válida para cualquier proceso productivo en el que se representen seres humanos en entornos cerrados. Una vez la plataforma ha sido validada, se considera que dentro del ámbito de los problemas de accesibilidad, puede ser de gran utilidad para: (i) la detección temprana de errores en tiempo de diseño de los edificios, facilitando la realización de nuevos diseños en la distribución de los elementos del edificio, como habitaciones, pasillos, rampas o ascensores para evitar posibles problemas futuros relacionados con el desplazamiento de las personas con discapacidad; (ii) prevenir que personas con discapacidad tengan que enfrentarse a problemas de accesibilidad antes de comenzar a desempeñar sus funciones en un puesto de trabajo, pudiendo adaptar de manera anticipada su lugar de trabajo de manera acorde a sus capacidades; (iii) mejorar la accesibilidad de las personas que ya se encuentran trabajando en un determinado lugar.



---

# CAPÍTULO V

---

Interfaz inteligente para el control de  
sillas de ruedas



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA



*Tras el estudio del estado del arte de las diferentes propuestas de sistemas de control de sillas de ruedas tanto a nivel comercial como académico, se ha podido detectar cuáles son las carencias actuales en este tipo de sistemas. En este capítulo se presenta una plataforma basada en OV que posibilita el control de una silla de ruedas motorizada, centrada en permitir una rápida integración de diferentes interfaces de control externas.*

## 5.1. Introducción

El uso de soluciones tecnológicas en el campo de la salud ha ayudado notablemente a la mejora de nuestra calidad de vida. El campo de la movilidad no es ajeno a estas mejoras, ya que desde la aparición de la primera silla de ruedas eléctrica motorizada desarrollada por George Klein en el *National Research Council* (NRC) en los años 50 (Bonarini et al. 2013), la dependencia de las personas con discapacidad motriz ha disminuido de forma notoria. A partir de este modelo inicial, numerosas mejoras han sido incorporadas, tales como el uso de micro-procesadores para facilitar su control y maniobrabilidad, una mayor autonomía de las baterías de las sillas, la incorporación de suspensiones y asientos basculantes, aparición de nuevas interfaces de control, o incluso sillas que permiten subir y bajar escaleras de manera autónoma (Quaglia and Nisi 2017).

A pesar de este tipo de mejoras, la gran variedad de problemas motrices y grados de discapacidad que afectan a los usuarios de sillas de ruedas hace que los dispositivos de control de sillas de ruedas tradicionales no sean aptos para todos ellos. Sin embargo, se están consiguiendo grandes avances en la aplicación de técnicas de IA para el control de sillas de ruedas motorizadas, adaptando los sistemas de control a diferentes discapacidades. Podemos encontrar varios ejemplos en trabajos previos como (Ponce et al. 2010), donde se presentan diferentes alternativas de control para personas con cuadriplejía mediante el uso de comandos de voz o el movimiento de los ojos; (Rojas, Ponce, and Molina 2018) donde los datos obtenidos a través de sensores de ultra sonidos se usan en combinación con técnicas de lógica difusa para implementar un sistema de prevención de colisiones, que permite mejorar la maniobrabilidad en espacios

reducidos; (Heitmann, Kohn, and Stefanov 2011) donde se emplean sensores de fuerza resistivos (FSR) para el desarrollo de un interfaz de control basado en el movimiento de la cabeza; o (Kundu et al. 2017) donde se presenta un sistema que interpreta diferentes gestos realizados con las manos mediante el uso de sensores de electromiografía y unidades de medida inercial. Éstos son algunos de los muchos ejemplos que podemos encontrar en la literatura actual, en los que se puede constatar cómo los sistemas de control están mejorando gracias a la combinación de técnicas de inteligencia artificial y de los datos recopilados gracias a diferentes sensores.

El creciente número de alternativas de control para sillas de ruedas que utilizan este tipo de técnicas y que, además, necesitan dar soporte a un proceso de adquisición de datos de diferentes sensores, hace que sea necesario incrementar la carga computacional de los sistemas para poder desplegarse. Este hecho determina que sea de vital importancia investigar en plataformas que favorezcan la rápida integración de diversos sistemas de control en plataformas hardware de sillas de ruedas, de forma que se adapten a las necesidades específicas de cada caso. De esta forma, será posible favorecer y acelerar la investigación en nuevos sistemas de control, mejorando la adecuación del uso de una silla de ruedas al mayor número de usuarios con problemas de movilidad, independientemente del grado de discapacidad que presenten, favoreciendo así su integración social. Por otro lado, no sólo hay que pensar en los propios usuarios de sillas de ruedas, ya que en ocasiones son otras personas (acompañantes, asistentes) quienes deben realizar un esfuerzo físico para mover la silla de ruedas. En estos casos, desplazar una silla motorizada empujándola es una tarea difícil debido a su peso, y controlarla a través del joystick tradicional puede ser complicado debido a su ubicación. Por este motivo, también se deben buscar alternativas para facilitar el control de las sillas de ruedas bajo estas circunstancias.

Frente a esta motivación inicial, en este trabajo se presenta una plataforma basada en OV de agentes que posibilita el control de una silla de ruedas motorizada convencional mediante un conjunto de interfaces externas. Para la consecución exitosa de este trabajo, se ha diseñado una interfaz hardware que actúa como puente entre la capa física y una serie de aplicativos que han sido desarrollados para los usuarios finales. Esta interfaz hardware, permite tomar el control de los motores de la silla de ruedas, haciendo uso de

un protocolo compatible con tecnología Universal Serial Bus (USB) o Bluetooth. Los diferentes aplicativos que han sido desarrollados para los usuarios de la plataforma son: un aplicativo que permite actuar sobre la silla mediante comandos de voz; un aplicativo que permite indicar el movimiento que el usuario desea realizar de forma sencilla haciendo de un dispositivo móvil (se incorporan tres tipos de control: dos basados en el uso de la pantalla táctil y uno que hace uso del acelerómetro) y, finalmente, la incorporación de un dispositivo de electroencefalograma (EEG) utilizado para identificar el movimiento que el usuario quiere realizar a través del procesamiento y el análisis de la señal registrada por este dispositivo. Adicionalmente se ha desarrollado un software de control que permite interactuar con el usuario. Este software recopila información útil del estado de la silla (estado de baterías, velocidad, temperatura, sensores de proximidad de obstáculos, autonomía de la silla, etc.). Los diferentes tipos de control que han sido integrados en esta propuesta pretenden que esta solución sea accesible por el mayor número de personas, favoreciendo así la autonomía de personas con problemas de movilidad.

## 5.2. Propuesta

En esta sección se detalla el sistema propuesto, que consiste en el diseño y desarrollo de una plataforma que permita controlar cualquier tipo de silla de ruedas. Esta plataforma está centrada en la fácil integración de sistemas de control, principalmente aquellos basados en la recopilación y análisis de información proveniente de sensores. Para la validación del correcto funcionamiento del sistema, se han diseñado e implementado diferentes técnicas de control y se ha integrado el primer prototipo funcional en una silla de ruedas eléctrica convencional (modelo Quickie S-646). La explicación de la propuesta se ha subdividido en diferentes apartados, que tratan de:

- El diseño del dispositivo hardware de control y su integración con una silla de ruedas convencional.
- La presentación de la arquitectura del SMA que da soporte al correcto funcionamiento del sistema de control de la silla de ruedas.

- Las diferentes interfaces de control implementadas que hacen uso de: (i) dispositivo móvil, (ii) comandos de voz, (iii) un dispositivo de electroencefalografía.

### 5.2.1. Sistema hardware de control

Actualmente, las diferentes alternativas que existen para el control de sillas de ruedas se basan en un único modelo o marca. Por este motivo, cuando las diferentes instituciones realizan nuevos estudios y diseños de mecanismos de control de sillas de ruedas, se ven obligados a realizar costosos procesos de adaptación del mecanismo de control (J. Wang, Chen, and Liao 2013), a recurrir a la construcción de maquetas que emulan sillas de ruedas o situaciones reales (Berjón et al. 2012)(Kumar, Kumar, and others 2015), o incluso a hacer uso de simuladores (Leeb et al. 2007)(Galán et al. 2008). En ningún caso, como por ejemplo ocurre en el sector del automovilismo con el bus CAN, se aúnan esfuerzos para la creación de un protocolo de comunicación estándar que permita controlar todas las sillas del mercado desde diferentes periféricos con un protocolo universal.

Ante esta situación, se ha planteado la necesidad de construir un dispositivo hardware que permita controlar cualquier tipo de silla independientemente del fabricante. El objetivo fundamental es que personas con discapacidades muy diferentes puedan controlar por sí mismas cualquier tipo de silla de ruedas a través del uso de diferentes interfaces de control. De esta forma, podrán realizar movimientos que no serían capaces de efectuar en sillas convencionales, ganando independencia y permitiendo que cuidadores o familiares tengan una importante descarga de trabajo. Por otra parte, el promover el uso de estándares en el control de las sillas de ruedas motorizadas, hará más fácil la labor en el campo de la investigación de interfaces alternativos de control. Este hecho evitará realizar la adaptación de sillas de ruedas ya existentes o la construcción de sillas de ruedas específicas para el trabajo a desarrollar por parte de los investigadores; lo que les permitirá centrarse únicamente en el desarrollo de nuevas tecnologías para la mejora de la integración social de personas discapacitadas en el campo de la movilidad.

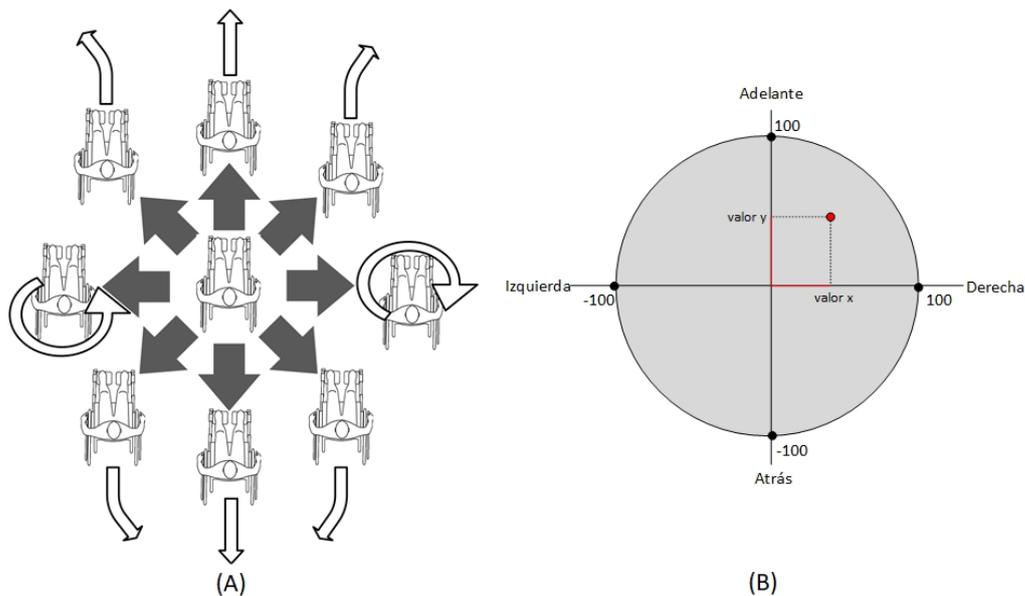
Como parte central del sistema, encargada de la gestión del control de los motores de la silla de ruedas, ha sido necesario el desarrollo de una placa de

circuito impreso que permita la comunicación entre dispositivos de control (ver Figura 20). El principal componente de esta placa, responsable del control del sistema, es un microcontrolador 18F2550 de Microchip, cuyo cometido es, entre otras funciones, comunicar las órdenes enviadas por el usuario a través de las interfaces de control a los motores de la silla de ruedas. Para este proceso, ha sido necesario incorporar en la placa unos drivers para el control de la entrega de potencia a los motores. El modelo de drivers elegido es el Pololu Dual VNH5019. Para ofrecer una amplia alternativa a la hora de elegir el dispositivo de control de la silla de ruedas a emplear, se ha optado por la incorporación de dos interfaces de comunicación: una cableada a través de USB, gracias al uso de un chip FT232RL de FTDI, y otra inalámbrica mediante tecnología Bluetooth, soportada gracias al uso de un chip RN-41 de la compañía Microchip. El principal motivo de incorporar un método de comunicación inalámbrico es ofrecer la posibilidad de controlar la silla de ruedas de manera remota. Esta funcionalidad está especialmente pensada para habilitar distintos sistemas de control para aquellas situaciones en las que el usuario de la silla de ruedas es asistido por otra persona, como familiares, personal de residencias de mayores o personal de aeropuertos.



Figura 20 Placa de circuito impreso

Como se ha comprobado en el estudio del estado del arte actual en materia de dispositivos de control de sillas de ruedas, en la industria existen dos tipos de control claramente diferenciados y ampliamente utilizados: controles proporcionales y controles no proporcionales. Para poder dar soporte a ambos tipos de control, en el protocolo de comunicación entre la placa desarrollada y los dispositivos de control se han incorporado comandos que permitan el uso de ambas alternativas. De este modo, para efectuar un control no proporcional, se han incluido un total de nueve comandos, correspondientes a los movimientos de: delante, detrás, izquierda, derecha, cuatro movimientos diagonales y parada. En la Figura 21 (A) se muestra la correspondencia entre los diferentes comandos no proporcionales y cuál es el sentido de movimiento que se produce en la silla. Puesto que a través de este tipo de control no es posible regular la velocidad de movimiento de la silla, se ha incluido un comando adicional que permite configurar la potencia que aplican los motores, pudiendo aplicar cinco niveles de potencia distintos, siendo el 1 el de menor potencia y el 5 el de mayor potencia.



**Figura 21 (A) Comportamiento de la silla mediante comandos no proporcionales  
(B) Rango de valores para el control de la silla**

En lo relativo a los controles proporcionales, el diseño se ha inspirado en el funcionamiento del control proporcional más común: el joystick. Para emular su funcionamiento, los dispositivos de control podrán enviar a la placa

desarrollada comandos cuyo contenido implique no sólo un componente direccional del movimiento a realizar, sino también relativo a su velocidad. Para ello, estos comandos están compuestos por dos valores que representan el desplazamiento en los ejes X e Y, para los que el valor 0,0 corresponde a la posición central del joystick (silla parada). Los valores admitidos para los ejes están definidos según:

$$x^2 + y^2 \leq 100^2$$

Los valores positivos para el eje Y corresponden con un movimiento hacia delante y los negativos un movimiento hacia atrás. En el caso del eje X, los valores negativos corresponden con un movimiento hacia la izquierda y los positivos con un movimiento hacia la derecha (ver Figura 21 (B)). La entrega de potencia a los motores en función de las coordenadas proporcionadas puede efectuarse de múltiples formas, que pueden estar determinadas por los requerimientos del sistema, las características del método de control o incluso las necesidades particulares de cada usuario. Dentro de los métodos de control presentados en este trabajo, únicamente se ha desarrollado un método de control proporcional; en la sección *Smartphone* se detalla cuál es el método de mapeo de las coordenadas elegido en ese caso.

Adicionalmente se han incluido en el protocolo de comunicación una serie de mensajes que informan al resto de dispositivos conectados del estado general del sistema. De esta forma, se ofrece información relativa al estado de carga de las baterías, la velocidad de la silla de ruedas, la temperatura de la placa de control, o el estado de otros componentes adicionales como sistema de iluminación o sensores de proximidad. En el caso de una silla de ruedas tradicional, este tipo de información no es representada para que el usuario pueda visualizarla, mientras que puede ser de gran utilidad para éste. En el prototipo funcional desarrollado, se ha implementado una interfaz para la visualización de estos datos, como se mostrará más adelante.

Como se ha introducido anteriormente, para poder llevar a cabo una serie de pruebas que validen el correcto funcionamiento del sistema propuesto, así como realizar nuevas investigaciones interfaces de control para sillas de ruedas, se ha desarrollado un prototipo funcional donde se integra dicho sistema. En la Figura 22 se pueden ver los principales componentes de este prototipo. Como se puede apreciar, el componente central del sistema es la placa

de circuito impreso, diseñada para comunicarse con otros dispositivos de manera bidireccional, de forma que envía información acerca del estado actual del sistema y recibe comandos con los que manejar el funcionamiento de la silla de ruedas.

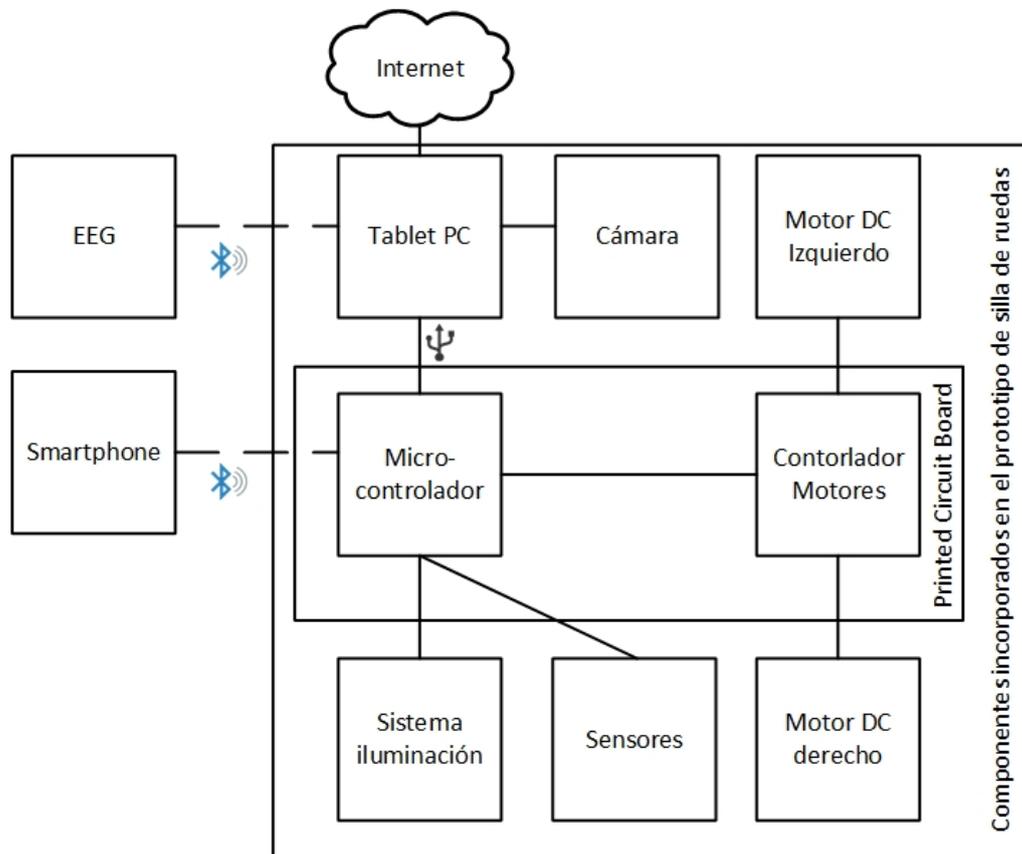


Figura 22 Componentes del prototipo

Para representar la información acerca del estado de la silla (nivel de carga de las baterías, velocidad, o temperatura entre otras), se ha desarrollado una aplicación que en este caso se ejecuta en una tablet Microsoft Surface que se ha incorporado al prototipo. Gracias al uso de esta aplicación es posible visualizar en tiempo real imágenes capturadas por una cámara que se encuentra en la parte trasera de la silla, lo que permite a usuarios con problemas de movilidad en el cuello poder observar qué ocurre tras ellos. Esta tablet se conecta a la placa de control a través de una conexión de tipo USB, lo que hace posible tanto enviar órdenes como recibir información. Para evitar depender de la autonomía que proporciona la batería de este dispositivo, se ha incorporado

un inversor de corriente que se conecta a las baterías de la silla de ruedas, pudiendo así alimentar la tablet a través de ésta. Con el objetivo de mejorar la seguridad del usuario de la silla, se ha incluido en el prototipo una red de sensores de ultrasonidos modelo HC-SR04. Estos sensores permiten la detección de obstáculos en la trayectoria de la silla, pudiendo de esta manera efectuar una parada de la silla de ruedas para evitar una colisión. También relacionado con la seguridad del usuario, se ha dotado al prototipo de un sistema de iluminación, que por un lado mejora la visibilidad del usuario y, por otro, ayuda a advertir a otros viandantes de los movimientos realizados por el usuario de la silla, puesto que actúa como un indicador de determinados movimientos, tales como los desplazamientos laterales o hacia atrás. Finalmente, se han desarrollado tres interfaces de control para la silla de ruedas: (i) haciendo uso del teléfono móvil, que se encuentra conectado a la placa diseñada a través de bluetooth; (ii) mediante comandos de voz, procesados en la aplicación de la Tablet y (iii) a través de los datos recogidos por un dispositivo de electroencefalografía inalámbrico, cuyas señales son procesadas e interpretadas en la tablet. Estos mecanismos de control se describen en detalle en la siguiente sección. A continuación, se muestran dos fotografías de la parte frontal (Figura 23 (A)) y trasera (Figura 23 (B)) del prototipo desarrollado.

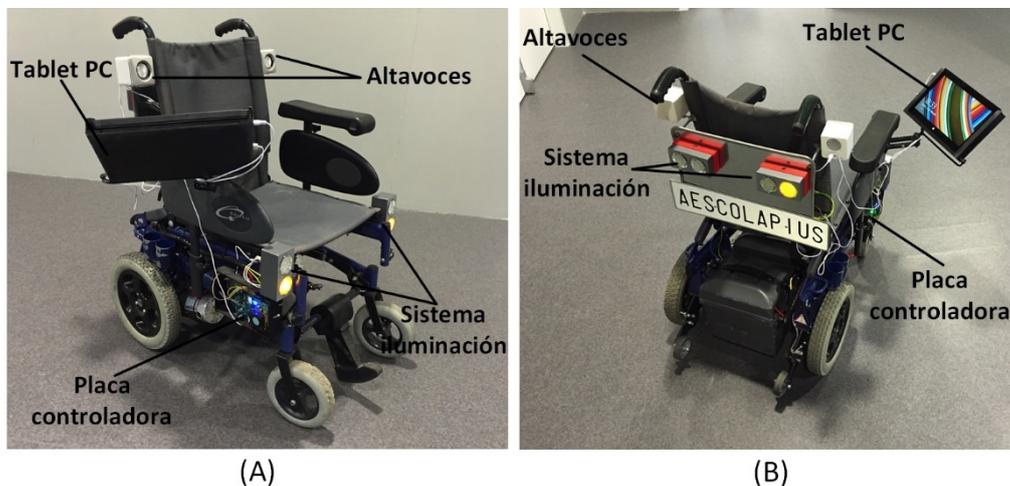


Figura 23 (A) Imagen frontal del prototipo (B) Imagen trasera del prototipo

## 5.2.2. Arquitectura multiagente

En el caso de estudio que se ha llevado a cabo, la arquitectura que sustenta el funcionamiento del sistema de control de la silla de ruedas está basada en el uso de organizaciones virtuales de agentes. El principal motivo de seguir este tipo de enfoque es el de dotar al sistema de las ventajas inherentes del uso de las organizaciones virtuales, las cuales están orientadas a conseguir sistemas más abiertos y dinámicos, en las que los agentes poseen una serie de roles y normas que determinan su comportamiento. Las posibilidades que ofrecen los aspectos organizativos de este tipo de sistemas pueden determinar en gran medida la flexibilidad, dinamismo y apertura del SMA. Como base para la implementación del SMA se ha optado por PANGEA (Zato et al. 2012). Se trata de una plataforma de agentes creada por el grupo de investigación BISITE de la Universidad de Salamanca para el desarrollo de sistemas multiagente abiertos, especialmente aquellos que incluyen aspectos organizativos. La plataforma permite la integración de las organizaciones y además presenta una serie de características de gran utilidad, las cuales se describen a continuación. Desde la perspectiva de los agentes, se incluyen diferentes modelos de agentes, como BDI o CBR-BDI. Además, permite una gestión sencilla desde un punto de vista organizacional: se admite el uso de cualquier topología organizacional, mientras que un motor de reglas de negocio se encarga de hacer cumplir los estándares establecidos para el correcto funcionamiento de la organización. Este SMA, con licencia *open-source*, incluye un conjunto de servicios que permiten reorganizar de manera dinámica las organizaciones de agentes o redistribuir las tareas y balancear la carga de trabajo. Asimismo, permite el uso de diferentes protocolos de comunicación, algunos de ellos centrados en la comunicación entre dispositivos embebidos, por lo que se trata de una plataforma que cuadra con los requisitos necesarios para el desarrollo de esta plataforma, incluyendo la posibilidad de interactuar con agentes FIPA-ACL. Con el objetivo de facilitar el trabajo a los usuarios finales, PANGEA está provista de un conjunto de utilidades, como herramientas gráficas para controlar el ciclo de vida de los agentes, utilidades de depuración e identificación de servicios o una interfaz para la supervisión de las organizaciones.

La Figura 24 muestra la estructura organizacional del SMA propuesto, encargado de la gestión de la plataforma. Por un lado, la parte superior es la

específicamente diseñada para este caso de estudio, mientras que la parte inferior muestra aquellos agentes propios de PANGEA.

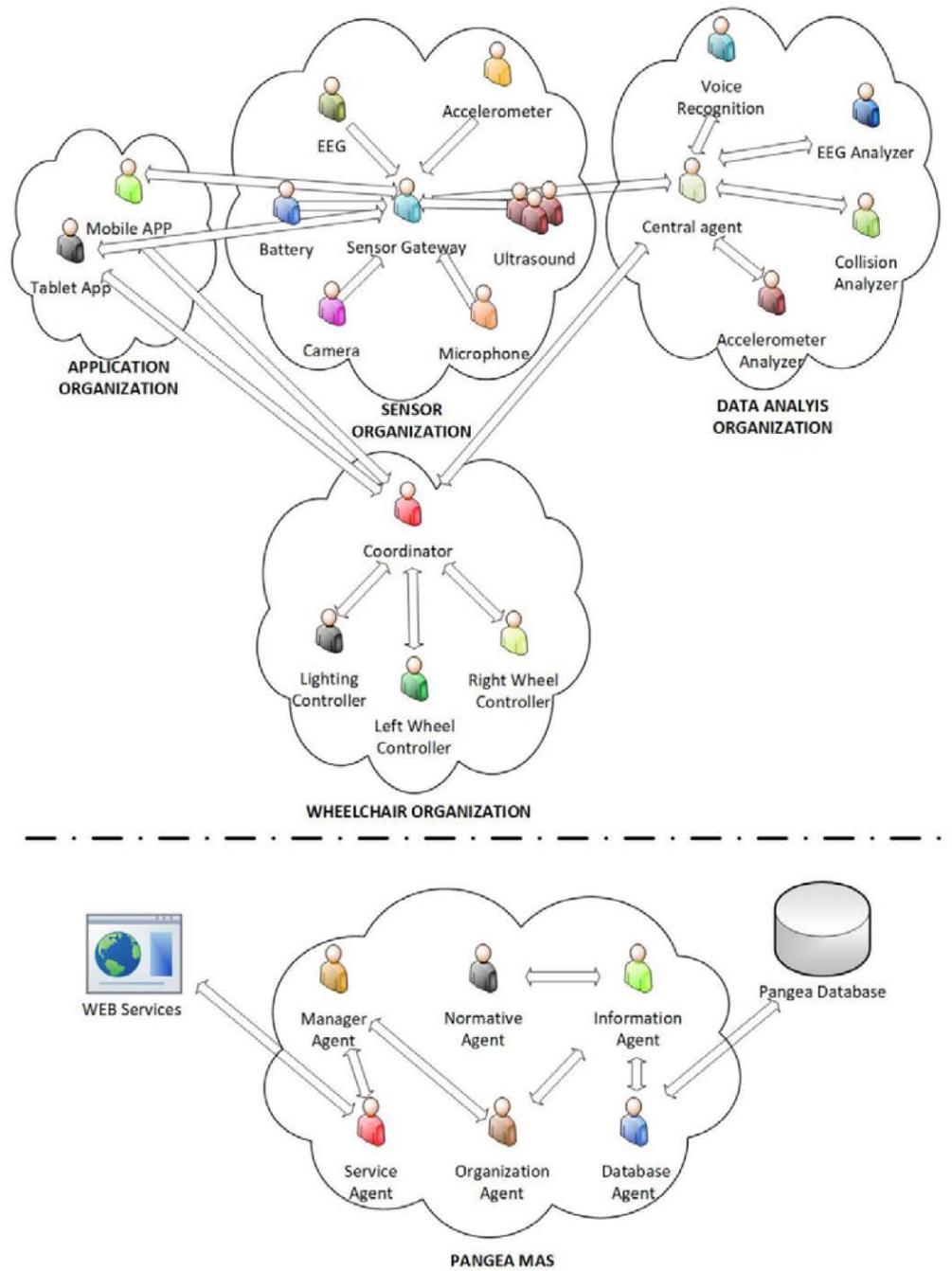


Figura 24 Arquitectura multiagente

A continuación, se detalla la funcionalidad que aportan los distintos agentes de las organizaciones que conforman el sistema:

- **Sensor organization:** el cometido de esta organización es recopilar datos de un conjunto de sensores hardware para su posterior representación y análisis por parte de otros agentes presentes en el SMA. Como parte central de esta organización, se encuentra el *Sensor Gateway Agent*, el cual se encarga de recopilar los datos de los agentes embebidos en los sensores presentes en el sistema, normalizar la información recopilada en caso de ser necesario y transmitirla a aquellos agentes del resto de organizaciones que la soliciten. En el caso de estudio que se presenta en este trabajo, los sensores que intervienen en esta organización son: *Battery* (conocer el nivel de carga), *EEG*, *Accelerometer* (analizar inclinación para el control, así como posibles caídas del teléfono), *Ultrasounds* (sensor de proximidad), *Microphone* y *Camera*.
- **Data analysis organization:** en base a los datos proporcionados por la *OV sensor organization*, los agentes que forman parte de esta organización son los encargados de analizarlos para poder efectuar los procesos de toma de decisiones relativos al control de la silla de ruedas. Dentro de esta organización, se incorpora el *central agent*, el cual se encarga de enviar los datos necesarios provenientes de los sensores al resto de agentes de la organización, encargados de analizarlos, y recibirá de vuelta instrucciones relativas al control de la silla de ruedas. Este agente comunicará estas instrucciones a la organización encargada de gestionar el control de la silla de ruedas (*Wheelchair organization*). En el caso de que las decisiones tomadas por los agentes de esta organización entren en conflicto, el *Central Agent* se encarga de gestionar su prioridad. Entre el resto de los agentes de la organización se encuentran: el *Voice Recognition Agent*, el cual, a través de la señal de audio recopilada por un micrófono, utiliza un sistema de reconocimiento del habla para interpretar diferentes comandos con los que controlar la silla; el *EEG analyzer* que analiza los datos recopilados por un dispositivo de electroencefalograma para posterior análisis, gracias al cual se podrá efectuar el control de la silla de ruedas; *Collision Analyzer*, que en base a las señales recogidas por los sensores de

proximidad, se encarga tomar el control de la silla de ruedas para evitar posibles colisiones y finalmente el *Accelerometer Analyzer*, que analiza la información recopilada del acelerómetro embebido en el smartphone con el objetivo de controlar la silla de ruedas y detectar posibles caídas del smartphone.

- **Wheelchair organization:** encargada de efectuar el control sobre distintos componentes de la silla de ruedas. Forman parte de esta organización el *Coordinator Agent*, agente central encargado de la coordinación de la organización, los *Right* y *Left Wheel Controller Agents*, al cargo del control individual de cada uno de los motores y el *Lighting Controller Agent*, encargado del control del sistema de iluminación que incorpora la silla de ruedas.
- **Application organization:** para permitir al usuario final visualizar la información recopilada desde los distintos sensores, se ha desarrollado una aplicación para Tablets. El agente responsable de recopilar esta información es el *Tablet App Agent*. Por otro lado, esta organización también incluye al *Mobile App agent*, el cual es responsable de gestionar el sistema de control de la silla de ruedas basado en el uso de la pantalla táctil del smartphone.

Por otro lado, la arquitectura propuesta se apoya en el uso de los propios agentes que provee la plataforma PANGEA. Estos agentes se encargan de tareas como: (i) la supervisión del correcto desempeño de las tareas (*manager agent*); (ii) el registro de los agentes y servicios presentes en el sistema (*information agent*); (iii) el control de la correcta operación de los servicios ofrecidos por los agentes y su distribución a través de servicios web (*service agent*); (iv) garantizar el correcto cumplimiento de las reglas definidas en las organizaciones (*normative agent*); (v) el acceso a base de datos (*database agent*), o (vi) la gestión de las diferentes organizaciones que conforman el sistema (*organization agent*) (Zato et al. 2012).

El funcionamiento general de los procesos que tienen lugar en la plataforma para el funcionamiento de una interfaz de control específica se puede ver en la Figura 25. Con este propósito, se ha elegido la interfaz de control basada en el uso del EEG para representar los procesos de la plataforma. En primer lugar, los agentes de la organización *Data Analysis* que participan en la

interfaz de control seleccionada, realizan una solicitud de suscripción al agente central de esta organización. En esta solicitud, estos agentes especifican qué datos procedentes de los diferentes sensores presentes en el sistema se necesitan para su posterior análisis. En este caso, dos agentes trabajan en paralelo: el *EEG Analyser* y el *Collision Analyser*. El *EEG Analyser* se encarga de llevar a cabo el análisis de los datos provenientes del dispositivo de EEG para inferir qué movimientos desea realizar el usuario, mientras que el *Collision Analyser* trabaja con los datos de los sensores de ultrasonidos para detectar posibles colisiones con el entorno. Por lo tanto, la solicitud de suscripción de datos realizada por estos agentes corresponde con los datos recopilados por el EEG y con los datos de los sensores de ultrasonidos. La solicitud de datos de esta organización a la *sensor organization* se realiza mediante el agente *Sensor Gateway*, que recopila todos los datos procedentes de los agentes encargados de obtener la información de los diferentes sensores desplegados. A medida que los agentes *EEG* y *Ultrasound* envían sus datos correspondientes al agente *Sensor Gateway*, esta información se redistribuye directamente al agente central de la organización *Data Analysis* (solo se envía la información a la que los agentes de esta organización se han suscrito previamente). A medida que la información solicitada se proporciona a cada agente de esta organización, ésta es evaluada por los agentes. En el caso del *EEG Analyser*, si se reconoce un determinado patrón asociado a un movimiento, se lleva a cabo una petición de movimiento al *Coordinator Agent* de la organización *Wheelchair*, mientras que, si el *Collision Analyser* detecta un posible impacto, se efectúa una petición de parada. Cuando se realiza una petición al *Coordinator Agent*, éste se encarga de evaluar dicha petición atendiendo a su prioridad. Por ejemplo, en este caso, las peticiones efectuadas por el *Collision Analyser* tendrán siempre una mayor prioridad. Una vez que las peticiones se han evaluado y aceptado, la orden correspondiente se envía a los *Controller Agent* para efectuar el movimiento físico de la silla de ruedas. La Figura 25 también muestra cómo se provee la información representada en la aplicación para Tablet a través de las diferentes organizaciones de agentes. Se incluye como ejemplo el flujo de información de la información relativa al estado de la batería.

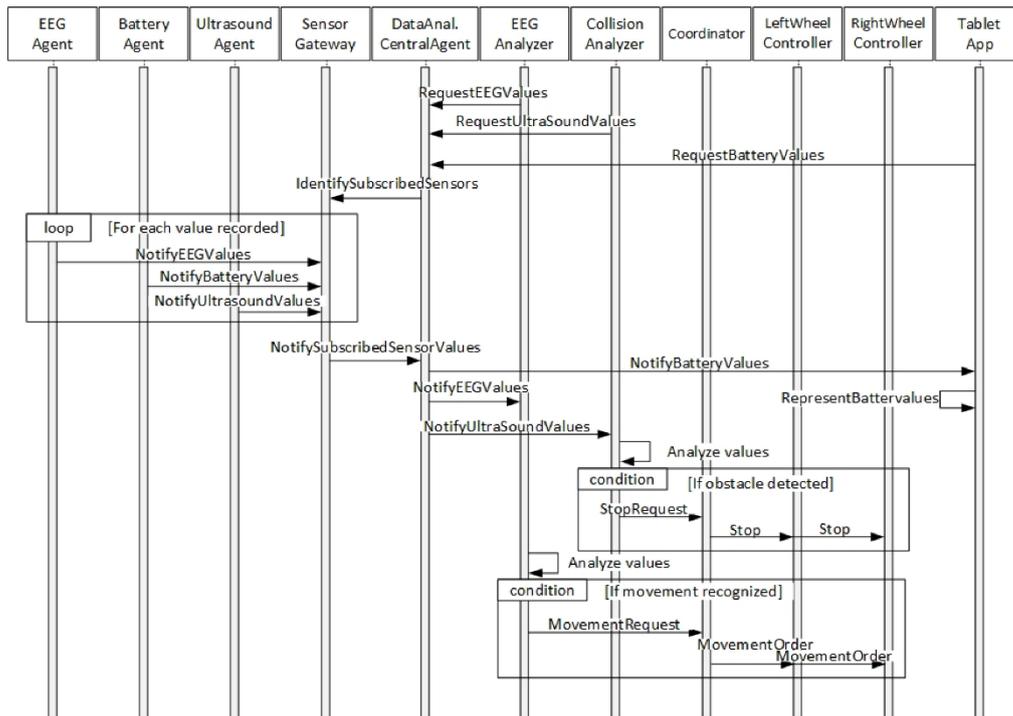


Figura 25 Diagrama de colaboración-secuencia para la interfaz de control mediante electroencefalograma (EEG)

### 5.3. Interfaces de control

Las sillas de ruedas motorizadas convencionales cuentan habitualmente con un joystick como dispositivo de control. El uso de este dispositivo requiere un esfuerzo físico que no todos los usuarios pueden realizar como, por ejemplo, las personas con movilidad reducida en las extremidades superiores. Ante esta problemática, se han diseñado diferentes métodos de control alternativos que se pueden acoplar a cualquier modelo de silla a través de la plataforma desarrollada, de forma que las posibilidades a la hora de controlar los movimientos de la silla de ruedas se multipliquen. Gracias a estas nuevas interfaces de control, el usuario de la silla de ruedas podrá dirigirla con la voz o utilizando un dispositivo con el que interpretar la actividad bio-eléctrica cerebral, mientras que un familiar o cuidador también puede manejar la silla desde interfaces externas, como un dispositivo móvil.

### 5.3.1. Smartphone

En ocasiones, los usuarios de sillas de ruedas (manuales o eléctricas) no pueden conducir las de manera independiente debido a limitaciones en el entorno (grandes pendientes, espacio reducido), o a limitaciones físicas. En estas situaciones, se hace necesario recurrir a una segunda persona que asista al usuario de la silla, que no siempre dispone de la fuerza necesaria para poder desplazar la silla sin tener que realizar un gran esfuerzo. Obviamente, controlar una silla de ruedas motorizada mediante el uso de un joystick, al mismo tiempo que se está andando, no es sencillo. Por ello, para facilitar el manejo de una silla por las personas asistentes, determinados modelos de sillas de ruedas eléctricas disponen de mandos especialmente diseñados para ellas. Estos mandos generalmente se sitúan en la parte trasera de la silla de ruedas para que su uso sea más cómodo. De esta forma, es el asistente quien controla la dirección de la silla, mientras que los motores realizan el esfuerzo para desplazar la silla. Aunque esta opción está disponible para varios modelos de sillas en la actualidad, no todos los modelos ofrecen la posibilidad de integrar un sistema de estas características, y en caso de hacerlo, generalmente el precio es elevado.

Frente a esta situación, se ha planteado la posibilidad de desarrollar un sistema de control para asistentes que sea asequible y accesible para cualquier persona, cuyo uso sea intuitivo. Para llevar a cabo este sistema, se ha optado por hacer uso de smartphones. Esta decisión está fundamentalmente motivada porque su penetración de uso es cada vez mayor, por lo que gran parte de la población dispone de uno (llegando a una penetración del 78% del total de la población en el caso de EEUU, o al 87% en el caso de España (Google 2017)) y, además, disponen de una gran conectividad y formas de interactuar con ellos. En este trabajo se proponen tres alternativas de control de una silla de ruedas a través del teléfono móvil: una mediante el uso del acelerómetro del teléfono móvil y dos mediante el uso de la pantalla táctil del teléfono móvil. Todas estas alternativas hacen uso de la comunicación bluetooth entre el dispositivo móvil y la placa de control diseñada, enviando mediante este canal de comunicación los comandos necesarios para que se efectúen los movimientos de la silla de ruedas.

La mayoría de smartphones disponen de un sensor de aceleración embebido en su interior. Este sensor permite medir la inclinación del

dispositivo respecto al suelo. Haciendo uso de este sensor, se ha desarrollado un método de control no proporcional para la silla de rueda basado en la inclinación del teléfono móvil. Para ello, se define una máquina de estados con cinco posibles estados (delante, detrás, izquierda, derecha y parado), cuya transición entre los mismos se realizará en base a una serie de *thresholds* para los valores registrados por el acelerómetro para los ejes X, Y y Z. La Figura 26 (A) muestra cómo se debe inclinar el teléfono móvil para efectuar un movimiento en la silla de ruedas. Por ejemplo, inclinar el teléfono como se muestra en la parte superior izquierda de la imagen, corresponde con un movimiento de la silla hacia adelante.

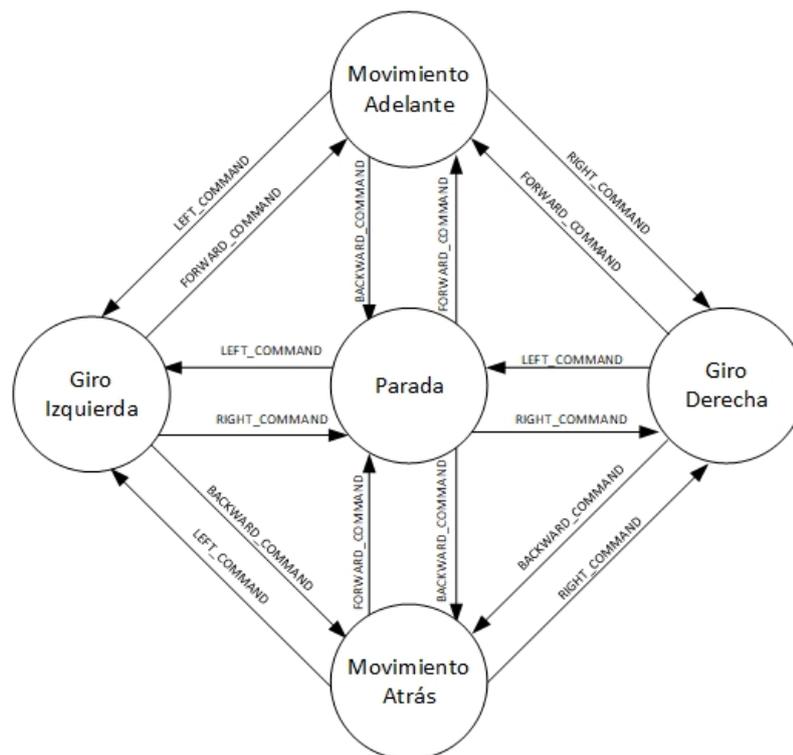


**Figura 26 (A) Inclinaciones del teléfono permitidas por el dispositivo móvil (B) Interacción mediante el control táctil**

A pesar de que el control mediante el uso del acelerómetro es muy intuitivo, la forma de interacción más habitual con un smartphone es a través de una pantalla táctil, por lo que puede haber usuarios que se encuentren más cómodos utilizando este elemento como interfaz de control de la silla de ruedas. Por otro lado, puede ser un método de control cuyo uso sea adecuado para usuarios de sillas de ruedas que tengan movilidad en sus manos, pero no la suficiente fuerza como para poder utilizar un joystick con soltura. Este tipo de control es un posible sustituto de bajo coste de interfaces de control basados en el uso de paneles táctiles, cuyo precio es generalmente elevado, como por ejemplo el Switch-It TouchDrive 2 (Switch-it 2017b), que supera los 3.000 €. Para integrar esta opción en una silla de ruedas convencional, bastará con incorporar un pequeño soporte para el teléfono móvil en el en el apoyabrazos de

la silla, de forma que se sitúe bajo la mano del usuario. Se plantean dos métodos de control alternativos a través del uso de la pantalla táctil del dispositivo móvil.

El primero de ellos es un método no proporcional, que permite la transición entre 5 estados (los mismos que se emplean en el caso del acelerómetro). La Figura 26 (B) muestra cómo interactuar con la pantalla táctil del dispositivo móvil: deslizando un dedo en la dirección concreta hacia la que el usuario desea desplazarse. Por ejemplo, para hacer que el sistema mueva la silla hacia adelante, se deberá deslizar el dedo desde la parte inferior de la pantalla hacia la superior. Para cancelar el movimiento, es decir, hacer que la silla se detenga, se realizará el movimiento opuesto, en este caso desde la parte superior hacia la parte inferior. Será posible la transición directa entre todos los movimientos, exceptuando los movimientos opuestos (ya que implican que la silla se detenga). La Figura 27 muestra los posibles estados de transición del control no proporcional basado en el uso de la pantalla táctil.



**Figura 27 Posibles estados de transición del control no proporcional basado en la pantalla táctil**

La Figura 28 muestra el pseudocódigo de cómo se ha implementado el control no proporcional basado en la pantalla táctil. Como se puede observar, el Algoritmo 1 se encarga de analizar las coordenadas de la pantalla en las que se ha producido una pulsación y una liberación, mientras que el *Algoritmo 2* evalúa los resultados del *Algoritmo 1* para llevar a cabo la solicitud de un determinado movimiento de acuerdo con estos resultados, desplazando la silla hacia adelante, atrás, izquierda, derecha, o deteniéndola.

<pre> <b>Algorithm 1</b> onTouchEvent <b>Input:</b> motionEvent <b>Output:</b> None <b>Variables:</b> xi,yi: point when press; xf, yf: point when release; xr,yr: relative coordinates <b>if</b> event.getAction() == MotionEvent.ACTION_DOWN <b>then</b>     xi = event.getX()     yi = event.getY() <b>else if</b> event.getAction() == MotionEvent.ACTION_UP <b>then</b>     xf = event.getX()     yf = event.getY()     yr = yf - yi     xr = xf - xi     <b>if</b> abs(xr) &gt;= abs(yr) <b>then</b>         <b>if</b> xr &gt; 0 <b>then</b>             <b>if</b> a &lt; 1 <b>then</b>                 a ++             <b>else if</b> a == 1    a == -1 <b>then</b>                 b = 0             <b>end if</b>             sendCommand(a, b)         <b>else</b>             <b>if</b> yr &gt; 0 <b>then</b>                 <b>if</b> b &lt; 1 <b>then</b>                     b ++                 <b>else if</b> b == 1    b == -1 <b>then</b>                     a = 0                 <b>end if</b>                 sendCommand(a, b)             <b>else</b>                 <b>if</b> b &gt;= 0 <b>then</b>                     b ++                 <b>else if</b> b == 1    b == -1 <b>then</b>                     a = 0                 <b>end if</b>                 sendCommand(a, b)             <b>end if</b>         <b>end if</b>     <b>end if</b> <b>end if</b>     </pre>	<pre> <b>Algorithm 2</b> sendCommand <b>Input:</b> a, b <b>Output:</b> None <b>if</b> a == 0 &amp;&amp; b == 0 <b>then</b>     requestStop() <b>else</b>     <b>if</b> a == -1 <b>then</b>         requestLeftMovement()     <b>end if</b>     <b>if</b> a == 1 <b>then</b>         requestRightMovement()     <b>end if</b>     <b>if</b> a == 1 <b>then</b>         requestForward()     <b>end if</b>     <b>if</b> a == 1 <b>then</b>         requestBackward()     <b>end if</b> <b>end if</b>     </pre>
--	--

**Figura 28 Algoritmos del control no proporcional basado en la pantalla táctil**

El segundo método de control basado en el uso de la pantalla táctil del teléfono móvil es un método de control proporcional que emula el joystick tradicional de una silla de ruedas, siendo únicamente necesario desplazar el dedo en la pantalla en la dirección hacia la que el usuario desea ir. A pesar de que el tipo de control que ofrece este método es análogo al que ofrece un joystick, se plantea su uso para aquellas personas con movilidad parcial en su mano, pero que sí pueden mover un dedo de forma controlada en un reducido

espacio, siguiendo la línea de otros dispositivos de control basados en la dirección del dedo, como el DX-RJM-VIC (“Finger Steering Control DX-RJM-VIC MANUAL” 2017). El mapeo de las coordenadas obtenidas de la aplicación (según el rango de valores establecido en la sección *Sistema hardware de control*) con respecto a las velocidades correspondientes para cada motor está basado en el trabajo (Faria et al. 2013), en el que se estudian tres alternativas distintas. De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, se ha optado por el *intuitive mapping*, puesto que es el que ha presentado mejores resultados a la hora de controlar la silla de ruedas, incluso en espacios reducidos.

### 5.3.2. Control por voz

Con el objetivo de hacer más accesible el uso de una silla de ruedas motorizada a aquellas personas que no pueden realizar movimientos físicos, se ha desarrollado una interfaz de control adicional basada en el control por voz. Mediante el uso de diferentes comandos de voz, el usuario podrá controlar los desplazamientos de la silla de ruedas de manera no proporcional. A pesar de tratarse de un control no proporcional, se incorpora además un comando que permite controlar la velocidad de la silla en diferentes niveles. Por otro lado, al incorporar este tipo de interfaz, las posibilidades de interacción con el usuario se multiplican. Para aprovechar este potencial, se han incorporado funcionalidades adicionales, de manera que se pueden consultar las noticias o la información meteorológica, ordenar que se iluminen las luces que hemos incorporado al sistema o emitir una señal de emergencia.

La aplicación que se encarga de la gestión del reconocimiento de voz se ejecuta en la tablet Microsoft Surface, y se encuentra activa por defecto. Para efectuar el reconocimiento de voz, se ha hecho uso de la API de reconocimiento de voz del Framework .NET. La principal ventaja que ofrece esta API frente a otras es que realiza el proceso de reconocimiento de voz de manera local, sin necesidad de interactuar con ningún servidor externo. Además, permite establecer restricciones gramaticales a un conjunto finito de alternativas, que en este caso corresponden con los comandos admitidos por el sistema. El hecho de utilizar tecnologías dependientes de una conexión de red estable podría comprometer la seguridad del usuario cuando ésta fuera inestable. Para evitar que los comandos que controlan el movimiento de la silla de ruedas se activen de forma no intencionada, ya que podrían aparecer en cualquier conversación

normal que mantuviera el usuario, se ha incluido una palabra clave en todos los comandos, exceptuando el comando que hace que la silla de ruedas se detenga. A continuación, la Tabla 6 recoge los comandos admitidos por el sistema junto con la respuesta del sistema para cada uno de ellos.

<b>Comando</b>	<b>Respuesta del sistema</b>
“Ejecutar avanzar”	La silla de ruedas se desplaza hacia el frente
“Ejecutar retroceder”	La silla de ruedas se mueve hacia atrás
“Ejecutar izquierda”	La silla de ruedas se mueve hacia la izquierda
“Ejecutar derecha”	La silla de ruedas se mueve hacia la derecha
“Ejecutar velocidad [número del 1 al 5]”	Hace que la velocidad de desplazamiento de la silla de ruedas se modifique (niveles de intensidad del 1 al 5)
“Abortar”	Hace que la silla de ruedas se detenga.
“Ejecutar noticias”	El sistema lee una noticia del RSS de un periódico a definir por el usuario.
“Ejecutar tiempo”	El sistema lee la previsión meteorológica
“Ejecutar luces”	Hace que se encienda (o apague) el sistema de iluminación de la silla de ruedas.
“Ejecutar hora”	El sistema lee la hora actual.

**Tabla 6 Comandos de voz y respuesta del sistema**

### 5.3.3. EEG

Muchos de los usuarios de sillas de ruedas padecen enfermedades que les impiden utilizar las interfaces de control presentadas en los apartados anteriores. Por ejemplo, enfermedades como la esclerosis lateral amiotrófica (ELA) o daños medulares que provocan parálisis total o parcial. Por ello, es fundamental incluir una interfaz de movimiento que permita el uso de las sillas de ruedas a este tipo de personas. Es ahí donde el uso de las tecnologías basadas en EEG se plantea como alternativa a los métodos propuestos con anterioridad.

Para implementar un sistema inteligente que sea capaz de hacer uso de la tecnología basada en EEG se ha optado por la utilización del dispositivo EPOC+ diseñado por la empresa Emotiv. Se trata de un dispositivo del tipo *Neuroheadset*. En la Figura 29 (A) se muestra una imagen del dispositivo utilizado. Este periférico está compuesto por un total de dieciséis sensores que

funcionan con un líquido conductor de corriente. Catorce de estos sensores (AF3, AF4, F7, F8, F3, F4, FC5, FC6, T7, T8, P7, P8, O1, O2) son canales de datos y los otros dos (P3, P4) son los llamados sensores de referencia. En la Figura 29 (B) se muestra la distribución de los diferentes sensores una vez que una persona se ha colocado el dispositivo. Como se puede ver en la Figura 22, el dispositivo inalámbrico de electroencefalografía se conecta directamente a la Tablet PC, y no a la conexión bluetooth ofrecida por el dispositivo hardware de plataforma. El motivo es que es necesario conectar este dispositivo directamente a un receptor USB de Bluetooth específico desarrollado por Emotiv.



**Figura 29 . a) Emotiv EPOC+ de b) Distribución de los sensores del EPOC+ en la cabeza de los sujetos.**

Emotiv EPOC+ es capaz de reconocer casuísticas tanto afectivas, expresivas, como cognitivas; para ello, mide la actividad cerebral mediante la realización de un electroencefalograma. Las casuísticas cognitivas son las que se tendrán en cuenta para implementar el sistema que permitirá mover la silla de ruedas. El sistema se va a diseñar de tal forma que el usuario pueda utilizar pensamientos abstractos o bien observar imágenes concretas para poder conducir y guiar la silla de ruedas.

De esta forma, se recogerán datos de diversas personas para comprobar la eficacia del sistema y de la interfaz de movimiento diseñada. A cada una de estas personas se les hará pensar una serie de conceptos abstractos, en concreto cuatro, de tal forma de cada uno de esos pensamientos se relacione posteriormente con los cuatro movimientos que podrá realizar la silla

motorizada, izquierda, derecha, adelante y atrás. De la misma forma, se relacionarán cuatro imágenes de flechas con cada una de las cuatro direcciones anteriores. En este último caso, el usuario tendrá que reaccionar al estímulo de mirar cada una de las cuatro flechas.

Con cada uno de los individuos se extraerán diferentes conjuntos de datos puesto que cada uno de ellos piensa en diferentes conceptos y no tienen la misma reacción al visualizar las imágenes. Este conjunto de datos se obtendrá cada vez que los individuos utilicen la interfaz. Con cada uso existirá una pequeña etapa de entrenamiento inicial, de unos 40 segundos de duración. Esta etapa de adaptación inicial del usuario al dispositivo de electroencefalografía es necesaria ya que, aunque siempre se relacionen los mismos pensamientos con cada uno de los movimientos, puede que la respuesta cerebral no sea la misma en cada uno de los usos de la interfaz.

Una vez concluida esta fase de entrenamiento, el *dataset* generado se utilizará para entrenar el modelo que posteriormente se utilizará para que el individuo se desplace. Para poder obtener estos modelos es necesario aplicar un preprocesamiento que ayude a la identificación de los patrones de movimiento. En la sección de *Resultados* se muestra cómo se construyen varios modelos haciendo uso de diferentes técnicas de *machine learning* con el objetivo de determinar cuál de ellos ofrece mejores resultados cuando sea evaluado. Los algoritmos que se utilizarán son métodos basados en árboles y reglas de decisión, en aprendizaje basado en funciones, en el teorema de Bayes y en meta-clasificadores.

### 5.3.3.1. *Procesamiento de datos en crudo*

Los diferentes pasos del procesamiento de los datos en crudo recogidos de las lecturas del dispositivo de EEG se describen a continuación.

#### 5.3.3.1.1. Muestreo de las señales

Como se ha indicado previamente, Emotiv EPOC+ es capaz de obtener catorce registros bioeléctricos a partir de sus catorce sensores. Cada una de estas señales está muestreada en una frecuencia de 128Hz, es decir, por cada segundo se obtienen 128 muestras por sensor. De esta forma se obtiene la señal en el dominio del tiempo para cada sensor. Sin embargo, es necesario pasar la señal

al dominio de la frecuencia para poder reconocer mejor los patrones dentro de cada señal, tal y como se realizan en (Cena et al. 2013).

De cada señal, se ha escogido una ventana de 2 segundos para la transformada de Fourier, con un desplazamiento de 0.5 segundos. Es decir, se seleccionan 256 valores, con un desplazamiento de 64 valores. Para cada ventana de tiempo se aplica la transformada de Fourier. A diferencia de otros trabajos que recomiendan el uso de ventanas de 5 segundos, en este trabajo se ha escogido 2 segundos como ventana por el *delay* que representa a la hora de detectar el movimiento y realizarlo.

### 5.3.3.1.2. Obtención de la Transformada Discreta de Fourier

La transformada de Fourier es una transformación matemática para pasar una señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Dada una señal en el dominio del tiempo  $s(n)$ , se denota como  $s_i(n)$  la señal fragmentada en  $I$  ventanas, donde  $i \in I$  denota la ventana que se está transformando. Para cada ventana se calcula la Transformada Discreta de Fourier (TDF) como sigue:

$$S_i(k) = \sum_{n=1}^N s_i(n)h(n)e^{-j2\pi kn/N}, 1 \leq k \leq K.$$

Donde  $h(n)$  es una función de enventanado y  $K$  es la longitud de la TDF; en este caso se han considerado 64 valores. Como función de enventanado se ha escogido la ventana de Hanning que, en el intervalo  $n \in [0, N - 1]$ , corresponde con la fórmula que se muestra a continuación.

$$w(n) = 0.5 \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \right]$$

Donde  $N$  es el número de muestras que se seleccionan; en este caso son 256, tal y como se ha explicado en la subsección *Muestreo de las señales*.

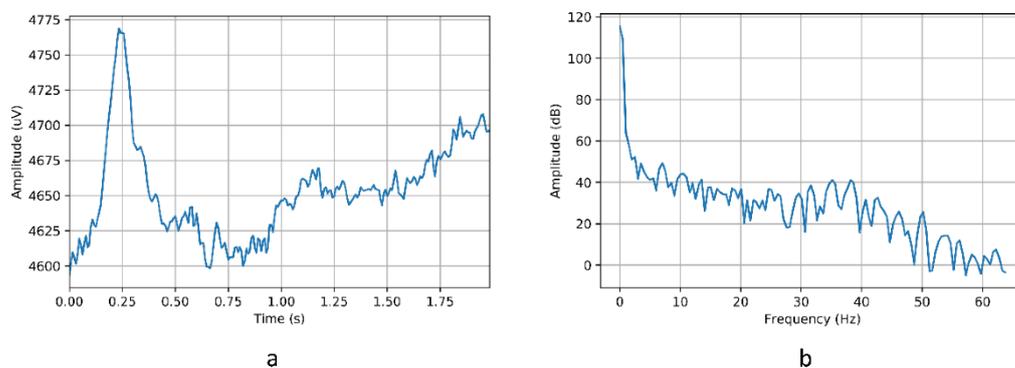
### 5.3.3.1.3. Transformación de los datos en decibelios

La transformación de la TDF en decibelios permite que, dada la naturaleza logarítmica del decibelio, simplifique las operaciones con valores de potencia bajos. Es el caso del Emotiv EPOC+, en donde los registros de las

señales se dan en  $\mu V$ . Formalmente, la transformación de la TDF de una señal  $S(k)$  en decibelios es como sigue:

$$S_{dB}(k) = 20 * \log_{10} S(k), 1 \leq k \leq K.$$

En la Figura 30 se puede apreciar la transformación de los datos en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. En ambas imágenes se observa la señal correspondiente al movimiento "izquierda" registrado por el sensor AF4. Una vez obtenidos los datos ya en el dominio de la frecuencia, se construye el modelo a partir del cual se detectarán los movimientos que ha de realizar la silla.



**Figura 30 Señal correspondiente al movimiento "izquierda" del sensor AF4 (a) Señal en el dominio del tiempo; (B) señal en el dominio de la frecuencia**

Es importante mencionar que la extracción de los datos procedentes del encefalograma se realiza mediante el software EmotivPRO, proporcionado también por la empresa Emotiv bajo suscripción. Una vez obtenidos los datos, éstos han de ser preprocesados con el objetivo de poder pasar los datos que se encuentran en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, mediante la aplicación de transformadas de Fourier.

### *5.3.3.2. Técnicas para la construcción del modelo*

A continuación, se detallan los algoritmos que se han empleado para determinar el movimiento de la silla, aplicados a los datos previamente preprocesados. De todas las técnicas empleadas, se analizará cuál de ellas es la más apropiada para ser aplicada en este problema concreto, de forma que se realice una clasificación lo más precisa posible.

### 5.3.3.2.1. RIPPER

El algoritmo Repeated Incremental Pruning Produce Error Reduction o más conocido por sus siglas RIPPER (Cohen 1995) es un algoritmo de reglas de decisión que evoluciona del algoritmo IREP (Incremental Reduced Error Pruning) (Fürnkranz and Widmer 1994) y a su vez este último algoritmo es una combinación del algoritmo REP (Reduced Error Pruning) (Brunk and Pazzani 1991) y la técnica de divide y vencerás.

En IREP se denomina a  $R_j$  a la regla  $j$  formada por conjunciones de literales, un conjunto de reglas está formada por disyunciones de reglas  $R_1 \cup \dots \cup R_n$ . Una regla es parcial de la regla  $R_j$  y se define como  $R_j^{par}$  si está definida la intersección de un subconjunto de los literales originales de la regla  $R_j$ . En el algoritmo IREP se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. El conjunto inicial de datos  $D$ , se divide en dos subconjuntos  $D_{pos}$  y  $D_{neg}$  de modo que la intersección entre ambos subconjuntos es el vacío y la unión es  $D$ . En cada uno de los subconjuntos, se introducen los elementos que poseen una determinada característica  $D_{pos}$ , y los que no tienen esa característica  $D_{neg}$ .
2. Dividir los subconjuntos anteriores  $D_{pos}$  y  $D_{neg}$  en dos subconjuntos  $D_{pos} = D_{grow-pos} \cup D_{prune-pos}$  y de igual modo  $D_{neg} = D_{grow-neg} \cup D_{prune-neg}$  siendo cada uno de los subconjuntos disjuntos.
3. Siguiendo los subconjuntos  $D_{grow-pos}$  y  $D_{prune-pos}$  el algoritmo añade a cada regla parcial  $R_j^{par}$  el literal con mejor rendimiento generando la nueva regla  $R_j^{par}$  según la función.

$$f_g(R_j, R_j^{par}, D_{grow-pos}, D_{grow-neg}) = \frac{n_1}{n_2} \left[ -\log\left(\frac{p}{p+n}\right) + \log\left(\frac{p'}{p'+n'}\right) \right]$$

Donde  $n_2$  representa el conjunto de elementos que representa la regla  $R_j^{par}$ ,  $n_1$  el conjunto de elementos que representa la regla  $R_j^{par}$ ,  $p$  y  $n$  representan el conjunto de casos positivos y negativos representados por  $R_j^{par}$  y equivalente-

mente  $p'$  y  $n'$  para  $R_j^{par}$ .

4. Se repite el paso anterior hasta que no se pueda añadir ningún elemento a ninguna de las reglas.
5. Una vez finalizado el procesamiento, se procede a realizar la poda partiendo de los últimos literales añadidos. Se eliminan todos los literales tratando de maximizar la siguiente función.

$$f_p(R_j, D_{prune-pos}, D_{prune-neg}) = \frac{p + (n_{prune-neg} - n)}{n_{prune-pos} - n_{prune-neg}}$$

Donde  $n_{prune-neg}$  representa el número de elementos para  $D_{prune-neg}$  y equivalentemente  $n_{prune-pos}$  para  $D_{prune-pos}$ .

6. Se repite el paso anterior hasta que ya no se puede maximizar la regla anterior para cada una de las reglas.

En RIPPER se incorporan una serie de modificaciones a IREP en el procesamiento:

1. Se modifica la función de poda  $f_p$  por la siguiente:

$$f_p(R_j, D_{prune-pos}, D_{prune-neg}) = \frac{p - n}{p + n}$$

2. Introduce heurística para determinar un criterio de parada en el proceso de adición de reglas.
3. Añade un nuevo paso de optimización una vez finalizado el conjunto de reglas.
  - Reemplaza la regla  $R_j$  por  $R'_j$  si el conjunto  $D_{prune-pos} \cup D_{prune-neg}$  tiene menor tasa de error.
  - Añadir literales a la regla  $R_j$  de modo que se decremente el error en el conjunto  $D_{prune-pos} \cup D_{prune-neg}$ .

#### 5.3.3.2.2. C4.5

El algoritmo C4.5 (Quinlan 1993) es una evolución del algoritmo original ID3 (Quinlan 1986), perteneciente a los métodos inductivos de aprendizaje automático *Top Down Induction of Decision Trees* (TDIDT), empleados para la generación de árboles y reglas de decisión a partir de datos preclasificados. La

principal ventaja de C4.5 frente a ID3 es que permite incorporar atributos que presenten valores continuos en las operaciones lógicas llevadas a cabo en los nodos del árbol generado. Actualmente, existen nuevas versiones de este algoritmo como C5.0, aunque se trata de una versión comercial. J48 es la implementación de C4.5 en Java, y se encuentra disponible en herramientas de minería de datos como *Weka* (Hall Eibe Frank et al. 2009). Es una de las técnicas más usadas junto con CART (B. Leo et al. 1984), ya que ambas permiten el uso de atributos numéricos.

Los datos de entrada que toma el algoritmo C4.5 son un conjunto de datos de entrenamiento ya clasificados, donde cada uno tiene una serie de valores para una cantidad fija de atributos (valores independientes)  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_k\}$  que pueden ser continuos o discretos, y un atributo de clase  $C$  discreto que representa la clase a la que pertenece cada muestra, que puede tomar los valores  $\{C_1, C_2, \dots, C_x\}$ .

El objetivo del algoritmo es conseguir una función que mapee los valores de los atributos a la predicción de una clase, generando una estructura (árbol de decisión) en la que los puntos de decisión se llaman nodos y los puntos finales donde se recogen las observaciones de los datos se llaman hojas. Para construir el árbol, se hace uso del método de divide y vencerás, donde cada partición de un conjunto de datos ( $S$ ) se lleva a cabo probando los posibles valores de las instancias en cada atributo, seleccionando posteriormente la mejor partición.

El algoritmo C4.5 trata de minimizar la amplitud del árbol de decisión mediante estrategias de búsqueda pesada, basándose en criterios la como la entropía o el criterio de ganancia. Siendo  $RF(C_j, S)$  la frecuencia relativa de los casos en  $S$  que pertenecen a la clase  $C_j$ , la entropía viene definida así:

$$I(S) = - \sum_{j=1}^x RF(C_j, S) \log(RF(C_j, S))$$

Después de dividir  $S$  en los subconjuntos  $\{S_1, S_2, \dots, S_x\}$  por un nodo de decisión  $B$ , la ganancia de información se define de la siguiente manera:

$$G(S, B) = I(S) - \sum_{i=1}^t \frac{|S_i|}{|S|} I(S_i)$$

El criterio de ganancia selecciona la condición  $B$  que maximice  $G(S, B)$ . Para evitar favorecer las particiones con ramas con pocos elementos, se introduce el término de tasa de ganancia:

$$P(S, B) = - \sum_{i=1}^t \frac{|S_i|}{|S|} \log\left(\frac{|S_i|}{|S|}\right)$$

Finalmente, se selecciona el nodo  $B$  de los nodos que tengan al menos la ganancia promedio, que maximiza el siguiente criterio:

$$\frac{G(S, B)}{P(S, B)}$$

A lo largo del proceso de generación del árbol, se dividen los datos hasta que cada nodo hoja tenga casos de una sola clase o hasta que sea imposible llevar a cabo más particiones si dos casos tienen los mismos valores para cada atributo, pero pertenecen a clases diferentes. Por lo tanto, si no hay conflictos entre casos, el árbol de decisión será capaz de clasificar de manera correcta todos los datos de entrenamiento. Sin embargo, este ajuste puede resultar excesivo a la hora de clasificar ejemplos, dando lugar a un sobreentrenamiento o sobreajuste (*overfitting*). Para evitar este sobreentrenamiento y obtener además un árbol más manejable, se aplican técnicas de poda. En el caso de C4.5 se efectúa una post-poda (después de haber generado el árbol completo). Para ello, se compara el error estimado de clasificación de un nodo con el error en cada uno de sus hijos y su padre. En función qué valor es menor, se mantendrá sin modificar, se reemplazará el subárbol por un nodo hoja (*subtree replacement*) o se sustituirá el nodo por uno de sus subárboles (*subtree raising*).

### 5.3.3.2.3. Random Forest

El algoritmo *Random Forest* está inspirado en cierto modo en los algoritmos de *Bagging* y la técnica de *bootstrapping*. La idea original del algoritmo *Random Forest* es mejorar la reducción de varianza del algoritmo *Bagging*, reduciendo para ello la correlación entre los árboles que se generan sin reducir demasiado la varianza. Esto se consigue durante la etapa de creación y crecimiento del árbol, gracias a la selección de las variables aleatorias que compondrán el árbol (Breiman 2001).

Para ello, el algoritmo crea una serie de árboles aleatorios, donde el factor aleatorio viene determinado por las variables que se seleccionan para formar el árbol. El proceso se detalla a continuación.

1. Se generan un total de  $B$  árboles aleatorios. Para generar cada uno de ellos se realiza lo siguiente.
  - a. Se extrae un subconjunto  $Z^*$  del conjunto de entrenamiento  $Z$ , mediante la técnica de *bootstrapping*.
  - b. Se genera un árbol  $T_b$ , del bosque aleatorio que se pretende formar, con el subconjunto  $Z^*$ . Para realizar este proceso se repiten recursivamente los siguientes pasos hasta que el número mínimo de nodos es alcanzado.
    - i. Se seleccionan  $m$  variables aleatorias de las  $p$  variables totales.
    - ii. Se selecciona la mejor variable de entre las  $m$  seleccionadas.
    - iii. Por último, se divide ese nodo formado por la mejor variable  $m$  en dos nodos hijos.
2. Una vez obtenidos el conjunto de los árboles, se pasa a realizar la clasificación de las instancias. Para ello se utilizan cada uno de los árboles formados con anterioridad y, la clase asignada a las instancias, será la clase mayoritaria:

$$\widehat{C}_b(x) = \text{majority vote } \widehat{C}_b(x)_1^B$$

Donde  $\widehat{C}_b$  es la clase que se predice para la instancia  $x$ .

#### 5.3.3.2.4. Redes Bayesianas

El algoritmo basado en redes bayesianas establece un modelo que se fundamenta en la probabilidad que relaciona a un conjunto de variables aleatorias mediante un grafo dirigido acíclico. Esto permite utilizar la inferencia bayesiana para determinar las probabilidades de variables desconocidas a partir de otras que se conocen. Las redes bayesianas están compuestas por nodos (uno por cada variable aleatoria) y por arcos dirigidos que relacionan los nodos. Además, se sabe que la probabilidad de cada nodo está condicionada a la del

nodo padre. Las redes bayesianas se basan en el teorema de Bayes (Duda and Hart 1973), el cual permite calcular la probabilidad de un suceso a priori  $A_i$  sabiendo que ha ocurrido a posteriori el suceso  $B$ .

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{P(B)} = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{\sum_{j=1}^n P(B|A_j)P(A_j)}$$

Donde  $P(A_i)$  es la probabilidad de que ocurra el suceso  $A_i$ ;  $P(B)$  es la probabilidad de que ocurra el suceso  $B$  y  $P(B|A_i)$  representa la probabilidad de que ocurra el suceso  $B$  sabiendo que ha ocurrido  $A_i$ , siendo los sucesos  $A_i$  excluyentes.

En caso de que se desee establecer una propiedad a priori a través de una red bayesiana conociendo lo que ha ocurrido, se puede utilizar la siguiente ecuación.

$$P(X|e) = \alpha P(X, e) = \alpha \sum_y P(X, e, y)$$

Donde  $X$  representa una variable de un suceso que se quiere calcular a priori, mientras que  $e$  es el conjunto de variables conocidas a posteriori y por último  $\alpha$  es una constante que hace que la suma de los diferentes valores de la variable  $X$  sea 1.

El aprendizaje de redes bayesianas consiste en encontrar, de entre todos los grafos posibles, aquel que mejor represente el conjunto de dependencias entre los datos. Para ello se hace uso de métodos de búsqueda heurística; algunos de los más relevantes son K2 (Cooper and Herskovits 1992), TAN o BAN (Friedman, Geiger, and Goldszmidt 1997).

Es importante destacar que, en caso de que algún atributo tenga valores continuos, es necesario hacer una discretización de los datos, ya que si no este tipo de variables dificulta mucho el cálculo de las probabilidades.

### 5.3.3.2.5. SVM

*Support Vector Machine* (SVM) es una técnica de aprendizaje supervisado que fue inicialmente pensada para la resolución de problemas de clasificación, pero que actualmente se puede emplear para afrontar otros problemas como la regresión, el agrupamiento o la multclasificación. La técnica

de SVM surge como una extensión a los modelos no lineales, conceptuada para la clasificación de problemas separables linealmente mediante la construcción de hiperplanos en el espacio en el que se encuentran representados los datos. De esta forma, los hiperplanos permiten separar las diferentes clases de un conjunto (V. Vapnik 1963). SVM además es capaz de separar clases de elementos que no son separables linealmente, para lo que mapea el espacio de coordenadas inicial en un espacio de alta dimensionalidad mediante el uso de funciones. Debido a que la dimensionalidad del nuevo espacio puede ser muy alta, efectuar los cálculos de los hiperplanos que permiten la separabilidad lineal no es practicable. Para ello, se emplean un conjunto de funciones no lineales conocidas como núcleo o *kernel*, que permiten realizar estas operaciones de forma eficiente. En el artículo escrito por Vapnik (V. N. Vapnik 1999) se explica con más detalle esta técnica.

Cuando el número de datos es grande, la resolución de los problemas cuadráticos que surgen de las SVM puede ser difícil de resolver mediante las técnicas tradicionales. Una de las técnicas más extendidas para la resolución de estos problemas es *Sequential Minimal Optimization* (SMO) (Platt 1999). Este algoritmo es un método que permite descomponer el problema inicial en subproblemas, lo que hace que sea menos costoso computacionalmente.

#### 5.3.3.2.6. Meta-Clasificadores

El algoritmo *bagging* proviene de las palabras ***bootstrap aggregating***. La técnica consiste en obtener diferentes conjuntos de entrenamiento a partir de uno original mediante la técnica de *bootstrapping*. Cada uno de estos conjuntos de datos será la entrada de un clasificador diferente con el que cada clasificador, que por lo general son distintos entre sí, obtendrá un modelo clasificador que es capaz de tomar decisiones. Una vez obtenidos estos modelos, cada vez que se pretenda clasificar una instancia nueva, ésta será clasificada por cada uno de ellos. Cada uno de estos modelos puede llegar a un resultado diferente de tal forma que el multi-clasificador tiene que establecer la clase que se ofrecerá como resultado del proceso mediante la técnica del voto mayoritario. Esta técnica fue propuesta originalmente por Breiman (Breiman 1996). Por el contrario, la técnica de *boosting* utiliza un único clasificador para generar los diferentes modelos. Estos modelos son entrenados por diferentes subconjuntos de datos que se obtienen también mediante el *bootstrapping*. En los algoritmos que implementan esta técnica, como el AdaBoost, cada una de las instancias de

los subconjuntos de entrenamiento de cada clasificador recibe un peso inicial. Cada uno de esos subconjuntos es entrenado durante un número determinado de iteraciones. En cada una de estas iteraciones se comprueba el error del modelo y si no cumple las condiciones de satisfacción se realiza una nueva iteración, pero actualizando los pesos de las instancias mal clasificadas con la siguiente fórmula.

$$P_i = P_{ic} \frac{e}{(1 - e)}$$

Donde  $P_i$  representará el nuevo peso de la instancia  $i$ ,  $P_{ic}$  denota el peso actual de  $i$  y  $e$  representa el error del modelo tras la iteración actual.

De esta forma, se entrenarían cada uno de los modelos de los que constaría el multi-clasificador. Este determinará la clase resultante mediante la clase con mayor peso de las que devuelve cada uno de los clasificadores internos del multi-clasificador.

Con estas técnicas, analizaremos cuál de ellas se acopla mejor a la casuística del problema, con el objetivo de realizar una clasificación lo más precisa posible.

## 5.4. Resultados

En esta sección se realiza una evaluación de los resultados obtenidos tras el desarrollo del sistema propuesto. En primer lugar, se analiza la eficiencia de los diferentes algoritmos empleados en la sección *EEG*. Una vez vistos los resultados que obtienen cada uno de los algoritmos será necesario determinar cuál de ellos se acopla mejor a las características del sistema. En esta sección se analizan primero los algoritmos que se encargarán de discretizar entre los pensamientos abstractos, para posteriormente analizar los algoritmos que evalúen los conjuntos de datos formados cuando los usuarios observan las imágenes.

A la hora de determinar el funcionamiento de la interfaz de control basada en el uso de la tecnología EEG cuando el usuario piensa en conceptos abstractos, que posteriormente se relacionan con los movimientos de adelante, atrás, izquierda y derecha, este funcionamiento se evalúa con los algoritmos

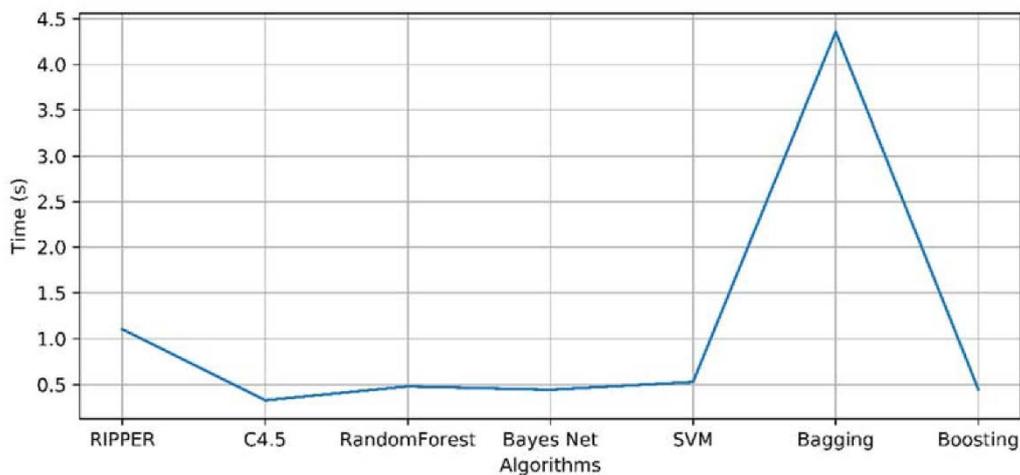
RIPPER, C4.5, RandomForest, redes bayesianas, SVM, Bagging con el algoritmo RandomForest y Boosting con el algoritmo RandomForest. Las versiones de estos algoritmos son las que se encuentran implementadas en la herramienta *Weka* (Hall Eibe Frank et al. 2009).

Cada uno de estos algoritmos recibirá un total de cinco *datasets* diferentes, uno por cada uno de los usuarios con los que se han realizado las pruebas, con el objetivo de determinar su eficacia. Los cinco individuos seleccionados son varones de entre 22 y 31 años. Los *datasets* son obtenidos mediante el proceso descrito en la subsección *EEG*. Con estos datos se evalúa el funcionamiento de los algoritmos mediante la generación del modelo y su validación con la técnica del *10-fold cross validation*. Los resultados de estas pruebas se muestran en la Tabla 7.

	Usuario 1			Usuario 2		
	Precisión (%)	Kappa	Tiempo (s)	Precisión (%)	Kappa	Tiempo (s)
RIPPER	97,25	0,9678	1,26	97,16	0,9654	1
C4.5	98,35	0,9721	0,62	98,23	0,9782	0,27
R.Forest	96,78	0,9534	0,6	96,42	0,9574	0,5
Bayes Net	92,56	0,9178	0,7	91,42	0,9107	0,38
SVM	96,63	0,9578	0,78	96,23	0,9503	0,47
Bagging	97,84	0,9724	4,53	97,45	0,9549	4,45
Boosting	97,63	0,9706	0,46	97,59	0,9619	0,46
	Usuario 3			Usuario 4		
	Precisión (%)	Kappa	Tiempo (s)	Precisión (%)	Kappa	Tiempo (s)
RIPPER	97,36	0,9542	1,09	97,59	0,9641	1,04
C4.5	98,48	0,9624	0,27	97,85	0,9528	0,24
R.Forest	96,98	0,9408	0,44	97,68	0,9606	0,41
Bayes Net	92,35	0,9004	0,39	93,21	0,9154	0,35
SVM	97,87	0,9543	0,45	97,24	0,9629	0,46
Bagging	97,94	0,9664	4,34	97,69	0,9579	4,15
Boosting	97,81	0,9546	0,45	98,04	0,9723	0,42
	Usuario 5			Media		
	Precisión (%)	Kappa	Tiempo (s)	Precisión (%)	Kappa	Tiempo (s)
RIPPER	97,21	0,9601	1,14	97,314	0,9623	1,106
C4.5	97,45	0,9578	0,24	98,072	0,9647	0,328
R.Forest	98,46	0,9687	0,45	97,264	0,9562	0,48
Bayes Net	92,45	0,9124	0,4	92,398	0,9113	0,444
SVM	97,48	0,9621	0,48	97,09	0,9575	0,528
Bagging	97,89	0,9578	4,32	97,762	0,9619	4,358
Boosting	98,12	0,9724	0,44	97,838	0,9664	0,446

Tabla 7 Comparación de los modelos con pensamientos abstractos

Como se observa en la tabla, todos los algoritmos obtienen una eficacia muy alta, en todos los casos superior al 97% al validar cada uno de sus modelos mediante la técnica de *10-fold cross validation* y un índice *kappa* también cercano a 1. A la hora de interpretar el índice *kappa*, se puede establecer que el la fuerza de concordancia es muy buena para valores entre 0.81 y 1, por lo que todos los modelos ofrecen un funcionamiento muy satisfactorio para cada uno de los individuos con los que se ha probado el sistema. Por ello, es fundamental que en este caso se preste especial atención al tiempo que es necesario para generar cada uno de los modelos. Este aspecto se aprecia mejor en la Figura 31.



**Figura 31 Evolución del tiempo de formación de los modelos**

La anterior figura muestra los tiempos medios de cada uno de los modelos generados para cada usuario. Observando esta gráfica se puede concluir que el mejor algoritmo para afrontar el problema del tratamiento de pensamientos abstractos es el C4.5.

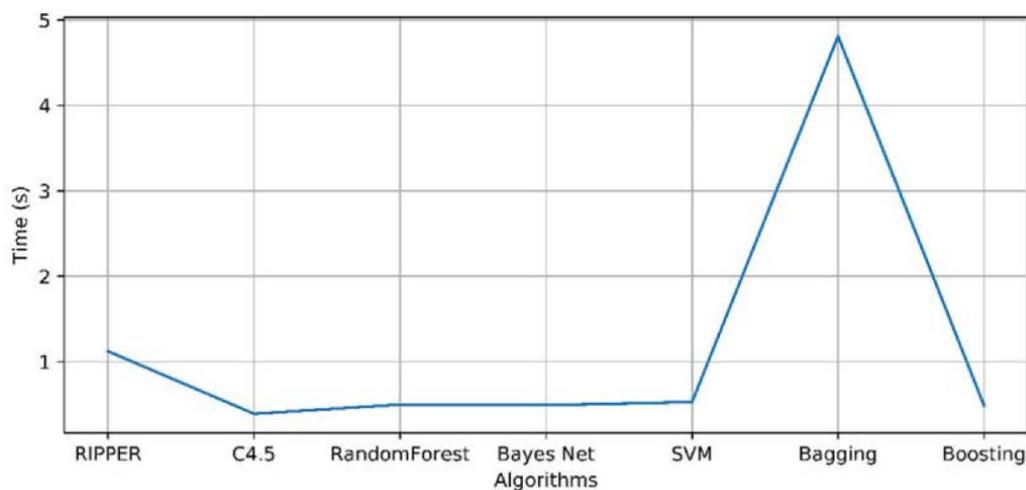
Si tenemos en cuenta la eficacia del sistema a la hora de discretizar cuándo el usuario visualiza las imágenes de las flechas que se relacionan con cada uno de los cuatro movimientos, ésta se evalúa con los mismos algoritmos que antes: RIPPER, C4.5, RandomForest, redes bayesianas, SVM, Bagging con el algoritmo RandomForest y Boosting también con el algoritmo RandomForest, de nuevo empleando las implementaciones de la aplicación *Weka* (Hall Eibe Frank et al. 2009).

Del mismo modo que antes, cada uno de los algoritmos se evalúan con los *datasets* de los cinco usuarios y con la técnica de *10-fold cross validation*. Los resultados de estas pruebas de validación se pueden observar en la Tabla 8.

	Usuario 1			Usuario 2		
	Precisión (%)	Kappa	Tiempo (s)	Precisión (%)	Kappa	Tiempo (s)
RIPPER	98,56	0,9824	0,95	99,3878	0,9923	1,19
C4.5	98,72	0,9715	0,34	98,52	0,9705	0,31
R.Forest	95,32	0,9414	0,49	95,12	0,9475	0,51
Bayes Net	93,78	0,9124	0,4	92,66	0,9122	0,39
SVM	96,47	0,9612	0,42	96,19	0,9545	0,51
Bagging	97,12	0,9664	4,49	97,35	0,9642	4,8
Boosting	96,89	0,9612	0,45	96,94	0,9623	0,48
	Usuario 3			Usuario 4		
	Precisión (%)	Kappa	Tiempo (s)	Precisión (%)	Kappa	Tiempo (s)
RIPPER	98,67	0,9712	1,08	98,87	0,9787	0,96
C4.5	97,87	0,9641	0,42	98,84	0,9823	0,34
R.Forest	94,45	0,9376	0,48	96,06	0,9542	0,5
Bayes Net	91,78	0,9117	0,4	92,64	0,9228	0,4
SVM	96,36	0,9578	0,46	96,48	0,9569	0,78
Bagging	96,96	0,9624	4,7	97,87	0,9735	5,16
Boosting	96,57	0,9612	0,49	96,49	0,9637	0,52
	Usuario 5			Media		
	Precisión (%)	Kappa	Tiempo (s)	Precisión (%)	Kappa	Tiempo (s)
RIPPER	98,01	0,9784	1,44	98,73445	0,9806	1,124
C4.5	99,85	0,9895	0,55	98,77	0,9756	0,392
R.Forest	96,14	0,9581	0,52	95,418	0,9478	0,5
Bayes Net	94,83	0,9407	0,87	93,138	0,9199	0,492
SVM	96,12	0,9574	0,48	96,324	0,9576	0,53
Bagging	97,45	0,9682	4,91	97,35	0,9669	4,812
Boosting	96,42	0,9578	0,5	96,662	0,9612	0,488

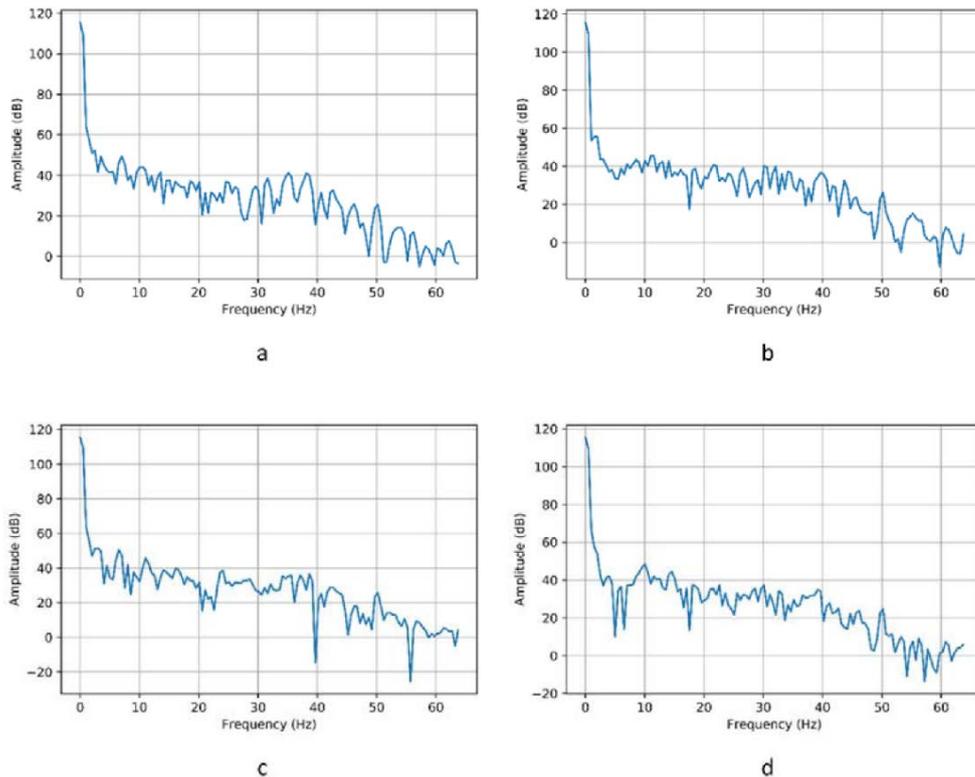
Tabla 8 Comparativa de los modelos en el visionado de imágenes

Nuevamente, los modelos ofrecen unos buenos resultados, teniendo en cuenta tanto los valores de la precisión como el del valor *kappa*. La precisión es, en casi todos los casos, superior al 95% y de un índice *kappa* superior al 0.94. Por tanto, de nuevo es necesario comparar los valores de tiempo en los que se tarda en generar cada uno de los modelos. Esto se aprecia en la Figura 32. Observando la imagen, se puede apreciar que nuevamente el algoritmo C4.5 es el que consume menos tiempo para generar el modelo. Por lo que este algoritmo se selecciona entre el resto de ellos para conformar el modelo que decidirá qué imagen está visualizando el usuario a través de los datos recibidos de su actividad cerebral.



**Figura 32 Evolución del tiempo de formación de los modelos**

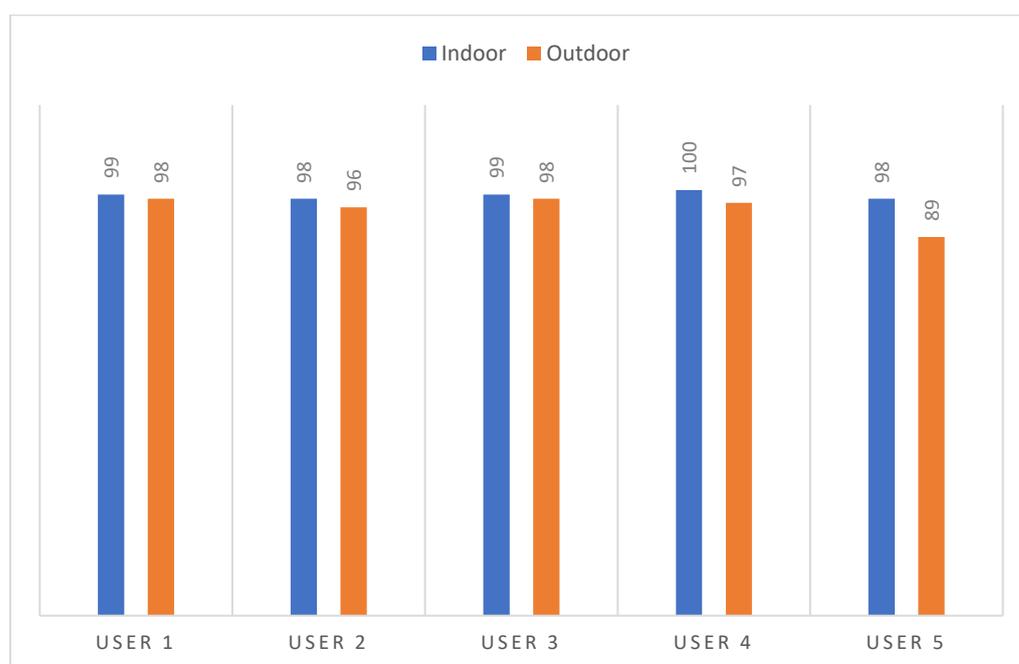
El buen funcionamiento de todos los modelos propuestos se debe principalmente al preprocesamiento de los datos, en el cual se transforman los datos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia. Esto se consigue mediante la aplicación de la transformada de Fourier, así como de las funciones de enventanado, tal y como se explicó en la subsección *EEG*. Con este proceso se consigue que los modelos diferencien entre cada uno de los movimientos, como se puede ver a simple vista en la Figura 33.



**Figura 33 Señal recogida por el sensor AF4 del sujeto 1 en los dos primeros segundos a) Movimiento "izquierda" b) Movimiento "derecha" c) Movimiento "adelante" d) Movimiento "atrás"**

En cuanto a la evaluación del control por voz, se llevaron a cabo un conjunto de pruebas con cinco usuarios diferentes. Es importante remarcar que ninguno de estos usuarios presentaba problemas de pronunciación. A la hora de llevar a cabo las pruebas, éstas se realizaron sin utilizar la silla de ruedas, ya que el propósito de estas pruebas era simplemente el evaluar el rendimiento del sistema de reconocimiento de voz, no su usabilidad como interfaz de control para una silla de ruedas. Durante estas pruebas, cada usuario repitió 10 veces cada uno de los comandos (ver Tabla 6) en dos escenarios distintos: un entorno de interior y otro de exterior (una calle relativamente ajetreada). El correcto funcionamiento del proceso de reconocimiento de los comandos por parte del sistema es de vital importancia. Un error a la hora de reconocer la instrucción dada por el usuario, no identificando la instrucción como ningún comando, implicaría que la silla de ruedas continuara realizando la misma acción que estuviera realizando previamente. Una situación menos deseable se daría cuando el sistema reconociera de manera errónea un comando diferente al que

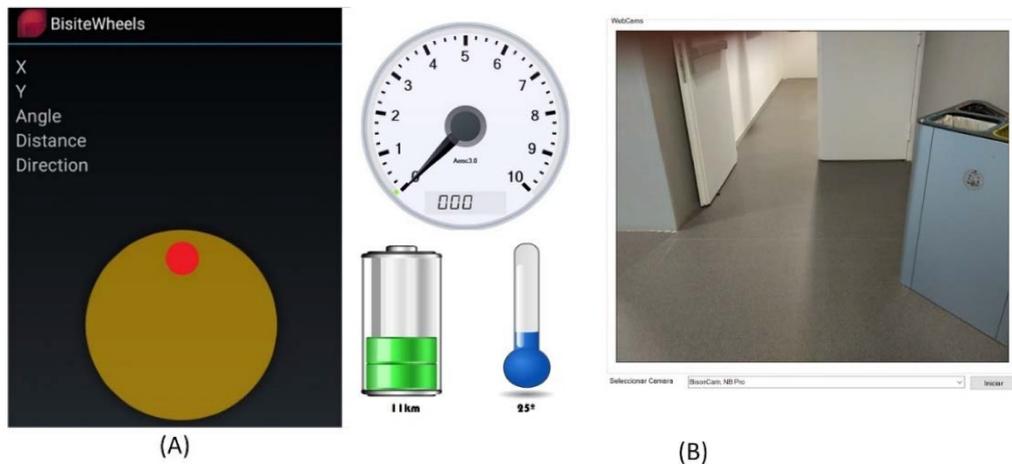
el usuario estaba indicando. La Figura 34 muestra el porcentaje de los comandos de voz reconocidos de manera satisfactoria durante las pruebas realizadas en interiores y exteriores. La mayoría de los errores producidos en el sistema estuvieron relacionados con la no identificación de alguno de los comandos. Únicamente en 12 de los 1000 casos el sistema confundió un comando con otro.



**Figura 34 Precisión del sistema de reconocimiento de voz**

En la Figura 35 se pueden ver capturas de pantalla de las aplicaciones para Tablet y smartphone. La Figura 35 (A) muestra la interfaz de la aplicación para smartphone que permite tomar el control de la silla de ruedas a través de la pantalla táctil emulando un joystick. Para poder tomar el control de la silla de ruedas, el usuario debe deslizar el dedo a través del círculo que se puede ver en la imagen en la dirección en la que se desea mover la silla. Para detener su movimiento, basta con dejar de tocar el círculo. La Figura 35 (B) muestra la interfaz de la aplicación desplegada en la Tablet Microsoft Surface, situada en la parte frontal de la silla de ruedas. Esta aplicación se emplea para presentar al usuario información de utilidad. Como se puede observar en la figura, se muestra información relativa a la velocidad y a la temperatura de los componentes electrónicos. Además, con el objetivo de tener una visión más amplia del entorno, se incluyen imágenes recogidas por parte de una cámara

situada en la parte trasera de la silla de ruedas. De esta manera, los usuarios con problemas de movilidad en el cuello pueden ver qué ocurre tras ellos.



**Figura 35 (A) Interfaz de la aplicación para smartphone; (B) Interfaz de la aplicación para Tablet**

Puesto que la precisión de los sistemas de control basados en el smartphone no es evaluable de la misma forma que se ha realizado con los sistemas de control basados en el uso del dispositivo de EEG o la voz, se han llevado a cabo diferentes pruebas con el propósito de obtener *feedback* por parte de los usuarios acerca de la precisión y facilidad de uso de estos sistemas. Las pruebas se realizaron con todas las interfaces de control presentadas previamente utilizando el prototipo de silla de ruedas. Adicionalmente, el uso de los sistemas de control basados en el uso del smartphone fue evaluado como sistema de control para personas acompañantes, no para usuarios de la silla de ruedas.

Cinco usuarios llevaron a cabo estas pruebas, en las que se utilizaron los sistemas de control tanto para interiores como para exteriores, siguiendo la misma ruta. Finalmente, los usuarios evaluaron la precisión y la facilidad de uso de los sistemas de control usando una calificación numérica de 0 a 10. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 9. Se pueden extraer algunas conclusiones de las evaluaciones y del *feedback* de los usuarios: como se puede ver en los resultados, los dos sistemas de control más precisos son los basados en el acelerómetro y la pantalla táctil del teléfono. Los usuarios estuvieron muy satisfechos con el rendimiento y la facilidad de uso de ambos sistemas de control y todos destacaron que el control basado en el acelerómetro era el más intuitivo,

lo que hizo que este método de control fuera el más cómodo de usar al caminar junto a la silla de ruedas. En cuanto al control basado en comandos de voz, los usuarios destacaron su facilidad de uso, aunque señalaron que les resultaba difícil efectuar giros precisos debido al tiempo requerido para pronunciar el comando. Por otra parte, el sistema de control basado en el uso del dispositivo de EEG, resultó ser el menos fácil de usar. La razón principal es que este sistema requiere un proceso más costoso en términos de adaptación y capacitación por parte del usuario. En cuanto a la precisión de este sistema como método de control, resultó ser el menos eficiente ya que requiere un mayor grado de concentración por parte del usuario. Su uso en interiores resultó ser apropiado, mientras que se experimentaron ciertos problemas a la hora de ser empleado en entornos exteriores, donde gran cantidad de estímulos externos pueden afectar la concentración del usuario.

<b>Usuario</b>	<b>Acelerómetro</b>		<b>Pantalla Táctil</b>	
	<b>Precisión de control</b>	<b>Facilidad de uso</b>	<b>Precisión de control</b>	<b>Facilidad de uso</b>
Usuario 1	10	10	10	9
Usuario 2	10	9	9	8
Usuario 3	10	10	9	8
Usuario 4	10	9	10	9
Usuario 5	10	9	10	9
Media	10	9,4	9,4	8,6

<b>Usuario</b>	<b>Voz</b>		<b>EEG</b>	
	<b>Precisión de control</b>	<b>Facilidad de uso</b>	<b>Precisión de control</b>	<b>Facilidad de uso</b>
Usuario 1	7	9	7	9
Usuario 2	8	8	6	8
Usuario 3	8	9	6	7
Usuario 4	8	8	5	8
Usuario 5	6	8	6	7
Media	7,4	8,4	6	7,8

Tabla 9 Evaluación de los sistemas de control

## 5.5. Conclusiones

A continuación, se describen las principales conclusiones obtenidas tras la consecución satisfactoria de los objetivos marcados en el desarrollo de la interfaz inteligente para el control de sillas de ruedas.

En este trabajo se ha diseñado y desarrollado una plataforma basada en VO de agentes para controlar una silla de ruedas eléctrica desde diferentes dispositivos externos. El uso de un SMA como PANGAEA ha aportado una serie de ventajas, propias de este paradigma, para el análisis, diseño e implementación de sistemas complejos donde las fuentes de datos y el procesamiento de los datos son distribuidos. PANGAEA provee la infraestructura necesaria para diseñar y desplegar un SMA de manera ágil y sencilla, facilitando la recopilación y procesamiento de datos y la comunicación con los usuarios. Además, mejora la posibilidad de diseñar diferentes formas de acceso a datos que admitan un procesamiento de información no centralizado, mejorando las propiedades de escalabilidad del sistema.

El uso de un SMA basado en PANGAEA para llevar a cabo el desarrollo del caso de estudio ha hecho posible la interconexión de agentes desarrollados en diferentes lenguajes de programación y sistemas operativos. PANGAEA se caracteriza por ser una arquitectura que permite la conexión de diferentes dispositivos de una manera simple y rápida, proporcionando a los investigadores herramientas visuales que favorecen la implementación de casos de estudio de forma rápida. Gracias a la utilización de este SMA es posible equilibrar la distribución de tareas de forma dinámica en diferentes organizaciones virtuales que interactúan entre sí a través de FIPA-ACL. El protocolo de comunicación utilizado para la interconexión entre los diferentes dispositivos se basa en el protocolo IRC (Internet Relay Chat Protocol-RFC1459), que ofrece una mayor eficiencia en cuanto al consumo de batería, ya que es un protocolo más ligero y flexible en comparación con, por ejemplo, una arquitectura SOAP.

Para realizar el control y actuar en la capa física del hardware, se ha diseñado y fabricado una placa de control de circuito impreso. Esta placa actúa como una puerta de enlace entre las aplicaciones de usuario desarrolladas y la silla de ruedas. Este hardware es independiente de los fabricantes de sillas de

ruedas, lo que facilita probar esta solución en diferentes modelos. La interfaz posibilita conectar diferentes dispositivos externos que permitan adaptar el control a las capacidades motrices del usuario. Este caso de estudio ha sido validado con tres interfaces externas (voz, teléfono inteligente y un dispositivo EEG). Es importante señalar que el coste de desarrollo de la interfaz es inferior a 110 €, tal como estaba previsto al principio, por lo que podría ser fácilmente costado por parte los usuarios finales.

A la hora de efectuar las pruebas, el sistema de control basado en los estímulos cerebrales fue la interfaz que atrajo la mayor atención. Desde un punto de vista más técnico, esta interfaz de control permite a los usuarios realizar cambios de dirección rápidamente, a través de soporte visual o mediante conceptos abstractos, con un retraso inicial de 2 segundos y un muestreo cada 0.5 segundos. Para calibrar la interfaz, es suficiente hacer un breve entrenamiento de 40 segundos de duración, lo que hace que la plataforma sea mucho más eficiente y presente resultados satisfactorios. Finalmente, podemos concluir que el estado actual de este trabajo no permite que un usuario se mueva dentro de un espacio cerrado con dimensiones reducidas con una buena efectividad, sino que pretende ser una prueba de concepto que haga posible que una persona que sufre de algún tipo de problema motriz se mueva un espacio abierto.

El hecho de no haber optado por un RSF para el desarrollo de la plataforma podría haber ralentizado su desarrollo, ya que las plataformas de desarrollo de SMA no proporcionan ciertas herramientas que sí proporcionan los RSFs y podrían haber sido muy útiles en este trabajo, como por ejemplo las interfaces y algoritmos de robótica o las herramientas de simulación y modelado. Sin embargo, una vez que la plataforma ha sido implementada y desplegada, consideramos que el uso de OV acelera y mejora la incorporación de nuevas interfaces de control que combinan el uso de sensores y técnicas de IA. Muchas son las ventajas que aporta el uso de OV, ya que permiten lograr sistemas más abiertos, dinámicos y flexibles, manteniendo las ventajas implícitas de usar un SMA, como la heterogeneidad, modularidad, escalabilidad, paralelismo y flexibilidad del sistema o su robustez contra fallos.

A pesar de que la plataforma se puede implementar fácilmente en cualquier silla de ruedas convencional, la aparición de iniciativas como la

presentada en este trabajo no alcanzará la relevancia suficiente si no son impulsadas por los fabricantes de sillas de ruedas. Sin embargo, este trabajo puede ser muy útil como punto de partida para aquellos investigadores que necesitan modificar una silla de ruedas convencional para llevar a cabo su trabajo. Sin embargo, siempre requerirá un esfuerzo adicional a nivel de hardware si no existe consenso en la estandarización de los protocolos con los que interactuar y controlar las sillas de ruedas por parte de todos los fabricantes.

A nivel global, se considera que el resultado obtenido en términos del rendimiento de los métodos de control es satisfactorio. Sin embargo, aún se pueden hacer mejoras a nivel general. Por ejemplo, se puede trabajar en la incorporación de sistemas más avanzados en el sistema de colisión, como el propuesto en (Rojas, Ponce, and Molina 2018), para que la experiencia de control del usuario con cualquier interfaz pueda mejorarse ampliamente. Por otro lado, la evaluación de los resultados obtenidos podría ser más exhaustiva en términos de los métodos de control aumentando el número de intentos y usuarios, pero fundamentalmente incorporando en los casos de estudio a personas con diferentes discapacidades para evaluar la adecuación de cada una de las propuestas a cada una de las discapacidades.

---

# CAPÍTULO VI

---

## Conclusiones



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA



*En este capítulo se recogen algunas conclusiones generales fruto del trabajo presentado en los capítulos anteriores. Además, se resaltan cuáles han sido las principales contribuciones del trabajo realizado, así como las posibles líneas de trabajo futuro relacionadas.*

Debido a la creciente preocupación de la sociedad por la integración de las personas discapacitadas, podemos comprobar que han surgido un gran número de iniciativas que tratan de dar apoyo a este colectivo mediante la prevención, los cuidados médicos y psicológicos, la rehabilitación, la educación, la orientación o la integración laboral entre otras. En este trabajo se han presentado un conjunto de herramientas cuyo objetivo es facilitar la integración social en el ámbito de la movilidad. En este contexto, podemos establecer que el grado de accesibilidad de los entornos se define en base a los tipos de usuarios con relación a sus capacidades (que determinan el grado de incidencia de las diferentes barreras en cada caso) y de los tipos de dificultades que plantea el entorno. Por ello, en este trabajo se han estudiado diferentes alternativas que tratan de ofrecer una mejora de la accesibilidad tanto en el apoyo a las capacidades de los usuarios, como en la reducción de las dificultades impuestas por los entornos.

En primer lugar, se presenta el diseño e implementación de una herramienta que se basa en el uso combinado de la simulación social basada en agentes junto con las representaciones tridimensionales. La utilización de ambas técnicas hace posible realizar modelados y simulaciones de manera muy próxima a la realidad de entornos complejos y cambiantes. El principal objetivo de esta herramienta es el de detectar a qué dificultades se pueden enfrentar los usuarios dentro de un entorno para poder adaptarlos a sus necesidades. Con el propósito de agilizar el diseño de los entornos tridimensionales en los que se lleven a cabo las simulaciones, se incorpora una herramienta de edición, que permite un modelado ágil de entornos de interior mediante el uso de modelos especialmente diseñados para un rápido despliegue. El método de simulación definido, se integra en una arquitectura multiagente basada en OV de agentes, los cuales se emplean para la representación de las personas y diferentes elementos que intervienen en la simulación. La implementación de dichos agentes está basada en el modelo BDI; se trata de agentes deliberativos cuyo uso es adecuado en entornos dinámicos y en aplicaciones en tiempo real, que

aportan una representación intuitiva y una gran variedad de posibles implementaciones.

Por otro lado, la proliferación de diferentes sistemas de control de sillas de ruedas que hacen uso de datos provenientes de redes de sensores y de técnicas de IA, requiere de plataformas que faciliten y automaticen las tareas de recopilación y análisis de datos. En este contexto, se presenta una arquitectura centrada en ofrecer rápida integración de diferentes sistemas de control de sillas de ruedas donde diferentes elementos de computación trabajan de forma distribuida. Dicha arquitectura se cimienta sobre un modelo adaptativo basado en OV que permiten la integración de dispositivos inteligentes para el procesamiento de la información y se apoya en el uso de un dispositivo hardware que actúa como nodo central para la gestión del control de la silla de ruedas. Además, gracias a la aplicación de diferentes técnicas de IA para efectuar un análisis de datos en tiempo real, ha sido posible el desarrollo de diferentes interfaces de control.

## 6.1. Contribuciones de la investigación

Finalmente, es posible concluir que se ha realizado un trabajo de investigación, en el que se ha estudiado el estado del arte de la teoría de agentes, sistemas multiagente y técnicas aplicadas a la integración de personas con problemas de movilidad a través de herramientas que permitan favorecer su autonomía. A continuación, se resumen las aportaciones realizadas:

- **Marco para el análisis de la accesibilidad de los entornos físicos.** Se han estudiado las relaciones existentes entre las personas y los entornos físicos en los que se desenvuelven. De esta forma ha sido posible definir las vías de actuación para trabajar en la adecuación de los entornos físicos, estableciendo unos objetivos y criterios bien definidos.
- **Marco para el análisis y diseño de sistemas multiagente.** Se ha llevado a cabo un estudio de las tendencias actuales dentro de la inteligencia artificial distribuida en entornos colaborativos, centrándose en los sistemas multiagente, y más en concreto las organizaciones virtuales.

- **Marco para el diseño de sistemas de simulación mediante técnicas de ABSS.** Se ha realizado un estudio previo del estado del arte actual en ABSS, disciplina que se ocupa de la simulación de fenómenos sociales a través del uso de modelos computacionales multiagentes.
- **Estudio de tecnologías para el control de sillas de ruedas motorizadas.** Se ha realizado una revisión del estado del arte de los diferentes sistemas de control de sillas de ruedas tanto a nivel comercial como a nivel académico. Además, se ha evaluado la utilización de diferentes alternativas de desarrollo ampliamente empleadas en el campo de la robótica, aplicadas al desarrollo de un sistema de control de sillas de ruedas.
- **Propuesta de una herramienta edición de entornos tridimensionales.** Se ha llevado a cabo el diseño y desarrollo de una herramienta de edición 3D que permite un modelado rápido de entornos de interior mediante el uso de modelos especialmente diseñados para un rápido despliegue. Dados los objetivos marcados inicialmente en el trabajo, esta herramienta ha sido capaz de definir problemas de accesibilidad y restricciones arquitectónicas siguiendo criterios específicos de desplazamiento.
- **Propuesta de una herramienta de simulación social basada en agentes para la integración de personas discapacitadas.** Se ha propuesto una herramienta de simulación centrada en el análisis de la accesibilidad de los entornos físicos a través de simulaciones. Su desarrollo ha sido posible gracias al uso de técnicas de ABSS, empleando conceptos organizacionales y el modelo BDI para modelar las interacciones entre los actores en un entorno tridimensional. Además, esta herramienta ha sido evaluada mediante su aplicación en un problema real, en una oficina de trabajo.
- **Propuesta de una arquitectura para el control de sillas motorizadas.** Basada en el desarrollo de un dispositivo hardware integrado en una silla de ruedas convencional y en el uso de un sistema multiagente que permite la distribución de tareas de forma dinámica en diferentes organizaciones virtuales de manera ágil y sencilla, facilitando

la recopilación y procesamiento de datos y la comunicación con los usuarios.

- **Investigación en interfaces de control para sillas de ruedas.** Con los que se ha podido probar el correcto funcionamiento de la plataforma para el control de sillas motorizadas. En esta investigación se han incorporado interfaces basadas en el uso de la voz del usuario, de un dispositivo móvil, y de un dispositivo de EEG.
- **Intercambio de conocimiento.** A lo largo del trabajo de investigación, se ha trabajado en la difusión del trabajo realizado, por un lado, a través de la publicación de varios artículos y, por otro lado, con la asistencia a conferencias, congresos y workshops, lo que ha permitido fomentar el intercambio de conocimiento con otros investigadores.

## 6.2. Trabajo futuro

Existe una multitud de posibles líneas de trabajo futuro relacionadas con el trabajo desarrollado. Algunas de las líneas abiertas se han mencionado a lo largo del trabajo. A continuación, se recogen las más relevantes.

En relación con la herramienta de simulación social basada en agentes para la integración de personas discapacitadas:

- Incluir la posibilidad de realizar una abstracción de los modelos de edificios a través de ontologías, de forma que la información del entorno no resida únicamente en el entorno tridimensional, permitiendo que la plataforma de agentes también disponga de este conocimiento.
- Permitir el desarrollo de diferentes entornos tridimensionales, no estando limitados únicamente a la representación de edificios.
- Mejorar el proceso de extracción de conocimiento relacionado con los algoritmos que intervienen en la detección de los problemas de accesibilidad, ofreciendo además un posible servicio de estadísticas en tiempo real y un servicio de generación de informes.
- Incorporar funcionalidad adicional a la herramienta de visualización para incluir alternativas a la hora de extraer información

acerca de los procesos simulados como, por ejemplo, grafos que muestren las relaciones entre agentes que interactúen entre sí, o la generación de mapas de calor que muestren cuáles son las rutas más habituales que toma cada trabajador en el entorno tridimensional.

- Llevar a cabo pruebas de estrés para comprobar cuáles son las limitaciones de la plataforma con relación a los procesos de comunicación y en lo relativo al tamaño de los modelos 3D. En este sentido, será posible estimar el tamaño máximo de agentes y las características del entorno 3D soportadas por la plataforma haciendo uso de diferentes infraestructuras hardware.

Con relación a la interfaz inteligente para el control de sillas de ruedas:

- Investigar en nuevos sistemas de detección de obstáculos que no se basen únicamente en evitar colisiones, sino que sea un elemento activo que intervenga en la modificación de la trayectoria de la silla. De esta manera se podrá mejorar la experiencia de los usuarios con cualquier interfaz de control incorporada en el sistema.
- Llevar a cabo una evaluación más exhaustiva con relación a los métodos de control desarrollados, aumentando el número de pruebas y usuarios.
- Validar la adecuación de los sistemas de control desarrollados con personas con diferentes discapacidades, de forma que se comprueben cuáles son las más apropiadas para cada caso.
- Realizar pruebas de integración del dispositivo hardware de control en otros modelos de sillas de ruedas para comprobar su interoperabilidad.



---

# CAPÍTULO VII

---

## Research overview



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA



## 7.1. Introduction

It is well known by all the problem that people with motor disabilities face to autonomously move in their daily lives. In the case of quadriplegic people who use wheelchairs, this problem is even more serious. According to the World Health Organization, around 10% of the world's population suffers some type of disability (either physical or mental), of which around 10% need a wheelchair to move (World Health Organization 2010). In Europe, according to a report published by the European Commission, the number of people with disabilities expands to 38 million (16% of the population), and by 2050 it is estimated that 30% of the population will be over 65 years (European Commission 2015), so disabilities derived from aging will increase significantly.

Fortunately, society is increasingly aware of the challenge of integrating disabled people, especially in the field of mobility. As a consequence of this collective consciousness, different initiatives arise from large organizations. One of the most relevant initiatives is the declaration by the United Nations (UN) of the *Standard Rules on the Equalization of Opportunities for Persons with Disabilities* (United Nations 1994), which helped to put this problem in the spotlight, leading the way to the creation of other new initiatives in the field of the integration of people with disabilities. We can find some examples in *European Disability Strategy 2010-2020: A Renewed Commitment to a Barrier-Free Europe* (European Commission 2010) within the European Union or the *Disability Integration Act of 2015* (E. Schumer and U.S. Congress 2015) in the United States.

Given that these groups face clear disadvantages to a greater or lesser extent, it is necessary to make all possible efforts to minimize these difficulties. Given this problem, this work seeks as a main objective to promote the integration of disabled people in the field of mobility. To do this, the adaptation of both the environment and the vehicles that serve as technical help for the displacement of these people is sought in this work.

On the one hand, social machines are a suitable computational model for this field of research, since they allow the development of computer mechanisms that facilitate the realization of social studies (F.-Y. Wang et al. 2007), as the development of systems that support the social behavior that

occurs between human beings and systems (Erickson and Kellogg 2000). In short, they allow the adequate combination of contributions from both human (experience) and computational systems (computational capacity) (Robertson and Giunchiglia 2013). In the framework of this work, a platform based on virtual organizations (VO) with the capacity to perform social simulations on the basis that provides a three-dimensional environment is proposed. The objective of this platform is to detect the possible accessibility problems that people can face in the environment through the use of simulations. The use of organizational MAS allows the implementation of social machines, facilitating the work of humans and machines for the achievement of common objectives. Likewise, it also allows the inclusion of advanced techniques and algorithms such as social simulation techniques and the modeling of human behavior. In the framework of the labor integration, simulations can help to discover in advance the problems that people with disabilities will face before these problems happen. In this way, environments can be adapted in a way that facilitates the performance of daily tasks.

On the other hand, people with serious functional limitations of the locomotor system need to use technological solutions (mainly wheelchairs) to be able to move autonomously. It is important to promote the mobility of this group, seeking the best possible adaptation of the use of a wheelchair to the greatest number of users with mobility problems, regardless of the degree of disability they have. Fortunately, a growing number of research projects in which different methods of wheelchair control are proposed are emerging in recent years. Despite of the interest of the scientific community in the area, there is not a platform that allows an easy integration of several control systems that make use of heterogeneous sensors and computationally demanding algorithms. Within this work, an architecture based on VO of agents that makes use of a flexible and scalable communication protocol that allows the deployment of embedded agents in computationally limited devices is proposed. To validate the correct functioning of the proposed system, it has been integrated into a conventional wheelchair. In addition, a set of control systems have been developed and integrated, including: a system based on a portable electroencephalography system, a voice interface or a smartphone application with multiple control systems.

The main objective of this research is to facilitate the integration of people with mobility problems using tools that favor their autonomy. With this purpose, it will be sought to improve the adequacy of physical spaces, by means of (i) reducing the architectural barriers that may exist and (ii) adapting wheelchair control interfaces to the needs of each case, so that its use is facilitated to as many people as possible.

The hypothesis that is defended in the framework of this research project is that *by using multi-agent systems and making use of adaptive organizations models that integrate intelligent control interfaces and Artificial Intelligence methods for the processing of information, it is possible to model, simulate and manage resources efficiently, facilitating the integration of disabled people in the performance of their daily tasks.*

## 7.2. Background

### 7.2.1. Wheelchair control

Since the advent of microprocessors, there have been significant improvements in the control interfaces for motorized wheelchairs (Fehr, Langbein, and Skaar 2000). A proof of this fact is the wide variety of options that are currently offered by wheelchair manufacturers. Within these control interfaces, two types are clearly differentiated: **proportional controls** and **non-proportional controls** (E.Dicianno, A.Cooper, and Coltellaro 2010).

**Proportional controls** are those that allow the simultaneous control of speed and direction. The most common proportional control interface is the *joystick*. Besides of the traditional joysticks, there is a wide variety of joysticks with specific characteristics, such as *sensitive joysticks*, which allow to perform high precision movements by using few physical strength or *sealed joysticks*, which are resistant to liquids, of small size and it is also necessary to use few physical strength. In addition to joysticks, some of the most widespread proportional control devices are the *touch pad*, a control based on touch, very similar to the one used in laptops or *tilt sensors*, with which users perform small movements to choose the direction where they want to move.

As for the **non-proportional controls**, they allow the user of the wheelchair to control only the direction of movement, not the speed. Parameters such as acceleration or speed of the wheelchair should be programmed in advance, since this type of controls act as mere switches. These controls usually present very low physical demands, but high cognitive demands. Some examples of non-proportional controls are *reinforced joysticks*, which have a resistant design suitable for people who do not control their movements sufficiently or *sensitive mini-joysticks*, small size and highly sensitive joysticks. Designed for those users who cannot control a joystick, there are alternatives such as *switch trays* and systems with a *single button*. For those users who do have mobility in the head, it is also common to use proximity sensors arranged in a headrest. Finally, one of the most used options for people whose mobility is very limited is the use of a pneumatic system, which allows the control of the wheelchair through the spiff and spuff.

Despite the wide variety of controls that are currently available on the market, the varied diversity of conditions that can affect wheelchair users -both physical and cognitive- makes that current control devices do not cover the needs of all of them. For this reason, the scientific community continues to focus on the investigation of new techniques that make it possible to adapt the use of motorized wheelchairs to as many people as possible. Within the current state of the art, some of the most relevant studies in this field focus on the following fields of application:

- **Voice control:** the great advance of the automatic speech recognition technologies during the last years has made this approach to be one of the most widespread methods in human-machine interaction systems. There are examples of its application in the field of medicine (Gundogdu, Bayrakdar, and Yucedag 2017), industry (Rogowski 2012) or home automation (Zhu et al. 2010). In the same line, there are several works in which the automatic speech recognition technology has been used for the control of motorized wheelchairs. The most common type of control by voice is based on the detection of different keywords that act as commands to perform a particular movement. We can find examples of this type of systems in (Škraba et al. 2015) and (Ruíz-Serrano et al. 2013). Another alternative to control a wheelchair by voice is presented in (Peixoto, Nik, and Charkhkar 2013). In this case, the

control is based on the buzzing performed by the user. The control of the wheelchair is carried out based on the variations in the fundamental frequency of the user's buzz, which is obtained through an accelerometer that measures the vibration of his vocal cords.

- **Artificial vision:** The use of artificial vision has been widely used in the field of assistive technologies, allowing to overcome certain limitations in different needs of users, such as mental functions, mobility problems, sensorial substitution or assistance services (M. Leo et al. 2017). Within this field, it has also been applied as a wheelchair control system. Its most widespread use is based on the detection of the user's eyes movement, and sometimes it is also combined with the eye blinking. The combined use of both parameters is used as a control method for wheelchairs, as we can see in works like (Gajwani and Chhabria 2010) or (Purwanto, Mardiyanto, and Arai 2009).
- **Deictic control:** in previous studies such as (Frédéric Leishman, Horn, and Bourhis 2010) and (Frederic Leishman et al. 2014), it is proposed to use a deictic approach to control an electric wheelchair. Using laser devices and a webcam, these systems are able to perceive the environment. Thus, the system allows the user to indicate the destination to which he wishes to go, so the wheelchair moves to that point autonomously.
- **Brain interface:** Electroencephalography (EEG) is a technique that allows the recording of the bioelectric activity of the brain by means of electrodes applied on the scalp. The use of this technique, combined with the use of algorithms that classify different patterns in the recorded signal, has also been used as a possible control system (Herweg et al. 2016) (Craig and Nguyen 2007).
- **Electromyographic signals:** analogous to the use of electroencephalographic techniques, electromyographic signals (those produced by the muscles during the contraction and relaxation processes) have also been studied as a suitable control system for wheelchairs. We find examples in (Yi, Xiaolin, and Yuan 2015), where a combined use of this technique is made with artificial vision techniques to detect gestures made with the head; in (Mishra et al. 2017), where an

electrooculogram system is used to measure the movement of the eyes; or in (Hashimoto, Takahashi, and Shimada 2009), where electrooculogram and electromyography techniques are combined to recognize different gestures of the user's head.

- **Autonomous navigation systems:** through the use of different situation awareness techniques, either through visual tracking (Lei and Li 2013), BLE beacons (Miyamoto et al. 2018) or others, it has been possible to develop systems that allow wheelchairs to autonomously move in indoor spaces. Within these systems, there are two main trends: the control of wheelchairs in a 100% autonomous way, without the intervention of the user, or the use of these techniques as driving assistance systems, such as for collision prevention (Yeounggwang, Hwang, and YiKim 2013) or semi-autonomous driving systems (Pasteau et al. 2016).

As it has been shown, due to the advances in the development of sensors and artificial intelligence techniques applied to the control of wheelchairs, the number of different control interfaces has significantly increased during last years. This fact makes that the traditional approaches of designing wheelchair interaction systems, conceptualized to be controlled by a single interface, are currently obsolete. Given this fact, it is expected that, as an alternative, similar solutions to those adopted in the field of robotics will come to light, where during the last years, many proposals that encapsulate solutions to the most recurrent problems in this field have arisen: Robotic Software Frameworks (RSFs). These frameworks propose integral solutions to build general purpose robotic systems through a set of tools, libraries and algorithms. RSFs speed up the development and deployment of software and hardware components in a simple way (Iñigo-Blasco et al. 2012). Several examples of RSFs can be found in the literature, such as Player 2 (Collett, MacDonald, and Gerkey 2005), Open Robot Control Software (OROCOS) (Bruyninckx 2001), Robotic Operating System (ROS) (Quigley et al. 2009), OpenRTM (Ando, Suehiro, and Kotoku 2008) or OpenRDK (Calisi et al. 2008). The main utilities that provide this type of frameworks are focused on the following areas: middleware for distributed robotics, introspection and management tools, advanced development tools, robot interfaces and drivers, robotics algorithms and simulation and modeling of the system (Iñigo-Blasco et al. 2012).

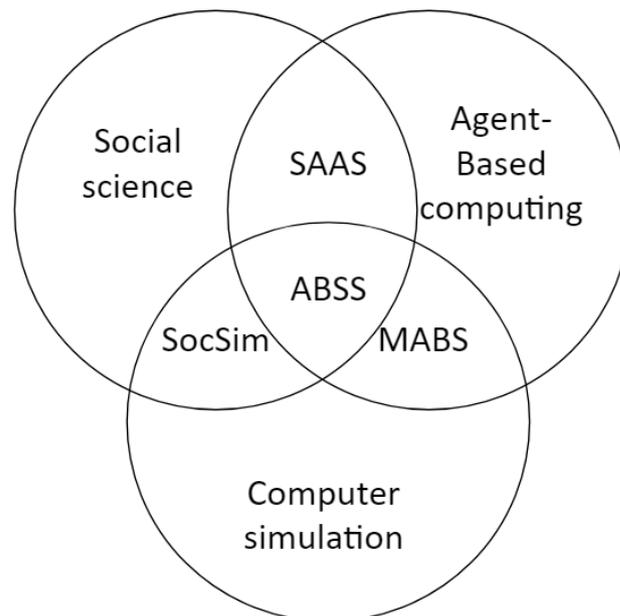
Within the field of robotics, the use of Multi Agent Systems (MAS) has also been widely applied to the definition and construction of robotic systems, giving rise to the research field of Multi Agent Robotic Systems (MARS) during the late 80s. Since then, MARS have been very popular to solve real-world problems that are better modeled by using a set of agents instead of a single agent (Cena et al. 2013), being favored by the intrinsic characteristics of MAS: heterogeneity, modularity, scalability, parallelism, flexibility and robustness against faults. This set of characteristics make MAS especially appropriate for the construction of complex systems (Merdan et al. 2011). Two are the central areas in which MARS have been used: (i) *multiple robot cooperative systems*, where a set of robots works together to solve complex tasks, such as collaborative search and rescue (Marconi et al. 2012), collective transportation (Rubenstein et al. 2013), construction (Ardiny, Witwicki, and Mondada 2015) or exploration and mapping (Saeedi et al. 2016) and (ii) *multi-agent control systems*, in which a group of agents cooperates to control a single robot in a distributed manner (Y. Wang and de Silva 2010). This approach is mainly used when the robot is composed of a large number of hardware and software components that require a modular architecture. In the same way as the RSFs, there are different platforms that allow creating and designing MAS in an agile way, such as JADE (Bellifemine, Poggi, and Rimassa 1999), MASON (Luke et al. 2004) or PANGEA (Zato et al. 2012).

### 7.2.2. Agent Based Social Simulation

Performing simulations of heterogeneous systems where a large number of elements intervene is a complex task, but it has found in the agent-based modeling a technique that facilitates its design and implementation. For this reason, agent-based modeling has been widely used to model different active objects, such as vehicles (Barthélemy and Carletti 2017; Hörl 2017), markets (Aliabadi, Kaya, and Sahin 2017; Immonen 2017), people (Kamara-Esteban et al. 2017), industrial units (Terán, Aguilar, and Cerrada 2017), animals (Anderson et al. 2017), health (Montagna and Omicini 2017), etc. The phenomenon to be simulated is composed by a set of sequences, events or tasks that may exist in the environment, which will be configurable through the simulation model. These tasks are interrelated, since in the end, they depend on the order or time in which the events occur. The complexity lies in the fact that

these models allow the simulation of changing and complex environments, so the use of open MAS is ideal, thus emerging the concept of ABSS (Davidsson 2000).

ABSS is a discipline that deals with the simulation of social phenomena by using multi-agent computational models. Therefore, ABSS is a combination of social sciences, agent-based computing and computational simulation. In recent times, other areas of study whose interests interact with each other have also emerged, as shown in Figure 1 (Davidsson 2002).



**Figure 1 Intersection of different areas within the ABSS**

The use of the theory of agents in the framework of simulations is especially indicated when it is necessary to capture the different tasks, elements, objects or people of complex and dynamic environments. This is because these can be implemented without needing to have a great knowledge about the global interdependencies. Another reason is the ease they offer when building them at the time of facing changes in the model, since generally it is only necessary to make local changes, not global (Borshchev and Filippov 2004). This paradigm is used in many disciplines; some examples can be found in the field of health (Venkatramanan et al. 2017), urbanism (Haman et al. 2017), economics (Han et

al. 2017), architecture (Wagner and Agrawal 2014), criminology (Devia and Webe 2013) or biology (De Almeida et al. 2010) among others.

ABSS has been applied with good results for the design of work methods (Rodriguez et al. 2011) or training of people with disabilities (Bajo et al. 2010). However, it has not yet been applied to the integration of people with disabilities in their working place. Though, considering the current state of the art, ABSS is suitable for modeling work environments where there are people with disabilities, since it allows modeling large and distributed problems where environments are open and dynamic. This type of approach to perform simulations, allows to experiment on a model, which if is good enough, will respond in a similar way to the studied system. This would allow to carry out different models of experiments on multiple occasions, permitting to test and evaluate the different configurations, besides of being able to include random components. Thanks to this, it is possible to analyze the simulation context from different perspectives, obtaining much more realistic results from the analysis.

There are different tools such as MASON (Luke et al. 2004), Repast (North et al. 2005), Pangea (Zato et al. 2012) or Swarm (Gilbert and Terna 2000) that allow the visualization of the interactions between the agents themselves, as well as with the environment. A review of these tools can be found in (Railsback, Lytinen, and Jackson 2006) or (Lytinen and Railsback 2012). These models and tools allow to model a wide variety of environments and tasks. In fact, they have even been applied in previous studies, obtaining good results (García et al. 2011). However, it is observed that all of them suffer from difficulties when it comes to modeling the physical environment that is intended to simulate, a characteristic that is especially relevant when modeling simulations oriented to the integration of people with disabilities, since a high percentage of the problems that are to be solved, are related to the structure of the buildings or accessibility barriers (steps, ramps, elevators, doors, corridors, services, etc.).

## 7.3. ABSS for the integration of disabled people

### 7.3.1. Introduction

ABSS, used in combination with three-dimensional representation, makes it possible to do near-reality modeling and visualizations of changing and complex environments. In this section, we describe the design and implementation of a tool that integrates these two techniques. The purpose of this tool is to assist in creating a work environment that is adapted to the needs of people with disabilities.

One of the objectives that was sought when developing this tool was to model different environments in a flexible and dynamic way. For this reason, the proposed system is based on a novel approach, which consists in the combined use of an VO-based SMA and a three-dimensional modeling and representation tool. The combination of both strategies is key for the simulations to be carried out since, on the one hand, agents can implement different tasks, objectives, purposes, etc., while the three-dimensional environment allows the physical modeling of different environments. In this way, this approach allows to carry out simulations in the environment, as well as the visualization of their results.

### 7.3.2. Proposal

Zambonelli et al. (Zambonelli, Jennings, and Wooldridge 2003) introduce the idea that MAS must accept the participation of agents of all types, regardless of architectures and languages. This statement goes to the extreme in the framework of social computing, where humans and machines work collaboratively. However, it is necessary to determine rules or social rules for agents, since a priori their behavior is not trustful. Thus, the idea of modeling systems through iterations has evolved to the point of being necessary to perform an organizational model, where artificial societies exist (Davidsson and Johansson 2006) in which humans and machines collaborate to achieve the common objectives of the society. Following this trend, it is necessary to define concepts of rules (Zambonelli 2001), norms and institutions (Esteva et al. 2001)

and social structures (Van Dyke Parunak and Odell 2001), which arise from the need to have a level of abstraction which explicitly defines the organization in which the agents they coexist.

The current trend towards computer developments in collaborative work environments and with distributed knowledge management, has generated interest in VO: a group of people and institutions that need to coordinate resources and services across different institutional boundaries (Foster, Kesselman, and Tuecke 2001). There is a clear analogy between human and agents' societies; we can define a human society as a foundation or social entity with a certain number of members that can be specified and where an internal differentiation of the functions that are performed by these members is done (Peiro, Prieto, and Zornoza 1993), on the other hand, an agent organization is a collection of roles, which maintain certain relationships among themselves, and that take part in patterns of interaction with other roles in an institutionalized and systematic way (Zambonelli, Jennings, and Wooldridge 2003).

Thanks to these capabilities provided by the VO of agents, it is possible to model social machines, creating artificial societies of humans and machines that share tasks, objectives and norms. Human and artificial agents in a MAS try to cooperatively carry out tasks in the environment of the system to which they belong. The tasks that can be performed within the system will be established by the knowledge and skills of the agents and the restrictions imposed by the environment.

In this context, agents will represent the different elements and processes that are developed. Thanks to them, it will be possible to model the different tasks attending to the role they have, as well as the different specific characteristics that they may have. Agents' roles and characteristics will influence the way they carry out those tasks. The final goal of the system is to minimize the tasks that cannot be done in order to maximize compliance with the individual objectives of each agent, which will achieve the overall objectives of the entire system as a whole.

One of the objectives that was sought at the time of developing this tool was to model the different environments in a flexible and dynamic way. For this reason, the proposed system is based on a novel approach, consisting on the use

of MAS based on VO and a three-dimensional representation environment. The combination of both strategies is key for the purpose of the simulations to be carried out since on the one hand, the agents can implement different tasks, objectives, purposes, etc.; while the three-dimensional environment allows the physical modeling of work environments. Thus, this approach allows simulations to be carried out on the work environment itself, as well as the visualization of the results of the simulations.

In the following subsections, the proposed architecture is described in detail: in section 7.3.2.1 the components of the proposed architecture are described, section 7.3.2.2 describes the implementation of the organizational model and what the structure of the agents that intervene in the simulations is like and finally, section 7.3.2.3 describes how the communication between the agent platform and the three-dimensional visualization tool takes place.

### *7.3.2.1. Components of the proposed architecture*

The general architecture of the system is made up of two large blocks: a MAS and a tool for designing and visualizing three-dimensional environments. On the one hand, the MAS is composed of a set of intelligent agents that allow to perform the simulation of the desired model. For the implementation of this component, the JADE platform (Bellifemine, Poggi, and Rimassa 1999) has been used, as it will be detailed later. The proposal is oriented towards the modeling of the MAS as a VO of agents. The system must be able to define a structure, roles and a set of rules that regulate the interactions between agents. To do this, a higher-level layer to JADE, responsible for managing the MAS, is included in the system. Through this, it has been possible to provide the system with a set of additional functionalities that maximize the capabilities of the platform, allowing a better interactivity and configuration on the part of human experts. These functionalities are detailed below:

- Ability to use **virtual organizations of agents**, which allow agents to adopt different topologies, such as hierarchies, oligarchies, groups, congregations, etc. (V. Dignum 2009). VO will allow the artificial representation of human societies in work environments. Thus, the structure of the MAS in each simulation may vary, generating specific components depending on the environment to be modeled. Attending to

the simulation that it is intended to be performed, it will be necessary that the MAS would be able to adopt one of these topologies, so different types of agents must co-exist. JADE does not support the management of VO, so it has been necessary to introduce additional functionality with which to perform this task. To support this functionality, a database has been incorporated into the system in which the topology of the agents present in the system will be stored, making it possible to reuse it in the future.

- The tasks that the agents can carry out within the artificial societies that are generated within the framework of the simulations can vary, so that the objectives of the agents can be the same, but the decision-making process to carry them out may differ depending on the kind of disability. In this way, agents with advanced capabilities have been developed for **planning the distribution of tasks** according to the needs and configuration of the organizational structure. The user of the platform will be responsible (through a series of functionalities implemented in the visualization tool) to model the different agents that act in representation of the elements that they want to model, thus allowing human-artificial collaborative work. For example, when defining an organization with a hierarchical structure, two kinds of agents will exist. The agents in charge of the decision-making will be located in the higher level of the hierarchy -determining which tasks need to be carried out and who should carry them out- and the agents that have a more basic functionality – those in charge of carrying out the designated tasks- will be placed in the lower layers.

- **Communication with the 3D environment**, so that all the changes occurred can be reported between the agent platform and the three-dimensional environment in a bidirectional way.

Figure 2 shows in detail the different components present in the MAS, as well as the relationships between them.

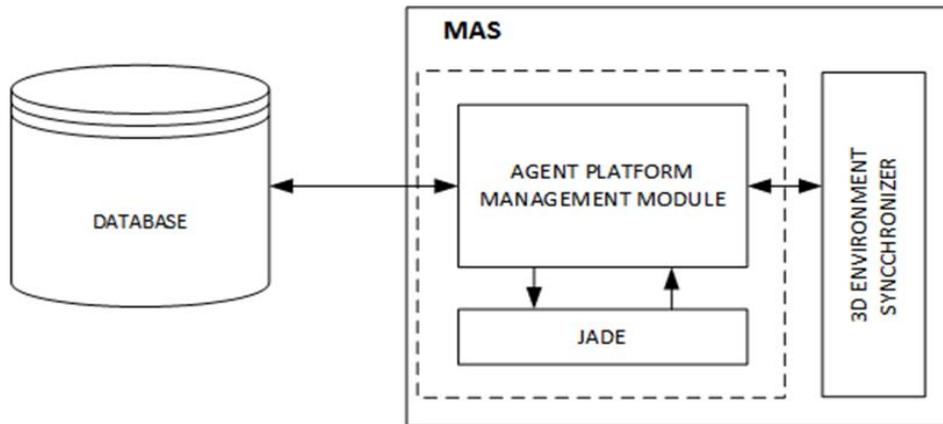


Figure 2 MAS Components

Finally, the **3D environment** that allows real information representation collected from the simulated environment is composed of an editor and a viewer. An organization is surrounded by an environment that is constantly changing. In this case the model of the environment will be determined by the design phase of the building in which the simulation is developed. This process will be carried out through a tool based on Unity 3D (“Unity Official Web Page” 2017).

The **3D editing environment** (Figure 3) allows the modeling of virtual environments for urban areas (buildings, flats, apartments, gardens, parks, etc.) in three dimensions with a high level of realism and quality. This tool is able to generate 3D virtual environments in scale and define elements such as floors or walls. It also includes a set of default furniture models that can help to reduce the virtual environment modeling time. This editor uses different services from a *Cloud Computing* platform (la Prieta et al. 2015) where the designed models of the buildings will be stored and retrieved. The models of the different buildings are encoded in a specific format, with the purpose of remotely storing the definition of the building in the *Cloud Computing* platform, from which the scenarios that are part of the simulations will be imported and exported, thereby providing a high availability of information to the platform.



Figure 3 3D edition environment

The **3D viewer** supports the representation and rendering of the environment and the features that were previously built with the 3D editor. It is also responsible for showing the different agents that are part of the system, making it possible to visualize the performance of the different activities of each agent. One of the main problems that must be faced in 3D scenes is to move one model from one point to another, so it is necessary to use an algorithm that calculates the route. In this case CritterAI (“CritterAI Documentation” 2017) was used. It is a navigation system for Unity, which offers functionality related to the generation of navigation meshes, road search and movement management. This tool provides different options of the route calculation algorithm that can be used: Dijkstra and A \*. These algorithms are used to calculate the lowest cost path between an origin and a destination node. The nodes on which these algorithms will search for the minimum cost path will be the ones generated in the navigation mesh.

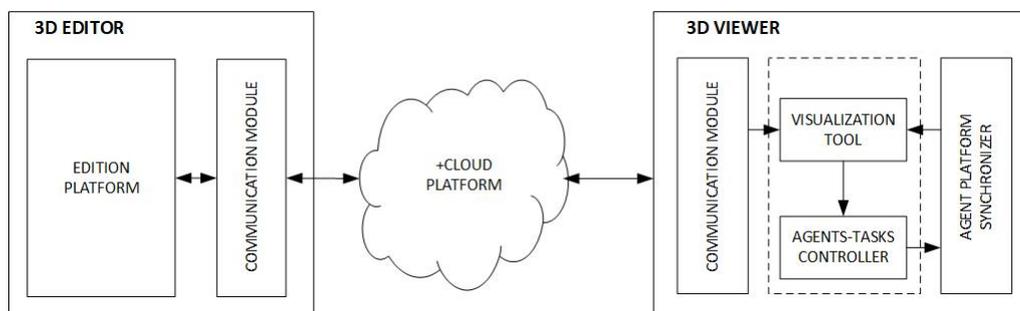


Figure 4 3D environment modules

It has been necessary to add synchronization mechanisms between the 3D viewer and the agent platform, so that there is a correspondence between what happens on the agent platform and what is displayed in this tool. In addition, this platform is the main way of interaction between humans and machines, allowing experts in HR to modify the simulations based on their objectives. The operations that can be carried out are the creation and elimination of agents and assignment of tasks. As discussed in the previous chapter, all the operations requested from the 3D environment will be communicated to the agent platform, which will attend these requests and confirm or not its completion in order to update the visualization status accordingly. Figure 4 shows the set of modules that make up the 3D editing environment and 3D viewer, previously explained.

### *7.3.2.2. Implementation of the organizational model*

The JADE platform (Bellifemine, Poggi, and Rimassa 1999), has been taken as the basis for the implementation of the MAS, adapting it to support the management of VO. Thus, for the management of the existing agents in the VO, a specially designed database is used, which allows to store the agents' characteristics: the roles which have been assigned to them, the services they offer, as well as additional features that may be presented by the agents.

The control of the information stored in the database, and therefore of the organizational models used in each simulation, is encapsulated in a JADE agent called the Database Agent (DBA). This agent offers a set of services that facilitate all kinds of access to the database, preventing inappropriate access by agents who should not be able to consult or modify the content of the database. Among the services offered by this agent, it allows to add agents, roles, services, etc., as well as query, modify or delete information. To access the different services, a module to check permissions is implemented, making the services accessible only to the agents that are specified.

Next, the structure of the database that will be used to store the structure of the VO is shown in Figure 5. Through a relational model, it is possible to define the different roles associated with the agents, as well as the tasks that can be carried out by an agent with a specific role. Additionally, three specific tables

have been incorporated for the case study in which the proposed model will be evaluated, thus being able to define which agents intervene in each project, if they present some type of disability and associate roles with the different departments of a company.

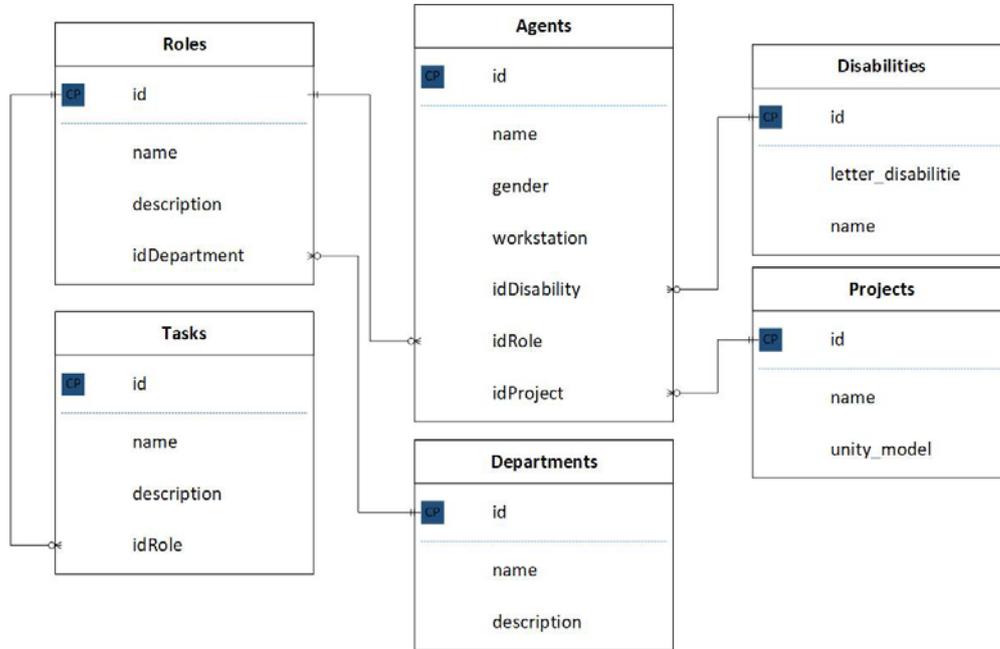


Figure 5 Virtual Organization database schema

Figure 6 shows in detail the structure of each of the agents, which will consist of three large blocks: (i) a communication module, which will allow the agent to communicate with the other agents of the platform; (ii) a reasoning module, which is detailed below; and (iii) an agent communication module with the 3D environment, formed by a sensor and an effector.

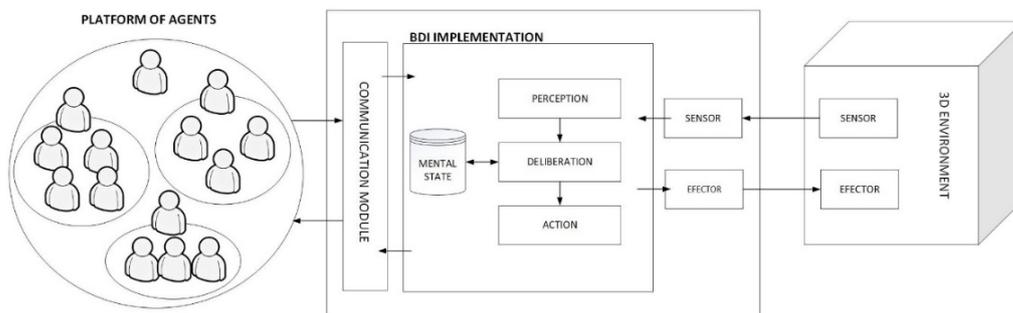


Figure 6 Agent structure

For the definition and implementation of the reasoning module of agents within the platform, the BDI model (Rao, Georgeff, and others 1995) has been selected. The behavior of the system is therefore determined by the mental attitudes of the agents. For this reason, it is fundamental to achieve a correct operation of the system when the deliberation processes are limited by the resources.

In each iteration, the interpreter first reads an event queue and generates a list of options (possible goals to be achieved). Then it selects the best of these actions and adds them to the structure of intentions. If there is any intention to perform an atomic action, the agent executes it. Events that may occur during the interpreter's execution cycle are added to the queue. Finally, the agent modifies the structures of intentions and desires by eliminating both the intentions and desires that have been successfully carried out and those that are not possible. With this model, deliberative systems are more appropriate for dynamic environments and are also more suitable for applications that work in real time. In this way, this model perfectly suits to the requirements of the platform that is presented.

In addition to the reasoning module, it is necessary to introduce two additional modules that allow the agent to obtain information about the environment (**sensor**), as well as to be able to modify it (**effector**). It is necessary that these modules are distributed, having one component present in the agent's own implementation within the agent platform, and another component within the 3D environment. In this way, the agent is able to be aware of the state of the three-dimensional environment that has been rendered for the simulation in progress, monitoring the changes that are produced in the virtual world.

The agent model presented above is designed to represent different actors involved in the simulation in representation of elements such as human beings, or similar. However, it is also necessary to introduce another type of agents: **environment agents**. These will represent elements of the environment with which the other agents can interact directly. Examples of these agents can be telephones, elevators, photocopiers, etc. These agents are not aware of the environment around them, they will only be aware of their internal state, so they will lack of sensors. Any interaction with other agents

cannot be initiated by an environment agent. When an agent requests an interaction with them, it will consult their internal state, and will communicate the pertinent information to the agent who finally, will determine according to this information if they can carry out the action that has previously been assigned to them.

The communication between agents is important in order to achieve the objectives of the system, where the objectives of the individual agents coexist. There is a set of stages in which the need for the existence of communication between agents is obvious. For example, when defining the problem to be solved, as well as its decomposition and distribution among the agents that make up the system. To carry out the communication between the agents, they are equipped with a FIPA ACL **communication module**. Thanks to the use of JADE it has not been necessary to redefine additional functionality, since this platform facilitates a complete implementation of these interaction protocols between agents.

### *7.3.2.3. Communication of the agent platform with the visualization tool*

One of the essential tasks within the platform is to establish a communication between JADE and the 3D environment, so that there is a real correspondence between what happens in the agent platform and the visualization that will take place on the 3D platform. Within the agent platform, there will be an agent in charge of managing communications in the JADE side.

For this purpose, the communication between the agent platform and the 3D environment is done through TCP sockets. In the Unity side, a module dedicated to the management of the requests made by the agent platform and vice versa is included. The tasks of creation, elimination and interaction between agents executed on the platform must be updated in the 3D environment, and the tasks of creation, elimination and interaction between agents executed from the 3D interface, must be carried out first in the agent platform for being later updated in Unity. For the implementation of the communication module hosted in Unity, IKVM.NET is used. It allows the execution of compiled Java code in MICROSOFT.NET. The communication will be divided into 2 blocks:

1. Sockets dedicated to carrying out the tasks in JADE and their corresponding update in Unity.
2. Sockets dedicated to the performance of the tasks initialized from the Unity interface, which must be done first in JADE and then updated in Unity.

For the simulation of tasks in JADE that will be updated later in Unity, three elements are used: two sockets, one for sending tasks and another for the confirmation of the performed tasks, and a table with which will keep a record of these tasks (Figure 7).

- **UnityTasks**, stores tasks that have not yet been updated.
- **JadeProducer**, it allows to send tasks to Unity through a TCP socket. In Unity, there will be a resource (**UnityConsumer**) which is listening to the requests that are being produced.
- **JadeConsumer**, opens a TCP socket to receive information regarding the performed tasks. In Unity, **UnityProducer** is in charge of sending the the confirmation of the performed tasks.

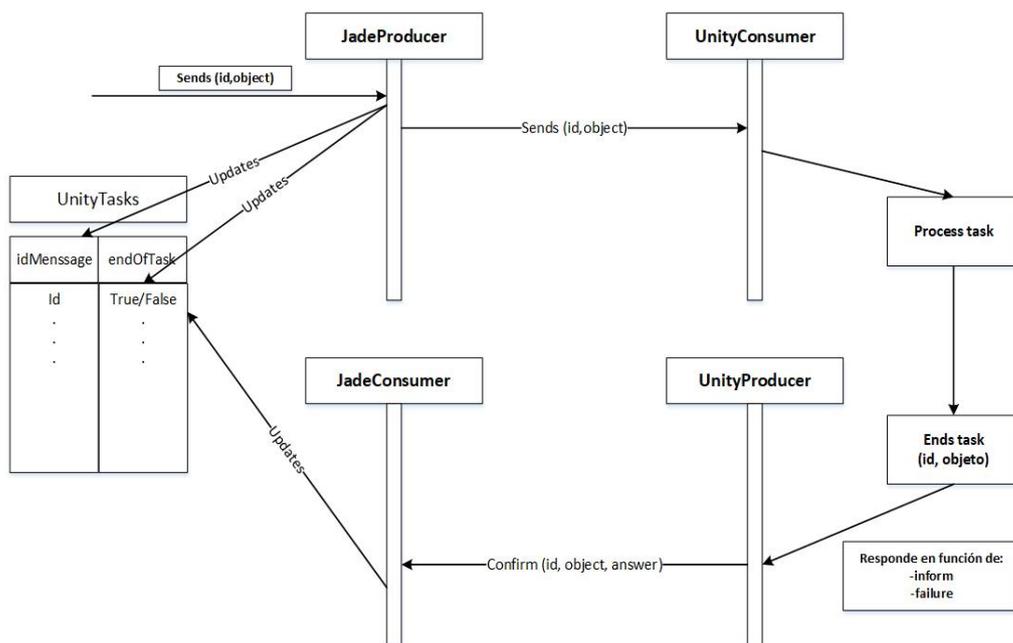


Figure 7 JADE-Unity communication

Regarding the tasks that are performed in Unity and later updated in JADE, UnityTasks resides on the Unity side, since it is in charge of making requests and must verify that everything that is done in JADE is updated later in Unity. Figure 8 shows the scheme that follows this communication, where a TCP socket will be used. JADE is the server which will listen to the requests performed from Unity. Each request in Unity is a new client that requests a connection to the server, so throughout the execution several clients can coexist. The requests made from Unity can be of three different types: creation of agents, elimination of agents or assignment of tasks to agents.

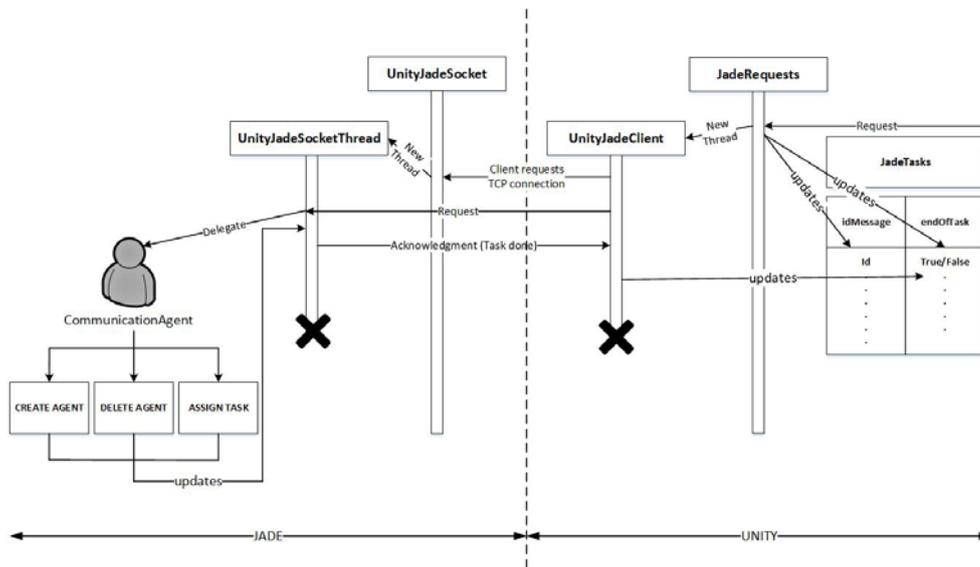
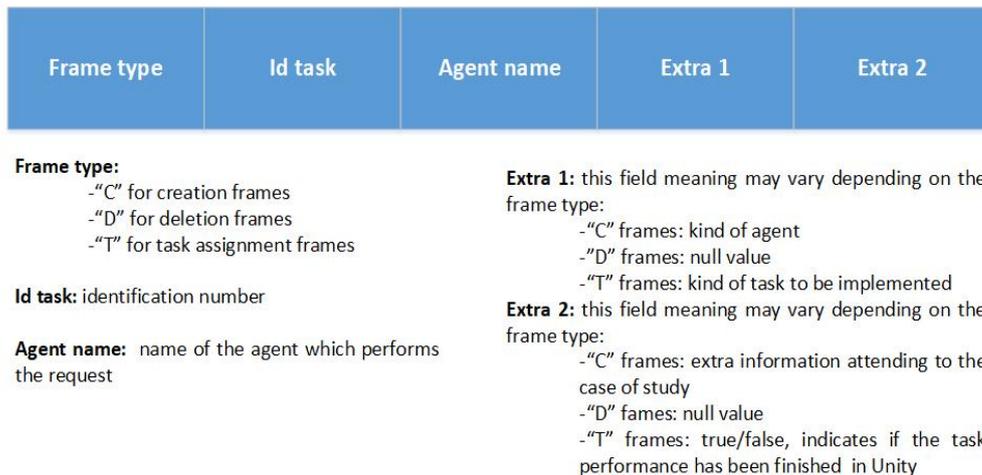


Figure 8 Unity-JADE communication

The **Communication Agent (CA)** is in charge of attending the requests that arrive from Unity, carrying out the tasks that correspond according to the frame exchanged. The frame that is sent in each request contains the components shown in Figure 9.



**Figure 9 Communication frame**

### 7.3.3. Case study

A case study used to evaluate and validate the proposed system is presented in this section. The scope of the case study is the analysis of the accessibility of the different jobs in a real company: the offices of Indra Sistemas S.A. in Salamanca. By this way, through the performance of a set of simulations, knowledge about the different problems that disabled workers of the company may encounter can be extracted.

For the performance of the simulations, it will be necessary to define the characteristics of the VO, in such a way that it would be able to modeling the processes carried out in the company as closely as possible to reality (Corchado et al. 2003). To do this, the different roles that agents can acquire, the services necessary for the proper functioning of the organization, the rules that will govern the society and the agents' own messages and iterations must be defined.

In addition, the environment in which the simulation will be carried out must be defined, in this case the building of the company under study. For this purpose, the 3D editing tool mentioned above was used. The 3D editing process begins from the plans of the building, so the environment in which the simulation takes place is as similar as possible to the real world. Furthermore, the disposition of the furniture inside the building must also be defined in order to evaluate, for each job, if each of the working places are accessible for people with different types of disabilities.

Afterwards, a series of simulations that show the behavior of the organization in different situations can be carried out, finally getting into the validation of the proposed model. First, we define the interaction model, analyzing the needs of the users who use the system and the way in which the exchange of information takes place. We define the following roles:

- **User:** represents the user or customer of the system. In this context, the user may be responsible for defining the distribution of the different elements in the building. Users can be the human resources responsible for assigning jobs to employees or the architect in charge of designing the building in which the professional activity will be carried out, in order to obtain information about the accessibility of the environment. User:
  - Is responsible for initiating the simulation process.
  - Will model the different agents that act as actors representing the workers of the company, as well as the tasks they will perform during the simulation.
  - Can access to the information that is generated after the processes that are simulated.
  
- **Manager:** this agent is responsible for carrying out the task planning that will be carried out by the whole organization. It may be present or not in the system, depending on the organizational structure of the company to be represented. Manager:
  - Generates the tasks that represent the objectives to be fulfilled by the whole organization.
  - Delegates the task distribution to the different area managers according to the nature of each task.
  
- **Department/Area managers:** these agents are in charge of planning the distribution of tasks assigned to the department or area that manages. Department managers:
  - Receive the tasks from the manager.

- Plan the task distribution among the agents that make up the department based on their availability (agents with a lower number of tasks will have a higher priority) and capacities (not all agents offer the same services).
- **Workers:** agents who represent each of the workers involved in the simulation.
  - The agents will have a stack where they store all the tasks they must perform, which have been previously assigned by the area manager.
  - They will send information regarding the degree of success with which they have carried out each of them.
  - All these agents have a set of elements that define their common behaviors and cognitive abilities. In addition to these common characteristics, the agents will have their own characteristics, defined according to their role within the organization and their disability.
  - The assigned roles will determine the tasks they can perform and the specific behaviors for each one of them, so different executions can be modeled for the same task according to the type of disability of the worker.
- **Environment agents:** these agents represent those elements of the building with which the worker agents can interact directly. Some examples of this type of agents can be found in different elements of the environment such as telephones, elevators or photocopiers.
  - These agents are not aware of the environment around them, they are only aware of their internal state.
  - Any interaction with other agents will be initiated in any case by a worker agent.
  - When an agent requests its use, it will consult its internal status, checking if it is free and if it has the necessary resources so that the requested task can be carried out. It

will communicate this information to the working agent, determining if it can complete the requested task.

- **Database Agent:** this agent offers a set of services that facilitate all forms of access that are held on the data base that stores the information regarding the structure of the VO. Database Agent:
  - Will take care of inadequate accesses by agents that should not be able to query or modify the contents of the database. These services will allow adding agents, roles, services, etc. to the database, as well as query, modify or delete information.
  - Includes a small module which is in charge of checking permissions, making the services accessible only to the specified agents.
  
- **Human resources agent:** The proposed VO can be classified within the so-called semi-open societies, since it will have a mechanism to control the admission of agents. In this way, it is necessary to make a request to evaluate the inclusion or not of an agent into the society. The human resources agent is in charge of carrying out this task. The human resources agent:
  - Evaluates the candidatures of those agents which request access to the organization, approving the different proposals based on the vacancies that exist in the department to which the agent intends to access.
  - The number of spaces in each department will be established by the working places that are defined in the work environment. Each of the working places will be associated with a single department and an agent if they are occupied.
  
- **Communication agent:** it is responsible for communicating the MAS with the visualization tool, in order to facilitate the message-passing between the two modules of the architecture.

- It guarantees that there is a real correspondence between what happens in the agent platform and the visualization that takes place in the 3D viewer.
- **Supervising agent:** analyzes the different behaviors and evolutions of the agents involved in the simulation to carry out an analysis of the processes that take place in the organization.
  - It will communicate with the other agents after the completion of a task, collecting whether they could carry it out or not.
  - If a task has been carried out satisfactorily, it will be communicated which task was performed, which agent intervened, and the time and resources that have been used to carry it out. Otherwise, the agent involved shall indicate to the supervising agent the reasons why it could not be carried out.

Within the processes that are carried out in the company under study, three departments have been identified, according to the tasks that workers can perform: reception, administration and maintenance. The worker-type agents will have associated a series of tasks that they can carry out depending on the department to which they belong. We define the following tasks as well as possible additional environmental agents that may be necessary for each of them (Table 1).

<b>Task type</b>	<b>Department</b>	<b>Environment agents</b>
Make photocopies	Reception, Administration, Maintenance	Photocopier
Go to the bathroom	ALL	Toilet
Fire alarm	ALL	Siren
Answer Telephone	Reception, Administration	Telephone
Carry letters	Reception	-
Drink coffee	ALL	Coffee maker
Eat	ALL	Microwave
Throw Trash	Maintenance	Trash can
Collect documentation	Reception, Administration	-
PC	Reception, Administration	-
Check elevator	Maintenance	Elevator
Watering plants	Maintenance	-
Sweep	Maintenance	-
Collect garbage	Maintenance	Trash can, container

**Table 1 Relations between tasks, departments and environment agents**

Once the building model and the interaction model have been defined, we can proceed to perform the simulation. To do this, the visualization tool must be deployed, which at the beginning of the process, has to perform different operations: (i) loading the building model, (ii) generating the navigation mesh, (iii) synchronizing with the agent platform. Figure 10 shows a screenshot of the simulation tool.



**Figure 10 Simulation tool**

The execution of the simulation will depend on the set of tasks that the MAS has to perform, which may be specified by the user, or generated by the management agent, as well as the process of the tasks assignment. Overall, the simulation will be defined by the definition of:

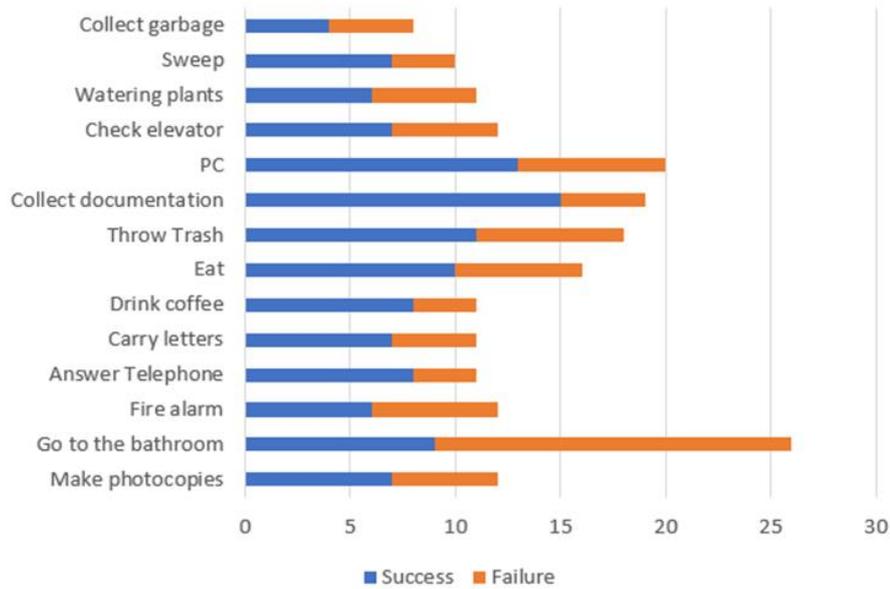
- The set of agents responsible for each department:  $R = \{R_0, \dots, R_i\}$
- The set of worker agents:  $A = \{A_0, \dots, A_j\}$
- The set of tasks to be performed by the worker agents:  $T = \{T_0, \dots, T_k\}$
- The type of resources :  $l \in \{1, \dots, L\}$
- The set of resources (environment agents):  $E = \{E_0, \dots, E_m\}$
- The amount of available resources of n type at a certain t time:  $L_{n,t}$

The result space after the performance of a certain task by a worker agent has only two possible output states (success and failure):  $O \in \{0,1\}$ , where 1 represents the success of the performance of a task, and 0 represents its failure.

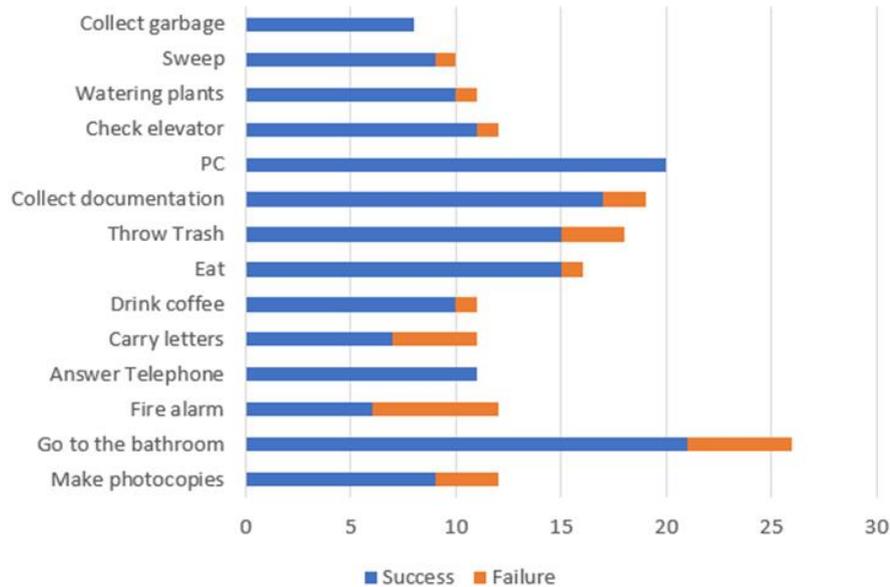
First, a simulation of 15 minutes is planned, for a total of 8 agents -1 receptionist, 2 maintenances and 5 administrative. Three of them have reduced mobility problems, three are visually impaired and one is deaf. After the simulation, the tool generates a detailed report with the accessibility problems that the avatars have encountered, which have impeded the achievement of the tasks assigned to them. 118 were successful and 79 failed (Figure 11 (A)).

Some of the deficiencies that were found by the platform are: (i) the lack of adapted bathrooms in the building; (ii) working places not adapted for people with visual or hearing disabilities: impossibility to perform tasks such as answering the telephone or being aware that the fire alarm is active; (iii) lack of ramps that enable the access to higher floors as an alternative to the elevator, which in case of breakdown would obstruct the access or exit to the building; (iv) limited access to certain work stations -spaces not large enough for accessing with wheelchairs- or (v) not accessible furniture elements -file cabinets, photocopiers-.

After the detection of these accessibility problems, a redistribution of the elements of the furniture susceptible to improvement was made, as well as the relocation of the work places of those users of wheelchairs, or the adaptation of the work places for users with auditory and visual deficiencies. After doing this, a new simulation with the same agents and task-assignment was made, obtaining as a result a total of 169 tasks performed satisfactorily and 28 failed (Figure 11 (B)), going through a reduction of 40.1% of failed tasks in the initial simulation to 14.2% in the second simulation. Obviously, there are elements of the environment that will continue to limit their accessibility, such as the lack of access ramps or adapted toilets, but the possibility of improving the accessibility of the environment through the restructuring of employees' working places or furniture in the critical points detected through the simulation.



(A)



(B)

Figure 11 Successful and failed tasks after simulations. (A) results after first simulation; (B) results after second simulation.

### 7.3.4. Conclusions

Once the simulation platform has been presented and evaluated, it can be affirmed that it allows the performance of simulations oriented to the labor integration of disabled people, allowing not only to analyze the tasks that are

carried out in a work environment, but also the physical spaces where these tasks take place.

From an academic point of view, it has been possible to model a real organization through a VO of agents with self-adaptive capacities. This system has been implemented using JADE, but adapting this platform to specific needs. In the same way, a 3D environment has been created, and it is capable of modeling and enabling simulations in work environments. In the same way, a system that allows communication between both platforms, which allows sharing relevant information about communications, has been developed. In short, the implementation of the platform allows to simulate different processes in a work environment, in order to establish the accessibility problems that may occur in it. In this sense, the representation of the employees working activity is performed, such and as presented in the case study.

## 7.4. Intelligent Interface for Wheelchair Movement Control

### 7.4.1. Introduction

The use of technological solutions in the health field has significantly helped to improve our quality of life. The field of mobility has also been continuously improving, mainly since the appearance of the first motorized electric wheelchair developed by George Klein at the National Research Council (NRC) in the 1950s (Bonarini et al. 2013). From this initial model, numerous improvements have been incorporated (Quaglia and Nisi 2017), helping to decrease the dependence of people with motor disabilities. Despite these improvements, the wide variety of motor problems and degrees of disability that affect wheelchair users makes traditional wheelchair control devices unsuitable for all of them. However, great advances are being made in the application of AI techniques for the control of motorized wheelchairs, adapting the control systems to different disabilities. The growing number of wheelchair control alternatives that use these types of techniques, which normally need to support the sensor data acquisition process, makes it necessary to increase the computational load of the systems. This fact makes it vital to investigate in platforms that favor the rapid integration of different control systems in

different wheelchair hardware platforms, so that they can be adapted to the specific needs of each case.

Faced with this initial motivation, this work presents a virtual organization-based platform that enables the control of a conventional motorized wheelchair through a set of external interfaces. For the successful achievement of this work, a hardware interface has been designed, which acts as a bridge between the physical layer and a set of applications that have been developed for end users.

## 7.4.2. Proposal

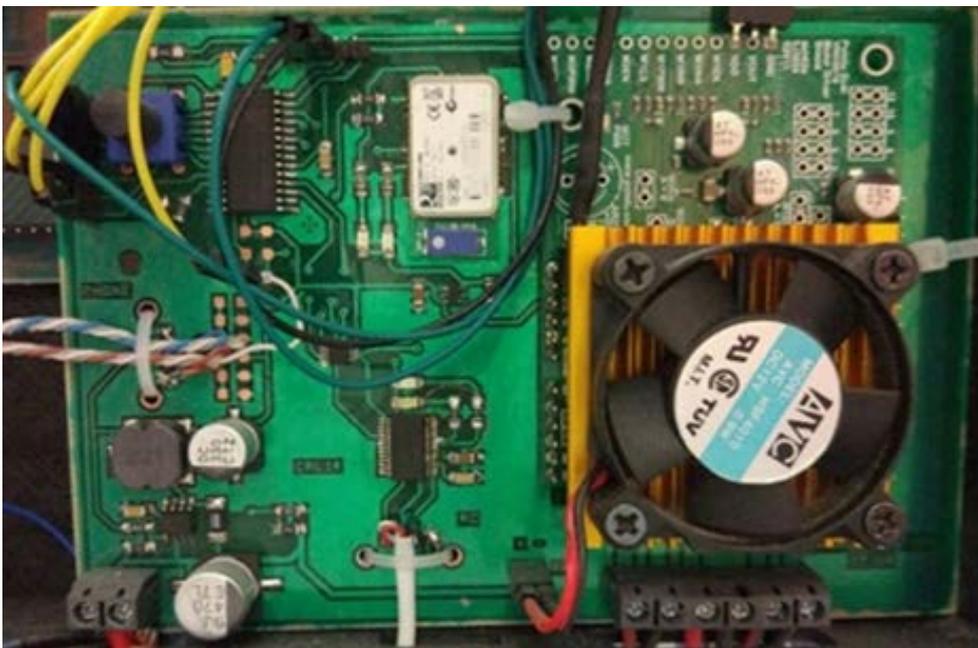
In this section, the proposed system is detailed. It consists of the construction of a hardware device that allows controlling any type of wheelchair regardless of the manufacturer. To validate the correct functioning of the system, different control techniques have been designed and implemented. Furthermore, the first functional prototype has been integrated into a conventional electric wheelchair (Quickie S-646 model).

### 7.4.2.1. *Hardware control device*

Currently, the different existing alternatives for the control of wheelchairs are based on a single model or brand. For this reason, when the different institutions carry out new studies and designs of wheelchair control mechanisms, they are forced to carry out costly processes of adapting the control mechanism (J. Wang, Chen, and Liao 2013), resorting to the construction of prototypes that emulate wheelchairs or real situations (Berjón et al. 2012)(Kumar, Kumar, and others 2015), or even to make use of virtual simulators (Leeb et al. 2007)(Galán et al. 2008). Under no circumstances (as for instance happens in the automobile sector with the CAN bus) efforts are being made to create a standard communication protocol that allows controlling all the wheelchairs on the market from different peripherals with a universal protocol.

Given this situation, the need to build a hardware device that allows to control any type of wheelchair regardless the manufacturer has been raised. The main objective is that people with different disabilities can control by themselves any kind of wheelchair using different control interfaces in a simple

manner. In this way, they will be able to perform movements that they would not be able to perform with conventional wheelchairs, gaining independence and allowing caregivers or family members to have a noticeable reduction of their workload. On the other hand, promoting the use of standards in the control of motorized wheelchairs, will make easier the work in the alternative control interfaces field of research. This will prevent the adaptation of existing wheelchairs or the construction of specific wheelchairs for the work to be developed by researchers. This will allow them to focus on the development of new technologies which aim to improve the social integration of disabled people in the field of mobility.



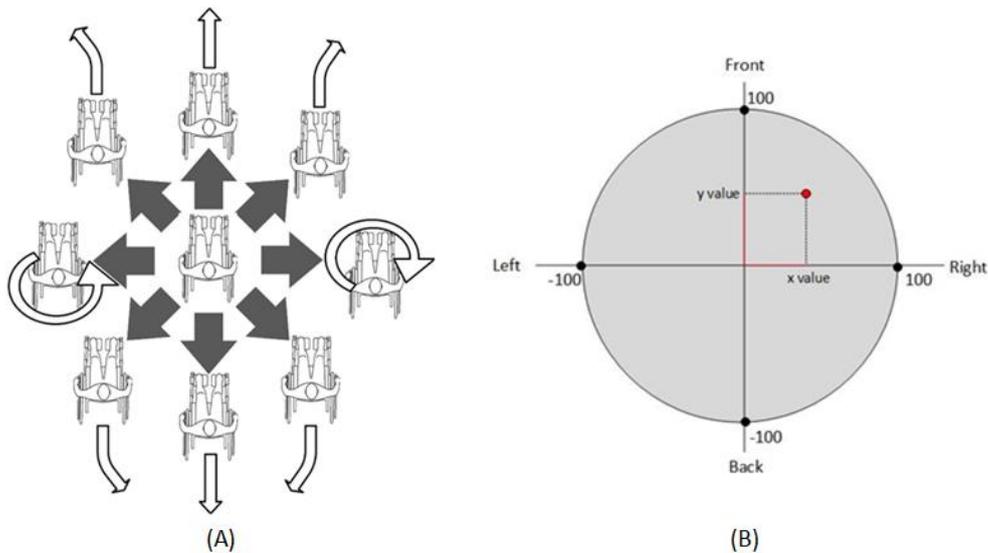
**Figure 12 Printed circuit board**

As a central part of the system, responsible for the management of the wheelchair motors control, it has been necessary to develop a printed circuit board that allows communication between control devices (Figure 12). The main component of this board, which is in charge of the control of the system, is a Microchip 18F2550 microcontroller. It is responsible, among other functions, for communicating the orders sent by the user through the control interfaces to the wheelchair motors. For this process, it has been necessary to incorporate drivers on the board to control the delivery of power to the motors. Pololu Dual VNH5019 drivers have been chosen with this purpose.

To offer a wide alternative when choosing the control device for the wheelchair to be used, we have opted for the incorporation of two communication interfaces: a wired one, through a USB connection, and a wireless one, via Bluetooth technology, which is supported by the use of a Microchip RN-41 chip. The main reason to incorporate a wireless communication method is to offer the possibility of controlling the wheelchair remotely. This functionality is specially designed to enable different control systems for situations in which the user of the wheelchair is assisted by another person, such as family members, nursing home staff, or airport personnel.

As it has been proven in the study of the current state of the art regarding wheelchair control devices, there are two types of control in the industry which are clearly differentiated and widely used: proportional controls and non-proportional controls. In order to be able to support both types of control, in the communication protocol between the developed board and the control devices, commands that allow the use of both alternatives have been incorporated. In this way, to perform a non-proportional control, a total of nine commands have been included, corresponding to the movements of: front, back, left, right, four diagonal movements and stop.

Figure 13(A) shows the correspondence between the different non-proportional commands and what is the direction of movement that occurs in the chair. Since through this type of control it is not possible to regulate the speed of movement of the chair, an additional command which allows to configure the power applied by the motors has been included. It is therefore possible to apply five different power levels, being level 1 the one of lower power and 5 level with the highest power.



**Figure 13 (A) Behavior of the chair by non-proportional commands (B) Range of values for chair control**

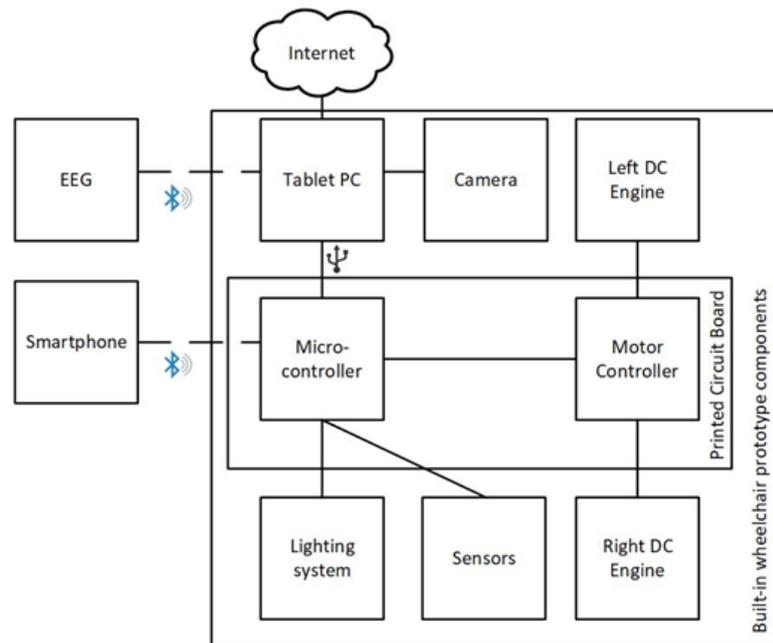
Regarding the proportional controls, the design has been inspired by the operation of the most common proportional control: the joystick. In order to emulate its operation, the control devices will be able to send commands to the developed board whose content implies not only a directional component of the movement to be carried out, but also relative to its speed. With that purpose, these commands are composed of two values that represent the displacement in the X and Y axes, for which the value 0,0 corresponds to the central position of the joystick (chair stopped). The admitted values for the axes are defined according to:

$$x^2 + y^2 \leq 100^2$$

The positive values for the Y axis correspond to a forward movement and the negative values to a backward movement. In the case of the X axis, negative values correspond to a movement to the left and positive values to a movement to the right. On the other hand, the higher the absolute value of the sent command, the higher the motor power delivery is, reaching the maximum value with 100 (see Figure 13).

In addition, a set of messages that inform the rest of the connected devices of the general state of the system have been included in the communication protocol. In this way, information regarding the battery charge

status, the speed of the wheelchair, the temperature of the control board, or the status of additional components such as the lighting system or proximity sensors is provided. In the case of a traditional wheelchair, this type of information is not presented to the user, while it can be very useful. In the developed functional prototype, an interface for the visualization of this data has been implemented, as it will be shown later.



**Figure 14 Prototype components**

As it has been previously introduced, in order to carry out a series of tests that validate the correct functioning of the proposed system (as carrying out new investigations on control interfaces for wheelchairs) a functional prototype where the proposed system is integrated has been developed. Figure 14 shows the main components of this prototype. As it can be seen, the central component of the system is the printed circuit board. It is designed to communicate with other devices in a bidirectional manner, so that it sends information about the current state of the system and receives commands with which to manage the operation of the wheelchair. In order to perform an effective control of the power applied by the motors, a specific controller has been incorporated for these, also integrated in the printed circuit board.

To represent the information about the state of the chair (level of battery charge, speed, or temperature among others), an application has been developed that in this case runs on a Microsoft Surface tablet that has been incorporated into the prototype. Thanks to the use of this application, real-time viewing of images captured by a camera located at the back of the chair is also done, allowing users with mobility problems in the neck to see what happens behind them. This tablet is connected to the control board via USB, which allows it to send orders, as well as receiving information. To improve the autonomy of the tablet battery, a current inverter has been incorporated. It is connected to the wheelchair batteries and allows the tablet to be fed through them. In order to improve the safety of the user of the chair, a network of ultrasound sensors (HC-SR04 model) has been included in the prototype. It allows the detection of possible obstacles in the chair's trajectory, which allows us to act accordingly by stopping the wheelchair to avoid a collision. Also related to the safety of the user, the prototype has been provided with a lighting system, which on the one hand improves the visibility of the user and on the other one, it helps to warn other pedestrians of the movements made by the user of the chair, since it acts as an indicator of certain movements, such as lateral or backward movements. Finally, three control interfaces have been developed for the wheelchair:

- Making use of the *mobile phone*, which is connected to the board designed through bluetooth,
- By *voice commands*, processed in the application of the tablet,
- Through the data collected by a *wireless electroencephalography device*, whose signals are processed and interpreted on the tablet.

These control mechanisms are described in detail in section Control interfaces. Next, two photographs of the front (Figure 15 a)) and back (Figure 15 b)) of the developed prototype are shown.

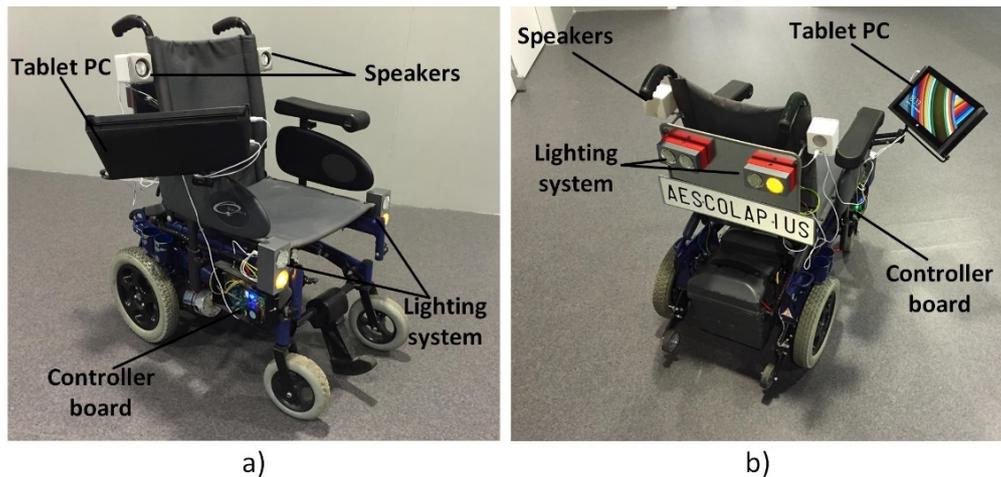


Figure 15 a) Prototype front picture b) Prototype back picture

#### 7.4.2.2. Multi-Agent architecture

In the case of the study that has been carried out, the architecture that supports the operation of the wheelchair control system is based on the use of VO of agents. The main reason to follow this kind of methodology is to provide the system with the inherent advantages of the use of VO, which are aimed at achieving more open and dynamic systems, in which agents have a set of roles and standards that determine their behavior. The possibilities offered by the organizational aspects of this type of system can largely determine the flexibility, dynamism and openness of the MAS. As a basis for the implementation of the MAS, PANGEA has been chosen (Zato et al. 2012). It is a multi-platform agent platform created by the BISITE research group of the University of Salamanca for the development of open multi-agent systems, especially those that include organizational aspects. The platform allows the integration of organizations and offers a set of useful characteristics. From the agents' perspective, different models of agents are included, such as BDI and CBR-BDL, while from an organizational perspective, it can be easily managed. Any organizational topology is allowed within this platform, while a business rules engine ensures the compliance with the standards established for the proper operation of the organization. Furthermore, a set of services is included which allow to dynamically reorganize the agents' organizations or distributing tasks and balancing the workload. Furthermore, a useful set of tools is included for end users, as graphic tools to control the agents' life cycle, debugging and

service discovering tools or an interface to oversee the organizations. From a communicational perspective, PANGEA allows the use of different communication protocols. Some of these protocols are focused on the communication between embedded devices, so it is a platform that matches the requirements necessary for the development of this system. Moreover, the possibility to interact with FIPA-ACL agents is supported.

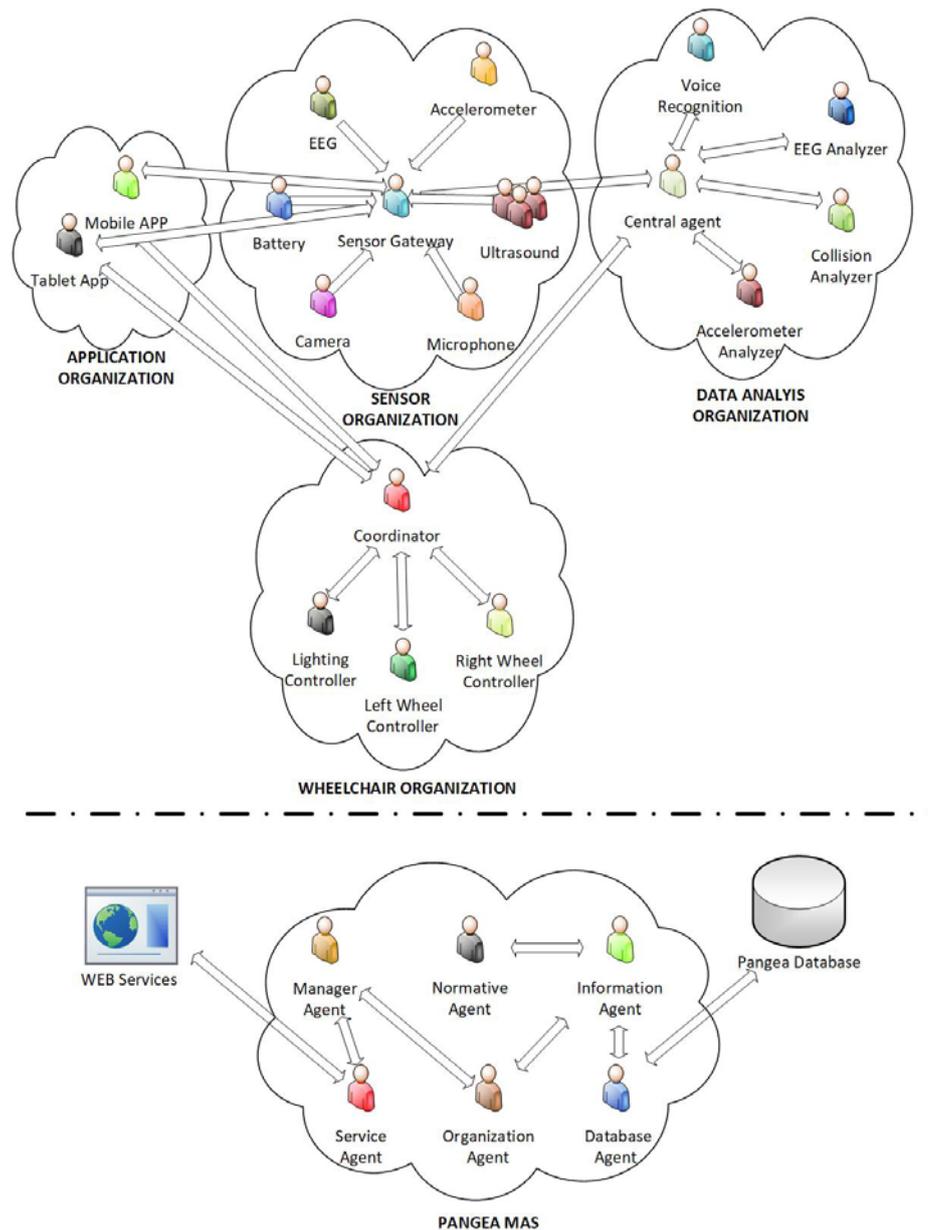


Figure 16 Multi-agent Architecture

Figure 16 shows the organizational structure of the proposed MAS, responsible for the management of the platform. On the one hand, the upper part is specifically designed for this case study, while the lower part shows those agents proper of PANGEA. Next, the functionality provided by the different organizations of agents that make up the system is detailed:

- **Sensor organization:** the purpose of this organization is to collect data from a set of hardware sensors for subsequent representation and analysis by other agents in the MAS. As a central part of this organization, the Sensor Gateway Agent is responsible for collecting the data of the agents embedded in the sensors present in the system, normalizing the collected information and transmitting it to those agents of the rest of the organizations that request it. In the case of study presented in the work, the sensors involved in this organization are: battery (knowing the battery level of charge), EEG, accelerometer (obtaining the smartphone accelerometer data), ultrasound (proximity sensor), microphone and camera.
- **Data analysis organization:** based on the data provided by the sensor organization, the agents that are part of this organization are in charge of analyzing it to carry out decision-making processes related to the control of the wheelchair-. Within this organization, a central agent is incorporated. It is in charge of sending the necessary data from the sensors to the rest of the agents of the organization, who are responsible for analyzing it. After these processes, the central agent will receive back instructions regarding the control of the wheelchair. This agent will communicate these instructions to the organization in charge of managing the wheelchair organization. In the event that the decisions made by the agents of this organization come into conflict, the central agent is responsible for managing their priority. Among the other agents of the organization are: the voice recognition agent. which, through the audio signal collected by a microphone, uses a speech recognition system to interpret different commands with which to control the chair; the EEG analyzer that analyzes the data collected by an electroencephalogram device to control the wheelchair; the Collision Analyzer, which attending on the signals collected by the proximity sensors, is responsible for taking the control of the wheelchair to avoid possible collisions, and the

Accelerometer Analyzer, which analyzes the data obtained from the smartphone embedded accelerometer in order to control de wheelchair, and also to detect possible falls of the smartphone.

- **Wheelchair organization:** responsible for carrying out the control on different components of the wheelchair. The Coordinator Agent is the central agent in charge of the coordination of the organization. The Right and Left Wheel Controller agents are in charge of the individual control of each of the motors and the Lighting Controller Agent is responsible for the control of the lighting system that incorporates the wheelchair.
- **Application organization:** For the end user to be able to view the information collected from different sensors, a tablet software application has been developed. The agent responsible for collecting this information and also responsible for the visualization layer of the application is the Tablet App agent. This organization also includes the Mobile App agent, responsible for managing the wheelchair control system based on the smartphone touchscreen.

On the other hand, the proposed architecture is based on the use of the agents provided by the PANGEA platform (Zato et al. 2012). These agents are responsible for tasks such as: (i) supervision of the correct performance of tasks (manager agent); (ii) the registration of the agents and services present in the system (information agent); (iii) control of the correct operation of the services offered by the agents and their distribution through web services (service agent); (iv) guarantee the correct compliance of the rules defined in the organizations (normative agent); (v) access to database (database agent), or (vi) management of the different organizations that make up the system (organization agent).

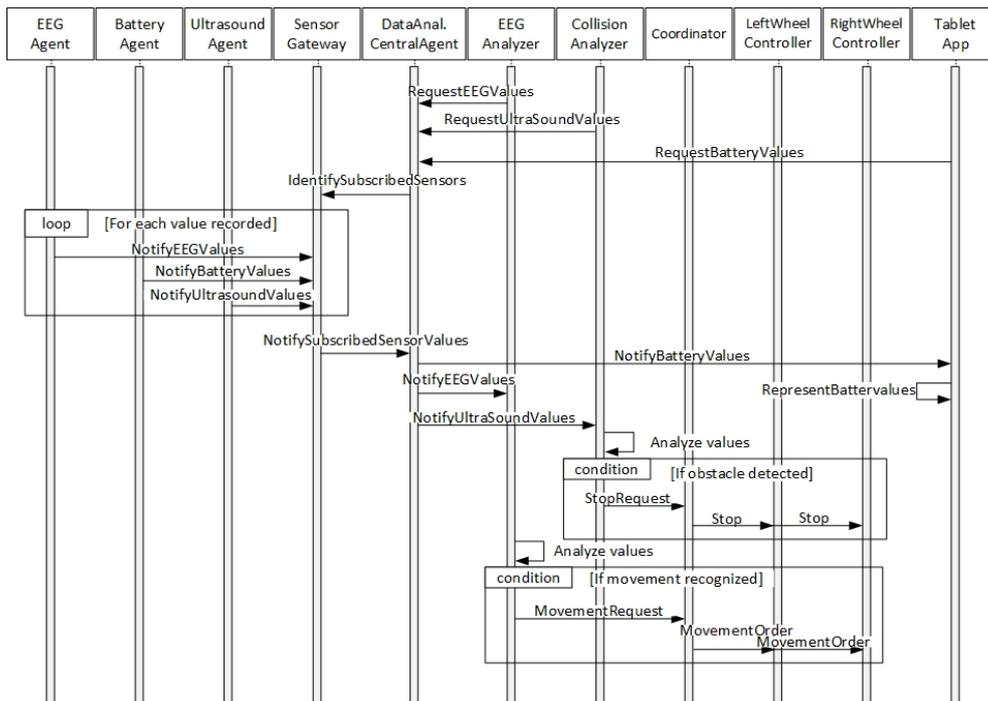


Figure 17 Collaboration-sequence EEG control interface diagram

The general operation of the processes occurring in the platform for a specific control interface can be seen in Figure 17. In this case, EEG control interface has been chosen to represent the platform's operation processes. Firstly, agents within Data analysis organization that are involved in the selected control interface perform a subscription request to the central agent of this organization. In this request, these agents specify which data coming from the hardware sensors is needed for their proper functioning. In this case, two agents will work in parallel: EEG Analyzer and Collision analyzer. EEG analyzer is in charge of performing the portable EEG device data analysis to infer which movements does the user want to perform, while the Collision analyzer works with the ultrasound sensors data to detect possible environment collisions. Thus, the data subscription request performed by these agents are the EEG and the ultrasound sensors data in each case. Subsequently, the data request from this organization to the *sensors organization* is done to the *sensor gateway agent*, which collects all the data coming from the different agents in charge of obtaining information from the different deployed sensors. As *EEG* and *Ultrasound agents* send their corresponding hardware data to the *sensor gateway*, this information is redistributed to the *data analysis central agent*

(only subscribed information is sent). As the requested information is provided to each *analyzer agent*, it is evaluated by each of the agents. In the case of the *EEG analyzer*, if a certain pattern associated with a movement is recognized, a movement request is performed to the *wheelchair organization's coordinator agent*, while if the *Collision analyzer* detects a possible impact, a stop request is done. When a request is done to the *coordinator agent*, it is in charge of evaluating it according to its priority. For instance, in this case, the *collision analyzer* requests will always have a higher priority. Once the requests are accepted, the corresponding order is sent to the *wheel controller* agents to perform the physical movement. Additionally, Figure 17 also shows how the information represented in the tablet App is provided through the agents' organizations. The battery information flow is provided as an example.

### 7.4.3. Control interfaces

#### 7.4.3.1. Smartphone

In some cases, users of wheelchairs (manual or electric) cannot drive independently due to limitations in the environment (large slopes, reduced space), or physical limitations. In these situations, it is necessary to resort to a second person who assists the user of the wheelchair and does not always have the necessary strength to move the chair without having to make a great effort. Obviously, controlling a motorized wheelchair while walking by using the traditional joystick is not easy. For this reason, to facilitate its operation by the attendees, certain models of electric wheelchairs have controls which are specially designed for attendees. These controls are usually located in the back of the wheelchair to ease its use. In this way, it is the assistant who controls the direction of the chair, while the motors make the effort to move the chair. Although this option is available for several models of chairs at present, not all models offer the possibility of integrating a system of these characteristics, and in case of doing it, the price is generally high.

Faced with this situation, it has raised the possibility of developing a control system for assistants that is affordable, accessible to anyone and intuitive to use. To carry out this system, we have chosen to use smartphones. This decision is fundamentally motivated because its penetration of use is increasing, so that a large part of the population has one (reaching a penetration

of 78% of the total population in the case of the US, or 87% in the case of Spain (Google 2017)) and, in addition, they have great connectivity and ways of interacting with them. In this work, three alternatives for controlling a wheelchair through the mobile phone are presented: one by using the accelerometer of the mobile phone and two by using the touch screen of the mobile phone. All these alternatives make use of the bluetooth communication between the mobile device and the designed control board, sending through this communication channel the necessary commands for the movements of the relevant wheelchair.

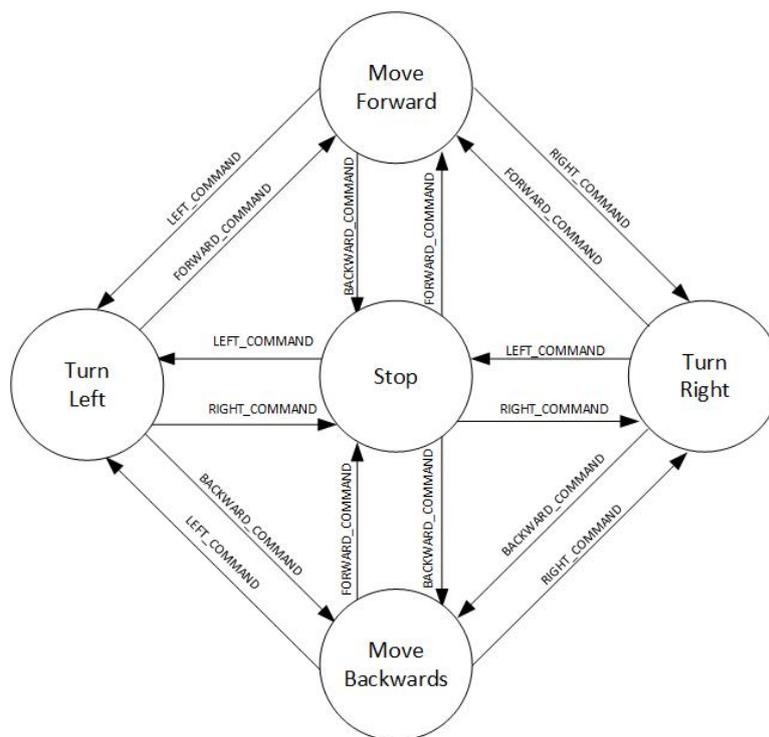


**Figure 18 (A) Telephone inclinations allowed by the mobile device (B) Interaction by touch control.**

Most smartphones have an acceleration sensor embedded inside. This sensor allows to measure the inclination of the device in relation the ground. Using this sensor, a non-proportional control method for the wheelchair based on the inclination of the mobile phone has been developed. To do this, a finite state machine is defined with possible states (front, back, left, right and stopped). The transition between states will be made based on a series of thresholds for the values recorded by the accelerometer for the X, Y axes. and Z. Figure 18(A) shows how the mobile phone should be tilted to make a movement in the wheelchair. For example, tilting the phone as shown in the upper left of the image corresponds to a forward movement.

Although the accelerometer-based control is very intuitive, the most common form of interaction with a smartphone is through a touch screen. For

that reason, there may be users who are more comfortable using this element as a wheelchair control interface. On the other hand, it can be a more suitable control method for wheelchair users that have good mobility in their hands, but not enough strength to be able to easily use a joystick. This kind of control is a possible substitute for low cost control interfaces based on the use of touch panels, whose price is generally high, such as the Switch-It TouchDrive 2 (Switch-it 2017a), which exceeds the 3000 €. To integrate this option in a conventional wheelchair, it will be enough to incorporate a small support for the mobile phone in the armrest of the chair, so that it is placed under the user's hand. Two alternative touch screen-based control methods are proposed.



**Figure 19 Possible states transition of the non-proportional touch screen-based control.**

The first one is a non-proportional method, which allows the transition between 5 states (the same ones used in the case of the accelerometer). Figure 18 (B) shows how to interact with the touch screen of the mobile device: sliding a finger in the specific direction in which the user wants to move. For example, to make the wheelchair to move forward, you must slide your finger from the bottom of the screen to the top. To cancel the movement, that is, to make the

chair stop, the opposite movement has to be made, in this case from the top to the bottom. It will be possible the direct transition between all the movements, excepting the opposite movements (since they imply that the chair stops). Figure 19 shows the possible states of transition of the non-proportional touch screen-based control.

Figure 20 shows the pseudocode of how the non-proportional touch screen-based control is implemented. As it can be observed, Algorithm 1 oversees analyzing the press and release coordinates on the touch screen, while Algorithm 2 evaluates the results of Algorithm 1 to perform the corresponding movement requests: moving forward, backward, left, right or stopping the wheelchair.

<pre> <b>Algorithm 1</b> onTouchEvent <hr/> <b>Input:</b> <i>motionEvent</i> <b>Output:</b> None <b>Variables:</b> xi,yi: point when press; xf, yf: point when release; xr,yr: relative coordinates <b>if</b> <i>event.getAction() == MotionEvent.ACTION_DOWN</i> <b>then</b>   <i>xi = event.getX()</i>   <i>yi = event.getY()</i> <b>else if</b> <i>event.getAction() == MotionEvent.ACTION_UP</i> <b>then</b>   <i>xf = event.getX()</i>   <i>yf = event.getY()</i>   <i>yr = yf - yi</i>   <i>xr = xf - xi</i>   <b>if</b> <i>abs(xr) &gt;= abs(yr)</i> <b>then</b>     <b>if</b> <i>xr &gt; 0</i> <b>then</b>       <b>if</b> <i>a &lt; 1</i> <b>then</b>         <i>a ++</i>       <b>else if</b> <i>a == 1    a == -1</i> <b>then</b>         <i>b = 0</i>       <b>end if</b>       <i>sendCommand(a, b)</i>     <b>else</b>       <b>if</b> <i>yr &gt; 0</i> <b>then</b>         <b>if</b> <i>b &lt; 1</i> <b>then</b>           <i>b ++</i>         <b>else if</b> <i>b == 1    b == -1</i> <b>then</b>           <i>a = 0</i>         <b>end if</b>         <i>sendCommand(a, b)</i>       <b>else</b>         <b>if</b> <i>b &gt;= 0</i> <b>then</b>           <i>b ++</i>         <b>else if</b> <i>b == 1    b == -1</i> <b>then</b>           <i>a = 0</i>         <b>end if</b>         <i>sendCommand(a, b)</i>       <b>end if</b>     <b>end if</b>   <b>end if</b> </pre>	<pre> <b>Algorithm 2</b> sendCommand <hr/> <b>Input:</b> <i>a, b</i> <b>Output:</b> None <b>if</b> <i>a == 0 &amp;&amp; b == 0</i> <b>then</b>   <i>requestStop()</i> <b>else</b>   <b>if</b> <i>a == -1</i> <b>then</b>     <i>requestLeftMovement()</i>   <b>end if</b>   <b>if</b> <i>a == 1</i> <b>then</b>     <i>requestRightMovement()</i>   <b>end if</b>   <b>if</b> <i>a == 1</i> <b>then</b>     <i>requestForward()</i>   <b>end if</b>   <b>if</b> <i>a == 1</i> <b>then</b>     <i>requestBackward()</i>   <b>end if</b> <b>end if</b> </pre>
---	---

**Figure 20** Non-proportional touch screen-based control algorithms

The second touch screen-based method is a proportional control method that emulates the traditional joystick of a wheelchair. Although the kind of

control offered by this method is analogous to the one offered by a joystick, its use is proposed for those people with partial mobility in their hand, but who can move a finger in a controlled manner in a small space, in the same line as other control devices based on the direction of the finger, such as the DX-RJM-VIC (“Finger Steering Control DX-RJM-VIC MANUAL” 2017).

#### *7.4.3.2. Voice control*

In order to make the use of a motorized wheelchair more accessible to those people who cannot perform physical movements, an additional control interface based on voice control has been developed. By using different voice commands, the user can control wheelchair movements in a non-proportional way. Despite being a non-proportional control, it also incorporates a command that allows controlling the speed of the chair at different levels. On the other hand, by incorporating this type of interface, the possibilities of interaction with the user multiply. To take advantage of this potential, additional functionalities have been incorporated, so that users can check the news or weather information, switch on and off the lights incorporated into the system or send an emergency signal.

The application that handles voice recognition management runs on the Microsoft Surface tablet, and is active by default. To perform speech recognition, the voice recognition API of the .NET Framework has been used. The main advantage that this API offers over others is that it performs the voice recognition process locally, without the need to interact with any external server. In addition, it allows to establish grammatical restrictions to a finite set of alternatives, which in this case correspond to the commands admitted by the system. The use of technologies that depend on a stable network connection could compromise the user's security when it is unstable. To prevent the commands that control the movement of the wheelchair from being activated unintentionally, since they could appear in any normal conversation that the user kept, a keyword has been included in all the commands, except for the command that makes that the wheelchair stops.

Next, Table 2 collects the commands admitted by the system together with the system response for each of them.

<b>Command</b>	<b>System response</b>
"Run forward"	The wheelchair moves forward
"Run back"	The wheelchair moves back
"Run left"	The wheelchair moves to the left
"Run right"	The wheelchair moves to the right
"Execute speed [number from 1 to 5]"	The wheelchair's speed changes (intensity levels from 1 to 5)
"Abort"	Makes the wheelchair stop
"Execute news"	The system reads a news item from the RSS of a newspaper to be defined by the user.
"Execute weather"	The system reads the weather forecast
"Execute lights"	Makes the wheelchair lighting system turn on (or off).
"Execute time"	The system reads the current time

**Table 2 Voice commands and system response**

### 7.4.3.3. EEG

Many wheelchair users suffer from diseases that prevent them from using the motion interfaces presented in the previous sections. For example, diseases such as amiatrophic lateral sclerosis (ALS) or spinal cord injuries that are likely to result in total or partial paralysis. It is therefore essential to include a motion interface that allows wheelchairs to be used for this type of person. This is where the use of EEG-based technologies is proposed as an alternative to the methods proposed above.

The EPOC+ helmet designed by the Emotiv company is used to implement an intelligent system capable of using EEG-based technology. It is a Neuroheadset device. An image of the device used is shown in Figure 21 (a). The helmet is made up of a total of sixteen sensors that work with a conductive liquid of the current, such as contact lens liquid. Fourteen (AF3, AF4, F7, F8, F3, F4, FC5, FC6, T7, T8, P7, P8, O1, O2) of these sensors are data channels and the other two (P3, P4) are the so-called reference sensors. Figure 21 (b) shows the distribution of the different sensors once a person has placed the helmet. As it can be observed in Figure 21, the wireless electroencephalography device is directly connected to the Tablet PC and not to the platform built-in Bluetooth.

The reason is that it requires to be connected to a specific USB Bluetooth receiver developed by Emotiv.



**Figure 21 ECG interface. a) EPOC+ helmet of Emotiv b) Distribution of EPOC+ helmet sensors in the head of subjects**

The Emotiv EPOC+ helmet is able to recognize affective, expressive and cognitive cases. To do this, it measures brain activity by means of an electroencephalogram. Cognitive casuistry is what will be taken into account to implement the system that will allow the wheelchair to move. The system is designed in such a way that the user can use abstract thoughts or observe specific images to guide the wheelchair.

In this way, data will be collected from various people to test the effectiveness of the system and the designed motion interface. Each of these people will be made to think of a series of abstract concepts, specifically four, in such a way that each of these thoughts is later related to the four movements that can perform the electric chair, left, right, front and back. In the same way, four arrows will be related to each of the four previous directions. In the latter case, the user will have to react to the stimulus by looking at each of the four arrows.

With each of the users different datasets will be extracted since each one of them thinks in different concepts and they do not have the same reaction when visualizing the images. This data set will be obtained each time individuals use the interface. With each use there will be a small initial training stage of about 40 seconds. This stage of the user's initial adaptation to the helmet is necessary since, although the same thoughts are always related to each of the

thoughts, the brain response may not be the same in each of the interface applications. Once this training phase is completed, the generated dataset will be used to train the model that will then be used to move the wheelchair. In order to obtain these models, it is necessary to apply a pre-processing that helps the identification of movement patterns. The Results and Conclusions section will show how several models with different machine learning techniques are constructed in order to determine which of them offers the best results when evaluated. The algorithms to be used are tree-based methods and decision rules, role-based learning, Bayes' theorem, as well as meta-classifiers.

#### 7.4.3.3.1. Processing of raw data

##### Signal Sampling

As previously explained., the Emotiv EPOC+ helmet is capable of obtaining 14 bioelectric records from its fourteen sensors. Each of these signals is sampled at a frequency of 128Hz, i.e. for every second, 128 samples per sensor are obtained. In this way the time domain signal is obtained for each sensor. However, it is necessary to pass the signal to the frequency domain in order to be able to better recognize the patterns within each signal, just as it is performed in work (Cena et al. 2013).

From each signal, a 2-second window has been chosen for the Fourier transform, with a shift of 0.5 seconds. In other words, 256 values are selected, with a shift of 64 values. For each time window, the Fourier transform is applied. Unlike other works that recommend the use of windows of 5 seconds, in this work has been chosen 2 seconds as window by the delay that represents when detecting the movement and perform it.

##### Obtaining the Fourier transformation

The Fourier Transformation is a mathematical transformation to pass a signal from the time domain to the frequency domain. Given a signal in the time domain  $s(n)$ , the fragmented signal in  $I$  windows is denoted as  $s_i(n)$ , where  $i \in I$  denotes the window being transformed. For each window the Discrete Fourier Transform (DFT) is calculated as shows in (Cena et al. 2013) As wrap function, the Hanning window has been chosen that in the interval  $n \in [0, N - 1]$  is the formula shown below.

$$w(n) = 0.5 \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \right]$$

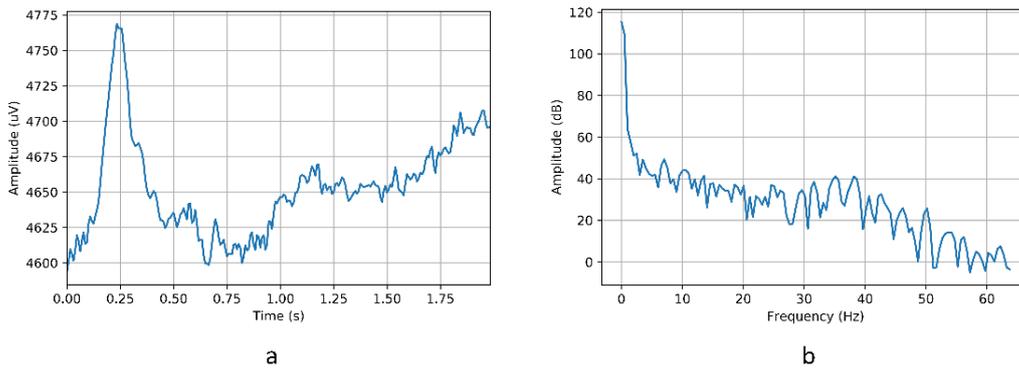
Where  $N$  is the number of examples selected, in our case there are 256, as explained previously.

7.4.3.3.1.1. Transformation of data into decibels

The transformation of the DFT into decibels allows the logarithmic nature of the decibel to simplify operations with low power values. This is the case of Emotiv EPOC+, where the records of the signals are given in  $\mu V$ . Formally, the transformation of the DFT from an  $S(k)$  signal into decibels is as follows:

$$S_{dB}(k) = 20 * \log_{10} S(k), 1 \leq k \leq K$$

Figure 22 shows the transformation of data in the time domain into the frequency domain. The images show the signal corresponding to the "left" movement recorded by the AF4 sensor. Once the data has been obtained in the frequency domain, the model is constructed from which the movements to be carried out by the chair will be detected.



**Figure 22** Signal corresponding to the "left" movement of the AF4 sensor. a) Signal in the time domain b) Signal in the frequency domain

It is important to mention that the extraction of data from the encephalogram is obtained by means of the EmotivPRO software, also provided by the company Emotiv under subscription. Once the data has been obtained, they must be preprocessed in order to pass the data found in the time domain to the frequency domain by applying Fourier transforming.

#### 7.4.3.3.2. Model construction techniques

As for the algorithms that will be used to determine the movement of the chair according to the data preprocessing explained are explained below. With these techniques it will be analyzed which of them is best suited to the casuistry of the problem, in order to make a classification as accurate as possible.

##### RIPPER

The Repeated Incremental Pruning Produce Error Reduction algorithm or better known by its acronym RIPPER is an algorithm that evolves from the IREP (Incremental Reduced Error Pruning) algorithm and in turn this last algorithm is a combination of the REP (Reduced Error Pruning) algorithm and the divide and beat technique.

The IREP algorithm was described by Fürnkranz and Widmer (Fürnkranz and Widmer 1994). It is a technique that makes use of decision trees to determine the class to which the different instances correspond. Cohen improves this algorithm and called it RIPPER. The improvements of this algorithm include the pruning function of the tree, a new criterion for stop addition process based on heuristics and a new optimization step after the rule set. For more information about the implementation of the RIPPER algorithm see the original article of Cohen (Cohen 1995).

##### C4.5

Algorithm C4.5 is an evolution of the original ID3 whose main advantage is that it allows numeric attributes to be incorporated into the logical operations carried out in the test nodes. Currently, there are new versions of this algorithm such as C5.0 but it is a commercial version. J48 is the implementation of C4.5 in Java, and is available in data mining tools like Weka. It is one of the most used techniques together with CART since both allow the use of numerical attributes. C4.5 tries to minimize the width of the decision tree through heavy search strategies. To do this, two terms are defined, the gain and the rate of gain based on the information  $H(x)$  contained in a node  $x$ . Using only the criterion of gain, attributes with many values are favoured since they favour the division of elements into numerous subsets, to avoid this the concept of the rate of gain is added. The idea was proposed by Quinlan (Quinlan 1993). In this book the researcher explain how the algorithm works.

### Random Forest

The Random Forest algorithm is somewhat inspired by Bagging algorithms and the bootstrapping technique. The original idea of the Random Forest is to improve the reduction of variance in Bagging, reducing the correlation between trees that are generated without reducing too much variance. Idea proposed by Breiman (Breiman 2001). This is achieved during the stage of tree creation and growth, thanks to the selection of random variables that will compose the tree.

The algorithm does this by creating a series of random trees, where the random factor is determined by the variables that are selected to form the tree. In (Breiman 2001) the process is explained.

### Bayesian network

The Bayesian network-based algorithm is a probability-based model that relates to a set of random variables using an acyclic-directed graph that allows Bayesian inference to be used to determine the probabilities of unknown variables from others that are known. Bayesian networks are composed of nodes, one for each random variable and by directed arcs that relate the nodes. In addition, it is known that the probability of each node is conditional on that of the parent node. Full explanation about this algorithm is defined by Su and Zhang (Su and Zhang 2006).

It is important to point out that in case any attribute has continuous values, it is necessary to make a discretization of the data, since if not this type of variables makes it very difficult to calculate the probabilities.

### SVM

The SVM (Support Vector Machine) algorithm is one of the algorithms that will be applied for the classification task. The technique of this algorithm consists of constructing hyperplanes in the space in which the data are represented, so that these hyperplanes maximize the distances between the different classes. This technique is explained in more detail in the article written by Vapnik (V. N. Vapnik 1999). This technique is one of the most widely used classification techniques that use data in the frequency domain. In addition, this technique also offers very good results compared to other techniques.

### Meta-classifiers

The bagging algorithm comes from the words bootstrap aggregating. The technique consists of obtaining different training sets from an original one using the bootstrapping technique. Each of these datasets will be the input of a different classifier and with which each of these classifiers, which are usually different from each other, will produce a classifier model that is able to make decisions. Once these models have been obtained, each time a new instance is to be classified, it will be classified by each one of them. Each of these models can arrive at a different result in such a way that the multi-classifier has to say the class that will be offered as a result of the process by the majority voting technique. This technique was originally proposed by Breiman (Breiman 1996). The boosting technique, on the other hand, uses a single classifier to generate the different models. These models are trained by different subsets of data that are also obtained through bootstrapping. In the algorithms that implement this technique, such as AdaBoost, each of the instances of the training subsets of each classifier receives an initial weight. Each of these subsets is trained during a given number of iterations. In each of these iterations the model error is checked and if it does not meet the satisfaction conditions, a new iteration is performed, but updating the weights of the misclassified instances. In this way, each of the models that the multi-classifier would consist of would be trained. This will determine the resulting class by means of the class with greater weight than those returned by each of the internal classifiers of the multi-classifier. The idea was proposed by Schapire and Freund (Schapire and Freund 2012).

### 7.4.4. Results

This section evaluates the results obtained from the system proposed in section 7.4.3. Firstly, the efficiency of the different algorithms proposed in subsection EEG is analyzed. Once the results obtained by each of the algorithms have been presented, it will be necessary to determine which one best suits the characteristics of the system. In this section we will first analyze the algorithms that will be responsible for discretizing between abstract thoughts, and then analyze the algorithms that evaluate the data sets formed when users observe the images.

When determining the operation of the control interface formed by the EEG technology when the user thinks of abstract concepts, which are later related to the forward, backward, left and right movements, this operation is evaluated using the following algorithms: RIPPER, C4.5, RandomForest, Bayesian networks, SVM, Bagging with the RandomForest algorithm and Boosting also with the RandomForest algorithm. The used versions of these algorithms are those that are implemented in the Weka tool (Hall Eibe Frank et al. 2009).

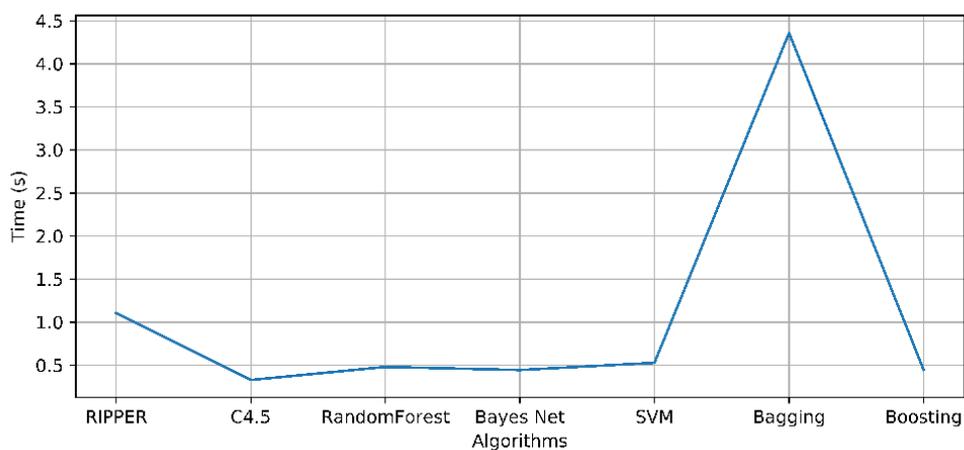
	<b>User 1</b>			<b>User 2</b>		
	<b>Accuracy (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>Time (s)</b>	<b>Accuracy (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>Time (s)</b>
RIPPER	97,25	0,9678	1,26	97,16	0,9654	1
C4.5	98,35	0,9721	0,62	98,23	0,9782	0,27
R.Forest	96,78	0,9534	0,6	96,42	0,9574	0,5
Bayes Net	92,56	0,9178	0,7	91,42	0,9107	0,38
SVM	96,63	0,9578	0,78	96,23	0,9503	0,47
Bagging	97,84	0,9724	4,53	97,45	0,9549	4,45
Boosting	97,63	0,9706	0,46	97,59	0,9619	0,46
	<b>User 3</b>			<b>User 4</b>		
	<b>Accuracy (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>Time (s)</b>	<b>Accuracy (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>Time (s)</b>
RIPPER	97,36	0,9542	1,09	97,59	0,9641	1,04
C4.5	98,48	0,9624	0,27	97,85	0,9528	0,24
R.Forest	96,98	0,9408	0,44	97,68	0,9606	0,41
Bayes Net	92,35	0,9004	0,39	93,21	0,9154	0,35
SVM	97,87	0,9543	0,45	97,24	0,9629	0,46
Bagging	97,94	0,9664	4,34	97,69	0,9579	4,15
Boosting	97,81	0,9546	0,45	98,04	0,9723	0,42
	<b>User 5</b>			<b>Media</b>		
	<b>Accuracy (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>Time (s)</b>	<b>Accuracy (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>Time (s)</b>
RIPPER	97,21	0,9601	1,14	97,314	0,9623	1,106
C4.5	97,45	0,9578	0,24	98,072	0,9647	0,328
R.Forest	98,46	0,9687	0,45	97,264	0,9562	0,48
Bayes Net	92,45	0,9124	0,4	92,398	0,9113	0,444
SVM	97,48	0,9621	0,48	97,09	0,9575	0,528
Bagging	97,89	0,9578	4,32	97,762	0,9619	4,358
Boosting	98,12	0,9724	0,44	97,838	0,9664	0,446

**Table 3 Comparison of models with abstract thoughts**

Each of these algorithms will receive a total of five different datasets, one for each of the users with whom the tests have been performed, in order to determine their effectiveness. The five individuals selected are males aged 22 to

31. The datasets are obtained by the process described in subsection Processing of raw data. This data is used to evaluate the performance of the algorithms by generating the model and validating it with the 10-fold cross validation technique. The results of these tests are shown in Table 3.

As it can be seen in the image, all the algorithms obtain a very high efficiency, in all cases higher than 97% by validating each of their models with the 10-fold cross validation technique and a kappa also close to 1. These values indicate that each model offers a perfect performance for each of the individuals with whom the system has been tested. Therefore, it is essential that in this case we look at the time it takes to generate each model. This is best seen in Figure 23.



**Figure 23 Evolution of model formation time**

The above figure shows the average times of each of the models generated for each user. By looking at this graph it can be concluded that the best algorithm for dealing with the problem of abstract thought treatment is C4.5.

If we take into account the efficiency of the system at the time of discretating when the user visualizes the images of the arrows that are related to each of the four movements, it is evaluated with the same algorithms that were used before: RIPPER, C4.5, RandomForest, Bayesian networks, SVM, Bagging with the RandomForest algorithm and Boosting also with the

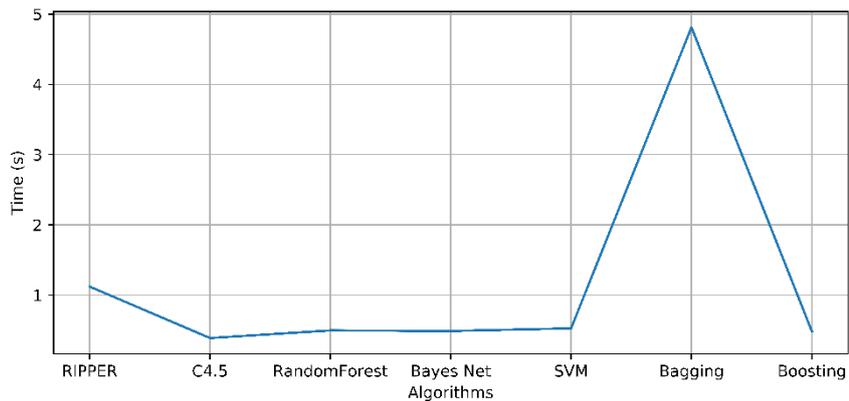
RandomForest algorithm, also from the Weka application (Hall Eibe Frank et al. 2009).

In the same way as before, each of the algorithms is evaluated with the datasets of the five users and the 10-fold cross validation technique. The results of these validation tests can be seen in Table 4.

	<b>Usuario 1</b>			<b>Usuario 2</b>		
	<b>Precision (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>Time (s)</b>	<b>Precision (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>Time (s)</b>
RIPPER	98,56	0,9824	0,95	99,3878	0,9923	1,19
C4.5	98,72	0,9715	0,34	98,52	0,9705	0,31
R.Forest	95,32	0,9414	0,49	95,12	0,9475	0,51
Bayes Net	93,78	0,9124	0,4	92,66	0,9122	0,39
SVM	96,47	0,9612	0,42	96,19	0,9545	0,51
Bagging	97,12	0,9664	4,49	97,35	0,9642	4,8
Boosting	96,89	0,9612	0,45	96,94	0,9623	0,48
	<b>Usuario 3</b>			<b>Usuario 4</b>		
	<b>Precision (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>Time (s)</b>	<b>Precision (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>Time (s)</b>
RIPPER	98,67	0,9712	1,08	98,87	0,9787	0,96
C4.5	97,87	0,9641	0,42	98,84	0,9823	0,34
R.Forest	94,45	0,9376	0,48	96,06	0,9542	0,5
Bayes Net	91,78	0,9117	0,4	92,64	0,9228	0,4
SVM	96,36	0,9578	0,46	96,48	0,9569	0,78
Bagging	96,96	0,9624	4,7	97,87	0,9735	5,16
Boosting	96,57	0,9612	0,49	96,49	0,9637	0,52
	<b>Usuario 5</b>			<b>Media</b>		
	<b>Precision (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>Time (s)</b>	<b>Precision (%)</b>	<b>Kappa</b>	<b>Time (s)</b>
RIPPER	98,01	0,9784	1,44	98,73445	0,9806	1,124
C4.5	99,85	0,9895	0,55	98,77	0,9756	0,392
R.Forest	96,14	0,9581	0,52	95,418	0,9478	0,5
Bayes Net	94,83	0,9407	0,87	93,138	0,9199	0,492
SVM	96,12	0,9574	0,48	96,324	0,9576	0,53
Bagging	97,45	0,9682	4,91	97,35	0,9669	4,812
Boosting	96,42	0,9578	0,5	96,662	0,9612	0,488

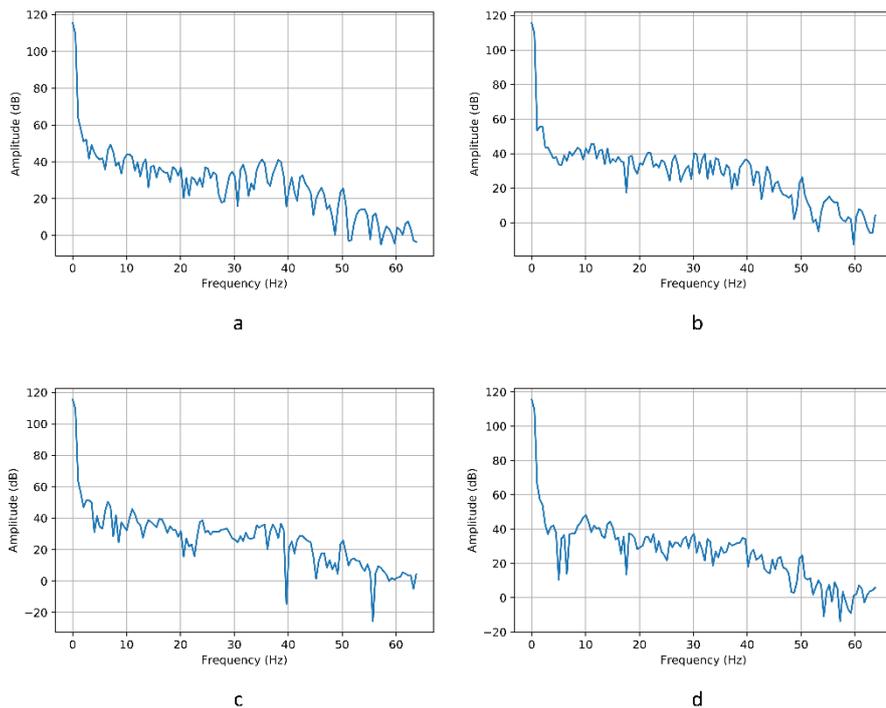
**Table 4 Comparison of models when viewing images**

Again, the models offer excellent results, both in terms of accuracy and kappa values. Therefore, it is again necessary to compare the time values in which it takes to generate each of the models. This can be seen in Figure 24.



**Figure 24 Evolution of model formation time**

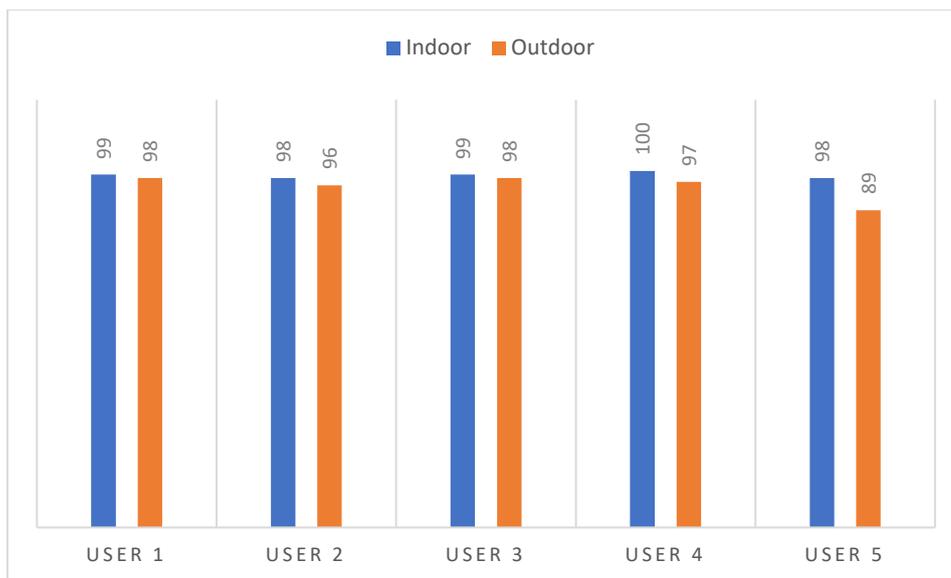
Looking at the image, it is again the C4.5 algorithm that consumes the least time to generate the model. Therefore, this algorithm is selected from the rest of them to conform the model that will decide which image the user is viewing through the data received from their brain activity.



**Figure 25 Signal picked up by the AF4 sensor of subject 1 in the first two seconds a) Movement "left" b) Movement "right" c) Movement "forward" d) Movement "back"**

The high performance of all the proposed models is mainly due to data pre-processing. In which the time domain data is transformed into the frequency domain. We achieved this by applying Fourier transformation as well as with the enveloping function, Hanning, as explained in the subsection EEG. With this process we achieve that the models differentiate between each of the movements, as it can be appreciated in Figure 25.

Regarding the evaluation of the voice control interface presented in section Voice control, a set of tests were carried out with five different users. It is important to remark that none of these users presented speech or pronunciation problems. In order to test the accuracy of the speech recognition system, five users participated in different tests. These tests were carried out without using the wheelchair, since the scope of these tests were just to evaluate the performance of the speech recognition system, not its usability as a wheelchair control interface.

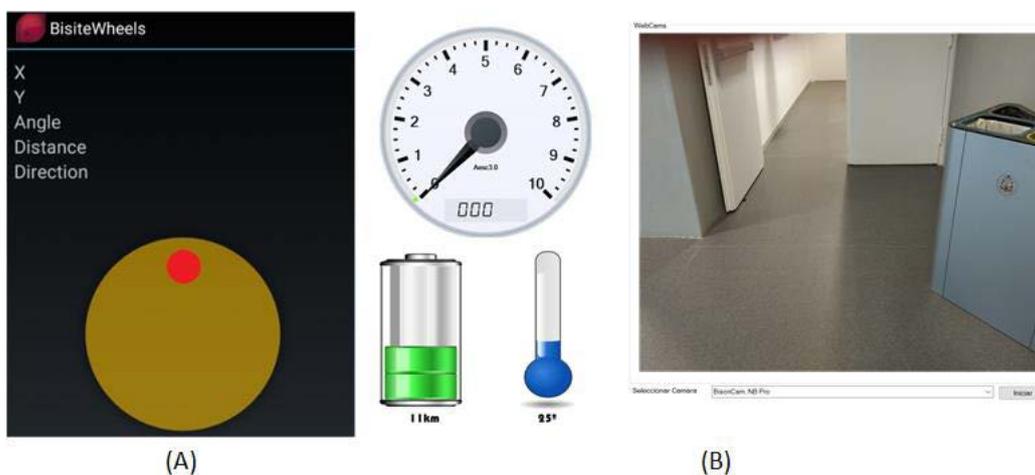


**Figure 26 Accuracy of the speech recognition system**

During these tests, each user repeated 10 times each of the commands (see Table 2) in two different scenarios: an indoor environment and an outdoor environment (a relatively busy street). The correct recognition of commands by the system is of vital importance. Failure to recognize a command would mean that the wheelchair would continue to perform the same action it was performing. A more undesirable situation would arise when the system would

mistakenly recognize a different command from the one that has been said. Figure 26 shows the percentage of correctly recognized voice commands during the tests in the indoor and the outdoor locations. Most of the errors produced in the systems were related to the non-identification of any of the commands. Only in 12 out of the 1000 spoken commands, the system confused one command with another.

Figure 27 shows screenshots of the smartphone and the tablet applications. Figure 27 (A) shows the interface of the mobile application that allows to control the wheelchair through the touchscreen. In order to control the wheelchair, the user has to slide a finger through the circle shown in the image, in the direction in which the user wants the chair to move. To stop its movement, user just has to stop touching the circle. Figure 27 (B) shows the interface of the Microsoft surface tablet that is placed at the front part of the wheelchair which is used to present useful information to the user. As it can be seen in the figure, information regarding speed and electronic components temperature is represented. Furthermore, images taken from the web-camera located at the back of the wheelchair are shown in order to let the user have a broader vision of the environment. By doing this, the application allows users with mobility problems in the neck to see what happens behind them.



**Figure 27 (A) Smartphone app interface (B) Tablet app interface**

Since the precision of the smartphone control systems is not evaluable as it has previously done with the EEG and the voice controls, in order to evaluate them, some tests have been done with the purpose of obtaining feedback from the users regarding the accuracy and ease of use of these control systems. Tests were carried out on all the different control systems presented in Section 3 using the prototype wheelchair.

Additionally, the use of the control interfaces based on the smartphone was also evaluated for its use by accompanying persons, not by users of the wheelchair. Five users carried out these tests, testing the control systems both indoors and outdoors following the same route. Finally, users assessed the accuracy and ease of use of the control systems using a numerical rating from 0 to 10. Results are presented in Table 5.

Some conclusions were extracted from these evaluations and the users feedback: As it can be seen in the results, the two most accurate control methods are those based in the accelerometer and the touchscreen of the mobile phone. Users were very satisfied with the performance and ease of use of both control systems, and all of them stood out the control based on the accelerometer for being more intuitive, which made this method of control the most comfortable to use while walking by the wheelchair. Regarding the control based on voice commands, users highlighted its ease of use, although they pointed out that they found it difficult to make precise turns due to the time required to speak the command to be made. Considering the EEG control system, it was the one which turned out to be the least easy to use. The main reason is that this system requires a more important process of adaptation and training by the user. Regarding the accuracy of this system as a control method, it proved to be the least efficient since it requires of a greater degree of concentration on the part of the user; it turned out to be an efficient indoor system, but its use is more complicated in external environments, where plenty of external stimulus can affect in the user's concentration.

	<b>Accelerometer</b>		<b>Touchscreen</b>	
<b>Usuario</b>	<b>Control accuracy</b>	<b>Ease of use</b>	<b>Control accuracy</b>	<b>Ease of use</b>
User 1	10	10	10	9
User 2	10	9	9	8
User 3	10	10	9	8
User 4	10	9	10	9
User 5	10	9	10	9
Mean	10	9,4	9,4	8,6

	<b>Voice</b>		<b>EEG</b>	
<b>Usuario</b>	<b>Control accuracy</b>	<b>Ease of use</b>	<b>Control accuracy</b>	<b>Ease of use</b>
User 1	7	9	7	9
User 2	8	8	6	8
User 3	8	9	6	7
User 4	8	8	5	8
User 5	6	8	6	7
Mean	7,4	8,4	6	7,8

Table 5 Evaluation of the control systems

### 7.4.5. Conclusions

The main conclusions obtained after the successful attainment of the objectives of this work are described below.

In this work, a platform based on VO of agents has been designed and developed to control an electric wheelchair from different external devices. The use of an opensource MAS as PANGEA, has allowed to benefit from the advantages of this paradigm for the analysis, design and implementation of complex systems where the data sources and data processing are distributed. PANGEA provides all the required infrastructure to easily design and deploy the MAS, gathering and processing data and communicating with the users. It also enhances the possibility of designing different data access forms which allow a non-centralized information processing, enhancing the scalability faculties of the system. The use of a MAS architecture based on PANGEA, has allowed to develop the case study allowing the interconnection of agents developed in different programming languages: Java for the smartphone application, C # for the tablet application and C in the wheelchair controller. PANGEA is characterized for being an architecture that allows the connection of different

devices in a simple and fast way, providing the researchers with visual tools that allow to implement case studies expeditiously. The use of this MAS has allowed the balancing and distribution of tasks dynamically in different VO interacting with each other through FIPA-ACL. The communication protocol used for the interconnection between the different devices is based on the IRC protocol (Internet Relay Chat Protocol - RFC1459), which allows a higher efficiency regarding battery consumption, since it is a lighter and more flexible protocol compared to a SOAP architecture.

To perform the control and act on the physical layer of hardware, a printed circuit control board has been designed and manufactured. This board acts as a gateway between the developed user applications and the wheelchair. This hardware is independent of the wheelchair manufacturers, which allows this solution to be tested on any model and manufacturer. The interface allows different external devices to be connected depending on the degree of user mobility. This case study has been validated with three external interfaces (voice, smartphone and an EEG device). It is important to remark that the development cost of the interface is less than \$ 120, as it was intended at the beginning, so that it could be financed by potential end users. The final application that allows to move a wheelchair through brain stimuli was the interface that attracted the most attention. From a more technical point of view, this control interface allows users to make changes in direction quickly, through visual support or through abstract concepts, with an initial delay of 2 seconds and sampling every 0.5 seconds. To calibrate the interface, it is enough to do a small training of 40 seconds of duration, which allows the platform to be much more efficient and to present satisfactory results. Finally, we could verify that the current state of this work does not allow a user to move inside a closed space with reduced dimensions, rather it intends to be a proof of concept that allows a person suffering from some type of motor problem to move in an open space.

Having not opted for an RSF for the development of the platform might have slowed down the development of the platform, since the MAS development platforms do not provide certain tools that RSF provide and could have been very useful in this work, such as robot interfaces and drivers, robotics algorithms or simulation and modeling tools. However, once the platform has been implemented and deployed, we consider that the use of VO speeds up and improves the incorporation of new control interfaces that combine the use of

sensors and artificial intelligence techniques. Many are the advantages of using VO, which allow to achieve more open and dynamic systems, gaining in flexibility, dynamism and openness, while maintaining the implicit advantages of using MAS, such as the system's heterogeneity, modularity, scalability, parallelism and flexibility capabilities or its robustness against faults.

Despite of the fact that the platform can be easily implemented in any conventional wheelchair, the emergence of initiatives such as the one presented in this work will not reach relevance enough if no impetus is given by wheelchair manufacturers. Nevertheless, this work can be very useful as a starting point for those researchers who require to modify of a conventional wheelchair to carry out their work. However, it will always require an additional effort at hardware level if there is no consensus in the standardization of the protocols with which to interact and control wheelchairs by all manufacturers.

Overall, we are satisfied with the results obtained in terms of the performance of the control methods. However, improvements can still be made at a general level. For example, the incorporation of more advanced systems in the collision system, such as the one proposed in (Rojas, Ponce, and Molina 2018) can be used, so that the experience of user control with any interface can be greatly improved. On the other hand, the evaluation of the results obtained could be more exhaustive in terms of control methods by increasing the number of attempts and users, but fundamentally incorporating in the case studies people with different disabilities to assess the adequacy of each one of the proposals to each of the disabilities.

## 7.5. Conclusions

Due to the growing concern of society for the integration of disabled people, we can see that a large number of initiatives that try to support this group have emerged. These initiatives follow different approaches, through prevention, medical and psychological care, rehabilitation, education, orientation or labor integration among others. In this work we have presented a set of tools whose objective is to facilitate social integration in the field of mobility. In this context, we can determine which is the degree of accessibility of the environments regarding the types of users (in relation to their capacities,

which determine the degree of incidence of the different barriers in each case) and the types of difficulties can be found in the environment. Therefore, in this work we have studied different alternatives that try to offer an improvement in accessibility, both in the support of the users' capacities, and in the reduction of the difficulties imposed by the environments.

First, the design and implementation of a tool that is based on the combined use of agent-based social simulation together with three-dimensional representations is presented. The use of both techniques makes it possible to carry out modeling and simulations of complex and changing environments in a very close way to the reality. The main objective of this tool is to detect which difficulties users may face within an environment in order to adapt it to their needs. To streamline the design of the three-dimensional environments in which the simulations are carried out, an editing tool is incorporated, which allows rapid modeling of interior environments through the use of specially designed models for its rapid deployment. The defined simulation method is integrated into a multi-agent architecture based on virtual organizations of agents, which are used for the representation of people and different elements involved in the simulation. The implementation of these agents is based on the BDI model. This model defines deliberative agents whose use is appropriate in dynamic environments and in real-time applications, which provide an intuitive representation and a wide variety of possible implementations.

On the other hand, the proliferation of different wheelchair control systems that make use of data from sensor networks and AI techniques, requires platforms that facilitate and automate the data collection and analysis tasks. In this context, an architecture focused on offering fast integration of different wheelchair control systems where diverse computing elements work in a distributed way is presented. This architecture is based on an adaptive model based on VO that allow the integration of intelligent devices for the processing of information. This is supported by the use of a hardware device that acts as a central node for the management of wheelchair control. In addition, thanks to the application of different AI techniques to perform a real-time data analysis, it has been possible to develop different control interfaces.

There are many future work lines related to the developed work. Some of the open lines have been mentioned throughout the work. Next, the most relevant ones are collected.

In relation to the agent based social simulation tool for the integration of disabled people:

- Include the possibility of making an abstraction of the building model through ontologies, so the information of the environment does not only exist in the three-dimensional environment, but the agent platform also has knowledge of it.
- Allow the development of different three-dimensional environments, not only limited to representation of buildings.
- Improve the extraction of knowledge by improving the algorithms that intervene in the detection of the environment accessibility barriers, offering real-time statistics and a report generation services.
- Include additional functionality to the visualization, so that there are alternatives when extracting information about the processes, such as graphs that show how the relationships between those agents interacting with each other or the generation of heat maps that show which are the routes taken by each worker in the three-dimensional environment.

Regarding the intelligent interface for the control of wheelchairs:

- Investigate on new obstacle detection systems, not just based on avoiding collisions, but as an active element that intervenes in the modification of the wheelchair's trajectory. In this way, the user experience can be improved with any of the control interfaces incorporated in the system.
- Carry out a more exhaustive evaluation in relation to the control methods developed, increasing the number of tests and users.

- Validate the adequacy of the control systems developed with people with different disabilities, to check which are the most appropriate for each case.
- Perform integration tests of the hardware control device on other wheelchair models to check their interoperability.



---

# CAPÍTULO VIII

---

## Referencias



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA



- Aliabadi, Danial Esmaeili, Murat Kaya, and Guvenc Sahin. 2017. "Competition, Risk and Learning in Electricity Markets: An Agent-Based Simulation Study." *Applied Energy* 195. Elsevier: 1000–1011.
- Almeida, Sandro Jerônimo De, Ricardo Poley Martins Ferreira, Álvaro E Eiras, Robin P Obermayr, and Martin Geier. 2010. "Multi-Agent Modeling and Simulation of an Aedes Aegypti Mosquito Population." *Environmental Modelling & Software* 25 (12). Elsevier: 1490–1507.
- Alonso, Fernando, A Roca, M Calle, J M Pazos, M Garc'ia, A Sanz, and P Vega. 2002. "Libro Verde. La Accesibilidad En España. Diagnóstico Y Bases Para Un Plan Integral de Supresión de Barreras." *Madrid: Instituto de Migraciones Y Servicios Sociales, IMSERSO* 339.
- Anderson, James H, Joni A Downs, Rebecca Loraamm, and Steven Reader. 2017. "Agent-Based Simulation of Muscovy Duck Movements Using Observed Habitat Transition and Distance Frequencies." *Computers, Environment and Urban Systems* 61. Elsevier: 49–55.
- Ando, Noriaki, Takashi Suehiro, and Tetsuo Kotoku. 2008. "A Software Platform for Component Based Rt-System Development: Openrtm-Aist." In *International Conference on Simulation, Modeling, and Programming for Autonomous Robots*, 87–98.
- Ardiny, Hadi, Stefan Witwicki, and Francesco Mondada. 2015. "Are Autonomous Mobile Robots Able to Take over Construction? A Review." *International Journal of Robotics, Theory and Applications* 4 (3). KN Toosi University of Technology: 10–21.
- Argente, Estefan'ia, Vicente Julian, and Vicent Botti. 2008. "MAS Modeling Based on Organizations." In *International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering*, 16–30.
- Argente Villaplana, Estefanía. 2008. "Gormas: Guías Para El Desarrollo de Sistemas Multiagente Abiertos Basados En Organizaciones." doi:10.4995/Thesis/10251/2481.
- Arjona, G. 2015. "La Accesibilidad Y El Diseño Universal Entendido Por Todos. De Cómo Stephen Hawking Viajó Por El Espacio." *La Ciudad Accesible*.
- Axtell, R. L., J. M. Epstein, J. S. Dean, G. J. Gumerman, A. C. Swedlund, J. Harburger, S. Chakravarty, R. Hammond, J. Parker, and M. Parker. 2002. "Population Growth and Collapse in a Multiagent Model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99 (Supplement 3): 7275–79. doi:10.1073/pnas.092080799.
- Axtell, Robert. 2000. "Why Agents?: On the Varied Motivations for Agent Computing in the Social Sciences." Center on Social and Economic Dynamics Brookings Institution.
- Bajo, Javier, Juan A Fraile, Belén Pérez-Lancho, and Juan M Corchado. 2010. "The THOMAS Architecture in Home Care Scenarios: A Case Study." *Expert Systems with Applications* 37 (5). Elsevier: 3986–99.

- Balmer, Michael, Marcel Rieser, Konrad Meister, David Charypar, Nicolas Lefebvre, and Kai Nagel. 2009. "MATSim-T: Architecture and Simulation Times." In *Multi-Agent Systems for Traffic and Transportation Engineering*, 57–78. IGI Global.
- Barbosa Filho, Hugo S, Fernando B Lima Neto, and Wilson Fusco. 2013. "Migration, Communication and Social Networks--an Agent-Based Social Simulation." In *Complex Networks*, 67–74. Springer.
- Barthélemy, Johan, and Timoteo Carletti. 2017. "An Adaptive Agent-Based Approach to Traffic Simulation." *Transportation Research Procedia* 25. Elsevier: 1238–48.
- Bellifemine, Fabio, Agostino Poggi, and Giovanni Rimassa. 1999. "JADE, A FIPA-Compliant Agent Framework." In .
- Benito Fernández, Jesús de, Javier García Milà, José Antonio Juncà Ubierna, Carlos de Rojas Torralba, and Juan José Santos Guerras. 2011. "Manual Para Un Entorno Accesible." Real Patronato sobre discapacidad.
- Berjón, R, M Mateos, I Muriel, and Gabriel Villarrubia. 2012. "Automatic Route Playback for Powered Wheelchairs." *Highlights on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems*. Springer, 273–80.
- Bhaduri, Budhendra L, Edward A Bright, Amy N Rose, Cheng Liu, Marie L Urban, and Robert N Stewart. 2014. "Data Driven Approach for High Resolution Population Distribution and Dynamics Models." In *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*, 842–50.
- Bisset, Keith R, and Madhav V Marathe. 2015. "An Interactive Epidemiological Modeling Environment Using High Performance Computing for Enhanced User-Productivity." *ACM Transactions on Management Information Systems* 5 (212): 1–19.
- Boissier, Olivier, Jomi Fred Hübner, and Jaime Simão Sichman. 2006. "Organization Oriented Programming: From Closed to Open Organizations." In *ESAW*, 4457:86–105.
- Bonarini, Andrea, Simone Ceriani, Giulio Fontana, and Matteo Matteucci. 2013. "On the Development of a Multi-Modal Autonomous Wheelchair." In *Handbook of Research on ICTs for Human-Centered Healthcare and Social Care Services*, 727–48. IGI Global.
- Borshchev, Andrei, and Alexei Filippov. 2004. "From System Dynamics and Discrete Event to Practical Agent Based Modeling: Reasons, Techniques, Tools." *22nd International Conference of the System Dynamics Society, 25-29 July 2004*, 45.
- Bradshaw, Jeffrey M. 1996. *Software Agents*. The MIT Press.
- Bratman, Michael. 1987. "Intention, Plans, and Practical Reason."
- Breiman, Leo. 1996. "Bagging Predictors." *Machine Learning* 24: 123–40.
- . 2001. "Random Forests." *Machine Learning* 45 (1): 5–32.

doi:10.1023/a:1010933404324.

- Brenner, W, H Wittig, and R Zarnekow. 1998. "Intelligent Software Agents: Foundations and Applications. Secaucus." NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc.
- Brunk, Clifford A, and Michael J Pazzani. 1991. "An Investigation of Noise-Tolerant Relational Concept Learning Algorithms." In *Machine Learning Proceedings 1991*, 389–93. Elsevier.
- Bruyninckx, Herman. 2001. "Open Robot Control Software: The OROCOS Project." In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, 3:2523–28.
- Calisi, Daniele, Andrea Censi, Luca Iocchi, and Daniele Nardi. 2008. "OpenRDK: A Modular Framework for Robotic Software Development." In *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, 1872–77.
- Camillen, Francesca, Salvatore Caprilli, Cesare Garofalo, Matteo Ignaccolo, Giuseppe Inturri, Alessandro Pluchino, Andrea Rapisarda, and Salvatore Tudisco. 2009. "Multi Agent Simulation of Pedestrian Behavior in Closed Spatial Environments." In *Science and Technology for Humanity (TIC-STH), 2009 IEEE Toronto International Conference*, 375–80.
- Cena, Cecilia Garcia, Pedro F Cardenas, Roque Saltaren Pazmino, Lisandro Puglisi, and Rafael Aracil Santonja. 2013. "A Cooperative Multi-Agent Robotics System: Design and Modelling." *Expert Systems with Applications* 40 (12). Elsevier: 4737–48.
- Cohen, William W. 1995. "Fast Effective Rule Induction." In *Machine Learning Proceedings 1995*, 115–23. Elsevier.
- Collett, Toby H J, Bruce A MacDonald, and Brian P Gerkey. 2005. "Player 2.0: Toward a Practical Robot Programming Framework." In *Proceedings of the Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA 2005)*, 145.
- Cooper, Gregory F, and Edward Herskovits. 1992. "A Bayesian Method for the Induction of Probabilistic Networks from Data." *Machine Learning* 9 (4). Springer: 309–47.
- Corchado, Juan M., Emilio S. Corchado, Jim Aiken, Colin Fyfe, Florentino Fernandez, and Manuel Gonzalez. 2003. "Maximum Likelihood Hebbian Learning Based Retrieval Method for CBR Systems." In *Case-Based Reasoning Research and Development*, 107–21. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/3-540-45006-8\_11.
- Craig, Daniel Ashley, and H T Nguyen. 2007. "Adaptive EEG Thought Pattern Classifier for Advanced Wheelchair Control." In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2007. EMBS 2007. 29th Annual International Conference of the IEEE*, 2544–47.
- "CriticAI Documentation." 2017. Accessed September 22.

- <http://www.critterai.org/projects/cainav/doc/>.
- Crooks, Andrew T. 2006. "Exploring Cities Using Agent-Based Models and GIS." Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL), UCL (University College London), Centre for Advanced Spatial Analysis (UCL).
- Cvetković, Dragan, and Ian Parmee. 2002. "Agent-Based Support within an Interactive Evolutionary Design System." *AI EDAM* 16 (5). Cambridge University Press: 331–42.
- Daft, Richard. 1998. "Teoría Y Diseño Organizacional México: Internacional Thomson Edition."
- Das, Ramesh Chandra. 2016. *Handbook of Research on Global Indicators of Economic and Political Convergence*. IGI Global.
- Davidsson, Paul. 2000. "Multi Agent Based Simulation: Beyond Social Simulation." In , 97–107. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/3-540-44561-7\_7.
- . 2002. "Agent Based Social Simulation: A Computer Science View." JASSS. <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/5/1/7.html>.
- Davidsson, Paul, and Stefan Johansson. 2006. "On the Potential of Norm-Governed Behavior in Different Categories of Artificial Societies." *Computational & Mathematical Organization Theory* 12 (2–3). Springer: 169–80.
- DeLoach, Scott A. 2001. "Analysis and Design Using MaSE and agentTool."
- . 2004. "The Mase Methodology." In *Methodologies and Software Engineering for Agent Systems*, 107–25. Springer.
- DeLoach, Scott A., and Juan C. Garcia-Ojeda. 2014. "The O-MASE Methodology." In *Handbook on Agent-Oriented Design Processes*, 253–85. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-39975-6\_9.
- Devia, Nelson, and Richard Webe. 2013. "Generating Crime Data Using Agent-Based Simulation." *Computers, Environment and Urban Systems* 42 (November). Pergamon: 26–41. doi:10.1016/J.COMPENVURBSYS.2013.09.001.
- Dignum, M V. 2004. *A Model for Organizational Interaction: Based on Agents, Founded in Logic*. SIKS.
- Dignum, Virginia. 2009. *Handbook of Research on Multi-Agent Systems: Semantics and Dynamics of Organizational Models*. Information Science Reference. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=-UMAEGsMvfYC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Handbook+of+research+on+multi-agent+systems:+semantics+and+dynamics+of+organizational+models+&ots=CNXGF38wmd&sig=BmeCE3UoFX6Vv922qe0Y4cGJAeU#v=onepage&q=Handbook+of+research+on+multi>

- Dijkstra, Edsger W. 1959. "A Note on Two Problems in Connexion with Graphs." *Numerische Mathematik* 1 (1). Springer: 269–71.
- Doran, Jim E, SRJN Franklin, Nicholas R Jennings, and Timothy J Norman. 1997. "On Cooperation in Multi-Agent Systems." *The Knowledge Engineering Review* 12 (3). Cambridge University Press: 309–14.
- Duda, Richard O, and Peter E Hart. 1973. "Pattern Classification and Scene Analysis." *A Wiley-Interscience Publication, New York: Wiley, 1973.*
- Dyke Parunak, H Van, and James Odell. 2001. "Representing Social Structures in UML." In *Proceedings of the Fifth International Conference on Autonomous Agents*, 100–101.
- E. Schumer, Charles, and U.S. Congress. 2015. "The Disability Integration Act."
- E.Dicianno, Brad, Rory A.Cooper, and John Coltellaro. 2010. "Joystick Control for Powered Mobility: Current State of Technology and Future Directions." *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics of North America* 21 (1). Elsevier: 79–86. doi:10.1016/J.PMR.2009.07.013.
- Erickson, Thomas, and Wendy A Kellogg. 2000. "Social Translucence: An Approach to Designing Systems That Support Social Processes." *ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI)* 7 (1). ACM: 59–83.
- Esteva, Marc, Juan A Rodriguez-Aguilar, Carles Sierra, Pere Garcia, and Josep Llu`is Arcos. 2001. "On the Formal Specifications of Electronic Institutions." *AgentLink* 1991. Springer: 126–47.
- European Comission. 2010. "European Disability Strategy 2010-2020: A Renewed Commitment to a Barrier-Free Europe."
- . 2015. "The 2015 Ageing Report."
- Faria, Br`igida Mónica, Lu`is Miguel Ferreira, Lu`is Paulo Reis, Nuno Lau, and Marcelo Petry. 2013. "Intelligent Wheelchair Manual Control Methods." In *Portuguese Conference on Artificial Intelligence*, 271–82.
- Fehr, Linda, W Edwin Langbein, and Steven B Skaar. 2000. "Adequacy of Power Wheelchair Control Interfaces for Persons with Severe Disabilities: A Clinical Survey." *Journal of Rehabilitation Research and Development* 37 (3). Superintendent of Documents: 353.
- Ferber, Jacques, Olivier Gutknecht, and Fabien Michel. 2003. "From Agents to Organizations: An Organizational View of Multi-Agent Systems." In *International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering*, 214–30.
- "Finger Steering Control DX-RJM-VIC MANUAL." 2017. Accessed October 20. <https://dynamiccontrols.com/en/downloads/dx/obsolete-dx-product/65-finger-joystick-installation-manual/file>.
- Foner, Leonard. 1993. "What's an Agent, Anyway? A Sociological Case Study."

- Foster, Ian, Carl Kesselman, and Steven Tuecke. 2001. "The Anatomy of the Grid: Enabling Scalable Virtual Organizations." *The International Journal of High Performance Computing Applications* 15 (3). Sage Publications/Sage CA: Thousand Oaks, CA: 200–222. doi:10.1177/109434200101500302.
- Franklin, Stan, and Art Graesser. 1996. "Is It an Agent, or Just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents." In *International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*, 21–35.
- Friedman, Nir, Dan Geiger, and Moises Goldszmidt. 1997. "Bayesian Network Classifiers." *Machine Learning* 29 (2–3). Springer: 131–63.
- Fundación ONCE, and Fundación Arquitectura COAM. 2011. "Accesibilidad Universal Y Diseño Para Todos." *Arquitectura Y Urbanismo. Madrid: Artes Gráficas Palermo*.
- Fürnkranz, Johannes, and Gerhard Widmer. 1994. "Incremental Reduced Error Pruning." In *Machine Learning Proceedings 1994*, 70–77. Elsevier.
- Gajwani, Poonam S, and Sharda A Chhabria. 2010. "Eye Motion Tracking for Wheelchair Control." *International Journal of Information Technology* 2 (2): 185–87.
- Galán, Ferran, Marnix Nuttin, Eileen Lew, Pierre W Ferrez, Gerolf Vanacker, Johan Philips, and J del R Millán. 2008. "A Brain-Actuated Wheelchair: Asynchronous and Non-Invasive Brain-Computer Interfaces for Continuous Control of Robots." *Clinical Neurophysiology* 119 (9). Elsevier: 2159–69.
- García, Elena, Sara Rodríguez, Beatriz Martín, Carolina Zato, and Belén Pérez. 2011. "MISIA: Middleware Infrastructure to Simulate Intelligent Agents." In , 107–16. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-19934-9\_14.
- Gasser, Les. 1992. "An Overview of DAI." *Distributed Artificial Intelligence: Theory and Praxis* 9 (9–29): 28.
- Gento Palacios, Samuel, Isabel Ma Ferrándiz Vindel, and Julián Palacios Sánchez. 2010. *Tratamiento Educativo de La Diversidad de Tipo Motórico*. Editorial UNED.
- Gilbert, Nigel, and Pietro Terna. 2000. "How to Build and Use Agent-Based Models in Social Science." *Mind & Society* 1 (1). Springer-Verlag: 57–72. doi:10.1007/BF02512229.
- Giunchiglia, Fausto, John Mylopoulos, and Anna Perini. 2002. "The Tropos Software Development Methodology: Processes, Models and Diagrams." In *Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Part 1*, 35–36.
- Glavic, Mevludin. 2006. "Agents and Multi-Agent Systems: A Short Introduction for Power Engineers."
- Gong, Xiaoguang, and Renbin Xiao. 2007. "Research on Multi-Agent

- Simulation of Epidemic News Spread Characteristics.” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 10 (3): 1.
- Google. 2017. “Consumer Barometer.” Accessed November 8. <https://www.consumerbarometer.com/en/>.
- Gundogdu, Koksai, Sumeyye Bayrakdar, and Ibrahim Yucedag. 2017. “Developing and Modeling of Voice Control System for Prosthetic Robot Arm in Medical Systems.” *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, April. Elsevier. doi:10.1016/J.JKSUCI.2017.04.005.
- Hall Eibe Frank, Mark, Geoffrey Holmes, Bernhard Pfahringer Peter Reutemann, and Ian H Witten. 2009. “The WEKA Data Mining Software : An Update.” *ACM SIGKDD Explorations Newsletter* 11 (1): 10–18.
- Haman, Igor Tchappi, Vivient Corneille Kamla, Stéphane Galland, and Jean Claude Kamgang. 2017. “Towards an Multilevel Agent-Based Model for Traffic Simulation.” *Procedia Computer Science* 109. Elsevier: 887–92.
- Hamet, Pavel. 2017. “Artificial Intelligence in Medicine.” *Metabolism* 69 (April). W.B. Saunders: S36–40. doi:10.1016/J.METABOL.2017.01.011.
- Han, Tianfang, Chuntao Zhang, Yan Sun, and Xiaomin Hu. 2017. “Study on Environment-Economy-Society Relationship Model of Liaohe River Basin Based on Multi-Agent Simulation.” *Ecological Modelling* 359. Elsevier: 135–45.
- Hart, Peter E, Nils J Nilsson, and Bertram Raphael. 1968. “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths.” *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics* 4 (2). IEEE: 100–107.
- Hashimoto, Masafumi, Kazuhiko Takahashi, and Masanari Shimada. 2009. “Wheelchair Control Using an EOG-and EMG-Based Gesture Interface.” In *Advanced Intelligent Mechatronics, 2009. AIM 2009. IEEE/ASME International Conference on*, 1212–17.
- Hawe, Glenn I, Graham Coates, Duncan T Wilson, and Roger S Crouch. 2012. “Agent-Based Simulation for Large-Scale Emergency Response: A Survey of Usage and Implementation.” *ACM Computing Surveys (CSUR)* 45 (1). ACM: 8.
- Heitmann, J., C. Kohn, and D. Stefanov. 2011. “Robotic Wheelchair Control Interface Based on Headrest Pressure Measurement.” In *2011 IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2011:1–6. IEEE. doi:10.1109/ICORR.2011.5975482.
- Herweg, Andreas, Julian Gutzeit, Sonja Kleih, and Andrea Kübler. 2016. “Wheelchair Control by Elderly Participants in a Virtual Environment with a Brain-Computer Interface (BCI) and Tactile Stimulation.” *Biological Psychology* 121. Elsevier: 117–24.
- Hodge, Billy J. 1996. *Organization Theory: A Strategic Approach*. Pearson College Division.

- Hörl, Sebastian. 2017. "Agent-Based Simulation of Autonomous Taxi Services with Dynamic Demand Responses." *Procedia Computer Science* 109. Elsevier: 899–904.
- Immonen, Eero. 2017. "Simple Agent-Based Dynamical System Models for Efficient Financial Markets: Theory and Examples." *Journal of Mathematical Economics* 69. Elsevier: 38–53.
- Invacare. 2017a. "Invacare Field Reference Guide." Accessed November 10. [https://www.invacare.com/doc\\_files/1141471.pdf](https://www.invacare.com/doc_files/1141471.pdf).
- . 2017b. "Invacare LiNX." Accessed November 10. <http://www.invacare.es/es/electrónica-linx-ma-p39w26um33es>.
- Iñigo-Blasco, Pablo, Fernando Diaz-Del-Rio, Carmen Romero-Tertero, Daniel Cagigas-Muñiz, and Saturnino Vicente-Diaz. 2012. "Robotics Software Frameworks for Multi-Agent Robotic Systems Development." *Robotics and Autonomous Systems* 60: 803–21. doi:10.1016/j.robot.2012.02.004.
- Kamara-Esteban, Oihane, Gorka Azkune, Ander Pijoan, Cruz E Borges, Ainhoa Alonso-Vicario, and Diego López-de-Ipiña. 2017. "MASSHA: An Agent-Based Approach for Human Activity Simulation in Intelligent Environments." *Pervasive and Mobile Computing* 40. Elsevier: 279–300.
- Kolp, Manuel, Paolo Giorgini, and John Mylopoulos. 2006. "Multi-Agent Architectures as Organizational Structures." *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 13 (1). Springer: 3–25.
- Kumar, Satish, Sandeep Kumar, and others. 2015. "Design and Development of Head Motion Controlled Wheelchair." *International Journal of Advances in Engineering & Technology* 8 (5). IAET Publishing Company: 816.
- Kundu, Ananda Sankar, Oishee Mazumder, Prasanna Kumar Lenka, and Subhasis Bhaumik. 2017. "Hand Gesture Recognition Based Omnidirectional Wheelchair Control Using IMU and EMG Sensors." *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, October. Springer Netherlands, 1–13. doi:10.1007/s10846-017-0725-0.
- Lämmel, Gregor, Dominik Grether, and Kai Nagel. 2010. "The Representation and Implementation of Time-Dependent Inundation in Large-Scale Microscopic Evacuation Simulations." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 18 (1). Elsevier: 84–98.
- Leeb, Robert, Doron Friedman, Gernot R Müller-Putz, Reinhold Scherer, Mel Slater, and Gert Pfurtscheller. 2007. "Self-Paced (Asynchronous) BCI Control of a Wheelchair in Virtual Environments: A Case Study with a Tetraplegic." *Computational Intelligence and Neuroscience* 2007. Hindawi Publishing Corporation.
- Lei, Shuangshuang, and Zhijun Li. 2013. "Fusing Visual Tracking and Navigation for Autonomous Control of An Intelligent Wheelchair." *IFAC Proceedings Volumes* 46 (20). Elsevier: 549–54.
- Leishman, Frédéric, Odile Horn, and Guy Bourhis. 2010. "Smart Wheelchair

- Control through a Deictic Approach.” *Robotics and Autonomous Systems* 58 (10). Elsevier: 1149–58.
- Leishman, Frederic, Vincent Monfort, Odile Horn, and Guy Bourhis. 2014. “Driving Assistance by Deictic Control for a Smart Wheelchair: The Assessment Issue.” *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 44 (1): 66–77. doi:10.1109/TSMC.2013.2287792.
- Leo, Breiman, Jerome H Friedman, Richard A Olshen, and Charles J Stone. 1984. “Classification and Regression Trees.” *Wadsworth International Group*.
- Leo, M., G. Medioni, M. Trivedi, T. Kanade, and G.M. Farinella. 2017. “Computer Vision for Assistive Technologies.” *Computer Vision and Image Understanding* 154 (January). Academic Press: 1–15. doi:10.1016/J.CVIU.2016.09.001.
- Li, Xiaochen, Wenji Mao, Daniel Zeng, and Fei-Yue Wang. 2008. “Agent-Based Social Simulation and Modeling in Social Computing.” In *International Conference on Intelligence and Security Informatics*, 401–12.
- Lind, Jürgen. 2001. *Iterative Software Engineering for Multiagent Systems: The MASSIVE Method*. Springer-Verlag.
- Luke, Sean, Claudio Cioffi-Revilla, Liviu Panait, and Keith Sullivan. 2004. “Mason: A New Multi-Agent Simulation Toolkit.” In *Proceedings of the 2004 Swarmfest Workshop*, 8:316–27.
- Lytinen, Steven L, and Steven F Railsback. 2012. “The Evolution of Agent-Based Simulation Platforms: A Review of NetLogo 5.0 and ReLogo.” In *Proceedings of the Fourth International Symposium on Agent-Based Modeling and Simulation*, 19.
- Maes, Pattie. 1990. *Designing Autonomous Agents: Theory and Practice from Biology to Engineering and Back*. MIT press.
- . 1995. “Artificial Life Meets Entertainment: Lifelike Autonomous Agents.” *Communications of the ACM* 38 (11). ACM: 108–13.
- Magitek. 2017. “Magitek - Products.” Accessed November 10. <http://www.magitek.com/products/>.
- Marconi, L., C. Melchiorri, M. Beetz, D. Pangercic, R. Siegwart, S. Leutenegger, R. Carloni, et al. 2012. “The SHERPA Project: Smart Collaboration between Humans and Ground-Aerial Robots for Improving Rescuing Activities in Alpine Environments.” In *2012 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, 1–4. IEEE. doi:10.1109/SSRR.2012.6523905.
- Marietto, Maria Bruno, Nuno David, Jaime Simão Sichman, and Helder Coelho. 2003. “A Classification of Paradigmatic Models for Agent-Based Social Simulation.” In *MABS*, 193–208.
- Merdan, Munir, Thomas Moser, Pavel Vrba, and Stefan Biffl. 2011. “Investigating the Robustness of Re-Scheduling Policies with Multi-Agent

- System Simulation.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 55 (1–4). Springer: 355–67.
- Mishra, Saswat, James J S Norton, Yongkuk Lee, Dong Sup Lee, Nicolas Agee, Yanfei Chen, Youngjae Chun, and Woon-Hong Yeo. 2017. “Soft, Conformal Bioelectronics for a Wireless Human-Wheelchair Interface.” *Biosensors and Bioelectronics* 91. Elsevier: 796–803.
- Miyamoto, Shugo, Takamasa Koshizen, Takanari Matsumoto, Hiroaki Kawase, Makoto Higuchi, Yasuo Torimoto, Koji Uno, and Fumiaki Sato. 2018. “An Application Using a BLE Beacon Model Combined with Fully Autonomous Wheelchair Control.” In , 323–35. Springer, Cham. doi:10.1007/978-3-319-61566-0\_30.
- Mo-Vis. 2017. “Mo-Vis All-Round Joystick P002-71.” Accessed November 9. <http://www.mo-vis.com/en/products/mo-vis-products/all-round-joystick>.
- Mondéjar, Rubén, Jordi Pujol, Pedro García, and Carles Pairot. 2006. “Sistemas Multi-Agente En Entornos P2P.” *Department of Computer Science and Mathematics, Tarragona, España: Universitat Rovira I Virgili*.
- Montagna, Sara, and Andrea Omicini. 2017. “Agent-Based Modeling for the Self-Management of Chronic Diseases: An Exploratory Study.” *SIMULATION* 93 (9). SAGE PublicationsSage UK: London, England: 781–93. doi:10.1177/0037549717712605.
- Montes, Guillermo. 2012. “Using Artificial Societies to Understand the Impact of Teacher Student Match on Academic Performance: The Case of Same Race Effects.” *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 15 (4): 8.
- Nagel, Kai, and Marcus Rickert. 2001. “Parallel Implementation of the TRANSIMS Micro-Simulation.” *Parallel Computing* 27 (12). Elsevier: 1611–39.
- Navarro, Laurent, Fabien Flacher, and Vincent Corruble. 2011. “Dynamic Level of Detail for Large Scale Agent-Based Urban Simulations.” In *The 10th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 2*, 701–8.
- Newell, Allen, Herbert Alexander Simon, and others. 1972. *Human Problem Solving*. Vol. 104. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ.
- Nguyen, G, T Tung Dang, L Hluchy, Z Balogh, M Laclavik, and I Budinska. 2002. “Agent Platform Evaluation and Comparison.” *Rapport Technique, Institute of Informatics, Bratislava, Slovakia*.
- North, Michael J, Thomas R Howe, Nick T Collier, and Jerry R Vos. 2005. “The Repast Symphony Runtime System.” In *Proceedings of the Agent 2005 Conference on Generative Social Processes, Models, and Mechanisms*, 10:13–15.

- Nwana, Hyacinth S. 1996. "Software Agents: An Overview." *The Knowledge Engineering Review* 11 (3). Cambridge University Press: 205–44.
- O'Brien, Paul D, and Richard C Nicol. 1998. "FIPA—towards a Standard for Software Agents." *BT Technology Journal* 16 (3). Springer: 51–59.
- O'Brien, R. 1998. "An Overview of the Methodological Approach of Action Research." *Faculty of Information Studies, University of Toronto*. <http://web.net/~robrien/papers/xxarfinal.htm>.
- Oktaba, Hanna, and Guadalupe Ibarguengoitia González. 1998. "Software Process Modeled with Objects: Static View." *Revista Computación y Sistemas*; Vol. 1 No. 4.
- Orhan, Ali. 2011. "AGENT BASED SYSTEMS: THEORETICAL AND PRACTICAL GUIDE." *Journal of Yasar University* 1 (1): 95–120.
- Ottobock. 2017. "Ottobock Joystick Mini Abatible." Accessed November 10. <http://www.ottobock.es/movilidad/sillas-de-ruedas-electronicas-y-mandos-especiales/mandos-especiales/>.
- Padgham, Lin, and Michael Winikoff. 2002. "Prometheus: A Methodology for Developing Intelligent Agents." In *Proceedings of the First International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: Part 1*, 37–38.
- Parker, Jon, and Joshua M Epstein. 2011. "A Distributed Platform for Global-Scale Agent-Based Models of Disease Transmission." *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)* 22 (1). ACM: 2.
- Pasteaua, François, Vishnu K.Narayanan, Marie Babel, and François Chaumette. 2016. "A Visual Servoing Approach for Autonomous Corridor Following and Doorway Passing in a Wheelchair." *Robotics and Autonomous Systems* 75 (January). North-Holland: 28–40. doi:10.1016/J.ROBOT.2014.10.017.
- Peiro, José M, Fernando Prieto Prieto, and Ana M Zornoza. 1993. "Nuevas Tecnologías Telemáticas Y Trabajo Grupal. Una Perspectiva Psicosocial." *Psicothema* 5 (Suplemento): 287–305.
- Peixoto, Nathalia, Hossein Ghaffari Nik, and Hamid Charkhkar. 2013. "Voice Controlled Wheelchairs: Fine Control by Humming." *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 112 (1). Elsevier: 156–65.
- Pelechano, Nuria, Jan M Allbeck, and Norman I Badler. 2007. "Controlling Individual Agents in High-Density Crowd Simulation." In *Proceedings of the 2007 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, 99–108.
- Permobil. 2017a. "Mini Joystick - Permobil." Accessed November 10. <https://permobilus.com/product/mini-joystick/>.
- . 2018b. "Permobil Head Array." Accessed June 15. [www.permobil.comwww.facebook.com/permobil](http://www.permobil.comwww.facebook.com/permobil).

- Platt, John C. 1999. "12 Fast Training of Support Vector Machines Using Sequential Minimal Optimization." *Advances in Kernel Methods*, 185–208.
- Ponce, Pedro, Arturo Molina, Rafael Mendoza, Marco Antonio Ruiz, David Gregory Monnard, and Luis David Fernández del Campo. 2010. "Intelligent Wheelchair and Virtual Training by LabVIEW." In , 422–35. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-16761-4\_37.
- Prieta, Fernando la, Sara Rodríguez, Juan M Corchado, and Javier Bajo. 2015. "Infrastructure to Simulate Intelligent Agents in Cloud Environments." *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 28 (1). IOS Press: 29–41.
- Purwanto, Djoko, Ronny Mardiyanto, and Kohei Arai. 2009. "Electric Wheelchair Control with Gaze Direction and Eye Blinking." *Artificial Life and Robotics* 14 (3). Springer Japan: 397–400. doi:10.1007/s10015-009-0694-x.
- Quaglia, Giuseppe, and Matteo Nisi. 2017. "Design of a Self-Leveling Cam Mechanism for a Stair Climbing Wheelchair." *Mechanism and Machine Theory* 112. Elsevier: 84–104.
- Quigley, Morgan, Ken Conley, Brian Gerkey, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Rob Wheeler, and Andrew Y Ng. 2009. "ROS: An Open-Source Robot Operating System." In *ICRA Workshop on Open Source Software*, 3:5.
- Quinlan, J Ross. 1986. "Induction of Decision Trees." *Machine Learning* 1 (1). Springer: 81–106.
- . 1993. *C4. 5: Programs for Machine Learning*. Elsevier.
- Railsback, Steven F., Steven L. Lytinen, and Stephen K. Jackson. 2006. "Agent-Based Simulation Platforms: Review and Development Recommendations." *SIMULATION* 82 (9). Sage Publications/Sage CA: Thousand Oaks, CA: 609–23. doi:10.1177/0037549706073695.
- Raney, Bryan, Andreas Voellmy, Nurhan Cetin, Milenko Vrtic, and Kai Nagel. 2002. "Towards a Microscopic Traffic Simulation of All of Switzerland." In *International Conference on Computational Science*, 371–80.
- Rao, Anand S, and Michael P Georgeff. 1992. "An Abstract Architecture for Rational Agents." *KR* 92: 439–49.
- Rao, Anand S, Michael P Georgeff, and others. 1995. "BDI Agents: From Theory to Practice." In *ICMAS*, 95:312–19.
- Robbins, Stephen P, Timothy A Judge, and others. 2001. "Organizational Behavior." New Jersey: Prentice Hall.
- Robertson, David, and Fausto Giunchiglia. 2013. "Programming the Social Computer." *Phil. Trans. R. Soc. A* 371 (1987). The Royal Society: 20120379.
- Rodríguez, Sara, Vicente Julián, Javier Bajo, Carlos Carrascosa, V Botti, and Juan M Corchado. 2011. "Agent-Based Virtual Organization Architecture."

- Engineering Applications of Artificial Intelligence* 24 (5). Elsevier: 895–910.
- Rogowski, Adam. 2012. “Industrially Oriented Voice Control System.” *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 28 (3). Pergamon: 303–15. doi:10.1016/J.RCIM.2011.09.010.
- Rojas, Mario, Pedro Ponce, and Arturo Molina. 2018. “A Fuzzy Logic Navigation Controller Implemented in Hardware for an Electric Wheelchair.” *International Journal of Advanced Robotic Systems* 15 (1). SAGE Publications: London, England: 1729881418755768. doi:10.1177/1729881418755768.
- Rubenstein, Michael, Adrian Cabrera, Justin Werfel, Golnaz Habibi, James McLurkin, and Radhika Nagpal. 2013. “Collective Transport of Complex Objects by Simple Robots: Theory and Experiments.” In *Proceedings of the 2013 International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 47–54.
- Ruíz-Serrano, A, R Posada-Gómez, A Martínez Sibaja, G Aguila Rodríguez, B E Gonzalez-Sanchez, and O O Sandoval-Gonzalez. 2013. “Development of a Dual Control System Applied to a Smart Wheelchair, Using Magnetic and Speech Control.” *Procedia Technology* 7. Elsevier: 158–65.
- Russell, Stuart, and Peter Norvig. 1995. “Artificial Intelligence: A Modern Approach.” *Artificial Intelligence. Prentice-Hall, Englewood Cliffs* 25: 27.
- Saeedi, Sajad, Michael Trentini, Mae Seto, and Howard Li. 2016. “Multiple-Robot Simultaneous Localization and Mapping: A Review.” *Journal of Field Robotics* 33 (1). Wiley-Blackwell: 3–46. doi:10.1002/rob.21620.
- Sawyer, R Keith. 2003. “Artificial Societies: Multiagent Systems and the Micro-Macro Link in Sociological Theory.” *Sociological Methods & Research* 31 (3). Sage Publications: 325–63.
- Scarcello, Francesco. 2018. “Artificial Intelligence.” In *Reference Module in Life Sciences*. Elsevier. doi:10.1016/B978-0-12-809633-8.20326-9.
- Schapire, Robert E., and Yoav Freund. 2012. *Boosting: Foundations and Algorithms*. MIT Press. <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=bISReLACtToC&oi=fnd&pg=PR7&dq=boosting+Freund+and+Schapire%27s&ots=l--c4n38H6&sig=WXL3vLWRyH3m-NyrXURvyHXwTX0#v=onepage&q=boosting Freund and Schapire's&f=false>.
- Škraba, Andrej, Radovan Stojanović, Anton Zupan, Andrej Koložvari, and Davorin Kofjač. 2015. “Speech-Controlled Cloud-Based Wheelchair Platform for Disabled Persons.” *Microprocessors and Microsystems* 39 (8). Elsevier: 819–28.
- Smith, Roger D. 1999. “Simulation: The Engine behind the Virtual World.” *GEN* 1. Citeseer: 72.

- SQLite. 2018. "SQLite Home Page."
- Stone, Peter, and Manuela Veloso. 2000. "Multiagent Systems: A Survey from a Machine Learning Perspective." *Autonomous Robots* 8 (3). Springer: 345–83.
- Story, Molly Follette. 1998. "Maximizing Usability: The Principles of Universal Design." *Assistive Technology* 10 (1). Taylor & Francis: 4–12.
- Su, Jiang, and Harry Zhang. 2006. "Full Bayesian Network Classifiers." In *Proceedings of the 23rd International Conference on Machine Learning*, 897–904.
- Suzumura, Toyotaro, and Hiroki Kanezashi. 2012. "Highly Scalable x10-Based Agent Simulation Platform and Its Application to Large-Scale Traffic Simulation." In *Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT), 2012 IEEE/ACM 16th International Symposium on*, 243–50.
- Switch-it. 2017a. "Switch-It Catalogue." Accessed November 10. <http://www.lindsrehab.com.au/tough-joystick.html>.
- . 2017b. "Switch-It TouchDrive 2." Accessed October 19. <http://www.sunrisemedical.com/power-wheelchairs/electronics/additional-proportional-drive-controls/switch-it-touchdrive2>.
- Sycara, Katia P. 1998. "Multiagent Systems." *AI Magazine* 19 (2): 79.
- Terán, Juan, Jose Aguilar, and Mariela Cerrada. 2017. "Integration in Industrial Automation Based on Multi-Agent Systems Using Cultural Algorithms for Optimizing the Coordination Mechanisms." *Computers in Industry* 91. Elsevier: 11–23.
- United Nations. 1994. "Standard Rules on the Equalization of Opportunities for Persons with Disabilities."
- "Unity Official Web Page." 2017. Accessed September 22. <https://unity3d.com/es/>.
- Vapnik, V.N. 1999. "An Overview of Statistical Learning Theory." *IEEE Transactions on Neural Networks* 10 (5): 988–99. doi:10.1109/72.788640.
- Vapnik, Vladimir. 1963. "Pattern Recognition Using Generalized Portrait Method." *Automation and Remote Control* 24: 774–80.
- Venkatramanan, Srinivasan, Bryan Lewis, Jiangzhuo Chen, Dave Higdon, Anil Vullikanti, and Madhav Marathe. 2017. "Using Data-Driven Agent-Based Models for Forecasting Emerging Infectious Diseases." *Epidemics*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.epidem.2017.02.010>.
- Waddell, Paul, and Gudmundur F Ulfarsson. 2004. "Introduction to Urban Simulation: Design and Development of Operational Models." In *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*, 203–36. Emerald Group Publishing Limited.

- Wagner, Neal, and Vikas Agrawal. 2014. "An Agent-Based Simulation System for Concert Venue Crowd Evacuation Modeling in the Presence of a Fire Disaster." *Expert Systems with Applications* 41 (6). Elsevier: 2807–15.
- Walker, L. 2009. "Implementing a Large Scale Social Simulation Using the New Zealand Bestgrid Computer Network: A Case Study." In *18th World IMACS/MODSIM Congress*, 1073–79.
- Wang, Fei-Yue, Kathleen M Carley, Daniel Zeng, and Wenji Mao. 2007. "Social Computing: From Social Informatics to Social Intelligence." *IEEE Intelligent Systems* 22 (2). IEEE.
- Wang, Jingchuan, Weidong Chen, and Wenlong Liao. 2013. "An Improved Localization and Navigation Method for Intelligent Wheelchair in Narrow and Crowded Environments." *IFAC Proceedings Volumes* 46 (13). Elsevier: 389–94.
- Wang, Ying, and Clarence W de Silva. 2010. "Sequential Q-Learning With Kalman Filtering for Multirobot Cooperative Transportation." *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 15 (2). IEEE: 261–68.
- Weiss, Gerhard. 1999. *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*. MIT press.
- Wooldridge, Michael, and Nicholas R Jennings. 1995. "Intelligent Agents: Theory and Practice." *The Knowledge Engineering Review* 10 (2). Cambridge University Press: 115–52.
- 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.
- World Health Organization. 2010. "Fact Sheet on Wheelchairs."
- Yeounggwang, Ji, Jihye Hwang, and Eun YiKim. 2013. "An Intelligent Wheelchair Using Situation Awareness and Obstacle Detection." *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 97 (November). Elsevier: 620–28. doi:10.1016/J.SBSPRO.2013.10.281.
- Yi, Zhang, Feng Xiaolin, and Luo Yuan. 2015. "Intelligent Wheelchair System Based on sEMG and Head Gesture." *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications* 22 (2). Elsevier: 7480–95.
- Zambonelli, Franco. 2001. "Abstractions and Infrastructures for the Design and Development of Mobile Agent Organizations." In *International Workshop on Agent-Oriented Software Engineering*, 245–62.
- Zambonelli, Franco, Nicholas R Jennings, and Michael Wooldridge. 2003. "Developing Multiagent Systems: The Gaia Methodology." *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology (TOSEM)* 12 (3). ACM: 317–70.
- Zato, Carolina, Gabriel Villarrubia, Alejandro Sánchez, Ignasi Barri, Edgar Rubión, Alicia Fernández, Carlos Rebate, et al. 2012. "PANGEA – Platform

- for Automatic coNstruction of orGanizations of intElligent Agents.” In , 229–39. Springer, Berlin, Heidelberg. doi:10.1007/978-3-642-28765-7\_27.
- Zhang, Lei, Gang-Len Chang, Shanjiang Zhu, Chenfeng Xiong, Longyuan Du, Mostafa Mollanejad, Nathan Hopper, and Subrat Mahapatra. 2012. “Integrating an Agent-Based Travel Behavior Model with Large-Scale Microscopic Traffic Simulation for Corridor-Level and Subarea Transportation Operations and Planning Applications.” *Journal of Urban Planning and Development* 139 (2). American Society of Civil Engineers: 94–103.
- Zhang, Lun, Wenchen Yang, Jiamei Wang, and Qian Rao. 2013. “Large-Scale Agent-Based Transport Simulation in Shanghai, China.” *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 2399. Transportation Research Board of the National Academies: 34–43.
- Zhao, Yunjie, and Adel W Sadek. 2012. “Large-Scale Agent-Based Traffic Micro-Simulation: Experiences with Model Refinement, Calibration, Validation and Application.” *Procedia Computer Science* 10. Elsevier: 815–20.
- Zhu, Jieming, Xuecai Gao, Yucang Yang, Hang Li, Zhati Ai, and Xiaoyan Cui. 2010. “Developing a Voice Control System for ZigBee-Based Home Automation Networks.” In *2010 2nd IEEE International Conference on Network Infrastructure and Digital Content*, 737–41. IEEE. doi:10.1109/ICNIDC.2010.5657880.
- Zia, Kashif, Katayoun Farrahi, Andreas Riener, and Alois Ferscha. 2013. “An Agent-Based Parallel Geo-Simulation of Urban Mobility during City-Scale Evacuation.” *Simulation* 89 (10). Sage Publications Sage UK: London, England: 1184–1214.
- Zia, Kashif, Andreas Riener, Katayoun Farrahi, and Alois Ferscha. 2012. “A New Opportunity to Urban Evacuation Analysis: Very Large Scale Simulations of Social Agent Systems in Repast HPC.” In *Proceedings of the 2012 ACM/IEEE/SCS 26th Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation*, 233–42.

---

# CAPÍTULO IX

---

## Glosario



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA



ABM (Agent Based Modelling)

ABSS (Agent-Based Social simulation)

ACL (Agent Communication Language)

ALS (amiatrophic lateral sclerosis)

BDI (Belief, Desire, Intention),

CART (Classification & Regression Trees)

CC (Cloud Computing)

TDF (Transformada directa de Fourier)

ELA (Esclerosis Lateral Amiotrófica)

FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents)

FSR (Sensores de Fuerza Resistivos)

IRC (Internet Relay Chat Protocol)

IREP (Incremental Reduced Error Pruning)

MABS (Multi Agent Based Simulation)

MARS (Multi Agent Robotic System)

MAS (Multi Agent System)

NRC (National Research Council)

OV (Organizaciones Virtuales)

REP (Reduced Error Pruning)

RIPPER (Repeated Incremental Pruning Produce Error Reduction)

RSF (Robotic Software Frameworks)

SAAS (Social Aspects of Agent Systems)

SMA (Sistema Multiagente)

SMO (Sequential Minimal Optimization)

SOAP (Simple Object Access Protocol)

**SocSim (Social Simulation)**

**SVM (Support Vector Machine)**

**TDIDT (Top Down Induction of Decision Trees)**

**USB (Universal Serial Bus)**

**VO (Virtual Organizations)**

---

# APÉNDICE A

---

## Legislación



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA



## 10.1. Introducción

Para entender por qué es necesario crear un entorno accesible en el ámbito laboral de las personas con discapacidad, es imprescindible hacer referencia al contexto normativo internacional y comunitario en el que se han ido fraguando los principios rectores y objetivos de las políticas en materia de discapacidad; principios y objetivos que se han ido incorporando a la legislación española para acabar estableciendo, en unos casos, medidas de aplicación inmediata y, en otros, pautas de actuación que requerirán un desarrollo posterior.

### 10.1.1. Contexto normativo internacional

En el ámbito internacional podemos destacar los siguientes hitos, por su especial relevancia a la hora de orientar las actuaciones de los Estados en materia de discapacidad -siendo reseñable, además, la trascendencia que se da al entorno en el que se desarrollan las personas con discapacidad-:

1.- En el año 1982, la Asamblea General de las Naciones Unidas adopta el **Programa de Acción Mundial para las Personas con Discapacidad** en el que se incluyen las siguientes orientaciones:

- Los estados miembros deben esforzarse para que el medio físico sea accesible a todos, incluyendo las personas con distintos tipos de discapacidad.
- Se alienta a los Estados Miembros a que adopten una política que garantice a las personas con discapacidad el acceso a todos los edificios e instituciones públicos nuevos, viviendas y sistemas de transporte públicos. Además, siempre que sea posible, se han de adoptar medidas que promuevan la accesibilidad a los edificios, instalaciones, viviendas y transportes públicos ya existentes, especialmente aprovechando las renovaciones.

2.- El 13 de diciembre de 2006 la Asamblea General de las Naciones Unidas aprueba dos tratados internacionales que recogen los derechos de las personas con discapacidad, así como las obligaciones de los Estados miembros a la hora de promover, proteger y asegurar tales derechos: la **Convención Internacional sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad y su Protocolo Facultativo**.

Lo más novedoso de esta Convención es que representa un cambio significativo en la orientación de las políticas de actuación en materia de discapacidad, yendo más allá del mero ámbito asistencial para afrontar una cuestión de derechos humanos; de manera que las personas con discapacidad no se ven ya como meros objetos de tratamiento y protección social, sino como auténticos sujetos titulares de derechos.

Desde este nuevo planteamiento, las demandas y necesidades de las personas con discapacidad deben ser atendidas a través de medidas que tomen como punto de referencia lograr la igualdad de oportunidades de dichas personas con respecto al conjunto de los ciudadanos.

Esto lleva aparejado la necesidad de eliminar las barreras que impidan y hagan efectiva la participación y el ejercicio de sus derechos y la promoción de las condiciones necesarias para que puedan alcanzar niveles máximos de independencia y el desarrollo pleno de sus capacidades, tanto físicas como mentales, sociales o profesionales; ya que se reconoce que las barreras y los prejuicios de la sociedad constituyen en sí mismos una discapacidad.

Desde esta perspectiva, la discapacidad queda configurada como la *circunstancia personal y el ecosistema social resultante de la interacción del hecho diferencial de algunas personas con un entorno inadecuado por excluyente en tanto en cuanto que establecido según el parámetro de persona «normal»*.

3.- En el **informe que sobre la discapacidad** emitieron en el año 2011 la **Organización Mundial de la salud y el Banco Mundial** se indica que la discapacidad forma parte de la condición humana pues casi todas las personas sufrirán algún tipo de discapacidad transitoria o permanente en algún momento de su vida, ya sea por cuestiones accidentales como por el envejecimiento (de hecho, en el mundo más de mil millones de personas presentan algún tipo de discapacidad reconocida, cifra que va en aumento como consecuencia del envejecimiento de la población y del incremento global de los problemas crónicos de salud asociados a la discapacidad como la diabetes, las enfermedades cardiovasculares y los trastornos mentales).

En este sentido hay que reseñar el papel determinante que el entorno juega en la discapacidad, ya que, si entendemos ésta no tanto como una

deficiencia, sino como un desajuste entre el ecosistema social y las capacidades diferenciadas de las personas, aceptaremos que el entorno puede facilitar o restringir los derechos de ciudadanía de las personas con discapacidad.

### 10.1.2. Contexto normativo comunitario

En el ámbito comunitario son imprescindibles, a la hora de abordar el asunto que nos ocupa, las siguientes referencias:

1.- **La Carta de los Derechos Fundamentales de la Unión Europea** consagra en su artículo 1º que la dignidad humana es inviolable, debiendo ser respetada y protegida y prohíbe, en el artículo 21, toda discriminación por razón de discapacidad. Por su parte, el artículo 26 dispone que “la Unión reconoce y respeta el derecho de las personas discapacitadas a beneficiarse de medidas que garanticen su autonomía, su integración social y profesional y su participación en la vida de la comunidad”.

2.- **El Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea** aborda la discapacidad en 4 artículos:

En el artículo 10, al señalar que la Unión -en la definición y ejecución de sus políticas y acciones- tratará de luchar contra toda discriminación por razón de sexo, raza u origen étnico, religión o convicciones, discapacidad, edad u orientación sexual, siendo competente el Consejo para adoptarlas, según el artículo 19. El artículo 21 prohíbe toda discriminación, *y en particular la ejercida por razón de sexo, raza, color, orígenes étnicos o sociales, características genéticas, lengua, religión o convicciones, opiniones políticas o de cualquier otro tipo, pertenencia a una minoría nacional, patrimonio, nacimiento, discapacidad, edad u orientación sexual.*

Específicamente en el artículo 26, referido a la *integración de las personas discapacitadas*, la Unión reconoce y respeta el derecho de estas personas a beneficiarse de medidas que garanticen su autonomía, su integración social y profesional y su participación en la vida de la comunidad.

3.- Por su parte, la **Directiva 2000/78/CE del Consejo**, de 27 de noviembre de 2000, relativa al establecimiento de un marco general para la igualdad de trato en el empleo y la ocupación estableció de manera concreta la

prohibición de discriminación, por motivos de discapacidad -entre otros- en el ámbito del empleo y la ocupación a nivel europeo.

4.- En último lugar, hay que destacar que el marco de referencia a nivel europeo y nacional para abordar las distintas situaciones de las personas con discapacidad lo constituye la **Estrategia Europea sobre Discapacidad 2010-2020**: un compromiso renovado para una Europa sin barreras, que merece un estudio más detallado.

El objetivo general de la Estrategia Europea sobre Discapacidad 2010-2020 es facilitar que las personas discapacitadas puedan disfrutar de todos sus derechos y beneficiarse plenamente de una participación en la economía y la sociedad europeas, especialmente a través del mercado único.

Para lograrlo, la Estrategia se centra en la supresión de barreras, identificando la Comisión ocho ámbitos primordiales de actuación: accesibilidad, participación, igualdad, empleo, educación y formación, protección social, sanidad y acción exterior. También se determinan medidas clave respecto a cada ámbito.

#### 1.- Accesibilidad

Garantizar la accesibilidad a los bienes y servicios, en especial los servicios públicos y los dispositivos de apoyo para las personas con discapacidad.

Para conseguirlo, la Estrategia señala que **se tendrá en cuenta especialmente la accesibilidad tecnológica** no sólo para romper la brecha digital que pueda existir y que se erige como efecto discriminador, sino tomando en consideración que las TIC suponen un instrumento óptimo para lograr una sociedad inclusiva, cohesionada, solidaria y avanzada en relación con las personas con discapacidad.

Como consecuencia de ello, **la utilización de medios tecnológicos se presenta como un recurso esencial** para afrontar y superar las dificultades a las que se enfrentan un importante grupo de personas diariamente.

#### 2.- Participación

Lograr una plena participación en la sociedad de las personas con discapacidad:

- permitiéndoles disfrutar de todos los beneficios de la ciudadanía de la UE;
- suprimiendo las trabas administrativas y las barreras actitudinales a la participación plena y por igual.
- proporcionando servicios de calidad de ámbito local que comprendan el acceso a una ayuda personalizada.

### 3.- Igualdad

Erradicar en la UE la discriminación por razón de discapacidad.

### 4.- Empleo

Posibilitar que muchas personas con discapacidad tengan ingresos por actividades laborales en el mercado de trabajo «abierto».

### 5.- Educación y formación

Promover una educación y un aprendizaje permanente inclusivos para todos los alumnos con discapacidad.

### 6.- Protección social

Promover condiciones de vida dignas para las personas con discapacidad.

### 7.- Sanidad

Potenciar la igualdad de acceso a los servicios sanitarios y a las instalaciones vinculadas para las personas con discapacidad.

### 8.- Acción exterior

Promover los derechos de las personas con discapacidad en la acción exterior de la UE.

## 10.1.3. Contexto normativo nacional

1.- Cualquier referencia normativa en el contexto nacional debe abordar, en primer lugar, la **Constitución Española de 1978**.

El artículo 9 del texto constitucional, encuadrado dentro del Título Preliminar, obliga a los poderes públicos a *promover las condiciones para que la libertad y la igualdad del individuo y de los grupos en que se integra sean reales y efectivas; remover los obstáculos que impidan o dificulten su plenitud y facilitar la participación de todos los ciudadanos en la vida política, económica, cultural y social*. En este mandato genérico, para todos los ciudadanos, tendremos que encuadrar también a los que padecen algún tipo de discapacidad.

Obligada es también la referencia al artículo 10 de la Constitución, que establece la dignidad de la persona como fundamento del orden político y de la paz social.

Por su parte, el artículo 14 reconoce que *los españoles son iguales ante la ley, sin que pueda prevalecer discriminación alguna por razón de nacimiento, raza, sexo, religión, opinión o cualquier otra condición o circunstancia personal o social* (no obstante, se echa en falta la referencia específica que a la discapacidad hacía expresamente el artículo 21 del Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea al prohibir la discriminación, por lo que cualquier ciudadano discapacitado que quiera invocar este derecho no podrá hacerlo por la circunstancia específica de la discapacidad, sino por la genérica de *cualquier otra condición o circunstancia personal o social*).

La Constitución no recoge expresamente en su articulado la referencia al término “discapacidad”, ya que el artículo 49 lo que dispone es que *los poderes públicos realizarán una política de previsión, tratamiento, rehabilitación e integración de los disminuidos físicos, sensoriales y psíquicos, a los que prestarán la atención especializada que requieran y los ampararán especialmente para el disfrute de los derechos que este Título otorga a todos los ciudadanos*, terminología que dista bastante del concepto que, a nivel internacional, se ha ido elaborando en los últimos años como hemos visto con anterioridad. Además, este artículo se encuadra en el Capítulo Tercero del Título I, *De los principios rectores de la política social y económica*, es decir, se configura como un principio programático en la actuación de los poderes públicos y no como un reconocimiento efectivo de derechos, por lo que para encontrar esos derechos habrá que acudir a otros artículos.

2.- En este contexto, la **Ley de Integración Social de Minusválidos 13/1982**, de 7 de abril, señala que los principios que la inspiran se fundamentan en los derechos que el artículo 49 de la Constitución reconoce, en razón a la dignidad que les es propia, a los disminuidos en sus capacidades físicas, psíquicas o sensoriales para su completa realización personal y su total integración social, y a los disminuidos profundos para la asistencia y tutela necesarias.

La Ley 13/1982 participaba ya de la idea de que el amparo especial y las medidas de equiparación para garantizar los derechos de las personas con discapacidad debía basarse en apoyos complementarios, ayudas técnicas y servicios.

3.- Habrá que esperar más de veinte años, hasta la **Ley de igualdad de oportunidades, no discriminación y accesibilidad universal de los discapacitados 51/2003**, de 2 diciembre, para que los nuevos enfoques en el tratamiento de la discapacidad en el ámbito internacional tengan reflejo en la normativa nacional.

La ley se justifica por la persistencia en la sociedad de desigualdades, pese a las proclamaciones constitucionales y, sobre todo, por los cambios operados en la manera de entender el fenómeno de la “discapacidad” admitiendo que las desventajas que presenta una persona con discapacidad tienen su origen en sus dificultades personales, pero también y sobre todo en los obstáculos y condiciones limitativas que en la propia sociedad, concebida con arreglo al patrón de la persona media, se oponen a la plena participación de estos ciudadanos. Cabe destacar que Ley se aprueba coincidiendo en el tiempo con el Año Europeo de las Personas con Discapacidad, por lo que *constituye una de las aportaciones más significativas de la sociedad española al esfuerzo colectivo de emancipación histórica de las personas con discapacidad.*

4.- Con posterioridad fue promulgada la **Ley 49/2007, de 26 de diciembre, por la que se establece el régimen de infracciones y sanciones en materia de igualdad de oportunidades, no discriminación y accesibilidad universal de las personas con discapacidad**, dictada al amparo de la disposición final undécima de la Ley 51/2003, y que toma en consideración lo establecido por las disposiciones comunitarias que exigen a los Estados miembros de la Unión Europea la

adopción de las normas necesarias para aplicar sanciones en caso de incumplimiento de las disposiciones nacionales. Su misión fue establecer un régimen sancionador eficaz con el propósito de que la Ley 51/2003 no se convirtiera en una mera declaración de principios.

5.- El 21 de abril de 2008 España ratificó la Convención Internacional sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad y su Protocolo Facultativo, entrando en vigor el 3 de mayo de ese mismo año. Conforme a lo dispuesto en el artículo 96.1 de la Constitución, a partir de esa fecha pasó a formar parte del ordenamiento interno, por lo que fue necesario adaptar y modificar diferentes disposiciones para poder hacer efectivos los derechos que la Convención recoge.

La aplicación de la Convención en España se ha desarrollado, entre otros instrumentos, mediante la **Ley 26/2011, de 1 de agosto, de adaptación normativa a la Convención Internacional sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad**, según la cual la discapacidad queda configurada como la *circunstancia personal y el ecosistema social resultante de la interacción del hecho diferencial de algunas personas con un entorno inadecuado por excluyente en tanto en cuanto que establecido según el parámetro de persona "normal"*.

Ley 26/2011 modificó un total de 19 disposiciones -entre ellas, la Ley 51/2003, de 2 de diciembre-, y su fundamento radica en el artículo 4 de la Convención, en virtud del cual los Estados Partes se comprometen a adoptar todas las medidas legislativas, administrativas y de otra índole que sean pertinentes para asegurar el pleno ejercicio de todos los derechos humanos y las libertades fundamentales de las personas con discapacidad, sin discriminación alguna por motivos de discapacidad.

La Ley profundiza en el modelo social de la discapacidad, pero da un impulso reformador para salvaguardar los derechos de las personas discapacitadas con el objetivo de favorecer la toma de decisiones en todos los aspectos de su vida, avanzar hacia la autonomía personal desinstitucionalizada y garantizar la no discriminación en una sociedad plenamente inclusiva; todo ello con el objetivo de adecuar la regulación en materia de discapacidad a las directrices marcadas por la Convención.

6.- El siguiente paso en estos antecedentes lo constituye la **Estrategia Española sobre Discapacidad 2012-2020**, cuyo objetivo estratégico es el de coadyuvar al cumplimiento de los objetivos cuantificados de la Estrategia Europea 2020 y del Programa Nacional de Reformas de España 2011.

La Estrategia también identifica otra serie de objetivos principales, la mayoría de los cuales (como la accesibilidad) son condición indispensable para el cumplimiento del objetivo estratégico. En ellos destacan:

*Accesibilidad:* entendida como el acceso de las personas con discapacidad, en las mismas condiciones que el resto de la población, al entorno físico, al transporte, a las tecnologías y a los sistemas de la información y las comunicaciones (TIC), y a otras instalaciones y servicios.

*Conocimiento:* mejorar el conocimiento real sobre la situación en que viven las personas con discapacidad en España y las barreras a las que se enfrentan en sus vidas diarias.

*Participación:* con el objeto de superar los obstáculos al ejercicio de los derechos como personas, consumidores, estudiantes o actores económicos y políticos se debe promover la participación de las organizaciones de personas con discapacidad en actividades, actos, instalaciones, bienes y servicios, comprendidos los de tipo audiovisual, el deporte, el ocio, la cultura y la diversión, la toma de decisiones y ejecución de políticas públicas tales como sanidad, educación, empleo, infraestructuras, vivienda y urbanismo.

*Igualdad:* se promoverá la igualdad de trato de las personas con discapacidad a través de un enfoque de doble vertiente. Por una parte, se utilizará la legislación vigente para proteger, prohibir, suprimir y sancionar cualquier tipo de discriminación y, por otra, se aplicará una política activa que mediante medidas de acción positiva promueva eficazmente la igualdad de oportunidades y la inclusión de las personas con discapacidad en todos los ámbitos en los que deseen participar activamente, prestando una atención especial a las mujeres y a los niños con discapacidad así como al impacto de la discriminación múltiple que pueden sufrir aquellas personas con discapacidad que reúnen alguna otra característica susceptible de motivar la discriminación como el sexo, el origen nacional, racial o étnico, la orientación e identidad sexual.

*No discriminación:* fundamentalmente se promoverán acciones para eliminar el agravio comparativo del perjuicio económico que supone para las personas con discapacidad y para sus familias el ejercicio ciudadano de una vida normalizada en relación con el resto de la población.

El propósito de la Estrategia es facilitar que las personas con discapacidad puedan disfrutar de todos sus derechos y que tanto la sociedad en su conjunto como las propias personas con discapacidad puedan beneficiarse plenamente de la aportación de éstas en la economía generando oportunidades y afianzando derechos. Para ello la Estrategia se centra en la supresión de barreras en su sentido más amplio, abordando las actuaciones concretas de acuerdo con las algunas recomendaciones hechas por la Organización Mundial de la Salud y el Banco Mundial.

*Actuaciones generales:* medidas estratégicas.

- Desarrollar la Estrategia Global de Acción para las Personas con Discapacidad en el Medio Rural.
- Promover el refuerzo de la I+D+i de discapacidad en Estrategia Española de Innovación mediante programas específicos.
- Desarrollar una Estrategia Global de Acción contra la discriminación múltiple en los ámbitos de la política de género y la infancia.
- Incluir en el Libro Blanco sobre Envejecimiento Activo las necesarias actuaciones sinérgicas con la Estrategia Española sobre Discapacidad 2012-2020.

*Accesibilidad:* medidas estratégicas.

- Apoyar la aprobación en la UE de la “European Accessibility Act” que se propone en la Estrategia Europea sobre Discapacidad 2010-2020.
- Elaborar una Estrategia Global de Accesibilidad de las Personas con Discapacidad a la TIC´s.
- Incorporar la accesibilidad universal como un factor esencial y tomarla en consideración en la elaboración y aplicación de todas las normas y las políticas públicas.
- Promover la formación en TIC´s de las personas con discapacidad, así como la formación en “diseño para todos” de los gestores y operadores informáticos.
- Avanzar en la unificación de la planificación de accesibilidad de los departamentos ministeriales.

*Empleo: medidas estratégicas.*

- Impulsar el desarrollo en empleabilidad de un número creciente de personas con discapacidad para garantizar el cumplimiento del objetivo general de empleo del Programa Nacional de Reformas de España 2011.
- Incorporar en la futura Estrategia Española de Empleo el factor discapacidad manteniendo los avances normativos en vigor y mejorando éstos garantizando mínimos comunes entre las diferentes Comunidades Autónomas.
- Promover las actuaciones precisas para fomentar y desarrollar la Nueva economía de la Discapacidad.
- Promover actuaciones específicamente dirigidas a impulsar la incorporación de las mujeres con discapacidad al mercado laboral, en igualdad de oportunidades.

*Educación y formación: medidas estratégicas.*

- Impulsar las medidas concretas sobre el colectivo de las personas con discapacidad para garantizar el cumplimiento de los objetivos generales de reducción del abandono escolar y aumento de las personas entre 30 y 34 años que han terminado la educación superior del Programa Nacional de Reformas de España 2011.
- Respalda a la UE en sus objetivos de una educación y formación inclusivas y de calidad en el marco de la iniciativa «Juventud en movimiento».
- Impulsar la detección precoz de las necesidades educativas especiales.
- Promover una educación inclusiva en todas las etapas educativas, con los medios de apoyo que sean necesarios.

*Pobreza y exclusión social: medidas estratégicas.*

- Impulsar las medidas concretas sobre el colectivo de las personas con discapacidad para garantizar el cumplimiento de los objetivos generales de reducción de personas por debajo de la línea de la pobreza del Programa Nacional de Reformas de España 2011.
- Desarrollar plenamente los objetivos de autonomía personal de la Ley de Autonomía Personal y Atención a la Dependencia.

*Participación real y efectiva: medidas estratégicas.*

- Con carácter general, podrá incorporarse a la asociación nacional más representativa de las personas con discapacidad a aquellos órganos

colegiados de participación de la Administración General del Estado (AGE) que tengan por finalidad el cumplimiento de los objetivos de la Convención.

- En los órganos colegiados de participación de la AGE que tengan por finalidad el cumplimiento de los objetivos de la Convención se tomará en consideración la perspectiva de género.

*Igualdad y colectivos vulnerables:* medidas estratégicas.

- Desarrollar la Estrategia Global de Acción para las Personas con Discapacidad en el Medio Rural.
- Desarrollar una Estrategia Global de Acción contra la discriminación múltiple en los ámbitos de la política de género y la infancia.
- Fomentar medidas de apoyo al envejecimiento activo de las personas con discapacidad.
- Promover medidas dirigidas a la prevención de la violencia contra las mujeres con discapacidad, y a garantizar su pleno y libre ejercicio de derechos.
- Incorporar la discapacidad en la formación de los profesionales que intervienen en la prevención y atención de situaciones de violencia contra mujeres.

*Sanidad:* medidas estratégicas.

- Fomentar, junto con las demás unidades competentes, la puesta en marcha de una Estrategia Sociosanitaria, que integren los recursos disponibles para dar respuesta a las necesidades de las personas con discapacidad y de sus familias.
- Promover medidas que faciliten el uso de medios técnicos de apoyo con vistas a garantizar la vida independiente.
- Desarrollar programas de detección y diagnóstico precoz de discapacidades.
- Desarrollar medidas preventivas, incluyendo la adaptación ortoprotésica y la rehabilitación funcional, para reducir los riesgos de discapacidades sobrevenidas y el agravamiento de discapacidades preexistentes.
- Diseñar medidas específicas para el colectivo de personas con autismo en sus diferentes enfoques y afecciones.
- Aplicar el enfoque de género en las políticas sociosanitarias, que permita tomar en consideración las necesidades específicas de las mujeres y niñas con discapacidad.

- Establecer medidas en el ámbito sanitario dirigidas a detectar violencia o malos tratos contra mujeres con discapacidad.

*Acción exterior:* medidas estratégicas.

- Incluir el factor discapacidad y la perspectiva de género en las actuaciones de emergencia, ayuda humanitaria y programas e instrumentos de cooperación internacional que desarrolle MAEC y AECID.

*Nueva economía de la discapacidad:* medidas estratégicas.

- Promover la normalización en el ámbito de los productos y servicios así como el establecimiento de distintivos de calidad que identifiquen la accesibilidad.
- Fortalecer el mercado de las TIC´s accesibles.
- Promover el mercado relacionado con la Autonomía Personal.

*Información:* medidas estratégicas.

- Establecer un moderno sistema de información sobre Discapacidad en red.
- Avanzar en la consolidación de un sistema de colaboración eficiente con las Comunidades Autónomas (CCAA) para la elaboración de la Base de Datos de Personas con Discapacidad.
- Fomentar la inclusión de la variable de discapacidad, cuando sea factible por tipo de la misma, y desagregada por sexo, en los estudios y encuestas que realicen los organismos públicos dependientes de la Administración del Estado, especialmente el Instituto Nacional de Estadística.
- Fomentar la imagen normalizada y el uso apropiado del lenguaje sobre discapacidad en medios de comunicación, teniendo en cuenta también la perspectiva de género.
- Desarrollar con carácter anual un Perfil de la Discapacidad de España que permita contar en el futuro con una serie temporal de diversos indicadores útil para la elaboración de políticas públicas.

*Otras:* medidas estratégicas.

- Incorporar a la presente Estrategia las vigentes estrategias sectoriales, así como, en su caso, sus respectivos Planes de Acción.
- Establecer medidas concretas sobre discapacidad en los siguientes ámbitos: Protección Civil, deporte, turismo, etc.

- Avanzar en el ámbito de identificación de alternativas jurídicas de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 12 de la Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad.
- Promover el estudio de un Plan Integral de Discapacidad en la AGE.
- Promover, con el acuerdo de las CCAA, la armonización de medidas y figuras relacionadas con los derechos de las personas con discapacidad.

7.- En este recorrido histórico en la legislación de referencia en materia de discapacidad, finalmente llegamos al **Real Decreto Legislativo 1/2013, de 29 de noviembre, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley General de los derechos de las personas con discapacidad y de su inclusión social.**

La Ley procede a la refundición de las leyes 13/1982, 51/2003 y 49/2007, regularizando, aclarando y armonizando dichas disposiciones, con arreglo al mandato contenido en la disposición final segunda de la Ley 26/2011, de adaptación normativa a la Convención Internacional sobre los derechos de las personas con discapacidad (proceso necesario como consecuencia del sustancial cambio del marco normativo de los derechos de las personas con discapacidad).

Esta tarea ha tenido como referente principal la mencionada Convención Internacional. Por ello, además de revisar los principios que informan la ley conforme a lo previsto en la Convención, en su estructura se dedica un título específico a determinados derechos de las personas con discapacidad. También se reconoce expresamente que el ejercicio de los derechos de las personas con discapacidad se realizará de acuerdo con el principio de libertad en la toma de decisiones.

Así, como colofón a todo el proceso evolutivo que se ha producido en el ámbito normativo en materia de discapacidad, y que acabamos de resumir, el objeto de la Ley, según el artículo 1 a), es el de *garantizar el derecho a la igualdad de oportunidades y de trato, así como el ejercicio real y efectivo de derechos por parte de las personas con discapacidad en igualdad de condiciones respecto del resto de ciudadanos y ciudadanas, a través de la promoción de la autonomía personal, de la accesibilidad universal, del acceso al empleo, de la inclusión en la comunidad y la vida independiente y de la erradicación de toda forma de discriminación, conforme a los artículos 9.2, 10, 14 y 49 de la Constitución Española y a la Convención Internacional sobre los*

*Derechos de las Personas con Discapacidad y los tratados y acuerdos internacionales ratificados por España.*

Llegamos así al marco legal vigente en materia de discapacidad, que es el que se ha tomado como referente a la hora de abordar este proyecto. Para ello, es necesario destacar el artículo 2 de la Ley que establece una serie de **definiciones**, de las que vamos a señalar -por lo que afectan a este trabajo- las siguientes:

a) Discapacidad: la ley la define como *una situación que resulta de la interacción entre las personas con deficiencias previsiblemente permanentes y cualquier tipo de barreras que limiten o impidan su participación plena y efectiva en la sociedad, en igualdad de condiciones con las demás.*

b) Igualdad de oportunidades: es la *ausencia de toda discriminación*, directa o indirecta, por motivo de o por razón de discapacidad, incluida cualquier distinción, exclusión o restricción que tenga el propósito o el efecto de obstaculizar o dejar sin efecto el reconocimiento, goce o ejercicio en igualdad de condiciones por las personas con discapacidad, de todos los derechos humanos y libertades fundamentales en los ámbitos político, económico, social, laboral, cultural, civil o de otro tipo.

k) Accesibilidad universal: es la *condición que deben cumplir los entornos, procesos, bienes, productos y servicios, así como los objetos, instrumentos, herramientas y dispositivos, para ser comprensibles, utilizables y practicables* por todas las personas en condiciones de seguridad y comodidad y de la forma más autónoma y natural posible.

En consonancia con lo anterior, el artículo 4 define a las personas con discapacidad como aquellas que presentan deficiencias físicas, mentales, intelectuales o sensoriales, previsiblemente permanentes que, al interactuar con diversas barreras, puedan impedir su participación plena y efectiva en la sociedad, en igualdad de condiciones con los demás.

El artículo 5 señala los **ámbitos** donde deberán aplicarse las medidas específicas que tratarán de garantizar la igualdad de oportunidades, la no discriminación y la accesibilidad universal, y que son, entre otros, los siguientes:

a) Telecomunicaciones y sociedad de la información.

b) Espacios públicos urbanizados, infraestructuras y edificación.

h) Empleo.

Llegados a este punto ya estamos en condiciones de entender por qué es necesario crear un entorno accesible en el ámbito laboral de las personas con discapacidad, que era el propósito inicial de esta introducción y la razón de ser de parte de esta tesis, y el motivo no es otro que permitir a las personas con discapacidad lograr una igualdad de oportunidades -con ausencia total de discriminación, mediante el empleo de medios tecnológicos que consigan alcanzar la accesibilidad universal en los entornos donde desarrollen su actividad.

Finalmente podemos hacer referencia a la normativa, ya de carácter técnico, que afecta al ámbito de los Espacios públicos urbanizados, infraestructuras y edificación - señalado en el artículo 5- y, en este caso, tanto a la normativa estatal como a la que las Comunidades Autónomas han aprobado en el ejercicio de sus competencias en esta materia.

### *10.1.3.1. Normativa estatal*

- Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad de Utilización y Accesibilidad (SUA1 Seguridad frente al riesgo de caídas. SUA9 Accesibilidad).
- Real Decreto 505/2007, de 20 de abril, por el que se aprueban las condiciones de accesibilidad y no discriminación de las personas con discapacidad para el acceso y utilización de los espacios públicos urbanizados y edificaciones.
- Orden VIV/561/2010, de 1 de febrero, por la que se desarrolla el documento técnico de condiciones de accesibilidad y no discriminación para el acceso y utilización de los espacios públicos urbanizados.
- Ley 8/2013, de 26 de junio, de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas.

### *10.1.3.2. Normativa autonómica*

A continuación, se muestra la normativa que encontramos en las distintas comunidades autónomas:

**Andalucía:**

- Decreto 293/2009, de 7 de julio, por el que se aprueba el Reglamento que regula las normas para la accesibilidad en las infraestructuras, el urbanismo, la edificación y el transporte en Andalucía.
- Orden de 9 de enero de 2012, por la que se aprueban los modelos de fichas y tablas justificativas del Reglamento que regula las normas para la accesibilidad en las infraestructuras, el urbanismo, la edificación y el transporte en Andalucía, aprobado por el Decreto 293/2009, de 7 de julio, y las instrucciones para su cumplimentación.

**Aragón:**

- Decreto 89/1991, de 16 de abril, de la Diputación General de Aragón, para la supresión de barreras arquitectónicas.
- Ley 3/1997, de 7 de abril, de promoción de accesibilidad y supresión de barreras arquitectónicas, urbanísticas de transportes y de la comunicación.
- Decreto 19/1999, de 9 de febrero, del Gobierno de Aragón, por el que se regula la Promoción de la Accesibilidad y Supresión de Barreras Arquitectónicas, Urbanísticas, de Transportes y de la Comunicación.
- Decreto 108/2000, de 29 de mayo, del Gobierno de Aragón, de modificación del Decreto 19/1999, de 9 de febrero, del Gobierno de Aragón, por el que se regula la Promoción de la Accesibilidad y Supresión de Barreras Arquitectónicas, Urbanísticas, de Transportes y de la Comunicación.

**Asturias:**

- Ley 5/1995, de 6 de abril, de promoción de la accesibilidad y supresión de barreras arquitectónicas.
- Decreto 37/2003, de 22 de mayo, por el que se desarrolla la Ley 5/1995, de 6 de abril, de promoción de la accesibilidad y supresión de barreras arquitectónicas.

**Baleares:**

- Ley 3/1993, de 4 de mayo, para la mejora de la accesibilidad y de la supresión de las barreras arquitectónicas.
- Decreto 20/2003, de 28 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento de Supresión de Barreras Arquitectónicas de las Islas Baleares.

**Canarias:**

- Ley 8/1995, de 6 de abril, de accesibilidad y supresión de barreras físicas y de la comunicación.
- Decreto 227/1997, de 18 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 8/1995, de 6 de abril, de accesibilidad y supresión de barreras físicas y de la comunicación.
- Decreto 148/2001, de 9 de julio, por el que se modifica el Decreto 227/1997, de 18 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 8/1995, de 6 de abril, de accesibilidad y supresión de barreras físicas y de la comunicación.

**Cantabria:**

- Decreto 61/1990, de 6 de julio, sobre evitación y supresión de barreras arquitectónicas en Cantabria.
- Ley 3/1996, de 24 de septiembre, sobre accesibilidad y supresión de barreras arquitectónicas, urbanísticas y de la comunicación.

**Castilla la Mancha:**

- Ley 1/1994, de 24 de mayo, de accesibilidad y eliminación de barreras en Castilla la Mancha.
- Decreto 158/1997, de 2 de diciembre, del Código de accesibilidad de Castilla la Mancha.

**Castilla y León**

- Ley 3/1998, de 24 de junio, de accesibilidad y supresión de barreras.
- Decreto 217/2001, de 30 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento de Accesibilidad y Supresión de Barreras de Castilla y León.
- Ley 2/2013, de 15 de mayo, de Igualdad de Oportunidades para Personas con Discapacidad de Castilla y León.
- Orden FAM/1876/2004, de 18 de noviembre, por la que establece el módulo de referencia para determinar la condición de “bajo coste” en la convertibilidad de los edificios, establecimientos e instalaciones.

**Cataluña:**

- Ley 20/1991, de 25 de noviembre, de promoción de la accesibilidad y de supresión de barreras arquitectónicas.
- Decreto 135/1995, de 24 de marzo, de desarrollo de la Ley 20/1991, de 25 de noviembre, de promoción de la accesibilidad y de supresión de barreras arquitectónicas y de aprobación del Código de Accesibilidad.

- Decreto 204/1999, de 27 de julio, por el que se da nueva redacción al Decreto 135/1995, de 24 de marzo, de desarrollo de la Ley 20/1991, de 25 de noviembre, de promoción de la accesibilidad y de supresión de barreras arquitectónicas y de aprobación del Código de Accesibilidad.

**Ceuta:**

- Ordenanza para la accesibilidad y la eliminación de barreras arquitectónicas, urbanísticas, del transporte y de la comunicación.

**Extremadura:**

- Ley 8/1997, de 18 de junio, de promoción de la accesibilidad en Extremadura.
- Decreto 8/2003, de 28 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley de promoción de la accesibilidad en Extremadura.

**Galicia:**

- Ley 8/1997, de 20 de agosto, de accesibilidad y supresión de barreras en la Comunidad Autónoma de Galicia.
- Decreto 35/2000, de 28 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo y ejecución de la Ley 8/1997, de 20 de agosto, de accesibilidad y supresión de barreras en la Comunidad Autónoma de Galicia.
- Decreto 74/2013, de 18 de abril, por el que se modifica el Decreto 35/2000, de 28 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de desarrollo y ejecución de la Ley de accesibilidad y supresión de barreras en la Comunidad Autónoma de Galicia, para su adaptación a la Directiva 95/16/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de junio, sobre aproximación a las legislaciones de los Estados miembros relativas a ascensores.

**La Rioja:**

- Ley 5/1994, de 19 de julio, de supresión de barreras arquitectónicas y promoción de la accesibilidad.
- Decreto 19/2000, de 28 de abril, por el que aprueba el Reglamento de accesibilidad en relación con las barreras urbanísticas y arquitectónicas, en desarrollo parcial de la Ley 5/1994, de 19 de julio.

**Madrid:**

- Ley 8/1983, de 22 de junio, de promoción de la accesibilidad y supresión de barreras arquitectónicas. Versión actualizada.
- Decreto 138/1998, de 23 de julio, por el que se modifican determinadas especificaciones técnicas de la Ley 8/1983, de 22 de junio, de promoción de la accesibilidad y supresión de barreras arquitectónicas.
- Decreto 13/2007, de 15 de marzo, por el que se aprueba el Reglamento Técnico de Desarrollo en materia de Promoción de la Accesibilidad y Supresión de Barreras Arquitectónicas.

**Melilla:**

- Ordenanza para la accesibilidad y la eliminación de barreras arquitectónicas, urbanísticas, del transporte y de la comunicación.

**Murcia:**

- Decreto 39/1987, de 4 de junio, sobre supresión de barreras arquitectónicas.
- Orden de 15 de octubre de 1991, sobre accesibilidad de espacios públicos y edificación.
- Ley 5/1995, de 7 de abril, de condiciones de habitabilidad en edificios de viviendas y de promoción de la accesibilidad general.

**Navarra:**

- Decreto Foral 154/1989, de 29 de junio, por el que se aprueba el Reglamento para el desarrollo y aplicación de la Ley Foral 4/1988, de 11 de julio, sobre barreras físicas y sensoriales.
- Ley Foral 5/2010, de 6 de abril, de accesibilidad universal y diseño para todas las personas.

**País Vasco:**

- Ley 20/1997, de 4 de diciembre, para la promoción de la accesibilidad.
- Decreto 68/2000, de 11 de abril, por el que se aprueban normas técnicas sobre condiciones de accesibilidad de los entornos urbanos, espacios públicos, edificaciones y sistemas de información y comunicación. Actualizado modificado Decreto 42/2005.

**Comunidad Valenciana:**

- Ley 1/1998, de 5 de mayo, de accesibilidad y supresión de barreras arquitectónicas, urbanísticas y la comunicación.

- Decreto 39/2004, de 5 de marzo, por el que se desarrolla la Ley 1/1998, de 5 de mayo, en materia de accesibilidad en la edificación de pública concurrencia y en el medio urbano.
- Orden de 9 de junio de 2004, por la que se desarrolla el Decreto 39/2004, de 5 de marzo, por el que se desarrolla la Ley 1/1998, de 5 de mayo, en materia de accesibilidad en la edificación de pública concurrencia y en el medio urbano.



---

# APÉNDICE B

---

Esquemas eléctricos



VNiVERSIDAD  
D SALAMANCA



