

UNIVERSITY OF SALAMANCA



VNiVERSiDAD
D SALAMANCA

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

International Doctoral Thesis

**Pattern detection platform using
disruptive technologies to improve
people's daily tasks**

Author:

André Filipe Sales Mendes

Supervisors:

Dr: Juan Francisco de Paz Santana

Dr: Gabriel Villarubia González

*A thesis submitted in fulfillment of the requirements
for the degree of Doctor of Philosophy
in Computer Engineering at the
University of Salamanca*

April 2022

Declaration of Content

This International Doctoral Thesis consists of a compendium of three scientific papers published in high impact factor international journal that are specified below

1. **“Automatic wireless mapping and tracking system for indoor location”**

André Sales Mendes¹, Gabriel Villarrubia¹, Javier Caridad¹, Daniel H. De La Iglesia¹, Juan F. De Paz¹

¹ Faculty of Science, University of Salamanca, Plaza de la Merced s/n, 37002 Salamanca, Spain

Neurocomputing 21 Abril 2019,

DOI: 10.1016/j.neucom.2018.07.084

2. **“Connected Elbow Exoskeleton System for Rehabilitation Training Based on Virtual Reality and Context-Aware”**

Daniel H. de la Iglesia^{1,2}, André Sales Mendes¹, Gabriel Villarrubia González¹, Diego M. Jiménez-Bravo¹ and Juan F. de Paz Santana¹

¹ Expert Systems and Applications Lab, Faculty of Science, University of Salamanca, Plaza de los Caídos s/n, 37002 Salamanca, Spain

² Facultad de Informática, Universidad Pontificia de Salamanca, C/Compañía 5, 37002 Salamanca, Spain

Sensors 6 Febrero 2020

DOI: 10.3390/s20030858

3. **“Multi-Agent Approach Using LoRaWAN Devices: An Airport Case Study”**

André Sales Mendes¹, Diego M. Jiménez-Bravo¹, María Navarro-Cáceres¹, Valderi Reis Quietinho Leithardt^{2,3,4}, and Gabriel Villarrubia González¹

¹ Expert Systems and Applications Lab, Faculty of Science, University of Salamanca, Plaza de los Caídos s/n, 37002 Salamanca, Spain

² Laboratory of Embedded and Distribution Systems, University of Vale do Itajaí, Itajaí 88302-901, Brazil

³ COPELABS, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, 1749-024 Lisboa, Portugal

⁴ VALORIZA, Research Center for Endogenous Resources Valorization, Instituto Politécnico de Portalegre, 7300-555 Portalegre, Portugal

Electronics 2 Septiembre 2020

DOI: 10.3390/electronics9091430

Declaration of Authorship

Dr. Juan Francisco de Paz Santana, full professor of the Computer Science and Artificial Intelligence area at the University of Salamanca and Dr. Gabriel Villarrubia González, associate professor of the Computer Science and Artificial Intelligence area at the University of Salamanca,

CERTIFY

That the present document, entitled "*Pattern detection platform using disruptive technologies to improve people's daily tasks*" has been prepared under their supervision at the Computer and Automation Department of the University of Salamanca by André Sales Mendes, and constitutes this thesis in the modality of compendium of articles for the degree of Doctor of Philosophy in Computer Engineering.

Dr: Juan Francisco de Paz Santana

Dr: Gabriel Villarrubia González

Date: 24 Mar 2022

Date: 24 Mar 2022

André Filipe Sales Mendes

Date: 24 Mar 2022

Declaration of the Academic Commission

The academic committee of the Ph.D. program in computer engineering authorizes André Filipe Sales Mendes with NIE Y5601546W to present the doctoral thesis entitled *"Pattern detection platform using disruptive technologies to improve people's daily tasks"*

Coordinator of the Ph.D. program in computer engineering

Date:

Declaration of Automatic wireless mapping and tracking system for indoor location coauthors

The co-authors of the work entitled "*Automatic wireless mapping and tracking system for indoor location*" and with DOI: 10.1016/j.neucom.2018.07.084, state that André Filipe Sales Mendes with NIE Y5601546W is the main author of the research included in this article and that they know and give their consent for the article to be used in the doctoral thesis in the form of a compendium of articles by André Filipe Sales Mendes entitled "*Pattern detection platform using disruptive technologies to improve people's daily tasks*". The details of the mentioned article are shown below.

Automatic wireless mapping and tracking system for indoor location

André Sales Mendes¹, Gabriel Villarrubia¹, Javier Caridad¹, Daniel H. De La Iglesia¹, Juan F. De Paz¹

¹ Faculty of Science, University of Salamanca, Plaza de la Merced s/n, 37002 Salamanca, Spain

DOI: 10.1016/j.neucom.2018.07.084

Gabriel Villarrubia González

VILLARRUBIA GONZALEZ
GABRIEL - 71932845T

Firmado digitalmente por VILLARRUBIA
GONZALEZ GABRIEL - 71932845T
Fecha: 2022.03.14 16:32:27 +01'00'

Date: 14 Mar 2022

Javier Caridad Hernández

Firmado por CARIDAD
HERNANDEZ JAVIER -

Date: 14 Mar 2022

Daniel Hernández de la Iglesia

HERNANDEZ DE LA IGLESIA
DANIEL - 70900083F

Firmado digitalmente por HERNANDEZ
DE LA IGLESIA DANIEL - 70900083F
Fecha: 2022.03.14 22:10:45 +01'00'

Date: 14 Mar 2022

Juan Francisco de Paz Santana

DE PAZ SANTANA JUAN
FRANCISCO - 76125754D

Firmado digitalmente por DE PAZ SANTANA JUAN FRANCISCO - 76125754D
Fecha: 2022.03.14 16:05:41 +01'00'

Date: 14 Mar 2022

Declaration of Connected Elbow Exoskeleton System for Rehabilitation Training Based on Virtual Reality and Context-Aware coauthors

The co-authors of the work entitled "*Connected Elbow Exoskeleton System for Rehabilitation Training Based on Virtual Reality and Context-Aware*" and with DOI: 10.3390/s20030858, state that André Filipe Sales Mendes with NIE Y5601546W is the main author of the research included in this article and that they know and give their consent for the article to be used in the doctoral thesis in the form of a compendium of articles by André Filipe Sales Mendes entitled "*Pattern detection platform using disruptive technologies to improve people's daily tasks*". The details of the mentioned article are shown below.

Connected Elbow Exoskeleton System for Rehabilitation Training Based on Virtual Reality and Context-Aware

Daniel H. de la Iglesia^{1,2}, André Sales Mendes¹, Gabriel Villarrubia González¹, Diego M. Jiménez-Bravo¹ and Juan F. de Paz Santana¹

¹ Expert Systems and Applications Lab, Faculty of Science, University of Salamanca, Plaza de los Caídos s/n, 37002 Salamanca, Spain

² Facultad de Informática, Universidad Pontificia de Salamanca, C/Compañía 5, 37002 Salamanca, Spain

DOI: 10.3390/s20030858

Daniel Hernández de la Iglesia

HERNANDEZ DE LA IGLESIA DANIEL - 70900083F
Firmado digitalmente por HERNANDEZ DE LA IGLESIA DANIEL - 70900083F
Fecha: 2022.03.14 22:11:17 +01'00'

Date: 14 Mar 2022

Diego Manuel Jiménez Bravo

Firmado por JIMENEZ BRAVO DIEGO MANUEL - 22758868T
Fecha: 14/03/2022 22:04:06 CET

Date: 14 Mar 2022

Gabriel Villarrubia González

VILLARRUBIA GONZALEZ GABRIEL - 71932845T
Firmado digitalmente por VILLARRUBIA GONZALEZ GABRIEL - 71932845T
Fecha: 2022.03.14 16:31:19 +01'00'

Date: 14 Mar 2022

Juan Francisco de Paz Santana

DE PAZ SANTANA JUAN FRANCISCO - 76125754D
Firmado digitalmente por DE PAZ SANTANA JUAN FRANCISCO - 76125754D
Fecha: 14/03/2022 22:04:06 CET

Date: 14 Mar 2022

Declaration of Multi-Agent Approach Using LoRaWAN Devices: An Airport Case Study coauthors

The co-authors of the work entitled "*Multi-Agent Approach Using LoRaWAN Devices: An Airport Case Study*" and with DOI: 10.3390/electronics9091430, state that André Filipe Sales Mendes with NIE Y5601546W is the main author of the research included in this article and that they know and give their consent for the article to be used in the doctoral thesis in the form of a compendium of articles by André Filipe Sales Mendes entitled "*Pattern detection platform using disruptive technologies to improve people's daily tasks*". The details of the mentioned article are shown below.

Multi-Agent Approach Using LoRaWAN Devices: An Airport Case Study

André Sales Mendes¹, Diego M. Jiménez-Bravo¹, María Navarro-Cáceres¹, Valderi Reis Quietinho Leithardt^{2,3,4}, and Gabriel Villarrubia González¹

¹ Expert Systems and Applications Lab, Faculty of Science, University of Salamanca, Plaza de los Caídos s/n, 37002 Salamanca, Spain

² Laboratory of Embedded and Distribution Systems, University of Vale do Itajaí, Itajaí 88302-901, Brazil

³ COPELABS, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, 1749-024 Lisboa, Portugal

⁴ VALORIZA, Research Center for Endogenous Resources Valorization, Instituto Politécnico de Portalegre, 7300-555 Portalegre, Portugal

DOI: 10.3390/electronics9091430

Diego Manuel Jiménez Bravo

Firmado por JIMENEZ BRAVO DIEGO
MANUEL - 22758868T
Fecha: 14/03/2022 22:06:13 CET

Date: 14 Mar 2022

María Navarro Cáceres

NAVARRO CACERES
MARIA - 70903746J
Firmado digitalmente por
NAVARRO CACERES MARIA -
70903746J
Fecha: 2022.03.14 22:03:53 +01'00'

Date: 14 Mar 2022

Valderi Reis Quietinho Leithardt

VALDERI REIS
QUIETINHO LEITHARDT
Firmado de forma digital por
VALDERI REIS QUIETINHO
LEITHARDT
Dados: 2022.03.14 19:06:33 Z

Date: 14 Mar 2022

Gabriel Villarrubia González

VILLARRUBIA
GONZALEZ GABRIEL -
71932845T
Firmado digitalmente por
VILLARRUBIA GONZALEZ GABRIEL -
71932845T
Fecha: 2022.03.14 16:32:09 +01'00'

Date: 14 Mar 2022

Nunca te das cuenta de lo que has hecho; sólo puedes ver lo que queda por hacer.

Marie Curie

Abstract

Pattern detection platform using disruptive technologies to improve people's daily tasks.

In recent years, the miniaturization of electronic devices and the reduction in the cost of component manufacturing processes have allowed wireless sensor networks to become increasingly important and used in many cases. Additionally, and due partly to the improvement in data storage and processing capabilities, it has allowed the construction of context-sensitive systems in areas such as medicine, monitoring, or robotics that allow a detailed and adaptive analysis of the processes and services provided to users. This doctoral thesis uses a "Compendium of Articles" to analyze the application of artificial intelligence paradigms in 3 differentiated case studies. A novel indoor localization system using Bayesian and fingerprinting techniques has been proposed to automate and facilitate calibration data acquisition processes. Additionally, an exoskeleton is presented that is connected to a context-sensitive architecture to allow rehabilitation patients to exercise interactively and use augmented reality techniques. The last paper emphasizes the design of a platform that uses wireless sensor networks to monitor the state of toilets by incorporating embedded agents in computationally constrained devices. This decentralized information is analyzed to detect possible anomalies and facilitate decision-making. One of the main milestones I intend to achieve with my study is to show the scientific community the different results I have obtained in my research, solving everyday problems that have been solved by modeling the case studies using multi-agent architectures and expert systems. Signal filtering, the use of classifiers, data mining, and other Artificial Intelligence techniques have been used to achieve this work.

Resumen

Sistema de detección de patrones mediante la utilización de tecnologías disruptivas para la mejora de las tareas diarias de las personas.

En los últimos años la miniaturización de los dispositivos electrónicos y el abaratamiento de los procesos de fabricación de los componentes ha permitido que las redes de sensores inalámbricas sean cada vez más importantes y se empleen en multitud de casos. Adicionalmente, y debido en parte a la mejora en cuanto a las capacidades de almacenamiento y procesamiento de datos se refiere, ha permitido construir sistemas sensibles al contexto en áreas como la medicina, la monitorización o la robótica que permiten hacer un análisis detallado y adaptable de los procesos y servicios que se pueden proporcionar a los usuarios. Esta tesis doctoral ha sido conformada mediante un “Compendio de Artículos” donde se analiza la aplicación de paradigmas de inteligencia artificial en 3 casos de estudio claramente diferenciados. Se ha planteado un novedoso sistema de localización en interiores que hace uso de técnicas bayesianas y fingerprinting, con objeto de automatizar y facilitar los procesos de adquisición de datos de calibración. A mayores, se presenta un exoesqueleto que es conectado a una arquitectura sensible al contexto con objeto de que los pacientes de rehabilitación hagan ejercicios de forma interactiva y haciendo uso de técnicas de realidad aumentada. En el último artículo, se hace hincapié en el diseño de una plataforma que hace uso de las redes inalámbricas de sensores, con objeto de monitorizar el estado de los aseos mediante la incorporación de agentes embebidos en dispositivos limitados computacionalmente. Esta información descentralizada es analizada con objeto de detectar posibles anomalías y facilitar la toma de decisiones. Uno de los principales hitos que pretendo con mi estudio, es mostrar a la comunidad científica los diferentes resultados que he obtenido en mi investigación, solventando problemas cotidianos que han sido resueltos mediante la modelización de los casos de estudio mediante la utilización de arquitecturas multi-agente y sistemas expertos. El filtrado de señales, la utilización de clasificadores, minería de datos y la utilización de otras técnicas de Inteligencia Artificial han sido empleadas para la consecución exitosa de este trabajo.

Agradecimientos

Una vez acabada mi tesis doctoral es imposible no pararse un momento a mirar atrás, recapitular y pensar cómo he llegado hasta aquí. Sobre todo, quiero agradecer a todas las personas que han hecho posible, de una manera u otra, haber logrado este importante proyecto.

En primer lugar, quiero agradecer a mis directores Dr. Gabriel Villarrubia González y Dr. Juan Francisco de Paz Santana, el haberme dado la posibilidad de comenzar mi carrera investigadora, por sus consejos, su atención y su confianza depositada a lo largo de estos últimos años.

Para continuar, mi agradecimiento a la hora de culminar esta tesis es también hacia aquellas personas cuyo apoyo ha sido fundamental a la hora de realizar esta tesis. Aquí quiero agradecer a todos los miembros del grupo de investigación ESALab por darme la posibilidad de embarcarme en nuevas aventuras.

Un agradecimiento especial a mis compañeros de doctorado Héctor, Luis, Diego y Francisco, a los que se van y vuelven como Mario, a los que se encuentran aquí desde el principio como Loza, Dani y Barri, sobre todo por los momentos que hemos podido compartir a lo largo de estos años. Recordad que esto sin vosotros no habría sido posible.

Gracias a mis amigos que siempre me han prestado un gran apoyo moral y humano. En especial a los Juanes, Carlos, José, Bea y Fátima por estar siempre ahí.

Por último, quiero terminar agradeciendo a mis padres, mi hermano y maestros. Son ellos los que me han enseñado que el esfuerzo por los demás es seguramente la mejor escuela posible. De ellos he aprendido el significado más profundo del valor de la generosidad.

A todos vosotros, GRACIAS.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Hipótesis y objetivos	3
1.2. Metodología de la investigación	3
1.3. Estructura de la tesis	4
2. Estado del arte	7
2.1. Paradigma IoT	7
2.1.1. Redes de sensores inalámbricas	8
2.1.2. Edge Computing	14
2.1.3. Aplicaciones IOT	15
2.2. Paradigmas de la inteligencia artificial	17
2.2.1. Sistemas multi-agente	17
2.2.2. Sistemas context-aware	19
2.2.3. Algoritmos de aprendizaje automático	20
2.3. Sistemas de localización	27
2.3.1. Conceptos generales de los sistemas de localización	27
2.3.2. Técnicas de posicionamiento en interiores	29
2.3.3. Tecnologías de posicionamiento en interiores	36
3. Lista de artículos de revistas	41
3.1. Coherencia y relación entre los artículos	41
3.2. Automatic wireless mapping and tracking system for indoor location . . .	45
3.2.1. Resumen en español	55
3.3. Connected Elbow Exoskeleton System for Rehabilitation Training Based on Virtual Reality and Context-Aware	61
3.3.1. Resumen en español	79
3.4. Multi-Agent Approach Using LoRaWAN Devices: An Airport Case Study	83
3.4.1. Resumen en español	109
4. Conclusions	113
4.1. General Contributions	113
4.2. Future Works	114
A. Factor de impacto de las revistas	117
A.1. Neurocomputing	117
A.2. Sensors	117
A.3. Electronics	118

B. Conclusiones	119
B.1. Contribuciones Generales	119
B.2. Trabajos Futuros	121
Bibliografía	123

Índice de figuras

2.1. Red WSN	8
2.2. Componentes de un nodo de una red WSN	9
2.3. Localización física y simbólica	27
2.4. Clasificación de técnicas de posicionamiento de interiores	30
2.5. Posicionamiento basado en <i>Angle Of Arrival</i>	31
2.6. Posicionamiento basado en <i>Time Of Arrival</i>	32
2.7. Posicionamiento basado en <i>Time Difference Of Arrival</i>	32
2.8. Posicionamiento basado en <i>Received Signal Strength Indication</i>	33
2.9. Clasificación de tecnologías de posicionamiento de interiores	36

Lista de Abreviaturas

ADC *Analog to Digital Converter.*

AmI *Inteligencia Ambiental.*

AOA *Angle Of Arrival.*

AR *Action Research.*

BLE *Bluetooth de baja energía.*

CoAP *Constrained Application Protocol.*

DDS *Data Distribution Service.*

DTLS *Datagram Transport Layer.*

GPS *Sistema de Posicionamiento Global.*

GSM *Sistema Global para las Comunicaciones Móviles.*

HTTP *Protocolo de transferencia de hipertexto.*

IA *Inteligencia Artificial.*

IIoT *Industrial Internet of Things.*

IoT *Internet de las Cosas.*

IR *Radiación Infrarroja.*

LAN *Red de Área Local.*

LPWAN *Red de Área Amplia de Baja Potencia.*

LTE *Long Term Evolution.*

M2M *Máquina a Máquina.*

ML *Machine Learning.*

MQTT *Message Queing Telemetry Transport.*

RF Radio Frecuencia.

RFID Identificación por Radiofrecuencia.

RSSI *Received Signal Strength Indication.*

TDOA *Time Difference Of Arrival.*

TOA *Time Of Arrival.*

TOF *Time Of Flight.*

UWB Banda Ultra Ancha.

VR Realidad Virtual.

WiFi *Wireless Fidelity.*

WLAN Red de Área Local Inalámbrica.

WPAN Red de Área Personal.

WSN Red de Sensores Inalámbrica.

Capítulo 1

Introducción

Actualmente, la mayoría de los dispositivos que se conectan a internet corresponden con los dispositivos utilizados directamente por los seres humanos, como son los ordenadores y dispositivos móviles. Con el incremento de la digitalización que se viene apreciando a lo largo de los últimos años, son cada vez más los objetos o las “cosas” que están más presentes dentro de este mundo conectado. En un futuro no muy lejano, cada objeto puede estar conectado a internet, dando lugar a que el número de cosas conectadas a internet será mucho mayor que el número de personas. Los usuarios de internet empiezan a mezclar el mundo físico y el mundo de la información, entrando en la nueva era a la cual podemos denominar Internet de las Cosas (IoT). En esta aparecen cada día nuevas formas de comunicación e interacción entre los humanos y los objetos, además, la comunicación entre las cosas o los objetos ya es una realidad.

Se prevé que, debido al desarrollo y la importancia que está teniendo el IoT, en los próximos años millones de objetos físicos estarán equipados con diferentes sensores y actuadores conectados a internet a través de las redes de comunicación en tiempo real, generando un gran volumen y flujo de datos que deben ser procesados, almacenados y analizados. En este punto de la cadena del flujo de la información es donde se incorpora el Cloud Computing, elemento encargado de que esta cantidad de datos puedan ser alojados en internet y que estos estén disponibles para su uso, de forma que puedan ser utilizados para la prestación de servicios o por empresas o usuarios desde cualquier lugar, proporcionando una infraestructura virtual para la integración de dispositivos de almacenamiento, así como herramienta de análisis, visualización o de plataforma.

Otra arquitectura que está tomando poder en desarrollos IoT es el Edge Computing. En esta arquitectura se aporta una mayor autonomía a los dispositivos, haciéndolos más listos y dotándolos de mayor funcionalidad. Mientras que, utilizando una arquitectura únicamente basada en Cloud Computing, todo el trabajo de computación y análisis de datos se realiza en la nube, utilizando Edge Computing se dota a los nodos de red de la capacidad de analizar los datos evitando que estos tengan que pasar por la nube, haciendo que los datos se procesen lo más cerca posible de donde se han generado, evitando largos recorridos hasta llegar a los centros de computación para la toma de decisiones. La principal ventaja que ofrece esta solución es el análisis de datos casi en tiempo real, siendo de vital importancia especialmente en los sectores de la industria o en el sector de la salud, telecomunicaciones o el financiero.

Con más dispositivos conectados, aparecen más datos que tienen como potencial proporcionar conocimientos increíbles a los usuarios y a las empresas, si bien con esto, se

presenta como reto el cómo llevar a cabo el análisis de todos los datos generados. La recopilación de estos datos no beneficia a nadie salvo que haya un sistema de interpretación para entenderlos. En este punto de la cadena es donde la Inteligencia Artificial (IA) entra en juego, ya que hacer que enormes cantidades de datos cobren sentido es una aplicación perfecta para la utilización de IA.

Con la aplicación de las capacidades analíticas de la Inteligencia Artificial a los datos recopilados por el Internet de las Cosas, las empresas y los usuarios pueden identificar y entender los patrones, así como tomar decisiones más fundadas simplificando la forma en que se realizan las tareas rutinarias. Esto conlleva a diversos beneficios, ya sea a los consumidores o las empresas, como es la intervención proactiva, la automatización inteligente y las experiencias con alto nivel de personalización. También nos permite encontrar soluciones para que los dispositivos conectados funcionen mejor de forma conjunta y hacer que los sistemas sean más fáciles de usar.

Este campo de trabajo, el estudio de patrones y de comportamientos ha experimentado una especial atención debido a las numerosas áreas de aplicación que tiene. Este se caracteriza por ser de tipo multidisciplinar abarcando un sinnúmero de aplicaciones con beneficios sociales, comerciales y educativos. Por ejemplo, en los sistemas de vigilancia [1, 2] ha permitido la creación de sistemas inteligentes donde no es necesario de un supervisor humano para el sistema. Estos sistemas se aplican principalmente para el control de acceso a áreas especiales, recuento de personas, mantener distancias sociales [3] o la detección de comportamientos anormales en el entorno que se encuentran los usuarios [4]. También se puede usar para el estudio de comportamientos a la hora de obtener patrones biométricos [5, 6], permitiendo identificar y distinguir a los diferentes usuarios. En el reconocimiento de gestos y posturas, se ha utilizado la detección para la creación de interfaces naturales avanzadas especialmente en el mundo de los videojuegos [7], reconocimiento de signos [8] y para el control de dispositivos [9]. En robótica, el reconocimiento de patrones se ha utilizado para la creación de robots humanoides que tienen la capacidad de imitar los movimientos de los humanos [10]. En el sector médico se ha utilizado para el estudio y el análisis de ortopedia, postura corporal y estado físico de pacientes [11, 12]. En el área del deporte y el ejercicio ha permitido analizar los movimientos atléticos para diseñar modelos de entrenamientos asequibles y eficientes [13]. También han aparecido sistemas que permiten la rehabilitación mediante la detección de movimientos [14]. En el arte y el entrenamiento las técnicas de reconocimiento de patrones se han utilizado para analizar, aprender y comprender emocionalmente los movimientos artísticos de la danza [15], permitiendo aumentar la calidad y el impacto de una actuación mediante la alteración de los movimientos.

A consecuencia de esto, se puede afirmar que el uso de tecnologías disruptivas como es el Internet de las Cosas (IoT) y la aplicación de mecanismos inteligentes basados en técnicas de Inteligencia Artificial pueden facilitar la interacción de las personas con las máquinas a la hora de realizar las tareas diarias de las personas. Debido a que el campo de estudio de patrones y estudios de comportamientos todavía es un campo joven, ya que su crecimiento se encuentra directamente relacionado con la aparición de nuevos sensores, actuadores y nuevas redes de sensores, en esta tesis doctoral se pretende investigar sobre nuevos campos en los cuales es necesario crear nuevos mecanismos de monitorización para la agilización de los procesos existentes.

1.1. Hipótesis y objetivos

En los últimos años diferentes grupos de investigación y otras entidades han hecho un inmenso esfuerzo en desarrollar e investigar soluciones orientadas al estudio y análisis de comportamiento de usuarios. En la actualidad existen diferentes soluciones tecnológicas que se encuentran totalmente acopladas a nivel hardware. Debido a ello existe una dificultad a la hora de realizar integraciones con sensores de diferentes fabricantes, o bien desarrollar nuevas capacidades tecnológicas sin una total dependencia. Es por ello por lo que es de vital importancia desarrollar e investigar nuevas arquitecturas que permitan el ofrecimiento de soluciones que faciliten el día a día de las personas.

De esta manera, la hipótesis que ha sido seleccionada como base de este trabajo de investigación es la siguiente:

Hipótesis
El diseño de una plataforma que permita la monitorización y detección de patrones de comportamiento mediante el manejo de redes de sensores distribuidas y embebidas en combinación con nuevos paradigmas de computación disruptivos como el Edge Computing aplicados sobre técnicas de Inteligencia y Visión Artificial, facilitara la interacción de las personas con las máquinas, simplificando de esta manera las tareas diarias de las personas y de una forma transparente para los usuarios.

Para validar la hipótesis de investigación se han planteado los objetivos que se pueden ver a continuación. Estos deben ser alcanzados durante el desarrollo del trabajo de investigación para demostrar que la hipótesis es factible.

- Realizar una revisión del estado del arte de los mecanismos de adquisición de información a través de redes de sensores, identificando las necesidades y las limitaciones actuales.
- Investigar y diseñar sistemas que permitan la detección de patrones de comportamiento de los usuarios mediante la aplicación de tecnologías inteligentes.
- Investigar de arquitecturas inteligentes que permitan la adaptación al contexto, con la incorporación de nuevos elementos o la resolución de fallos que se puedan producir en el entorno.
- Diseñar una la red de sensores y actuadores que permita recuperar información del entorno, procesarla en el entorno de Edge Computing y actuar en función del resultado del análisis de la información.
- Diseño de un modelo de agentes que pueda ser embebido en dispositivos computacionalmente limitados.
- Diseñar al menos tres casos de estudio diferentes donde se apliquen técnicas de inteligencia artificial que permitan determinar el comportamiento de los usuarios y, de esa manera, facilitar las tareas de las personas y mejorando su calidad de vida.

1.2. Metodología de la investigación

El proceso de investigación y el método de trabajo en el que se ha fundamentado esta tesis es la metodología *Action Research* (AR) [16]. Esta metodología se basa en identificar

un problema y formular a partir de él una hipótesis, partiendo de unos conceptos definidos dentro de un modelo cuantitativo de la realidad. De esta manera, se lleva a cabo el proceso de recopilación, organización y análisis de la información, continuando con el diseño de una propuesta enfocada a solucionar el problema. Finalmente, tras evaluar los resultados obtenidos de la investigación, se formulan las conclusiones respectivas. Para seguir esta metodología, ha sido necesario definir una serie de actividades que han permitido alcanzar los objetivos planteados, así como demostrar cierta la hipótesis. Las actividades que se han planteado al principio del trabajo de investigación han sido 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. El proceso de revisión se centra tanto en las técnicas aplicadas en el análisis de expresiones, como en las alternativas y métodos para llevar a cabo la planificación automática. La revisión del estado del arte debe ser un proceso continuo a lo largo de la investigación.
- **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** en comparación con otros procedimientos para así determinar si la hipótesis planteada inicialmente se ha alcanzado.
- **Publicación de los resultados obtenidos** a lo largo de la investigación tanto en congresos como en revistas. Las publicaciones en congresos son de gran importancia porque permiten la asistencia a conferencias que facilitan el intercambio de ideas de primera mano con otros investigadores del mismo o distinto campo de investigación.

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

Gracias a la aplicación de este método de investigación se ha planteado obtener un doble objetivo. En primer lugar, generar un beneficio del resultado de la investigación para la implantación en entornos reales y, en segundo lugar, generar conocimiento de investigación relevante aplicable a otros ámbitos.

Además, esta metodología también permite comunicar los resultados obtenidos en la investigación a través de las publicaciones en revistas o conferencias. Esta última afirmación es bastante importante, ya que el objetivo de toda la investigación científica es transferir los conocimientos obtenidos al resto de la comunidad científica.

1.3. Estructura de la tesis

Tras definir la hipótesis, se debe realizar una investigación para darla como cierta. Para ello, la investigación realizada se define en el resto de los capítulos cuyo contenido

y estructura son explicados a continuación.

1. **Capítulo 2. Estado del arte:** en este capítulo se ha llevado a cabo el estudio del estado del arte relacionado con la hipótesis del trabajo. En esta sección se han analizado los diferentes entornos y tecnologías existentes para la creación de sistemas inteligentes, así como los algoritmos que se pueden aplicar para su creación. Por otra parte, se han analizado los diferentes entornos IoT, realizando una clasificación de los componentes básicos, los protocolos y las tecnologías de comunicación. Por último, durante este estudio, se ha realizado un estudio profundo de los sistemas de localización.
 2. **Capítulo 3. Lista de artículos de revista:** Este capítulo de tesis es específico de la modalidad de tesis por compendio. En él se presentan cuáles han sido los artículos obtenidos durante este proceso, un resumen en español donde se describen cuáles son los objetivos de la investigación, la metodología y los resultados obtenidos en el artículo. En esta sección también se aborda cual es coherencia entre los diferentes artículos y como estos se encuentran alineados con la hipótesis de investigación.
 3. **Capítulo 4. Conclusiones:** por último, en este capítulo, se exponen cuáles han sido las conclusiones obtenidas con el desarrollo del trabajo de investigación de esta tesis doctoral.
-

Capítulo 2

Estado del arte

En este capítulo se describen los principales conceptos que se tratan en la presente tesis doctoral. Se analizan las investigaciones previas que se encuentran actualmente las diferentes técnicas y herramientas relacionadas con la hipótesis de esta tesis doctoral. El capítulo se encuentra dividido en tres paradigmas principales: Internet de las Cosas, inteligencia artificial y los sistemas de localización de interiores.

2.1. Paradigma IoT

El Internet de las Cosas (IoT) se está convirtiendo en la revolución del mundo actual y un hito de la inteligencia artificial [17]. El concepto de IoT tiene como objetivo actuar a distancia con todos los objetos que disponemos en nuestro entorno [18]. El IoT consiste en todos los dispositivos habilitados para su uso con internet que recogen, envían y actúan sobre los datos que adquieren de sus entornos, ya sea utilizando sensores, procesadores y hardware de comunicación integrados [19]. Estos dispositivos, a menudo llamados dispositivos conectados o inteligentes, a veces pueden hablar con otros dispositivos relacionados, realizándose un proceso llamado comunicación Máquina a Máquina (M2M), y actuar sobre la información que reciben unos de otros. Los humanos pueden interactuar con los *gadgets* para configurarlos, darles instrucciones o acceder a los datos, pero los dispositivos realizan la mayor parte del trabajo por sí solos sin intervención humana. Su existencia ha sido posible gracias al abaratamiento de los costes del hardware de los últimos años y la aparición de nuevos sensores.

Los objetos inteligentes en IoT pueden identificarse de forma unívoca. Estos dispositivos pueden disponer de Identificación por Radiofrecuencia (RFID) o códigos de barras que son detectados por los dispositivos sensores. Los sensores comparten los datos recogidos a través de Internet para ser procesados por la unidad de procesamiento. El resultado del tratamiento se comunica a la toma de decisiones y a la acción que invoca el sistema para generar la acción apropiada.

Con el IoT se pueden agilizar y dinamizar procesos aplicando técnicas de inteligencia artificial para el análisis de los datos [20, 21].

Debido a que el IoT genera y analiza grandes cantidades de información, es importante disponer de mecanismos que sean capaces de analizar grandes cantidades de datos [22] y aportar resultados en tiempo real [23].

La definición de IoT ha evolucionado debido a la convergencia de múltiples tecnologías, la analítica en tiempo real, el aprendizaje de máquinas, los sensores de productos

básicos y los sistemas incorporados. Los campos tradicionales de los sistemas incorporados, las redes inalámbricas de sensores, los sistemas de control, la automatización y otros contribuyen a hacer posible el Internet de las cosas.

2.1.1. Redes de sensores inalámbricas

Una red *Red de Sensores Inalámbrica (WSN)* es una red de dispositivos inalámbricos (nodos) equipados con unos sensores que cooperan para realizar una tarea común. Dichos dispositivos permiten formar redes Ad Hoc, es decir, redes descentralizadas y sin una infraestructura física preestablecida que permiten añadir más nodos de forma sencilla [24].

Los nodos están espacialmente distribuidos con objetivo de recoger métricas a monitorizar. Los datos generados por los sensores son enviados de manera inalámbrica entre los nodos hasta llegar a un dispositivo específico llamado *Gateway Node*, que es el responsable de enviar dichos datos a una red externa como se puede observar en la figura 2.1.

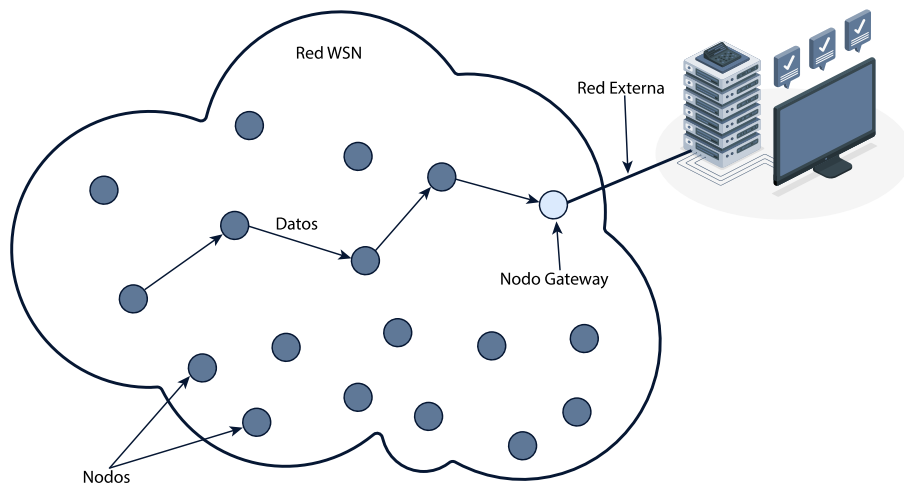


Figura 2.1: Red WSN

Los nodos que forman una red WSN deben disponer de cuatro componentes básicos [25]. El primer de ellos es la **unidad sensorial** que está formada por un sensor y un *Analog to Digital Converter (ADC)*. El sensor recoge la información de la métrica y el ADC es el responsable de convertir los datos analógicos a digitales. La segunda es la **unidad de procesamiento**, formada por un microcontrolador y una memoria. Tiene como tarea procesar la información recogida por la unidad sensorial. El **sistema de comunicación**, normalmente un radio receptor, es la parte que permite la comunicación entre los nodos y la comunicación del nodo con el nodo *Gateway*. Por último, es necesario una **batería** que es la encargada de ofrecer la alimentación al nodo. En la figura 2.2 se pueden ver los elementos básicos de un nodo de una red WSN.

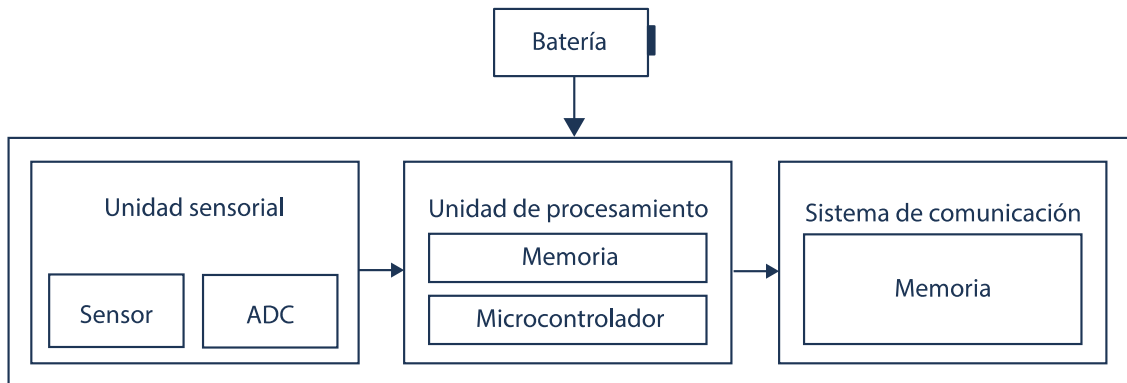


Figura 2.2: Componentes de un nodo de una red WSN

Los nodos cuando son construidos, debido a las limitaciones de las capacidades de las baterías, se construyen teniendo en cuenta el ahorro de energía y suelen disponer de la posibilidad de ponerlos en modo dormido (*sleep*) de bajo consumo de energía.

Características de una red WSN

Antes de abordar las diferentes arquitecturas y tecnologías utilizadas para el desarrollo de sistemas basados en WSN, se van a describir las principales características de redes WSN atendiendo al estudio [25].

- **No es necesario una infraestructura de red:** Los propios nodos de la red pueden actuar como enrutadores, receptores o emisores de la información.
- **Topología dinámica:** La topología en una red de sensores no es fija, más bien tiene una naturaleza cambiante donde al añadir nuevos nodos, la red se adapta para poder comunicar la nueva información adquirida.
- **Comunicaciones *multihops* o *broadcast*:** En las redes WSN es muy común utilizar protocolos de comunicación *multihops*, enrutamiento de múltiples saltos, donde la información pasa de un nodo a otro hasta llegar al nodo *gateway*, pero también es muy común utilizar un protocolo de comunicación *broadcast* donde la información se difunde por toda la red.
- **Bajos costes de producción:** Para obtener datos con fiabilidad las redes WSN tienen un número elevado de nodos sensores por lo que, una vez definida su aplicación, deben ser económicos al fabricarse en grandes cantidades.
- **Bajo consumo energético:** Un nodo sensor debe estar compuesto por componentes de ultra bajo consumo energético para aumentar su autonomía. Sin embargo, esto es uno de los factores más sensibles ya que hay que equilibrar bien entre el consumo energético y la capacidad de procesamiento del nodo.
- **Limitaciones Hardware:** Debido a que es necesario un nodo sensor de muy bajo consumo energético para aumentar su autonomía, esto conlleva que los componentes hardware del nodo deben ser lo más sencillos posible, limitando de este modo la capacidad de procesamiento del nodo.

- **Variabilidad del canal:** El canal de radio es un canal propenso a errores debido a una lista de fenómenos tales como atenuación, desvanecimientos e interferencias que pueden provocar errores en los datos recogidos.
- **Tolerancia a errores:** Un nodo dentro de una red WSN puede seguir funcionando, aunque se hayan generado errores en el sistema como por ejemplo la desconexión de algunos nodos de la red.

Clasificación de las redes WSN

Las redes WSN tiene una amplia aplicabilidad, por lo tanto, una red WSN específica que ha sido desplegada de acuerdo con los requisitos de aplicación puede ser diferente a otra red WSN cuyos requisitos de aplicación son distintos. A continuación, se muestra una clasificación de las redes WSN en categorías [24]:

- **Redes WSN estáticas y redes WSN móviles:** En muchas aplicaciones los nodos sensores son fijos sin movimiento y constituyen redes WSN estáticas. En cambio, en otras aplicaciones se necesitan que los nodos sensores se muevan en la red WSN para recoger información, dicha red se denomina redes WSN móviles.
 - **Redes WSN deterministas y redes WSN no deterministas:** En una red de sensores determinista se calculan y se fijan las posiciones de los nodos. Sin embargo, existen otras redes en las que el entorno no permite determinar las posiciones de los nodos y requieren un sistema de control complejo. Estos últimos forman una red no determinista.
 - **Redes WSN con un único nodo *gateway* y redes WSN con múltiples nodos *gateway*:** En las redes WSN pequeñas, normalmente bastaría con un único nodo *gateway* que recoga la información que mandan todos los nodos sensores. En redes WSN de gran tamaño esto no es posible y es necesario añadir más nodos *gateway*, en la cual un nodo sensor manda los datos generados al nodo *gateway* más cercano. La información recogida por los nodos *gateway* puede mandarse directamente a la red externa o mandarlas a un nodo *gateway* coordinador responsable de mandar dicha información a la red externa, filtrando el envío de paquetes duplicados.
 - **Redes WSN con nodo *gateway* estático y redes WSN con nodo *gateway* móvil:** Las redes sensores pueden tener un nodo *gateway* estático fijado en una posición específica dentro de la región de sensores. También pueden tener un nodo *gateway* móvil el cual es capaz de moverse a lo largo de la región de sensores para que la carga de los nodos sensores esté equilibrada.
 - **Redes WSN *single-hop* y redes WSN *multi-hop*:** Los nodos redes sensores de *single-hop* (salto simple) se comunican directamente con el nodo *gateway* mientras que los datos generados por las redes de sensores de *multi-hops* (múltiples saltos) van de un nodo sensor a otro nodo sensor hasta llegar a un nodo *gateway*.
 - **Redes WSN auto configurables y redes WSN no auto configurables:** En las redes de sensores no auto configurables los nodos no pueden organizarse por sí mismos y dependen de una unidad de control para recolectar información. En cambio, en
-

las redes auto configurables, los nodos sensores son capaces de organizarse y mantener la conexión y trabajar cooperando con otros nodos sensores para realizar la tarea.

- **Redes WSN homogéneas y redes WSN heterogéneas:** En las redes homogéneas todos los sensores tienen un consumo de energía, potencia computacional y capacidades de almacenamiento similares. Mientras que en las redes heterogéneas algunos nodos sensores tienen mayor potencia computacional y un mayor consumo energético por lo que las tareas de procesamiento y de comunicación se divide entre los nodos adecuadamente.

Topología de las redes WSN:

Según las características de las redes WSN comentadas anteriormente las redes sensores pueden formar diferentes topologías [26]. A continuación, se describen algunas de las topologías más comunes:

- **Topología en estrella:** En dicha topología hay un solo nodo central llamado *Hub* o *Switch* y los demás nodos están conectados con el *Hub*. La topología en estrella es fácil de diseñar, implementar y ampliar, pero el problema es que todos los datos generados por los nodos pasan por el *Hub* por lo que juega un papel importante en la red y, si falla el *Hub*, puede resultar en un fallo de toda la red.
- **Topología en árbol:** Una topología en árbol es una red jerárquica donde sólo hay un nodo raíz en la parte superior donde está conectado directamente con otros nodos que, a su vez, están conectados a otros nodos inferiores y así sucesivamente. La potencia de procesamiento y consumo energético es mayor en el nodo raíz y va disminuyendo a medida que bajamos por el orden jerárquico.
- **Topología de malla:** En una topología de malla los nodos, además de transmitir sus propios datos, actúan como repetidores y retransmite los datos recibidos de otros nodos. Dicha topología puede ser:
 - Topología de malla parcialmente conectada: Los nodos están conectados con uno o más vecinos.
 - Topología de malla totalmente conectada: Todos los nodos están conectados con los demás nodos.

Tecnología de comunicación

Las tecnologías de comunicación inalámbricas han tenido un rápido desarrollo en los últimos años. La utilización de una de forma específica depende de los requerimientos de la aplicación que se esté diseñando. A continuación, se muestran cuáles son las tecnologías de telecomunicación más utilizadas para la creación de redes WSN:

- **Bluetooth:** Esta tecnología se usa para el intercambio de datos a una corta distancia de forma inalámbrica. Su frecuencia de funcionamiento se encuentra en el rango 2400-2480MHZ. Entre sus características se destaca el bajo consumo, la elevada velocidad de transmisión de información y amplia cobertura. Se puede clasificar en 3 distintas clases, es decir, clase 1, clase 2 y clase 3, cada una con un alcance

determinado. El alcance del Bluetooth se encuentra en torno a los 250 metros. En la versión 4.0 del Bluetooth, también conocida por Bluetooth de baja energía (BLE), se incorpora a esta tecnología la una versión de bajo consumo. Igual que pasa con otras tecnologías de baja potencia, los ruidos existentes en el entorno pueden hacer que la señal se atenúe o se distorsione.

- **ZigBee:** Esta tecnología utiliza el estándar IEEE 802.15.4. Su aplicación se centra el despliegue de redes inalámbricas en formato malla. Con ella se pueden crear soluciones que sean eficientes a nivel energético. Sin embargo, como desventaja, tiene una tasa de envío de datos bastante baja, pudiendo alcanzar los 250kbps cuando se utiliza el canal de 2.4Ghz. El alcance de esta tecnología en exteriores puede alcanzar 75 metros cuando se realizan conexiones punto a punto y en interiores 30 metros. Esta tecnología a lo largo de últimos años se viene aplicando principalmente en el control de dispositivos, envío de datos desde los nodos de una forma fiable, automatización de viviendas e edificios, vigilancia, etc.
- **Red de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN):** Es un protocolo de transporte inalámbrico utilizado para la implementación de redes IoT. Las características que deben cumplir las tecnologías para pertenecer a este grupo son numerosas. Entre ellas, se encuentra la larga distancia que alcanzan, ya que deben ser capaces de realizar comunicaciones de larga distancia dentro de un rango 10 a 40km y en entornos urbanos de 1 a 5km. Además, deben permitir una comunicación eficaz en interiores o zonas subterráneas. Por otra parte, presentan un bajo consumo, es decir, la tecnología ha de estar optimizada para el bajo consumo de energía, ya que los nodos de forma habitual son diseñados para ser alimentados con baterías. Finalmente, presentan bajo coste ya que los protocolos de LPWAN son simples y ligeros por lo que se reduce la complejidad de diseño del hardware y se disminuyen los costes del dispositivo.

Algunas de las tecnologías LPWAN desarrolladas son:

- **Sigfox:** Es un operador de red LPWAN que ofrece una solución de conectividad IoT en cualquier punto basado en sus tecnologías patentadas. Para ello despliega estaciones equipadas con radios que permiten la comunicación entre nodos finales y los servidores del cliente final, utilizando una red basada en el protocolo IP. Los dispositivos finales se conectan a estas estaciones utilizando modulación binaria por desplazamiento de fase (BPSK). En Europa este operador utiliza la frecuencia sin licencia ISM a 868MHz para llevar a cabo la comunicación.
- **LoRa:** Es una tecnología a nivel de capa física que modula la señal en la banda de frecuencia sub-GHz ISM utilizando una técnica de propagación del espectro. Para su implementación también hace uso de frecuencias sin licencia ISM, 868MHz en Europa. La comunicación bidireccional es proporcionada por la modulación *Chirp Spread Spectrum* (CSS) que propaga la señal de banda ancha estrecha en un canal de ancho de banda más amplio. La tecnología LoRa utiliza 6 diferentes factores de propagación para adaptar el alcance y la tasa de envío de los datos. La tasa de envío de los datos se encuentran entre los 300bps y los 50kbps dependiendo del factor de propagación y el ancho de banda del

canal. Existe un protocolo de comunicación basado en LoRa llamado LoRaWAN que ha sido estandarizado por LoRa Alliance. Utilizando el protocolo LoRAWAN, cada mensaje transmitido por un dispositivo final es recibido por todas las estaciones que se encuentran en su área de alcance.

- **NB-IoT:** Esta tecnología para la comunicación de dispositivos IoT puede coexistir con el sistema Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM) y *Long Term Evolution (LTE)*, sin necesidad de realizar modificaciones en las arquitecturas ya desplegadas de LTE. La velocidad máxima de transmisión de datos está limitada a 200kbps para la bajada y 20kbps para la subida. El tamaño máximo del mensaje que se puede transmitir utilizando esta tecnología es 1600bytes.
- **Wireless Fidelity (WiFi):** Esta tecnología se encuentra basada en el estándar IEEE 802.11. En esta tecnología se utiliza en un espectro ensanchado permitiendo a los dispositivos ocupar la misma frecuencia causando la mínima interferencia entre ellos. La frecuencia de funcionamiento puede ser 2.4GHz o 5GHz. Esta tecnología es las más utilizadas para el uso Red de Área Local (LAN) con velocidades máximas de hasta 600Mbps y distancias de cobertura de 250m. El paquete de datos se envía utilizando el mismo estilo que se hace por Ethernet. La ventaja de WiFi radica en la alta velocidad de datos, el soporte IP, la amplia cobertura y la escalabilidad. El uso de esta tecnología en el desarrollo de dispositivos IoT se suele llevar a cabo cuando estos pueden estar conectados a la red eléctrica ya que debido a comunicaciones constantes de esta tecnología lo hacen todavía aptos para su uso con baterías.
- **Z-Wave:** Es una norma patentada y destinada exclusivamente a aplicaciones de control remoto en zonas residenciales y comerciales. Este protocolo funciona en la frecuencia 868 MHz en Europa y en la frecuencia 908 MHz en Estados Unidos. El alcance en interiores se encuentra en torno a 30 metros y en exteriores puede alcanzar los 100 metros. Las principales ventajas que ofrece esta tecnología son una red libre de interferencias y soporte del protocolo IP. En esta tecnología se pueden destacar dos tipos de nodos, los controladores y los esclavos. El controlador mantiene la topología de red y los esclavos pueden ser utilizados como enrutadores y son útiles para monitorizar los sensores.

Protocolos de comunicación de las redes WSN

- **Protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP):** Este protocolo funciona a nivel de capa aplicación y se usa de forma habitual para la comunicación entre sistemas distribuidos. Se ha utilizado para la implementación de sistemas IoT debido a su fiabilidad a la hora de enviar datos y su fácil implementación. Sin embargo, al ser un protocolo basado en texto este incrementa el tamaño del mensaje, el consumo y la complejidad para los dispositivos IoT.
 - **Message Queing Telemetry Transport (MQTT):** Este protocolo de comunicación M2M es de tipo de cola de mensajes. Utiliza el protocolo IP como base para su funcionamiento. MQTT, mantiene abierta la comunicación de modo que se pueda reutilizar en cada conexión. Se encuentra diseñado para gastar poco ancho de
-

banda y de la misma manera ahorrar energía. Esto lleva a que sea una de las principales razones de por qué este protocolo es uno de más comunes y utilizados en los dispositivos IoT.

Su funcionamiento se basa en un servicio de mensajería *push* con un patrón *Publish-Subscribe*. En este protocolo el *publisher* envía la información a un tópico específico y todos los *subscribers* que se encuentren suscritos a ese tópico recibirán una copia de la información enviada por *publisher*. En este protocolo también debemos destacar la funcionalidad del *broker* que es el encargado de recibir toda la información y distribuirla a todos los *subscribers*.

Una característica importante del MQTT es que, de forma nativa, es un protocolo que no se encuentra cifrado. Sin embargo, al operar sobre TCP, se puede utilizar el cifrado TLS/SSL.

- **Constrained Application Protocol (CoAP):** Este protocolo es sencillo y con poca sobrecarga. Se encuentra diseñado específicamente para dispositivos con recursos limitados, como pueden ser los microcontroladores o redes limitadas. Los mensajes intercambiados entre los dispositivos utilizando este tipo de protocolo son asíncronos. Las comunicaciones con este protocolo se realizan mediante el protocolo UDP reduciendo las comunicaciones entre el cliente y el servidor. Como desventaja al usar UDP la fiabilidad no está garantizada.

Igual que con MQTT, CoAP no está cifrado, pero el uso de *Datagram Transport Layer (DTLS)* al usar UDP permite cifrar las comunicaciones.

- **Data Distribution Service (DDS):** Este protocolo opera en la capa de transporte y se usa de middleware para el intercambio de mensajes entre M2M. Hace uso del patrón *Publish-Subscribe*, donde un nodo envía los datos a un tópico y todos los nodos suscritos a ese tópico van a recibir la información. Igual que pasaba con MQTT un nodo puede actuar de *publisher*, *subscriber* o de ambos.

2.1.2. Edge Computing

El *Edge Computing*, en español Computación en el Borde, es un paradigma informático distribuido que tiene como objetivo acercar la computación y el almacenamiento de los datos al lugar donde se necesitan, con el objetivo de mejorar los tiempos de respuesta y ahorrar también ancho de banda. Este paradigma se ha utilizado en el desarrollo de varias soluciones [27, 28, 29].

A continuación, se van a detallar cuales son las principales ventajas de los sistemas de *Edge Computing* frente a los tradicionales sistemas basados en *Cloud Computing*.

- **Instantaneidad:** En un escenario IoT el tiempo real viene determinado en gran medida por el tiempo del recorrido de los datos por la red, aunque este tiempo también se ve afectado por velocidad de la red el principal factor que se debe tener en cuenta es la distancia del recorrido. Debido a esto con *Edge Computing* se consigue que los sistemas sean más instantáneos que los tradicionales basados en *Cloud Computing*.
- **Ancho de banda:** En un sistema basado en *Cloud Computing*, todos los datos son enviados a un servidor central para su procesamiento y así generar una respuesta.

El recorrido del envío los datos y respuesta consume un elevado ancho de banda, mientras que en *Edge Computing* los datos hacen el menor recorrido posible ahorrando de esta manera todo el ancho de banda innecesario.

- **Enorme consumo de energía:** En los sistemas basados en *Cloud Computing* todos los datos se almacenan en un centro de datos llevando a un elevado consumo de energía centralizado, mientras que en *Edge Computing* al realizarse de forma descentralizada se alivia la carga de estos centros de datos.
- **Privacidad:** En los sistemas *Cloud Computing* la información se suele encontrar almacenada de una forma centralizada, por lo que suele ser una fuente más propensa a ser atacada. Por otra parte, en *Edge Computing* los datos se encuentran de forma más distribuida. Por otro lado, en una arquitectura basada en *Edge Computing* los datos se suelen encriptar lo más cerca de la fuente de modo que estos pasen a ser de carácter anónimos e insensibles para que sea menos problemático la filtración de la información.

2.1.3. Aplicaciones IOT

Las aplicaciones IoT intentan dar un giro importante en el estilo de vida de las personas ofreciéndoles facilidades en el momento de llevar a cabo tareas del día a día. Debido a la aparición de nuevas tecnologías de comunicación y el abaratamiento de los costes de producción de los dispositivos IoT, se superará la brecha entre el mundo físico y el digital para mejorar la forma de vida de la sociedad y las empresas. En esta sección se van a describir cuales son los campos sobre los cuales se desarrollan aplicaciones haciendo uso del IoT.

- **Ciudades inteligentes:** Las ciudades inteligentes, también conocidas por *Smart Cities*, es una de las principales aplicaciones del IoT [30]. El transporte automatizado, la seguridad urbana, los sistemas inteligentes de gestión de energía, los sistemas de vigilancia, el suministro de agua, el seguimiento y monitorización de constantes ambientales son algunos de los usos del IoT en las ciudades inteligentes [31]. Las soluciones IoT en las ciudades inteligentes tienen como objetivo mejorar el estilo de vida de las personas que viven en ellas. Además, este tipo de soluciones IoT en las ciudades resuelven los problemas de los atascos y reducen la contaminación acústica, además de ayudar a que las zonas urbanas sean más seguras.
 - **Salud digital:** El uso de dispositivos IoT en la sanidad está creciendo en los últimos años, y seguirá creciendo en las próximas décadas [32]. El IoT en el sector sanitario anima a las personas a utilizar los dispositivos conectados que se puedan llevar a cabo una monitorización constante de métricas relacionadas con la salud y recomendar unos hábitos de vida más saludables. El concepto de salud digital conectada tiene como público objetivo personas y empresas del sector de la medicina e industrias farmacéuticas, aunque de momento esto todavía no ha llegado a la mayoría de las personas.
 - **Agricultura inteligente:** Con el número de personas que viven en el planeta, y debido a que este número aumenta cada día, la demanda de alimentos también aumenta a diario. En este escenario, la agricultura inteligente es uno de los campos
-

que ha sufrido un mayor crecimiento en la aplicación de dispositivos IoT [33]. La aplicación del IoT no solo ayuda a los agricultores o a organizaciones agrícolas a aumentar sus ingresos, sino que también ayuda al consumidor a obtener alimentos más baratos y de mayor calidad. En la agricultura se está haciendo uso de dispositivos IoT para controlar los suministros de agua de las plantas, obtener información sobre los nutrientes, la humedad del suelo y las condiciones meteorológicas [34].

- **Cadena de suministros:** La cadena de suministros es otro de los campos donde se están experimentando avances tecnológicos. Con el IoT se facilita en este campo las tareas que hacen referencia al seguimiento y a la organización de productos o la gestión de información de inventarios [35].
 - **Hogares inteligentes:** Los hogares y las casas inteligentes han sufrido grandes avances a lo largo de los últimos años. La aplicación del IoT en este sector se centra en la automatización de las viviendas y edificios. Igual que los demás sectores la principal motivación que ha llevado a su expansión ha sido la bajada de los precios y la aparición de dispositivos *Plug and Play* que pueden ser instalados por los propios usuarios. Las automatizaciones que se puede llevar a cabo en estos hogares tienen como objetivo facilitar las tareas diarias a las personas que viven en ellos [36]. También nos podemos encontrar con aplicaciones relacionadas con la eficiencia energética, el ahorro de energía, la seguridad del hogar [37, 38]. Los entornos inteligentes domésticos están empezando a tener una vital importancia en personas mayores o que dispongan de algún tipo de discapacidad, ya que con ellos se les consigue ofrecer una mayor autonomía en la realización de tareas en su día a día.
 - **Sector del retail:** El sector del retail, concepto que hace referencia a la venta al por menor o comercio minorista, haciendo uso de dispositivos IoT, no solo puede ofrecer grandes rendimientos al vendedor [39]. Con ayuda del IoT se puede configurar información y promociones a los usuarios, permite también ayudar a localizar un producto dentro de un centro comercial o inventario. El teléfono inteligente es el principal elemento que se puede usar para este fin. Actualmente los consumidores pueden pagar con su teléfono, además de poder seguir sus pedidos a través de los servicios promocionados por los vendedores [40].
 - **Industrial Internet of Things (IIoT):** El IoT Industrial es la definición del IoT en campos como es la logística, el transporte, la fabricación o cualquier tipo de industria. Muchos investigadores ven el IIoT como un concepto que tiene grandes posibilidades [41]. El IIoT se usa para medir y sensorizar los datos de las máquinas o los diversos componentes de las industrias. El problema de la mayoría de las industrias es que necesitan que el procesamiento de los datos se realiza en tiempo real, y que necesitan actuar en milisegundos para evitar consecuencias graves o problemas catastróficos. Otro de los problemas en la industria es que cada máquina dispone de su propio protocolo, por lo que hace difícil realizar integraciones para obtener los datos de las propias máquinas o para que estas se comuniquen entre sí.
-

2.2. Paradigmas de la inteligencia artificial

El paradigma de la inteligencia artificial es conexionista y es un producto de la asociación o combinación de entidades independientes más simples, como pueden ser los agentes, genes o neuronas. El producto de su iteración es un sistema que presentaría un comportamiento inteligente para dar respuesta muy parecidas a las que daría un ser humano. Por otro lado, estos paradigmas de la inteligencia artificial también permiten la extracción de conocimiento a partir de fuentes de datos para ayudar al sistema o a los usuarios en la toma de decisiones. En este apartado se realizará un análisis de los sistemas multi-agente, sistemas basados en el contexto y los algoritmos de aprendizaje automatizados.

2.2.1. Sistemas multi-agente

Un sistema multi-agente está formado por múltiples agentes con capacidades de decisión que interactúan en un entorno compartido para alcanzar objetivos comunes o conflictivos. La investigación sobre los sistemas multi-agentes abarca toda una serie de problemas técnicos, como es el diseño de algoritmos que permiten a uno a varios agentes alcanzar los objetivos específicos del sistema, la forma de comunicación o propagar la información entre los agentes, las normas y los roles de cada uno de los agentes. La aplicación de los sistemas multi-agentes puede abarcar una amplia gama de aplicaciones, como pueden ser [42, 43, 44].

Un agente puede ser definido de varias formas, pero todas las definiciones coinciden en que un agente debe tener las siguientes propiedades:

- **Reactividad:** en el sentido que los agentes tienen percepción de su entorno y que pueden responder a los cambios que se pueden producir en él.
- **Proactividad:** al no limitarse a dar respuesta al entorno, los agentes deben ser capaces de tomar la iniciativa y mostrar un comportamiento impulsado por sí mismo.
- **Habilidades sociales:** los agentes deben ser capaces de interactuar o comunicarse con otros agentes a través de un lenguaje de comunicación de agentes, y establecer conexiones entre sus objetivos autónomos y el contexto especial.

Teniendo en cuenta estas propiedades puede ser difícil identificar lo que es o no es un agente a primera vista. Aunque la comunidad investigadora indica que un agente debe ser autónomo, nunca se puede conseguir una autonomía total, ya que un agente debe ser puesto en marcha por un humano u otro agente. Por otro lado, la autonomía tiene como objetivo que las acciones se lleven a cabo sin interferencia humana, pero es esencial para los agentes, incluso deseable, recibir interacción humana. Por ello es habitual construir agentes que se comportan de forma autónoma, pero que también son capaces de recibir órdenes o instrucciones de los humanos.

La construcción de agentes reactivos puede ser una tarea sencilla, pero puede no serlo deseable para un sistema multi-agente, ya que un agente puramente reactivo reaccionaría a los cambios del entorno de forma consecutiva sin tratar de alcanzar los objetivos globales del sistema. Los agentes deben ser diseñados con la capacidad de equilibrar el comportamiento reactivo con el proactivo.

El equilibrio entre la capacidad social y las capacidades proactivas o reactivas es de vital importancia. Esta importancia es aún mayor en un esquema de trabajo cooperativo establecido por un grupo de agentes que comparten un objetivo común. En estas situaciones, cada agente tiene que adaptar su reacción a los eventos que se producen en el entorno para realizar las tareas comunes, así como los comportamientos sociales necesarios para realizar las tareas colectivas.

Para caracterizar mejor los agentes puede resultar interesante dividirlos en clases analizando las diferentes topologías. El elevado número de atributos de los que puede disponer un agente permite darse cuenta de lo difícil que puede resultar implementar un agente que los incorpore todos. Esto también viene dado porque las características ideales de un agente dependen del tipo de aplicación. A continuación, se puede ver una clasificación de agentes por características:

- **Movilidad:** Los agentes pueden ser estáticos o móviles, los agentes móviles pueden residir en la máquina de origen o desplazarse temporalmente a otra.
- **Modelo de razonamiento:** La presencia o no de un tipo de razonamiento simbólico, es decir, un agente puede ser reactivo o puramente deliberativo.
- **Función del agente:** la función principal que asume el agente, agente de búsqueda de información (agente que busca información para un determinado usuario en internet) o de interfaz que facilita la información hombre máquina de una determinada aplicación.
- **Autonomía:** Los agentes operan sin la intervención directa de un ser humano o de otros agentes. Los agentes tienen control sobre sus acciones y su estado interno y son capaces de intercambiar información con otros agentes. Los agentes no están sometidos a la influencia de una dirección externa.
- **Cooperación:** Realización de acciones de cooperación con otros agentes.
- **Aprendizaje:** Inclusión o no de capacidades de aprendizaje en agente.
- **Características híbridas:** Agentes que combinan dos o más filosofías de comportamiento en un mismo agente.

Los agentes también pueden ser clasificados teniendo en cuenta la funcionalidad que desempeñan y la información que disponen. Usando esta clasificación disponemos de:

- **Agente de reflejos simple:** es el tipo de agente más sencillo, estos agentes únicamente realizan una acción relacionada con una percepción del entorno.
 - **Agentes de reflejo de estado interno:** estos agentes hacen uso de información de cómo ha evolucionado el entorno para responder a las necesidades de ese momento.
 - **Agentes basados en objetivos:** estos agentes combinan la información que tienen sobre sus objetivos y las posibles acciones para seleccionar la mejor acción para conseguir sus objetivos.
 - **Agentes basados en la utilidad:** estos agentes asocian a cada acción un posible valor de utilidad obtenidos con una función, de este modo la mejor acción es la que tiene el valor más alto ya que es una utilidad es una medida que hay que maximizar.
-

2.2.2. Sistemas context-aware

Los sistemas *context-aware* hacen uso del contexto para caracterizar la situación en la que se encuentra una entidad. Una entidad puede ser una persona, lugar u objeto que sea relevante para la interacción entre el usuario y la aplicación.

En cuanto a los trabajos que abordan el diseño de arquitecturas basadas en *context-aware* es posible encontrar un elevado número de trabajos relacionados con sistemas de telemonitorización [45, 46, 47, 48].

Un sistema *context-aware* es capaz de adaptar de forma automática su comportamiento proporcionando las funcionalidades más adecuadas al usuario, aprovechando la información contextual de los mismos. En un sistema ideal consciente del contexto, el usuario no debería preocuparse de solicitar los servicios o la información adecuada ya que el sistema debería tener la capacidad de proporcionar lo que el usuario, necesite utilizando el contexto del usuario sin que este se lo tenga que pedir al sistema. El contexto se puede clasificar en:

- **Contexto computacional:** la conectividad del dispositivo, el coste de la comunicación, el ancho de banda disponible o los recursos cercanos.
- **Contexto del usuario:** perfil del usuario, estado de ánimo, personas cercanas o actividad actual.
- **Contexto físico:** la luminosidad, el nivel de ruido, el tráfico, el tiempo, hora, la fecha o la localización.

Un sistema *context-aware* basa su funcionamiento en conocer:

- **Quién o el qué:** debe ser capaz de identificar el usuario actual, el objeto o dispositivo en cuestión.
- **Dónde:** debe identificar la localización del usuario, el objeto o el servicio.
- **Cuándo:** debe conocer aspectos del pasado, del presente o del futuro.
- **Qué está haciendo:** el sistema debe identificar las actividades que está realizando el usuario.
- **Porqué:** Identificar cuál es la razón por la que el usuario se encuentra realizando la acción que se encuentra realizando.

Un contexto se puede clasificar en activo o pasivo dependiendo del nivel de influencia en la actuación del sistema. En un sistema, cuando se hace uso de *contexto activo*, un cambio del contexto percibido por el sistema afecta a la respuesta de este. Un ejemplo de este tipo de contexto puede ser la detección de un obstáculo por un coche autónomo, que produce que el sistema actúe y frene el coche al instante. En sistemas de *contexto pasivo* el contexto es relevante pero no es crítico. En estos sistemas donde el contexto es pasivo se muestra la información actualizada del contexto al usuario, pero se le permite al usuario, cambiar el comportamiento del sistema. Como ejemplo de sistema que use este tipo de contexto puede ser un sistema informático de un navegador GPS, ya que este sistema reporta la posición del dispositivo en un mapa, pero se permite que el usuario cambie la ruta que toma con su vehículo.

Los sistemas *context-aware* son diseñados y desarrollados de forma habitual utilizando arquitecturas basadas en capas. Este tipo de arquitecturas basadas en capas ofrecen una mayor modularidad, interoperabilidad, compatibilidad y flexibilidad a la hora de desarrollar los sistemas. En cada una de las capas se añaden características de la información para producir datos de contexto utilizables por las demás capas. A continuación se puede ver un ejemplo de capas que se puede usar para el diseño de sistemas *context-aware*:

- **Capa de adquisición de información:** la primera capa es la encargada de detectar el entorno. La adquisición se realiza de utilizando sensores que proporcionan el estado de métricas o fenómenos físicos.
- **Capa percepción:** En esta capa se realiza un filtrado de los datos y se realiza una abstracción de la información a partir de los datos brutos. Los datos se procesan para obtener información más abstracta sobre el contexto. Por ejemplo, la detección de presencia de personas en una habitación se puede realizar mediante la fusión de información de medidas de movimiento, sonido o de vibración.
- **Capa de identificación de la situación y del contexto:** En esta capa se identifican las situaciones que se producen y las actividades que están realizando los usuarios. Por ejemplo, si el usuario está presente en una habitación y la plancha se encuentra encendida y moviéndose se identifica que ese usuario se encuentra planchando.
- **Capa de explotación:** en esta capa de proporciona la información contextual a las aplicaciones. Esta información se utiliza para adaptar la salida del sistema a las necesidades del usuario.

2.2.3. Algoritmos de aprendizaje automático

Los algoritmos de aprendizaje automático también conocidos como algoritmos de *Machine Learning* (ML), permiten la extracción de información para facilitar la toma de decisiones o predecir comportamientos a partir de los datos. Los algoritmos de aprendizaje automático se pueden clasificar en [49, 50]:

- **Algoritmos de regresión:** se aplican modelos de ML que buscan estimar y determinar la existencia de relaciones entre variables que forman parte del objeto de estudio.
 - **Algoritmos bayesianos:** realizan clasificaciones de cada valor como independiente de cualquier otro, logrando predecir con mucha efectividad una clase o categoría dentro de un conjunto dado de características mediante modelos probabilísticos.
 - **Algoritmos de agrupación:** permiten establecer categorías dentro de datos que no se encuentran etiquetados, ordenando datos que pertenecen a grupos indefinidos.
 - **Algoritmos árbol de decisión:** los algoritmos de árbol de decisión utilizan una estructura similar a un diagrama de flujo que utiliza un método de bifurcación para ilustrar cada resultado de una posible decisión. Cada nodo dentro del árbol representa una prueba específica y la rama el resultado de esa prueba.
 - **Algoritmos de redes neuronales artificiales:** estos algoritmos están compuestos por una serie de unidades dispuestas en capas, donde cada una se conecta con las capas anexas. Este tipo de algoritmos tienen la característica de aprender con
-

la experiencia y son extremadamente útiles para modelar relaciones no lineales o donde la relación entre los datos es difícil de entender.

- **Algoritmos de reducción de dimensión:** Este tipo de algoritmos permiten reducir el número de variables que se consideran como entrada para encontrar la información exacta requerida.
- **Algoritmos de aprendizaje profundo:** este tipo de algoritmos son un subconjunto del aprendizaje automático basado en redes neuronales artificiales. El proceso de aprendizaje se le denota profundo debido a que la estructura de las redes neuronales artificiales se componen de varias capas de entrada, salida y ocultas. Cada una de las capas contiene unidades que transforman los datos para que puedan ser utilizadas por las siguientes capas. Cada una de ellas tienen como objetivo realizar una tarea de predicción determinada. Debido a esta estructura se puede aprender a través de su propio procesamiento de datos.

Cuando tratamos de abordar la tarea de aprendizaje supervisado, los investigadores de forma común lo realizan dividiendo los conjuntos de datos etiquetados en tres subconjuntos: un conjunto de entrenamiento, un conjunto de validación y un conjunto de prueba. Para comprender cuál es el objetivo de cada uno de los conjuntos y sus diferencias, es útil examinar por qué es necesaria dicha división durante el desarrollo de soluciones que hacen uso del aprendizaje supervisado.

Las soluciones que se basan en el aprendizaje automatizado tienen como objetivo encontrar un modelo de clasificación o de regresión que sea capaz de predecir con la mayor exactitud posible salidas para entradas que no han sido vistas anteriormente por el modelo.

Para lograr este objetivo es necesario suministrar a un algoritmo de aprendizaje el conjunto de entrenamiento. Con este conjunto los algoritmos pueden ajustar los parámetros internos del modelo de forma que este cometa el menor número de errores posibles cuando se utilice para reproducir los resultados utilizados en el conjunto de entrenamiento.

Una vez obtenido el modelo nos podemos encontrar con dos supuestos:

- El algoritmo ha sido capaz de determinar las relaciones existentes entre las entradas y las salidas tal y como se relacionan en el conjunto de entrenamiento.
- Si estas relaciones son verdaderas de forma general, se pueden usar para inferir de forma correcta las salidas para datos de entrada que no se encuentran dentro del conjunto de entrenamiento.

La validez del primer supuesto puede verificarse observando el error de la muestra del modelo durante la fase de entrenamiento, es decir, la cantidad de errores que comete el modelo cuando se aplican a los mismos datos que se han utilizado para entrenar el modelo. Para validar el segundo supuesto es necesario validar el rendimiento del modelo entrenado con un conjunto separado, es decir en una colección de datos que se encuentren etiquetados que no se han utilizado para realizar el entrenamiento. De este modo, el conjunto de validación sirve de forma efectiva para realizar este proceso, ya que cuenta con entradas que no se han visto anteriormente por el modelo.

En la práctica, el conjunto de validación se utiliza para seleccionar el modelo que ofrece mejores resultados cuando se actúa sobre datos que no se han visto anteriormente, es

decir ayuda a identificar cuál es el algoritmo que muestra menor error de generalización, también conocido como *out-of-sample-error*, de los diferentes algoritmos utilizados. Algunos de los casos más típicos de estos errores son [50]:

- **Ajuste de hiperparámetros:** Para muchos modelos de aprendizaje automático hay ciertos aspectos del modelo que no son fácilmente ajustables, por ejemplo, la estructura de una red neuronal permite el ajuste de pesos y las tasas de aprendizaje del procedimiento de descenso del gradiente. A estos parámetros se les denomina hiperparámetros. De forma común se llevan a cabo procesos para la búsqueda de los hiperparámetros que producen el modelo con el mejor rendimiento predictivo sobre un conjunto de validación después del entrenamiento.
- **Selección del modelo:** es habitual que los profesionales del aprendizaje automático entrenen varios tipos de modelos utilizando el mismo conjunto de entrenamiento y elijan el tipo de modelo más eficaz tras comparar su rendimiento predictivo en el conjunto de validación.
- **Detectar un sobreajuste en el modelo:** Los modelos complejos tiene una fuerte tendencia a sobreajuste cuando se entrenan con una cantidad limitada de datos. Se dice que un modelo está sobreajustado cuando empieza a captar ruidos y se basa en patrones triviales de los datos de entrenamiento para realizar las predicciones. Los modelos que sufren de un sobreajuste se identifican debido a que presentan elevado rendimiento al predecir resultados utilizando datos de entrada empleados durante el entrenamiento, pero un bajo rendimiento cuando se aplica el modelo a datos fuera del conjunto de validación.

El conjunto de entrenamiento y el conjunto de validación se denominan también conjuntos de desarrollo, ya que se utilizan para desarrollar la solución de aprendizaje automático.

Una vez determinado el modelo más eficiente utilizando los conjuntos de desarrollo, cualquier afirmación sobre el rendimiento de este debe realizarse basándose en un conjunto de prueba. Este conjunto debe ser un conjunto de datos etiquetados que se encuentre al margen de todo el proceso de desarrollo del modelo. En la mayoría de los experimentos rigurosos, el conjunto de pruebas debe incluso mantenerse alejado de los responsables de desarrollar el modelo para no comprometer los resultados obtenidos con el sistema.

Una vez presentada la clasificación de los algoritmos de aprendizaje automatizado, los tipos de conjuntos que se utilizan para la obtención de los modelos y los diferentes errores que nos podemos encontrar, se van a presentar algunos de los algoritmos utilizados para el desarrollo de esta tesis doctoral.

Redes Bayesianas

Las redes Bayesianas, en inglés BayesNet, son un modelo basado en grafos para representar conocimiento sobre un dominio incierto en el que cada nodo corresponde con una variable aleatoria del dominio X_1, X_2, \dots, X_n , y cada una de las aristas del grafo representan la probabilidad condicional de las variables aleatoria correspondientes [51]. A este tipo de redes también se le denotan de redes de creencias o redes de Bayes debido

a las dependencias y las probabilidades condicionales. Una red de este tipo se representa con un grafo acíclico dirigido en el cual no se permite la existencia de bucles o de autoconexión.

En las redes Bayesianas se asume que un nodo depende solamente de sus nodos padre y cada nodo tiene asociado una tabla de probabilidades condicionales, que definen la probabilidad de cada estado en los que puede estar una variable, dados los posibles estados padres. La probabilidad para un conjunto X_1, X_2, \dots, X_n , viene dada por una red se puede definir como la ecuación 2.1:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1..n} P(X_i | \text{padres}(X_i)) \quad (2.1)$$

poniendo que la expresión es la probabilidad condicionada X_i y $\text{padres}(X_i)$, donde X_i presenta el valor que tomaría la variable X y $\text{padres}(X_i)$ denota los valores que tienen el conjunto de los padres en la red Bayesiana del nodo. Por lo tanto, el estado de cada variable se puede calcular multiplicando un reducido número de valores de las tablas de probabilidad.

Es importante destacar que este algoritmo no permite trabajar con *datasets* con variables continuas o con falta de valores. Por lo tanto, si va a utilizar alguno de este tipo de datos se debe llevar a cabo un preprocesado de los datos.

RIPPER

El algoritmo RIPPER (*Repeated Incremental Pruning Produce Error Reduction*) se trata de un algoritmo de inducción de reglas. Este algoritmo escala con las diversas instancias de entrenamiento y es adecuado para la construcción de modelos a partir de conjuntos de datos con distribuciones de clases sobrecargadas. Es una evolución del algoritmo IREP (*Incremental Reduced Error Pruning*) [52]. Este algoritmo también se comporta de forma correcta con conjuntos de datos donde existe ruido, ya que utiliza un conjunto de validación para evitar el sobreajuste del modelo.

En este algoritmo se selecciona la clase mayoritaria como su clase por defecto y hace uso de reglas para identificar las clase minoritarias. Para los problemas multiclase las clases son series según sus frecuencias.

En resumen, se crean reglas en una fase de crecimiento añadiendo nuevas condiciones hasta que se alcanza un 100% de precisión. Las condiciones que se añaden son las que tienen una mejor ganancia de información. Una vez terminada la etapa de crecimiento se realiza una fase de poda. La ecuación que define este proceso se puede ver en la ecuación 2.2

$$v^*(rule, \text{prunePos}, \text{pruneNef}) = \frac{p - n}{p + n} \quad (2.2)$$

donde *rule* es la regla de poda y *prunePos* es el subconjunto de instancias positivas utilizado para el proceso de poda, *pruneNef* es el conjunto de instancias negativas utilizado para el proceso de poda y *p* y *n* son instancias positivas y negativas representadas por la regla *rule* en los subconjuntos anteriores.

En los algoritmos de IREP, las fases de crecimiento y de poda se repiten hasta que la tasa de error es mayor o igual al 50%. Sin embargo, en RIPPER una vez definido el conjunto de reglas, el algoritmo genera dos reglas a partir de cada regla para el conjunto

y a cada una de ellas le aplica un proceso de crecimiento y de poda para obtener la mejor regla.

PART

El algoritmo PART, igual que el algoritmo RIPPER, se encuentra basado en la definición de reglas [53]. A este algoritmo se le denota con ese nombre debido a que usa únicamente una parte de los árboles de decisión. Desde cada uno de los árboles parciales de decisión se extrae una regla. La regla se obtiene de la hoja del árbol con más convergencia, el resto del árbol se descarta y las reglas se extraen siguiendo los siguientes pasos:

- Se obtienen diferentes subconjuntos de datos.
- Para cada uno de los subconjuntos, se construye un árbol de decisión utilizando el valor de la entropía de la ecuación 2.3.

$$H(X) = - \sum_i p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (2.3)$$

donde X es un evento y $p(x_i)$ es la probabilidad de que ese evento X pertenezca a uno de los tipos definidos en el conjunto.

- En el momento en que un nodo intermedio tiene una hoja en todos sus hijos, el proceso de crecimiento termina y se realiza el proceso de poda. Una vez que un nodo no es podado, se detiene el proceso de poda obteniendo el árbol parcial final. A partir de cada uno de los árboles se obtiene una regla.

K-nearest neighbors

El algoritmo de vecinos más cercanos, también es conocido como k -NN es un tipo de algoritmo de aprendizaje supervisado que se utiliza tanto para calcular la regresión como para la clasificación [54]. El algoritmo k -NN tiene como objetivo predecir la clase correcta para los datos de prueba haciendo uso de la distancia entre los datos de prueba y todos los puntos del conjunto de entrenamiento. El algoritmo utiliza vectores como instancias de un espacio n -dimensional, donde n es el número de atributos o las variables de una instancia. Cada uno de los vectores se encuentra asociado a cada una de las clases.

El algoritmo se puede explicar en dos pasos:

- El algoritmo basa su conocimiento en comparar la similitud de las instancias. Por lo tanto, el primer paso del k -NN es calcular la distancia entre la nueva instancia y clasificar al resto de instancias del conjunto de datos Z , en la ecuación 2.4 se presenta de forma genérica una forma para calcular la distancia entre instancias.

$$d(a, z) = d(z, a) = \left(\sum_{i=1}^n |a_i - z_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2.4)$$

donde a y z son instancias y a_i y z_i son los valores del vector de dichas instancias. Por otra parte, p es un parámetro mayor que 1 y determina el tipo de distancia. Si $p=1$, se utiliza la distancia de Manhattan; si $p=2$, la distancia obtenida es la Euclídea, y si $p \geq 3$ es la distancia de Minkowski.

- Una vez calculadas las distancias entre a y las instancias de z , el algoritmo clasifica a teniendo en cuenta la clase de la K más cercana a a . La clase seleccionada de forma habitual es la más común entre las K instancias.

A continuación, se selecciona el número k de puntos que se acercan a los datos de prueba. El algoritmo k -NN calcula la probabilidad de que los datos de prueba pertenezcan a las clases K de datos de entrenamiento y se selecciona la clase que tenga mayor probabilidad. En el caso de la regresión, el valor es la media de puntos ' K ' puntos de entrenamiento seleccionados.

KStar

El algoritmo KStar utiliza la entropía como medida basada en la probabilidad de transformar una instancia en otra instancia seleccionando de forma aleatoria una entre las posibles transformaciones [55]. El uso de la entropía como valoración de distancia tiene numerosas ventajas frente al algoritmo k -NN tradicional. El proceso se describe a continuación:

- Para clasificar una instancia, a , es posible transformar esa instancia en el resto de instancias del *dataset*, Z . El conjunto de transformaciones se define como P .
- Se calcula la distancia entre una instancia a y el resto de las instancias Z utilizando la ecuación 2.5.

$$K^*(z|a) = -\log_2 P^*(z|a) \quad (2.5)$$

$$P^*(z|a) = \sum_{t \in P: t(a)=z} p(t) \quad (2.6)$$

donde $P(z|a)$ es la suma de probabilidades y t es la transformación de una instancia a en z .

- Por último, la a se determina por la mayor probabilidad que sea una de las clases c_i , del *dataset*. Las probabilidades se determinan con la ecuación 2.7:

$$P^*(c_i|a) = \sum_{x \in c_i} P^*(z|a) \quad (2.7)$$

Random Forest

El algoritmo *Random Forest*, es un algoritmo que está formado internamente por un elevado número de árboles de decisión individuales que operan en conjunto para ofrecer un resultado [56]. Estos árboles deben ser creados a partir de variables aleatorias. Cada árbol individual del algoritmo realiza una predicción de cada una de las clases. La clase con mayor votación se convierte en la predicción del modelo.

El concepto de funcionamiento del algoritmo *Random Forest* se encuentra basado en la sabiduría de las multitudes. En este algoritmo, la baja relación entre los diferentes árboles internos es lo que produce buenos resultados. Los modelos no correlacionados pueden producir predicciones en conjunto que son más precisas que cualquiera de las

predicciones individuales. Los árboles internos de este algoritmo se protegen mutuamente evitando de esta forma los errores que producen de forma individual. Aunque algunos árboles produzcan errores, los demás ofrecen resultados correctos de manera que el resultado ofrecido por el algoritmo sea correcto. Por lo tanto, los requisitos previos para que el algoritmo funcione correctamente son:

- Debe existir una señal real en las características para que los modelos individuales con estas características tengan mejores resultados que las adivinanzas al azar.
- Las predicciones realizadas por los árboles individuales internos deben tener una baja correlación entre sí.

REPTree

El algoritmo REPTree (*Reduced Error Pruning*) es un algoritmo que clasifica instancias creando un árbol de forma rápida. Para la creación rápida del árbol el algoritmo utiliza variables numéricas en los primeros niveles del árbol. El árbol se obtiene de la siguiente manera:

- Se realiza un análisis de las instancias del conjunto de entrenamiento. El nodo del árbol se seleccionará utilizando la función de ganancia.
- Una vez realizada la prueba, el nodo seleccionado se divide en diferentes subconjuntos. Estos subconjuntos se repiten para cada subconjunto.
- Una vez finalizado el proceso de creación y crecimiento, se realiza la poda del árbol mediante el algoritmo de *backfitting* que permite reducir el error durante el proceso de poda.

Redes Neuronales

Los algoritmos de redes neuronales tienen como objetivo reconocer las relaciones subyacentes en un conjunto de datos mediante un proceso que imita el funcionamiento del cerebro humano. Estos sistemas están conformados por neuronas, denominadas perceptrones, con objetivo de que estas puedan adaptarse a los cambios que se producen en la entradas del sistema, de modo que la red pueda generar el mejor resultado posible sin necesidad de realizar un reentrenamiento de la red. Actualmente existen redes neuronales multicapa (MLP), redes neuronales convoluciones (CNN) [57], redes neuronales recurrentes (RNN) y redes de base radial (RBF). Este tipo de redes han sido ampliamente utilizadas a lo largo de los últimos años para para la construcción de soluciones [58, 59].

En una red neuronal multicapa (MLP), los perceptrones están dispuestos en capas interconectadas. Dentro de estas capas se encuentra una capa de entrada, una capa de salida y una o varias capas ocultas. Los perceptrones de cada una de las capas se activan cuando reciben información de capa anterior. Además, cada una de las funciones activación también tienen en cuenta el bias que se debe aplicar en cada una. Durante el procedimiento de entrenamiento el parámetro bias así como los pesos de la red son ajustados por el algoritmo para la obtención de los mejores resultados [60].

2.3. Sistemas de localización

Un sistema de localización es un protocolo automatizado que tiene la capacidad de ubicar un objeto móvil en un espacio físico, así como en un tiempo y momento determinado. La ubicación sistemática y continua utilizando este proceso se denomina sistema de seguimiento o de *tracking*. Al dispositivo que permite ese seguimiento se le puede denominar localizador, *tracker* o nodo a localizar.

El seguimiento continuo de un objeto o activo tiene más valor cuando se realiza en tiempo real, es decir, que el seguimiento se produzca en el momento exacto que el movimiento se está realizando.

La principal motivación por la cual se llevan a cabo investigaciones de forma constante sobre técnicas de estimación de posiciones en interiores es debido a la incapacidad de ofrecer localizaciones en este contexto el *Sistema de Posicionamiento Global (GPS)*.

2.3.1. Conceptos generales de los sistemas de localización

Antes de abordar las técnicas y algoritmos de localización, en este apartado se van a especificar algunos conceptos que son independientes de la tecnología, las técnicas o de los algoritmos que se utilicen.

- **Posición física y simbólica:** La posición física es la que proporciona, por ejemplo, un sistema GPS, ofertando unas coordenadas, compuestas en este caso de una latitud, longitud y altitud. Sin embargo, en la posición simbólica la información que se ofrece es más abstracta, puede ser una ciudad, una casa o una habitación concreta.

Tomando como ejemplo la figura 2.3 la localización física podría ser $40.96^{\circ} 04''$ N, $-5.67^{\circ} 09''$ W con una altitud de 5 metros si se hace uso de las coordenadas GPS. Por otra parte, la posición simbólica podría ser que se encuentra en el salón, delante de la televisión.



Figura 2.3: Localización física y simbólica

Los sistemas de posición simbólicos se usan, normalmente, como complemento a los sistemas de posición física ofreciendo información complementaria.

- **Posición absoluta frente a relativa:** Los sistemas de posición absoluta se caracterizan por usar un sistema de rejilla de referencia compartida para todos los objetos a

ser localizados como, por ejemplo, un mapa. Los diferentes dispositivos que se encuentren en el mismo punto son capaces de indicar que se encuentran en el mismo punto del sistema independientemente del fabricante del dispositivo. La ubicación relativa se refiere a la posición en la que puede estar un objeto en referencia a otro objeto. En la imagen 2.3 el objeto se encuentra en unas coordenadas respecto a un punto de referencia que puede ser la esquina de la planta. La transformación de un sistema de posiciones relativa a un sistema absoluto y viceversa es posible siempre que se conozcan al menos dos puntos que relacionen las coordenadas de ambos sistemas.

- **Privacidad del cálculo de la localización:** En varios sistemas es el objeto, nodo a localizar, el que realiza el cálculo de la localización. Por ejemplo, en el sistema GPS los satélites no conocen la localización del receptor, de este modo ninguna otra entidad sabe la localización de este. En contrapartida, es el nodo a localizar el que emite periódicamente dicha posición, por tanto, existe una entidad externa que tiene que realizar el cómputo para hallar la localización, perdiendo de esta manera la privacidad.
- **Exactitud y precisión:** Un sistema de localización debe situar un objeto con exactitud y precisión constante. Poniendo como ejemplo los sistemas GPS, pueden ofrecer posiciones a menos de 10 metros para aproximadamente el 95 % de las ocasiones. Con esto el sistema logra tener una precisión de 10 metros. La exactitud que ofrece un sistema debe ser constante para el porcentaje que indica. Cuando se tiene que un sistema es más preciso que otro, se está indicando que el sistema ofrece un error menor en las estimaciones.
- **Área de localización:** Cuando se habla del área que el sistema es capaz de dar cobertura y a su vez ofertar localizaciones, se refiere a la escala del sistema. El sistema puede ser capaz de realizar localizaciones a nivel global, si se trata de un sistema GPS, o si es un sistema más pequeño puede ser uno, varios edificios o apenas una habitación de estos edificios.
- **Variación de costes:** En el momento de valorar el coste de un sistema de localización aparecen múltiples variables como puede ser el tiempo de instalación, tiempo de administración, costes de infraestructura dependientes del área a instalar, etc. Aquí también se incluyen costes futuros, como son los costes de ampliación del área o el típico coste de mantenimiento.
- **Limitaciones:** Los sistemas de localización normalmente están limitados debido al entorno en el que se encuentran. En los sistemas GPS pueden existir ubicaciones donde la señal de los satélites sea nula o que no se reciban conexiones del número mínimo de satélites, imposibilitando el cálculo de la localización. En otros sistemas que se basan en ondas electromagnéticas como son los que están basados en WiFi o BLE, igualmente están limitados por el entorno, como pueden ser las limitaciones del edificio, que atenúen demasiado la señal o que pueden tener interferencias de otros dispositivos, como es posible un medio industrial.

De las características anteriores, cuando se trata de un sistema de localización de interiores y referente a la posición física y simbólica, en la mayoría de los casos es más importante para el usuario conocer la zona de la casa que se encuentra (cocina, salón,

dormitorio...) que una posición física. De igual modo sucede con la posición relativa frente a la absoluta, poniendo de ejemplo la localización de interiores en un museo, donde es más interesante conocer que el usuario pasa un mayor tiempo delante de un cuadro, que las coordenadas del usuario.

En cuanto al cálculo de la posición, normalmente se distribuye la carga entre los diferentes elementos del sistema de modo a que los dispositivos no tengan que tener demasiada potencia de cálculo, encareciendo el sistema. En algunos casos específicos es interesante que el cálculo lo realice todo el servidor. Un ejemplo de esto puede ser un sistema que lleve a cabo el recuento del número de personas que acceden diariamente a un centro comercial o cuando los nodos a localizar son dispositivos que deben ser de bajo consumo de energía.

Sobre la precisión y exactitud se pueden requerir diferentes valores ya que, para algunos casos específicos, basta saber la habitación donde se encuentra el usuario, y, en otros casos, hace falta precisiones menores a 3 metros para realizar un guiado del usuario.

El área de localización en cuanto a un sistema de interiores se refiere, suele ser un edificio o un conjunto de estos sobre los cuales se pretende realizar la localización. Este área influye bastante en los costes que tiene o va a tener el sistema, ya que la mayoría de ellos están directamente relacionados con la dimensión a realizar de la localización. Cuando se trata de costes siempre se pretende que estos sean mínimos o razonables para el sistema a desplegar.

2.3.2. Técnicas de posicionamiento en interiores

En los sistemas de localización de interiores se utilizan técnicas de posicionamiento para determinar y estimar la posición de los nodos de modo que se pueda mejorar la precisión del posicionamiento. Existen varios algoritmos y técnicas para obtener información de dirección, rango o distancias basadas en la medición de propiedades de las señales [61]. Los algoritmos utilizados habitualmente traducen las propiedades de las señales en distancias y ángulos que luego pueden ser utilizadas para calcular la posición o la ubicación real de un objeto. Esta información se puede explotar en diferentes ámbitos. Se puede destacar la navegación en interiores de edificios [62], estudios de comportamiento de usuarios [63] o para la monitorización y de detección de situaciones anómalas [64].

Aunque la mayoría de las técnicas, algoritmos y las tecnologías de posicionamiento se vienen aplicando a exteriores muchos años, su funcionamiento en interiores es diferente. Esto ha motivado a los investigadores a investigar sobre nuevas formas de aplicar estas técnicas para optimizar los procesos de estimación de las ubicaciones en interiores. Para determinar la posición de un usuario las técnicas de posicionamiento se pueden dividir en dos grandes grupos, como se puede ver en la clasificación realizada de la figura 2.4: propiedades de las señales y algoritmos de posicionamiento. Aparte de las técnicas y tecnologías de posicionamiento que se van a describir, existen otras que son muy variadas e infinitas, por lo que únicamente se van exponer las que son relevantes para la monitorización de comportamientos con personas.

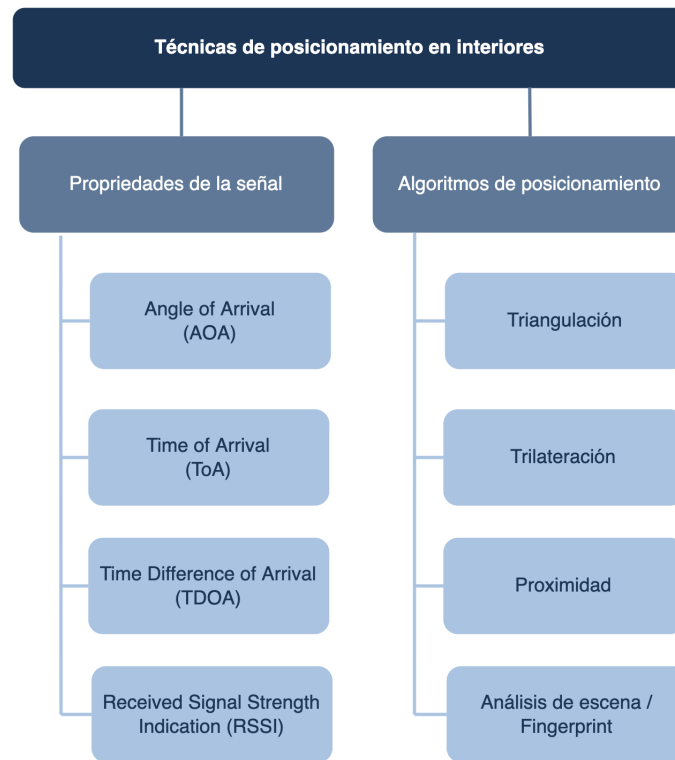


Figura 2.4: Clasificación de técnicas de posicionamiento de interiores

Propiedades de las señales

Los sistemas de posicionamiento pueden clasificarse por la medición de propiedades de la señal y/o técnicas que se emplean [61]. Las propiedades de las señales son parámetros geométricos como son los ángulos, la distancia o las potencias de las señales que, mediante cálculos, permiten obtener la posición de un objeto. Existen varios métodos de medición de señales o técnicas. Sin embargo, las más comunes y predominantes son el *Angle Of Arrival (AOA)*, *Time Of Arrival (TOA)*, *Time Difference Of Arrival (TDOA)* y *Received Signal Strength Indication (RSSI)*.

- **Angle Of Arrival (AOA)**, en español ángulo de llegada, son los ángulos y las distancias calculadas en relación a dos o más puntos de referencia mediante la intersección de las líneas de dirección entre los nodos de referencia (NR) y el nodo a localizar (NL) [61]. El cálculo del ángulo y la distancia se utiliza para determinar la posición del nodo a localizar. Con el AOA se puede determinar una posición del objeto con pocos sensores para un posicionamiento 2D o 3D [65]. Pero en la práctica, son pocos los sensores que permitan aplicar este tipo de técnica [66] debido a que los sensores que permiten aplicar esta técnica suelen tener un hardware complejo y un elevado coste. En la figura 2.5 se muestra el principio del método de posicionamiento utilizando AOA

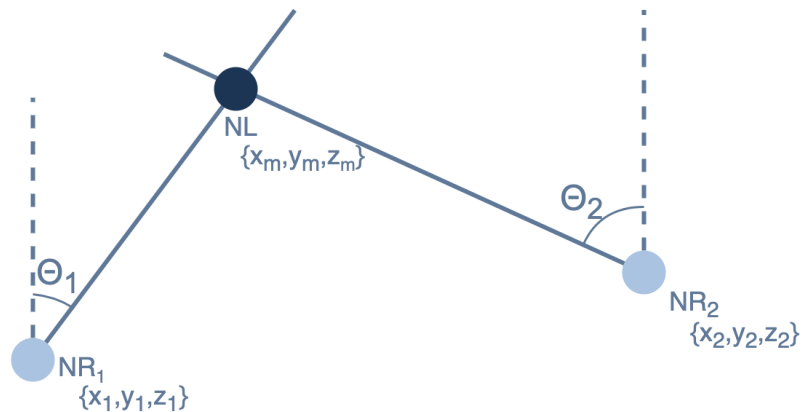


Figura 2.5: Posicionamiento basado en *Angle Of Arrival*

- **Time Of Arrival (TOA)**, en español tiempo de llegada. Es una técnica que permite obtener establecer la posición de un objeto determinando la distancia entre el nodo a ser localizado y los nodos de referencia. Al TOA también se denomina *Time Of Flight (TOF)* [65]. Esto se debe a que la técnica TOA para determinar la distancia calcula el tiempo que tarda en llegar la señal desde los nodos de referencia (NR) con posiciones conocidas hasta un nodo localizador (NL) con una posición móvil. Para la utilización de este método es necesario disponer de múltiples nodos de referencia que en sincronía permitan hallar la posición del nodo a localizar mediante triangulación. La obtención de la posición del nodo a localizar es posible siempre y cuando sean conocidas las posiciones exactas de los nodos de referencia. Si el escenario del caso de estudio es un plano 2D, para la estimación de la ubicación es necesario de al menos tres nodos de referencia. Si nos encontramos en un escenario de más de 2 dimensiones, será necesario de forma adicional un nodo de referencia.

A pesar de que TOA es una técnica robusta, posee los siguientes inconvenientes:

- Requiere que todos los nodos, ya sean los de referencia o el nodo a localizar, dispongan de una sincronización precisa ya que, con un pequeño error de sincronización, es imposible determinar cuánto tiempo ha tardado en llegar la señal y, a su vez, la distancia.
- La señal necesita que sea etiquetada con sello de tiempo, *timestamp*, con la finalidad de que los nodos receptores de esa señal puedan determinar el instante acerca del momento en el cual ha sido emitida esa señal. Este proceso incrementa la complejidad de la señal y a menudo es una fuente adicional de errores.

El mayor inconveniente que presenta esta técnica es la necesidad de conocer con exactitud las características de la señal para determinar con precisión el tiempo de llegada en condiciones desfavorables como puede ser donde exista ruido, interferencias, distorsiones de la señal o situaciones de multitrayecto.

Igual que establece en [67], la posición se puede obtener con precisión cuando entre los nodos de referencia y el nodo a ser localizado existe visión directa. Sin embargo, si no existe visión directa ente ambos, se parte de que la señal realizará una trayectoria más larga dando lugar a que la distancia calculada entra ambos no será

la correcta y, como consecuencia, el posicionamiento será erróneo. En la figura 2.6 se muestra el principio de posicionamiento con TOA.

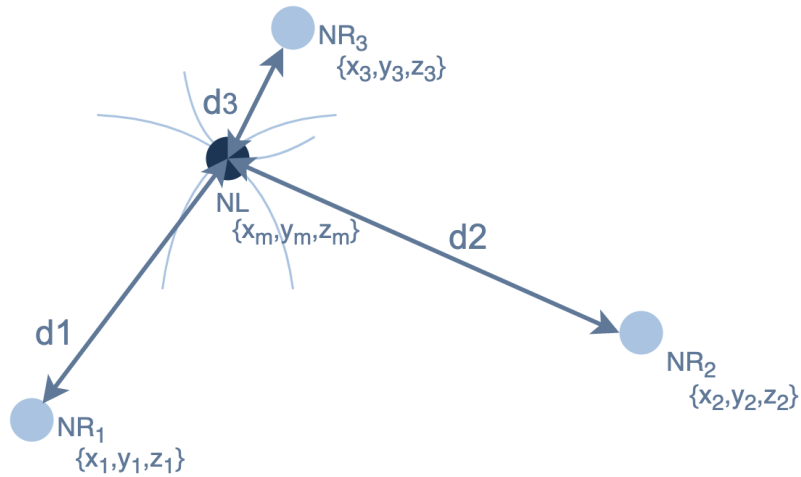


Figura 2.6: Posicionamiento basado en *Time Of Arrival*

- ***Time Difference Of Arrival (TDOA)***, en español es diferencia de tiempo de llegada. Igual que TOA, el TDOA también se basa en calcular la distancia en tiempos de propagación de las señales [68]. Debido a las similitudes con TOA, es necesario conocer las ubicaciones exactas de los nodos de referencia. La principal diferencia de TDOA con TOA, que hace este método más interesante, es que únicamente es necesaria la existencia de sincronización entre los nodos de referencia (NR), no siendo necesario sincronizar el nodo a localizar (NL). En esta técnica se toma como estación de referencia base la que reciba primero la señal del nodo a localizar. Una vez determinada la estación base todas las siguientes mediciones de diferencia de tiempo de llegada se realizan respecto a la estación base de referencia. En la figura 2.7 se puede ver el principio de posicionamiento TDOA.

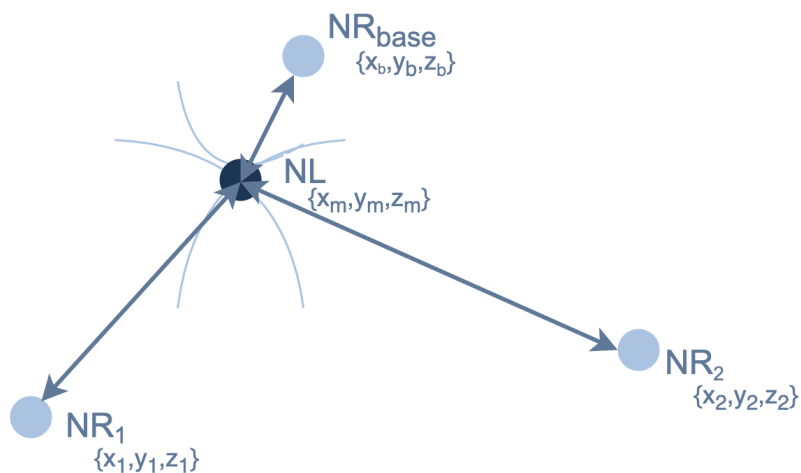


Figura 2.7: Posicionamiento basado en *Time Difference Of Arrival*

Utilizando esta técnica, siempre que los relojes de los nodos de referencia estén sincronizados, el error en la estimación de diferencias de tiempo de llegada será mínimo. A pesar de esto, este método también presenta los problemas que disponía la TOA en cuanto a la visión directa entre el nodo a localizar y los nodos de referencia.

- **Received Signal Strength Indication (RSSI)**, en español indicador de fuerza de la señal recibida. A diferencia de las medidas angulares y de distancia basada en tiempos, se utiliza la medida del nivel de potencia de la señal recibida para estimar la distancia entre dispositivos móviles [69]. Es decir, el enfoque de RSSI mide la atenuación de la señal transmitida para calcular la reducción de intensidad de la señal debido a la propagación. A través de la estimación se puede calcular la posición [65]. El RSSI es relativo en un entorno inalámbrico ya que cuando mayor sea el RSSI mejor será la calidad de señal [66]. Sin embargo, en interiores resulta bastante difícil obtener visión directa y el posicionamiento se ve afectado debido a la aparición del fenómeno multitrayecto y las zonas de sombra que hacen disminuir la precisión [66, 70]. En la figura 2.8 se puede ver el principio del funcionamiento del posicionamiento basado en RSSI.

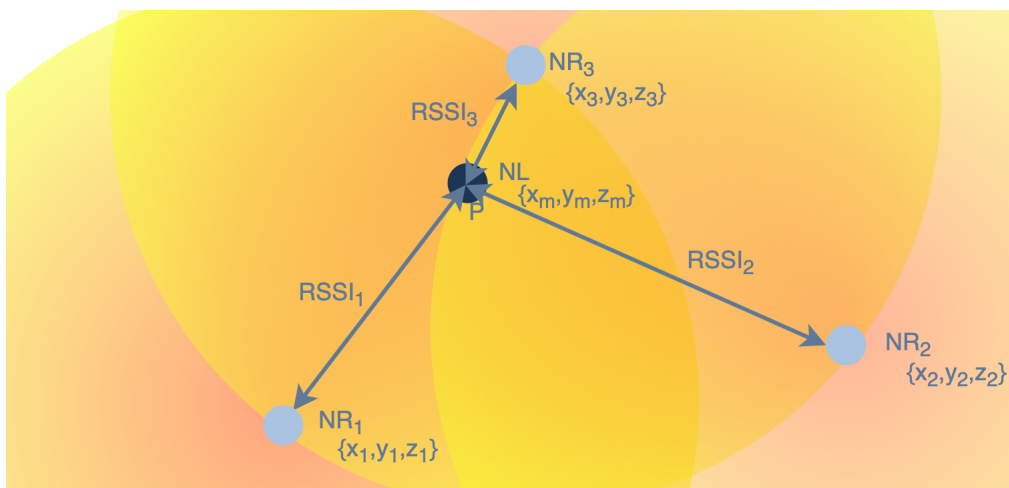


Figura 2.8: Posicionamiento basado en *Received Signal Strength Indication*

Esta técnica se aplica de forma habitual en un sistema de localización para dispositivos móviles que hagan uso de tecnologías WiFi o BLE, ya que la métrica de la intensidad de la señal se puede obtener para ambas tecnologías de forma sencilla en todos estos dispositivos.

En resumen, las propiedades de las señales son un elemento importante a la hora de determinar la posición y que, mediante la realización de los cálculos adecuados, se pueden utilizar se pueden determinar distancias a puntos de referencia conocidos. La propiedad de la señal utilizada con un algoritmo posicionamiento puede determinar en gran medida el resultado obtenido con un sistema. Por lo tanto, para utilizar la propiedad de la señal más adecuada es importante entender cuáles son los algoritmos de posicionamiento.

Algoritmos de posicionamiento en interiores

Los algoritmos de posicionamiento especifican cómo calcular la posición de un objeto [71]. En otras palabras, estos algoritmos traducen las propiedades de la señal recibidas en distancias o ángulos y luego calcula la posición real de un objeto o del nodo a localizar. Tanto las propiedades de las señales como el algoritmo de posicionamiento trabajan de forma conjunta para determinar una estimación de la ubicación. El algoritmo procesa la señal y ofrece como resultado una posición. La precisión que ofrece un algoritmo está directamente relacionada con la calidad de la medida de propiedad de la señal. Además, cada algoritmo tiene sus ventajas y desventajas, por lo que a veces, utilizar más de un algoritmo de posicionamiento al mismo tiempo puede ofrecer una mejor precisión y rendimiento a la hora de estimar la posición [66]. Debido a esto, existen varias técnicas para determinar la posición utilizando información de la distancia, proximidades basadas en la medición de propiedades de las señales [72]. Sin embargo, los algoritmos más comunes que ofrecen resultados a la hora de obtener resultado en la estimación de posiciones con las propiedades de las señales [72, 66] son la triangulación, trilateración, proximidad y análisis de escena (*fingerprint*).

- **Triangulación.** Utiliza las propiedades de geométricas de los triángulos para estimar la posición de un objeto calculando las medidas angulares relativas a dos puntos o nodos de referencia conocidos [73]. Es decir, la posición del objeto se encuentra entre la intersección de al menos dos líneas con un ángulo determinado [66, 73]. Para ello, se usa AOA para determinar la distancia entre los puntos de referencia y el nodo a localizar. Disponiendo del ángulo y la distancia resulta sencillo determinar la posición del nodo a localizar [61]. Cuando únicamente se utilizan dos o tres puntos de referencia, el funcionamiento del sistema resulta sencillo y de bajo coste, sin embargo, cuando se pretende que un sistema de estas características tenga una mayor cobertura con varios puntos de referencia, en el momento de estimar la posición puede tener varios errores y ofrecer una menor precisión [71]. Además, expandir un sistema de estos en una mayor área hace que los requisitos a nivel de hardware suelen ser complejos y costosos. El término triangulación a menudo suele ser sinónimo de trilateración. Ambos términos se utilizan como algoritmos de localización de interiores, pero con conceptos diferentes.
- **Trilateración.** Similar a la triangulación. La trilateración también utiliza las propiedades geométricas de los triángulos para estimar las posiciones de los objetos o los nodos a localizar. Sin embargo, en este caso, las mediciones de las distancias se realizan teniendo en cuenta tres puntos de referencia. [61, 73]. Del mismo modo existe la multilateración, que funciona de forma similar a la trilateración pero utiliza al menos cuatro puntos de referencia [72]. La posición en este caso se calcula utilizando el tiempo que tarda en llegar la señal desde a un receptor desde un transmisor [62]. También se puede utilizar TDOA, que es una mejora de TOA, que es la diferencia de llegada de TOA en diferentes receptores, determinando la posición relativa del transmisor basándose en la diferencia de los tiempos de las señales [70]. Esta técnica ofrece una gran precisión a costa de una gran complejidad de hardware. La precisión depende de la calidad de señal recibida, el entorno en que se encuentra y las condiciones ambientales [69].
- **Proximidad.** De forma diferente a la triangulación y la trilateración, los algoritmos

de proximidad no proporcionan una estimación de la posición absoluta o relativa ya que solo proporcionan información de la cercanía del nodo a localizar [71, 66]. Para ello, este algoritmo cuando se detecta un dispositivo con una antena se utiliza esa antena para calcular su posición. Pero si el dispositivo es detectado por más de una antena se utiliza la antena con mayor intensidad de señal para calcular su posición [71, 62]. El resultado de este algoritmo de forma general es la información de la antena por la cual ha sido detectada y una distancia a esta. La posición del dispositivo se determina mediante RSSI, que de forma habitual suele ser utilizado para determinar la distancia entre dispositivos [70]. Este algoritmo es utilizado en sistemas que utilizan IR, RFID y BLE. Para todos ellos es necesario llevar a cabo un proceso de calibración [66, 74]. Con este algoritmo es necesario una elevada dispersión de los lectores para lograr una mayor fiabilidad y zona de cobertura. Un sistema que utilice una gran concentración de antenas puede generar complejidad y alto coste.

- **Análisis de escena**, también conocida como *fingerprint*, la estimación de la posición basada en algoritmos de análisis de escena se realiza de forma independiente al ángulo o la distancia. Este algoritmo se base en la recolección de información o características de una escena y con ello estimar la posición comparando la información recogida en ese instante determinado con una base de datos con información existente sobre la escena [66, 62]. A la información recogida de la escena también la podemos denominar huella digital, de ahí su nombre en inglés *fingerprint*, ya que es una característica única que distingue una escena de otra. En los sistemas basados en radiofrecuencia este algoritmo hace uso de las intensidades de las señales recibidas en cada lugar para la creación de la huella del entorno [72, 66]. Este algoritmo cuenta con dos fases:
 - La fase de calibración: Es una fase de entrenamiento en la cual se genera un base de conocimiento o base de datos de valores de las fuerzas de las señales que emiten las estaciones bases en las diferentes posiciones y son capturadas por el dispositivo.
 - La fase de operación: El dispositivo que pretende realizar la localización envía al sistema los valores de potencia de las señales capturadas en ese momento. El sistema utiliza estos datos junto a los que se han obtenido y almacenado en la fase de calibración para la estimación de la localización.

Estos sistemas de forma general suelen ofrecer una buena precisión de posicionamiento y rendimiento. El esfuerzo necesario al implementar este sistema en un escenario real recae sobre fase de calibración, ya que las intensidades percibidas en cada posición se ven afectadas por cambios en entorno de modo que la fase de calibración se debe realizar de forma periódica.

2.3.3. Tecnologías de posicionamiento en interiores

Debido a que en el desarrollo de sistemas de posicionamiento en interiores se emplean varios algoritmos y técnicas, las tecnologías utilizadas varían de su aplicación. Aunque se han desarrollado muchas tecnologías específicas para el posicionamiento en interiores, normalmente se aprovechan de otros ámbitos. En este apartado se hará una referencia a las que se han determinado que tiene mayor relación con el estudio realizado en esta tesis. En la imagen 2.9 se puede ver una clasificación general de las tecnologías que se consideran más relevantes.



Figura 2.9: Clasificación de tecnologías de posicionamiento de interiores

- Radiación Infrarroja (IR):** En los principios del desarrollo de sistemas de posicionamiento de interiores se ha utilizado la tecnología de infrarrojos con el fin de obtener el posicionamiento y seguimiento. El proyecto principal de esa época era el *Active Badge*, un sistema de posicionamiento IR activo donde para llevar a cabo el posicionamiento era necesario portar un dispositivo localizador con esta tecnología [75]. Para desplegar este sistema es inevitable disponer de una red de sensores IR conectados a un servidor central.

La técnica utilizada para la estimación de la posición es TOA junto a algoritmos de trilateración [71]. Las principales ventajas que ofrecían los sistemas basados en esta tecnología frente a los basados en radio frecuencia es que en estas las señales de infrarrojos no atraviesan las paredes resultando más sencillo garantizar que el usuario se encuentra dentro de una habitación. Por otro lado, debido a esa característica de los infrarrojos, hace que los sistemas de estas características tengan un elevado coste de instalación.

- Ultrasonidos:** De forma similar a los infrarrojos, la tecnología de ultrasonidos es capaz de ofrecer localizaciones con elevadas precisiones a nivel de habitación. Para estimar la posición, el usuario debe portar un emisor o receptor de ultrasonidos [76, 77]. De los sistemas desarrollados con esta tecnología se destacan *Active Bat* [78], el sistema *Cricket* [79] y los más recientes [80, 81, 82]. En todos ellos, para su funcionamiento, es necesario realizar un despliegue de un elevado número de

sensores provocando que sea difícil la escala de estos sistemas. Las técnicas de posicionamiento utilizadas son TOA y TDOA junto a los algoritmos de trilateración.

- **Sonido audible:** De una forma muy diferente a los ultrasonidos que tienen un alcance limitado debido a la elevada atenuación en el momento de la transmisión, los sistemas basados en sonidos audibles tienen un mayor alcance [83]. Para determinar la posición en estos sistemas se utilizan tarjetas sonoras disponibles en los equipos estándares [75, 84]. Los estudios que validan que es posible la creación de estos sistemas son *Beep* y *BeepBeep* [85, 86, 87]. En ambos el nodo localizador envía un sonido a los receptores y cada nodo receptor dispone de un receptor acústico con la capacidad de analizar la señal recibida y, mediante técnicas de TOF o TOA, son capaces de proporcionar una ubicación con precisión a un bajo coste [71]. Cuando la señal es débil hace necesario el utilizar sensores de más precisión [75]. Debido a las interferencias que se pueden producir en el sonido, la baja frecuencia de actualización y que los obstáculos afectan al sonido, hace que no se desplieguen en entornos reales sistemas con esta tecnología.
 - **Sistema de posicionamiento magnético:** Los sistemas de posicionamiento magnético usan sensores de campo magnético y brújulas para percibir las señales magnéticas en el punto a ubicar [88] ya que este cambia de una ubicación a otra. De forma complementaria se pueden generar señales magnéticas o usar las propiedades magnéticas de los pilares, las estructuras de acero o cableado eléctrico de un edificio [89]. El algoritmo más comúnmente utilizado en el diseño de estos sistemas es el de *fingerprint*. Las principales desventajas que ofrecen estos sistemas es que el campo magnético puede ser fácilmente afectado al introducir o apagar equipos electrónicos en entorno a realizar la ubicación.
 - **Sistemas de posicionamiento basados en Radio Frecuencia (RF):** Los sistemas de posicionamiento basados en RF hacen uso de las infraestructuras de RF para determinar la posición de las personas u objetos [73]. Estos sistemas tienen como ventaja la capacidad de atravesar paredes y obstáculos de modo que permiten ofrecer una mayor cobertura. Estos sistemas también permiten la reutilización de infraestructura ya instalada para otros ámbitos, reduciendo los costes de despliegue [71, 90]. Estas dos ventajas han sido las que han atraído a los investigadores a decantarse por estos sistemas. Con estas tecnologías se ha permitido la creación de sistemas basados en algoritmos de proximidad mediante la medición de RSSI así como sistemas basados en triangulación, trilateración o *fingerprint* [71, 73]. Dentro de las tecnologías de RF disponibles para interiores podemos clasificarlas a su vez en Bluetooth, Banda Ultra Ancha (UWB), redes de Red de Área Local Inalámbrica (WLAN) o Identificación por Radiofrecuencia (RFID). Cada una de las distintas tecnologías tienen puntos fuertes y limitaciones únicas que se van a detallar a continuación.
 - **Bluetooth** es una tecnología que por lo general se utiliza para el intercambio de datos en pequeñas distancias dentro del Red de Área Personal (WPAN). En la localización de interiores se está aplicando la variante Bluetooth de baja energía (BLE) o Bluetooth ULP (*Ultra Low Power*) que se encuentra basado en la versión 4.0 del Bluetooth. Sus características que lo hacen destacable es el bajo consumo, baja latencia, altos niveles de seguridad y costes reducidos
-

[75, 71, 91]. La principal característica que hace se aplique en el ámbito de la localización es su soporte nativo en dispositivos móviles. La desventaja que presenta esta tecnología es el tiempo que tardan los dispositivos en descubrir a los dispositivos BLE afectando al posicionamiento en tiempo real, la precisión y el rendimiento. A lo largo de los últimos años se han realizado varias implementaciones exitosas para estimar la posición utilizando técnicas que han uso de la métrica de intensidad de señal [91, 92, 93, 94].

- **Banda Ultra Ancha (UWB)** es una tecnología de radio de alta velocidad de corto alcance para la comunicación inalámbrica. Lo que la hace aplicable para la construcción de sistemas de localización de interiores es su bajo consumo, altas frecuencias en las comunicaciones, tolerancia a interferencias, alto poder de penetración en paredes y objetos sin afectar al rendimiento, y su resistencia a efectos de multitrayecto [75, 90]. Las técnicas utilizadas cuando se aplica esta tecnología son TOA, TDOA y trilateración [75, 95]. Lo que frena a esta tecnología en una expansión dentro del desarrollo de sistemas de localización es que no se ajustan a los estándares existentes y no se encuentran integrados en los dispositivos móviles. Esta tecnología permite crear varios desarrollos que permiten llevar a cabo la estimación de posiciones en tiempo real con elevadas precisiones [71, 90]. Por ejemplo, [96, 97].
- **Red de Área Local Inalámbrica (WLAN):** Esta tecnología es la que se encuentra con mayor disponibilidad a nivel de puntos de acceso en la mayoría de los edificios modernos, ya que en todos ellos existen decenas de ellos, mucho más si estos son edificios públicos, pudiendo ofrecer soluciones de localización con bajo coste de instalación [98]. Esta tecnología se usa habitualmente para ofrecer conectividad de forma inalámbrica a los dispositivos de área local. Utilizando esta tecnología no disponemos del problema de visión directa entre receptor y emisor [90, 99]. La principal ventaja que ofrece esta tecnología, igual que el Bluetooth, es el hecho de ser soportada por todos los dispositivos que dispongan de un adaptador de red de este tipo. Como desventaja de esta tecnología podemos destacar su alto consumo de energía en comparación con tecnologías como es el BLE. Para la estimación de la posición se pueden utilizar técnicas basadas en RSSI junto a algoritmos de trilateración o de proximidad. Debido a que esta señal se comporta de forma muy diferente del entorno y de los objetos que se encuentran en este [99], los algoritmos basados en la huella digital, mediante la métrica de intensidad recibida, se han convertido en la alternativa más viable a la hora de desarrollar estos sistemas [99, 100, 101, 102].
- **Identificación por Radiofrecuencia (RFID):** esta tecnología es utilizada habitualmente para llevar a cabo la identificación de objetos por radio y está altamente extendida con fines de seguimiento [66]. Su principal orientación es la gestión de productos, distribución y detectar la presencia. Para su funcionamiento se hace uso de lectores que consultan los datos de las etiquetas y estas responden con una identificación única almacenada en el interior de estas [75]. Las etiquetas RFID pueden ser activas o pasivas. Las activas disponen de una batería interna de modo que les garantizan un mayor alcance de transmisión. Por otro lado, las pasivas únicamente se alimentan del lector [84] siendo necesario un mayor número de etiquetas por instalación. En el desarrollo de sistemas basados en esta tecnología lo más habitual es hacer uso

de la métrica RSSI y algoritmos de proximidad. Los sistemas desarrollados con esta tecnología, a su vez, los podemos clasificar en activos o pasivos [75]. En los activos las etiquetas se montan en los edificios y el lector corresponde con el nodo a localizar [103, 104, 105] mientras que en los pasivos las antenas lectoras son los elementos fijos del sistema y se desplazarían las etiquetas [106].

- **Sistemas Híbridos:** Los sistemas de posicionamiento híbridos son sistemas que implican que se combine dos o más tecnologías para la estimación de la posición. Por ejemplo, el sistema *Cricket* hace uso de ultrasonidos y RF. Los sistemas híbridos aprovechan los puntos fuertes de un sistema y los combina con los del otro. La combinación de dos sistemas y la fusión de la información solo se suele llevar a cabo cuando el nuevo sistema va a ofrecer una mayor precisión, rendimiento o facilidad en el sistema de localización. De la misma forma que se combinan diferentes tecnologías se pueden utilizar varias técnicas. Por ejemplo, se puede destacar el uso conjunto de RFID junto a WLAN [107, 108] o la combinación de tecnologías ópticas y WLAN [109, 110].
-

Capítulo 3

Lista de artículos de revistas

En este apartado se describe la coherencia de cada uno los artículos que conforman esta tesis doctoral presentada en formato de “*Compendio de artículos*”. A continuación, se detallan los tres artículos ya publicados en revistas internacionales, todas ellas indexadas en Journal Citation Reports (JCR). Se debe mencionar que los artículos han sido sometidos a un proceso de revisión ciega por pares de autores. Este capítulo se encuentra estructurado de la siguiente forma: en primer lugar se explica la coherencia y la relación que tienen los artículos con la hipótesis de este trabajo. A continuación, se presenta cada uno los artículos en su formato original, incluyendo para cada uno de ellos un breve resumen en castellano conformado por los objetivos de la investigación, la metodología utilizada y los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

3.1. Coherencia y relación entre los artículos

En la primera sección, se describe la coherencia y la relación existente entre los artículos y la hipótesis planteada en la sección 1.1. Los artículos se encuentran alineados con un trabajo de investigación bien definido y planificado que tiene con objetivo lograr una plataforma que permita la monitorización y la detección de patrones de comportamiento mediante el manejo de redes de sensores distribuidas haciendo uso de los nuevos paradigmas de computación disruptivos, como es el Edge Computing, aplicados sobre técnicas de Inteligencia Artificial y Visión Artificial que faciliten la interacción de las personas con las máquinas, simplificando de esta manera las tareas diarias de una forma transparente para el usuario. Como ya se ha indicado, todos los artículos han sido publicados en revistas indexadas en JCR con factor de impacto. Además, todas las publicaciones siguen la línea de investigación principal de la tesis. A continuación, se especificarán las publicaciones junto a un resumen breve:

- ***Automatic wireless mapping and tracking system for indoor location***: Este artículo hace foco en una arquitectura multi-agente basada en organizaciones virtuales que tiene como objetivo principal llevar a cabo la monitorización de activos o personas en espacios cerrados aprovechando el hardware que ya se encuentre instalado en los edificios.
- ***Connected Elbow Exoskeleton System for Rehabilitation Training Based on Virtual Reality and Context-Aware***: Este artículo se centra el diseño de una arquitectura basada en context-aware y la creación de un novedoso dispositivo hardware

de rehabilitación médica que es conectado a la arquitectura de forma inalámbrica. La utilización de técnicas de (VR) dota al usuario de una experiencia inmersiva. En conjunto, estos subsistemas permiten llevar a cabo una monitorización del proceso de rehabilitación.

- ***Multi-Agent Approach Using LoRaWAN Devices: An Airport Case Study***: Este artículo hace foco en el diseño de una red de sensores interconectada a arquitectura multi-agente capaz de adaptarse a los posibles errores o cambios que pueden producirse en el entorno. El principal objetivo de la plataforma es analizar la presencia de viajeros en aeropuertos en las zonas monitorizadas sin invadir su privacidad. Además, la plataforma monitoriza los recursos disponibles en los baños públicos logrando aumentar la eficiencia de los recursos humanos implicados en el grupo dedicado a la limpieza de los mismos.

Debido al abaratamiento de los costes del hardware a lo largo de los últimos años, la creación de redes de sensores se ha vuelto cada vez más importantes en todos los sectores de la sociedad. Las principales ventajas que ofrece el despliegue de sensores y actuadores es la capacidad adquirir datos para monitorizar y actuar sobre entorno de una forma inteligente, de modo que se puedan construir sistemas flexibles y sensibles al contexto que permitan agilizar los procesos y las tareas de las personas.

A pesar de los avances que se han producido en los últimos años, como pueden ser la aparición nuevas tecnologías que permiten afrontar un problema en concreto de una forma más sencilla, siempre nos encontramos con soluciones comerciales donde resulta complicado realizar integraciones o, en muchos casos, nos encontramos obligados a hacer uso una red o sistema ya desplegado, no solo por el ahorro de costes, sino también por ser respetuosos por la duplicidad en la instalación de dispositivos al ofrecer un nuevo servicio a los usuarios. Por otro lado, nos encontramos con situaciones donde es necesario llevar a cabo el desarrollo de nuevos dispositivos, afrontando así un problema en específico o un desarrollo que no había sido abordado anteriormente, ya sea a nivel comercial o a nivel de investigación. En estos desarrollos, normalmente, nos solemos encontrar con una serie de restricciones importantes a la hora de crear los nuevos dispositivos para que puedan ser utilizados en un caso de estudio real.

En la actualidad, existe una necesidad creciente acerca de la forma en que desarrollar e investigar sobre nuevas soluciones que ofrezcan la capacidad de integrar diferentes tecnologías. Al mismo tiempo, se busca que estas soluciones puedan fusionar datos de diferentes fuentes y gestionar la información de la manera más eficiente posible con objetivo de mejorar un proceso existente.

La hipótesis de este trabajo de investigación parte de la posibilidad de diseñar una plataforma que permita la monitorización y detección de patrones de comportamiento mediante el manejo de redes de sensores distribuidas y embebidas en combinación con nuevos paradigmas de computación disruptivos, como el Edge Computing, aplicados sobre técnicas de Inteligencia y Visión Artificial, facilitando la interacción de las personas con las máquinas a la vez que se simplifica, de esta manera, las tareas diarias de las mismas de una forma transparente para los usuarios. En este caso, las arquitecturas de los trabajos realizados están basados en sistemas de agentes virtuales o en context-aware que son capaces de obtener los datos medidos por los diferentes sensores utilizados en cada caso de estudio y actuar sobre los diferentes actuadores, analizando los datos mediante el uso de algoritmos de inteligencia artificial o mediante la utilización de sistemas

inteligentes basados en la experiencia de los expertos para la extracción de patrones que permiten ofrecer a los usuarios una solución que le permita la toma de decisiones o automatizar estas acciones.

Con lo descrito anteriormente, las soluciones propuestas en cada una de las publicaciones que conforman este trabajo de investigación muestran semejanzas entre ellas, dando lugar a la coherencia existente entre las diferentes propuestas. Además, esta coherencia se ve reforzada por los casos de estudios planteados en los diferentes artículos. Todos los trabajos de esta tesis de compendio tienen como objetivo facilitar las tareas de monitorización agilizando procesos existentes, ya sea debido a que estos actualmente se realizan de una forma más compleja o a que anteriormente no se monitorizaban. En el primero de los artículos se diseña un mecanismo para automatizar el proceso de calibrado de sistemas de localización de interiores que utilizan las redes ya existentes desplegadas en un edificio. Para el caso de estudio presentado en este artículo se ha diseñado una plataforma de seguimiento que tiene como objetivo facilitar la capacidad de realizar compras destinado a personas con movilidad reducida, para ello, se hace uso técnicas de procesamiento de imágenes. Este prototipo en combinación con el sistema de localización descrito permite estudiar patrones de comportamiento de los usuarios en el interior de los supermercados. En el segundo artículo se dejan de lado las técnicas de visión artificial para dar paso a la realidad virtual junto al edge computing. En este caso de estudio se ha diseñado un exoesqueleto para el sector de la medicina que, junto a una arquitectura basada en Context-Aware, permite llevar a cabo la monitorización de pacientes junto a estudios de comportamiento de los mismos. De esta forma, cuando los pacientes realizan los ejercicios de rehabilitación asignados, se obtienen medidas cuantitativas de estos ejercicios de una forma cuantitativa durante el progreso de cada uno de los pacientes, logrando así un seguimiento más efectivo del proceso de recuperación del paciente. Finalmente, en el tercer artículo, se realizan estudios de comportamiento con el objetivo de mejorar los servicios prestados por las empresas de limpieza. Para ello, se han diseñado unos dispositivos que hacen uso de redes inalámbricas de bajo consumo para monitorizar los diferentes productos de higiene de los baños públicos. En este caso, al igual que en el primer artículo, se ha usado una arquitectura basada en agentes virtuales que, en este caso, junto a un sistema de lógica difusa basada en reglas definidas por expertos, permite mejorar la toma de decisiones acerca de los instantes en los cuales realizar tareas de limpieza en dichos baños. Para ello, este sistema tiene en cuenta el flujo de personas que acceden a cada baño tras analizar datos temporales anteriores.

A modo resumen, esta tesis doctoral presentada en la modalidad de compendio de artículos, está formada por tres artículos científicos que muestran una relación en la utilización de arquitecturas y herramientas semejantes aplicadas a tres casos de estudio bien diferenciados. En estos casos de estudio se muestran los avances logrados en el campo abordado. En las secciones de a continuación se pueden ver como estos artículos tienen coherencia entre sí y la relación de estos con la hipótesis de investigación de este trabajo.

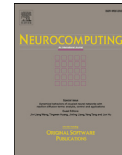
3.2. Automatic wireless mapping and tracking system for indoor location

Neurocomputing 338 (2019) 372–380



Contents lists available at ScienceDirect

Neurocomputing

journal homepage: www.elsevier.com/locate/neucom

Automatic wireless mapping and tracking system for indoor location

André Sales Mendes, Gabriel Villarrubia, Javier Caridad, Daniel H. De La Iglesia, Juan F. De Paz*



Faculty of Science, University of Salamanca, Plaza de la Merced s/n, 37002 Salamanca, Spain

ARTICLE INFO

Article history:

Received 29 January 2018

Revised 1 July 2018

Accepted 12 July 2018

Available online 9 January 2019

Keywords:

Neural networks
Indoor location system
Mapping and tracking

ABSTRACT

Automatic vehicle tracking systems ease the completion of numerous tasks in different fields. Moreover they can automatically capture information, this feature allows to perform location tasks. These systems can be implemented at airports, in shopping centers and in other large buildings; in this way, wireless network scans will serve as a basis for the creation of signal maps that can be used in indoor location systems. This work proposes an automatic people tracking system which also allows to map Wi-Fi networks in order to localize people indoor. In order to operate the system, information on vehicle movement was used to capture signal maps, with the aim of reducing the need to perform manual calibration and thus, improving the updating of information. The final location is determined by combining information provided by wireless networks, Bayesian networks are employed for this task.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

In the last years, considerable developments have been made in the field of indoor location systems; they have become more precise and can now locate users in real-time. These advances have allowed to leverage location systems in different fields; they can be found in case studies in the areas of medicine [1,2,10], employee monitoring [3], robots [4,5] etc. It is necessary to consider both the technology and the algorithms that can be used in location systems. The current trend in location systems is that they should operate, not one, but various technologies, in order to be able to apply information fusion techniques in the final calculation of a users' position. The purpose of this work is to create a system that will allow to combine the information provided by the different location mechanisms. Moreover, it intends to facilitate the process of location by means of the automatic mapping of signal levels.

Advances in system location have include both hardware and software. In the hardware part, systems with different technologies have been developed, such as Wi-Fi, RFID, Bluetooth, ZigBee or the analysis of electromagnetic fields. These systems have often been combined with other technologies, such as inertial systems. The main problem presented by these systems is low precision, in order to improve it, new algorithms based on fingerprint [12,16] have been applied. These algorithms have been chosen because they al-

low to locate users more precisely on the basis of the measurement of changes in the signal levels [12,20,21]. The main problem presented by the fingerprint technique is the need to make calibrations of the environment; this means that before the system can be used, a lot of time and efforts are required in order to maintain the information on signal levels updated [12].

This work proposes a multi-agent system which allows to locate devices in indoor spaces by operating iBeacon and Wi-Fi signals. The location system integrates iBeacon in order to determine scanning points, these scanning points are prefixed beforehand as the key points for calibration. At the points at which Bluetooth is detected, automatic scanning of the levels of Wi-Fi and iBeacon signals is carried out with the aim of creating a signal map and in order to make the use of fingerprint feasible. Moreover, the information on signal levels obtained from the iBeacons will be used in order to establish the aisle in the supermarket at which the user is located. After determining the aisle, the device is placed inside it thanks to the measurements made. Once we have these measurements, an application of the Bayesian signal distribution model is performed, obtaining a series of probabilities of stay at a calibration point. The system uses these probabilities to triangulate and calculate the final position.

In addition, time series will be applied in order to reduce the oscillation in the location of users. The proposed system has been used in a supermarket, for this purpose a shopping trolley was developed; the trolley tracks the users path and also guides the users to the place they want to reach. Without leaving out the traditional functions of this device, it is an element that is perfectly integrated with its environment, capable of detecting users and their gestures,

* Corresponding author.

E-mail addresses: andremendes@usal.es (A.S. Mendes), gvg@usal.es (G. Villarrubia), jch@usal.es (J. Caridad), denihiglesias@usal.es (D.H. De La Iglesia), fcolds@usal.es (J.F. De Paz).

<https://doi.org/10.1016/j.neucom.2018.07.084>

0925-2312/© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

this allows the trolley to always follow the correct user. The trolley independently follows the user and helps him in his shopping tasks. Moreover, it tells the system where the user is located at all times. All the movements made by the trolley are calculated autonomously, with the data provided to the Tablet by diverse sensors. This tablet is in charge of calculating the movements; these calculations are passed on to the microcontrollers which change these values into the energy that is provided to the motors for movement. This article is structured in the following way: related work is reviewed in Section 2, Section 3 describes the proposal, Section 4 shows the case study and finally in Section 5 the results and conclusions obtained are outlined.

2. Heuristics applied to optimization

Currently, location systems are widespread and their function varies depending on the case study. Outdoor location systems are usually based on the use of the Global Navigation Satellite System (GNSS), such as GPS, GLONASS, Galileo etc. [6], these systems often use different satellite networks to establish the final position. In initial works, we can see how sensor networks, consisting of beacons and tags, are deployed in order to locate objects in enclosed spaces. Along with the evolution of technology, indoor location systems have also been evolving. At the beginning it was possible to find location systems based on RFID technology; this was due to its low cost and because its features allowed to operate active and passive tags, although passive tags had limited capacities.

RFID based systems were implemented in different environments, for example, for the tracking of patients in hospitals [2,7] or to track objects in general [8]. With the appearance of new technologies, such as ZigBee, it was possible to create indoor location systems with greater precision [9]. Unlike Wi-Fi or Bluetooth, ZigBee never came to be integrated in mobile phones, this is why there have been Wi-Fi [10,11] and Bluetooth [12,13]. based indoor location systems.

Apart of looking at the signal level that reaches the devices by operating numerous technologies, different sensors have also been used, such as a camera or accelerometers, in order to implement the systems. In work [14], natural visual markers and inertial systems are used jointly in order to calculate the location of the user. Code based visual markers could be used as an alternative for finding the users' location [15]. New trends in location systems make use of magnetic fields [16], sound and lighting in order to detect the location of the user [17].

When dealing with networks formed by beacons and tags, not only the technology that will be used has to be considered, but also the location algorithm which will be used in the location process. In the case of wireless networks, it is common to use the received signal strength indicator (RSSI) [11], to determine the distance of the device according to the variation of the signal, although more information could be obtained, such as the signal quality LQI (Link Quality Indicator) [18]. There are numerous alternatives, such as signpost, which associates a tag with the beacon that is receiving the strongest signal level; on some occasions the tag itself will emit the signal that is received by the beacons and in others, a beacon will emit the signal and it will be received by other beacons. Some algorithms intend to establish the location more precisely by considering the attenuation of the signal with the distance [11] trilateration and multilateration based algorithms [19], function in this way. The main difficulty that these techniques display is when there are obstacles that attenuate the signal, for this reason the use of fingerprint [12,20,21] is more advisable.

Other studies that propose location systems with Wi-Fi, Bluetooth, magnetic field, sounds etc. use fingerprint. With fingerprint, it is necessary to carry out the calibration processes which allow to relate a particular location with sound, magnetic field or signal

levels [12,16]. In order to carry out the calibration process, inertial systems can be used in the same way that they are used during location [16]. This will make the calibration process easier [12] as it will be possible to establish points of origin, destination and to detect the steps of the user, in this way, relating location with signal levels. In recent works, it is common to find location systems that combine inertial systems with Wi-Fi [12,21].

In this article, we intend to simplify the calibration process by using iBeacons and by measuring signal levels automatically in the locations in which they are detected. The use of these iBeacons allows to update signal levels automatically and in addition to integrate new measurement points more simply.

3. Proposal

The Project was carried out using a multi-agent system which allows to control both the hardware of the trolley as well as the functionality of the location system. A multi-agent system has been chosen due to the possibilities it gives when including new functionalities dynamically. Fig. 1 shows the multi-agent system with its organizations. The trolley organization is in charge of operating the vehicle and allows for its movement, it includes the following agents for this purpose: The User detection agent, in charge of detecting and calibrating the user; the Movement agent, gives movement to the trolley through the actuators; the Obstacle detection agent prevents collision while the trolley is moving and finally, the PID agent controls the movement of the trolley. The location organization is in charge of carrying out the calibration and location processes by employing different machine learning techniques. The iBeacon and Wi-Fi agents are in charge of making a wireless scanning. The calibrate and location agents make use of the iBeacon and Wi-Fi agents when obtaining signal levels, both agents receive the scanning data from iBeacon and Wi-Fi and use this information to calibrate and locate, beside the location agent make use of the classifier agent that contains different classifiers in order to calculate the likelihoods belong to each calibrate point. Lastly, there is a database organization, which has a data agent that is responsible for managing the information in the database.

This work is done using a multi-agent system with the aim of generating a structure in which future improvements can be easily implemented. For example, it will be possible to model user behavior, analyze the sales dynamics in supermarkets, as well as propose an inter-relationship evolving system between the different organizations in the shopping cart.

Within each of the organizations, the agents share general information in such a way that it is common to all of them, and the variation in it causes changes in their behavior.

3.1. Description of the trolley's hardware system

This section briefly explains the functioning of the designed autonomous vehicle, as well as its main hardware components. Considering the electronic side of the design, we can distinguish the following elements: DC motors and their drivers for the management of movement, obstacle sensors, a central control unit, a device used to acquire images of the environment (Kinect), Bluetooth and Wi-Fi connection modules in order to make scans and finally a battery that powers the entire system.

The Microsoft Kinect device is a crucial element when tracking a user in the supermarket, making the following process much simpler. This device allows to recognize individuals that appear within the camera's . The API provided by the manufacturer allows to recognize and localize the skeleton of those individuals that appear in an image. This characteristic makes it possible to develop end services for users, which do not require the use of a remote control. To power the Kinect, the ML2596 voltage regulator was

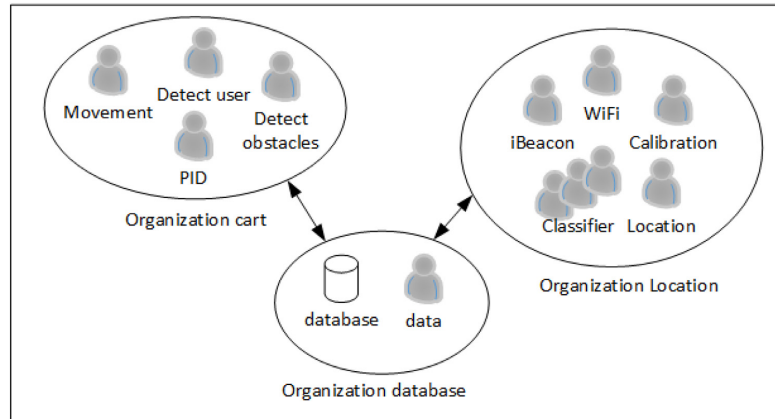


Fig. 1. Multi-agent system with system organizations.

used, in order to adjust the voltage of the battery since it can reach 14V and the voltage of the Kinect is 12V.

The device that is in charge of processing the images acquired by the Kinect camera, is the Surface Tablet. It should be remarked that it was necessary to use a tablet with the Windows operating system, since the application used in this case study has been developed with C#.

DC motors and motor drivers, which are connected to the tablet using the Arduino microcontroller, via the USB port, are used to move the trolley.

The computations of motion kinematics for following the user are calculated in the tablet because they are of high computing cost for an 8-bit microcontroller, such as the Arduino.

In order to detect people and objects moving on the sides, ultrasonic distance sensors are used, they allow to detect obstacles easily and efficiently. In order to make scans for subsequent location, a USB Wi-Fi & Bluetooth dongle is used. This allow to make scans with a different card to the one that is used to keep the Wi-Fi and Bluetooth connection established for the iBeacons scanning.

The connections between electronic components, that are used in the prototype, can be seen in Fig. 2. An USB HUB has been used for the connections between the Surface Tablet, Arduino, Kinect and the USB dongle.

3.2. Kinematics of movement

The application running on the tablet, is responsible for determining user movement information that appears in the image and to calculate, at every instant, the power that is to be applied to the motors. The calculated power is transmitted to the motors in a uniform way by using a microcontroller and a PID (proportional, integral, derivative). The computational load of the system resides, therefore, in the tablet, however the use of an 8-bits microcontroller Arduino is necessary in order to be able to communicate with the motors through an analog signal. DC current motors are, therefore, the actuators that allow to move the trolley in one direction or another. To change the direction of the trolley, the motor moves in one direction or in the opposite one. The power and speed that has applied by the motors, depend on both the load the trolley is carrying, its distance to the user and the speed at which the user is moving in the supermarket. In order to avoid sudden movements and adapt the speed to each situation, a PID controller was implemented, to control the power applied to the motors at each instant.

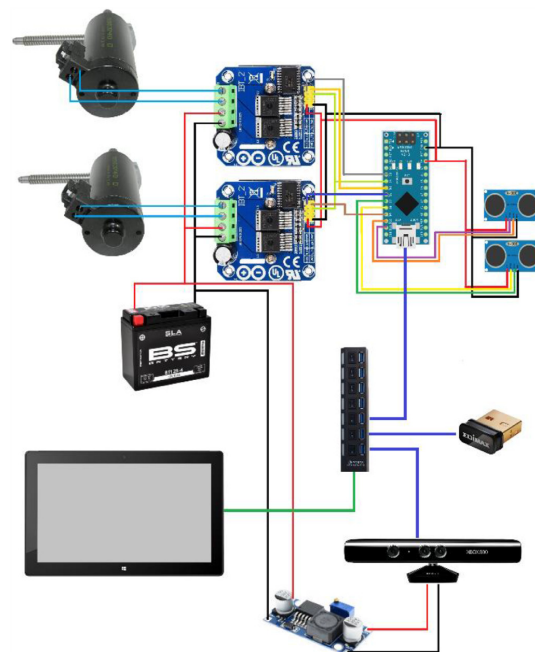


Fig. 2. Diagram of the electronic prototype.

The PID controller is a closed loop control system, which constantly evaluates the output of a variable in order to be able to compare it with a reference signal and calculate the difference between both (this value is called error). This value is introduced into the calculations with the aim of taking the output signal to the reference signal.

The PID controller is operated with the following formula:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1)$$

In formula (1) we can clearly observe the three terms that contribute to the control of PID. K_p is the proportionality constant, T_i is

the integrative constant and T_d is the derivative constant. Similarly, $e(t)$ is the error function and $u(t)$ is the output for the microcontroller. To find a solution to (1), a very simple heuristic method is implemented: once the signal error is obtained, $e(t)$ proportional control is applied immediately to K_p , in order to correct it. In this case, the signal is modified into its multiple in order to correct the error. This multiple is called gain and it will define a more or less rapid approach to the desired value. Once the control is close enough to the objective, the error will decrease and we will need to include a function that will evaluate the evolution of the error over time, modifying our correction of error. This evaluation is carried out by the integral part of the system, which accumulates all the errors that are produced over time. Due to the definition we made for this term, we will never look for T_i values close to zero. Lastly, it is necessary to evaluate the speed of change of this error, and how it is adapted to the desired value, for which we will determine T_d .

In this system, in particular, the PID controller is implemented in 4 stages where the distance between the trolley and the user is evaluated and the error is the difference between the distance of the KINECT device and the distance to the user, which is to be 25 cm. The PID controller is implemented in 4 stages, by means of a heuristic process based on a set of constrained values for the three constants.

First the proportional part is analyzed and the K_p parameter is tuned. This is done by placing T_i at its maximum value and T_d at its minimum. Then, the integral part is analyzed in order to compensate for the disturbances and keep the distance at around 25 cm. One of the key issues is that the value of T_i does not approach 0, since this will generate instability in the system. Once previous values are established, we increase T_d in order to get a faster response, while maintaining previous characteristics.

This control is implemented in the Arduino microcontroller through the motor drivers and the PWM pulses calculated previously by the PID controller.

3.3. Calibration system

The calibration system is created semi-automatically. The key for carrying out the calibration consists of the iBeacons, which are introduced into the environment. The location of these iBeacons is established beforehand and is based on the distribution of obstacles. Each iBeacon is associated with a point in the plan and the MAC address is stored. The iBeacon devices are continuously scanned until the level of the RSSI signal is higher than the established threshold. In that instant, the scanning of Wi-Fi networks and iBeacons begins. The signal levels of RSSI, Wi-Fi networks and iBeacon are stored. For each point p on the plan represented by the coordinates x_p, y_p a set of values r is taken as indicated in the following equation:

$$w^p = \{w_1^p, \dots, w_r^p\} \quad (2)$$

Each of the measurements obtained at time t follows the structure indicated in the following equation:

$$W_t^p = (bssid_1, rssi_1^p(t), bssid_2, rssi_2^p(t), \dots, bssid_s, rssi_s^p(t), x_p, y_p) \quad (3)$$

Thus for the point o , there will be a set of values w^p in different instant of time t .

3.4. Wireless network location system

The location system operates in two stages, first, the section in which the user is located is determined. In order to carry out the detection of the user, the only information required is the one

from the iBeacons. The iBeacons are associated to locations and locations are associated to sections, thus, the user is located in the last section in which an iBeacon was detected, with a higher level of signal than the predefined threshold.

Once the section in which the user is located is determined, the system goes on making a location within the section. In order to do the location within the section, supervised learning is carried out by means of the measurement points obtained in the previous step. In order to calculate the position of the users, continuous scanning of the Wi-Fi signal levels and the iBeacons is performed. The process of calculating the location of the Wi-Fi networks and iBeacons follows the scheme shown below.

Once the measurements for the sections are obtained, as indicated in Section 3.3, the system proceeds to carrying out a training. Before the training, it is necessary to modify the measurement data, in order to keep the number of input parameters constant. It should be considered that the measurements obtained for each point may not have a determined BSSID, due to the fact that the signal does not reach the device that is performing the scan. In order to carry out supervised training by means of a Bayesian network, it is necessary to keep the number of inputs constant for all the BSSID that are not detected. They are assigned with a default value which indicated the Wi-Fi and iBeacon signals are out of reach. The following BSSID have been obtained during the calibration process.

$$BSSID = \{bssid_1, bssid_2, \dots, bssid_n\} \quad (4)$$

So that the set of measurements obtained for the point p and time t is defined according to (5), here m refers to the value entered when the access point is not visible from p .

$$W_t^p = (bssid_1, rssi_1^p(t), bssid_2, rssi_2^p(t), \dots, bssid_n, rssi_n^p(t), x_p, y_p) / rssi_d(t) = m \forall bssid_d \notin w_k(t) \quad (5)$$

Therefore, from (5), (2) is redefined as

$$W^p = \{W_1^p, \dots, W_r^p\} \quad (6)$$

Therefore, thanks to (6) the Bayesian network has the same inputs for all the points in which the calibration is carried out, if we denote as RB_W the trained Bayesian network from the data measured in all z points where W is defined according to the following equation:

$$W = \{W^1, \dots, W^z\} \quad (7)$$

When a new tuple is obtained with the RSSI values of each of the access points by the following equation:

$$W_t^* = (bssid_1, rssi_1^p(t), bssid_2, rssi_2^p(t), \dots, bssid_n, rssi_n^p(t), x_p, y_p) / rssi_d(t) = m \forall bssid_d \notin w_k(t) \quad (8)$$

We proceed to making an estimate of the probability that the measurement W_t^* corresponds to each of the z points in the section, obtaining therefore probability values.

$$P_t = \{p_t^1, \dots, p_t^z\} \quad (9)$$

Where

$$\sum_{i=1}^z p_t^i = 1 \quad (10)$$

In addition, the coordinate point p represented as x_p, y_p is also known. From the values given in (9) and the coordinates of each of the points, we proceeded to calculate the estimate of the estimated location at time t defined as $(x, y)(t)$ by triangulation in (11).

$$(x, y)(t) = \left(\frac{1}{z} \sum_{i=1}^z x^i \cdot p_t^i, \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z y^i \cdot p_t^i \right) \quad (11)$$

Table 1
List of the electronic components.

Units	Description
1	Microsoft Kinect 360
1	Super Zoom Kinect
1	Surface Pro Tablet 128GB
1	Arduino Nano
2	IBT_2 Driver Motors
2	Motors
2	HC-SR04 Ultrasound Sensors
1	YTX9-BA Battery
1	WIFI Dongle/Bluetooth USB Endimax EW-7611UL
1	ML2596 Voltage Regulator

Because the RSSI signal levels oscillate, even if no movement occurs, it is necessary to smooth the displacements made to avoid jumps and also limit the maximum displacement, according to time. Therefore, the value calculated in (11) is not the final position calculated, as the first step the value of the jump is limited as indicated in (12) where d is defined according to (13)

$$(x, y)(t) = \begin{cases} \frac{x(t) + x(t-1)}{d/M}, \frac{y(t) + y(t-1)}{d/M} & d > M \\ (x, y)(t) & eoc \end{cases} \quad (12)$$

$$d = \sqrt{(x(t) - x(t-1))^2 + (y(t) - y(t-1))^2} \quad (13)$$

Finally, it is necessary to calculate the time series that reduces the oscillations, for which the previous k measurements are considered, calculating for it a weighted average where the last value has 80% of the weight on the final position and the remaining 20% is distributed among the measurements as indicated in the following equation:

$$(x, y)(t) = (x(t) \cdot 0.8 + 0.2 \cdot (x(t-1) \cdot 0.8 \dots), \\ y(t) \cdot 0.8 + 0.2(y(t-1) \cdot 0.8 \dots)) \quad (14)$$

4. Case study

The prototype made for the case study is equipped with a Microsoft Kinect 360 camera, which allows to capture the position of the user and to obtain a cloud of points which is used to detect obstacles that are within its reach. In order to detect the obstacles that are not within the camera's view, HC-SR04 distance sensors have been used, these are installed on the sides of the back of the device, given that there are more probabilities that the trolley will crash with these sides when making a turn. These sensors are connected to Arduino, which sends the distances between the trolley and the objects located at the sides, to an application executed from Surface. The central element of the system is Microsoft's Surface Tablet; it executes the application that is in charge of obtaining the position of the user and the cloud of obstacle points. With these data, the Tablet constantly makes calculations of the direction in which the trolley has to move and of the power that should be sent to the motors through the PID, and it sends it to Arduino.

The Tablet is also in charge of scanning the Wi-Fi networks and the iBeacons through a USB adapter from the Edimax brand, EW-7611UL model, which incorporates Wi-Fi and Bluetooth. The Arduino microcontroller is in charge of receiving the information from the application executed on the Surface Tablet, about the direction where the trolley should move in each instant. The microcontroller receives this information to apply current to the DC motors, using IBT_2 model drivers for DC motors.

Table 1 provides a list of all the electronic components, the number of units needed in the system.

In Fig. 3 we can see the installation point of the different components that have been described previously in the location system. This device has the appearance of a shopping trolley, so it

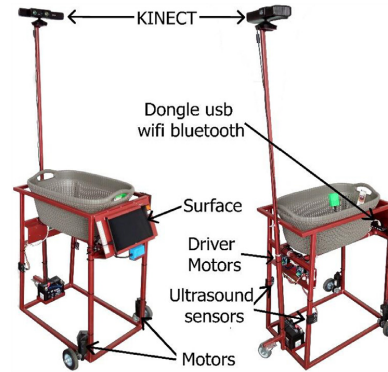


Fig. 3. The trolley's hardware components.

naturally fits the supermarket environment; in this way it was possible to evaluate its performance with real users, who saw the device as an intrinsic element of their everyday experience at the supermarket.

The main task of the trolley is to follow the users in their shopping process. For this reason, it is based on the detection of the movements and gestures made by the users. If the user wants the trolley to follow him, he needs to carry out the synchronization process. The trolley detects gestures in the synchronization process; the gesture chosen for the synchronization and desynchronization of the trolley, is the lifting of two hands. The user has to keep his hands lifted for two seconds. Once the trolley is synchronized, it establishes a continuous detection of the user's gestures. To do this, the device uses the position of the skeleton, captured by the Kinect. Once the position of the user is obtained, the device maps the position of the obstacles in its range of movement, using the cloud of points provided by the Kinect. Obstacles located on the sides are detected using ultrasound sensors. When the position of both the user and the obstacles is known, the device proceeds verifying if the user is at a greater distance than 25 cm from the trolley, if this is so, the device calculates a route that will allow the trolley to get closer to the user without colliding with other users or obstacles. If the user stops and the trolley is at a distance inferior to 25 cm, then it stops as well. In order to stop the trolley from following the user, the desynchronization process has to be carried out. The procedure is the same as when synchronizing the trolley; the user has to lift his hands and keep them lifted for 2 seconds, once desynchronized the trolley stops moving and remains in the same position in which it was desynchronized. If one user is synchronized, it will not be possible for another user to get synchronized with the trolley; a second synchronization will be rejected by the device. In Fig. 4 shows the synchronization, desynchronization steps and the task of following users, more in detail.

The synchronization process follows a pre-established workflow. The first thing to be done is to detect a user. Once a user is detected, his relative position is evaluated. If the user is performing the chosen synchronization gesture, the system synchronizes with him if it was at rest. After synchronization, the loop returns to the beginning with user detection. The position of the user who is now synchronized in the system is re-evaluated. As the user now does not perform the synchronism signal, the system picks up user's position, the obstacles around them and performs the tracking movement towards the user. This cycle is repeated until the synchronized user performs the synchronization gesture again, at this point the system returns to the idle state.

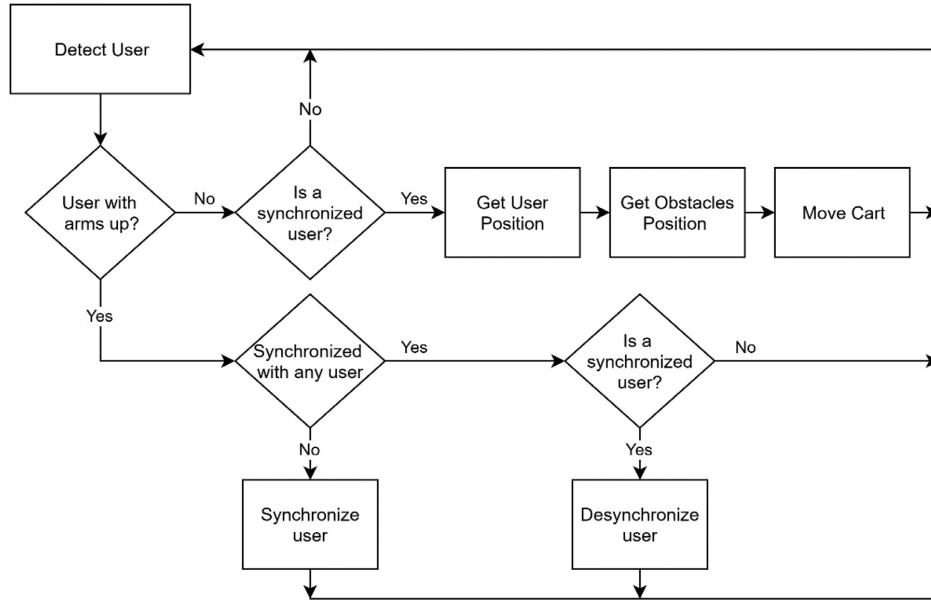


Fig. 4. Synchronization, desynchronization and user following steps.

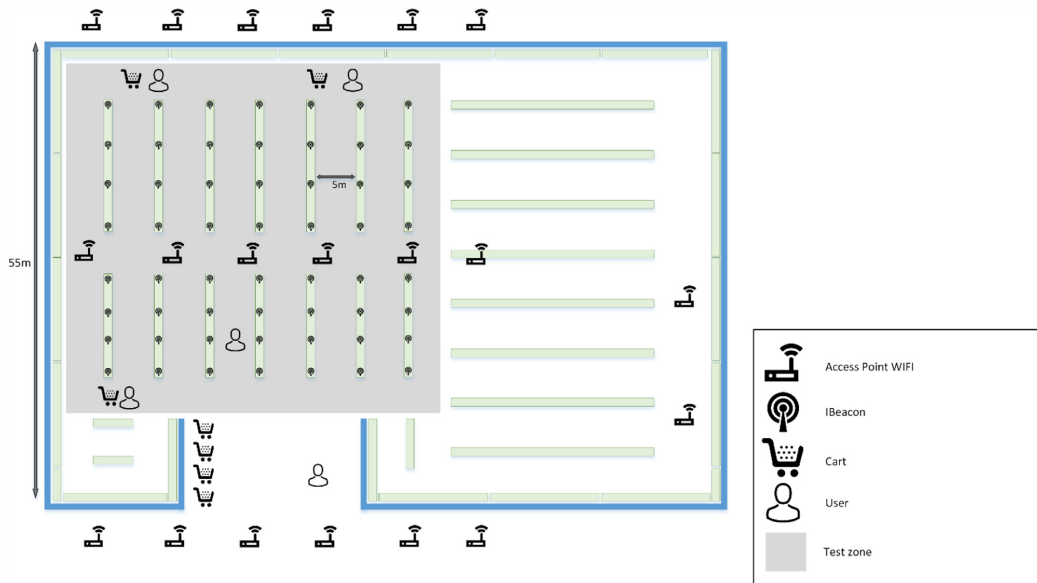


Fig. 5. A distribution map of the iBeacons and Wi-Fi networks.

In order to carry out the calibration process, iBeacons were placed on the supermarket’s shelving, as shown in the Figure. The iBeacons were located in a way that there was direct vision with no obstacles at least between two of them, they were placed at the beginning and at the end of each aisle. On the other hand, the Wi-Fi routers were installed at the facility beforehand, therefore, this infrastructure was not modified.

5. Results and conclusions

The system evaluation method consists of mapping and locating an area of a supermarket in order to analyze the performance of the system. In the tests, different phases have been carried out to verify the operation of the different characteristics. Some features, such as user synchronization or motion control using a PID

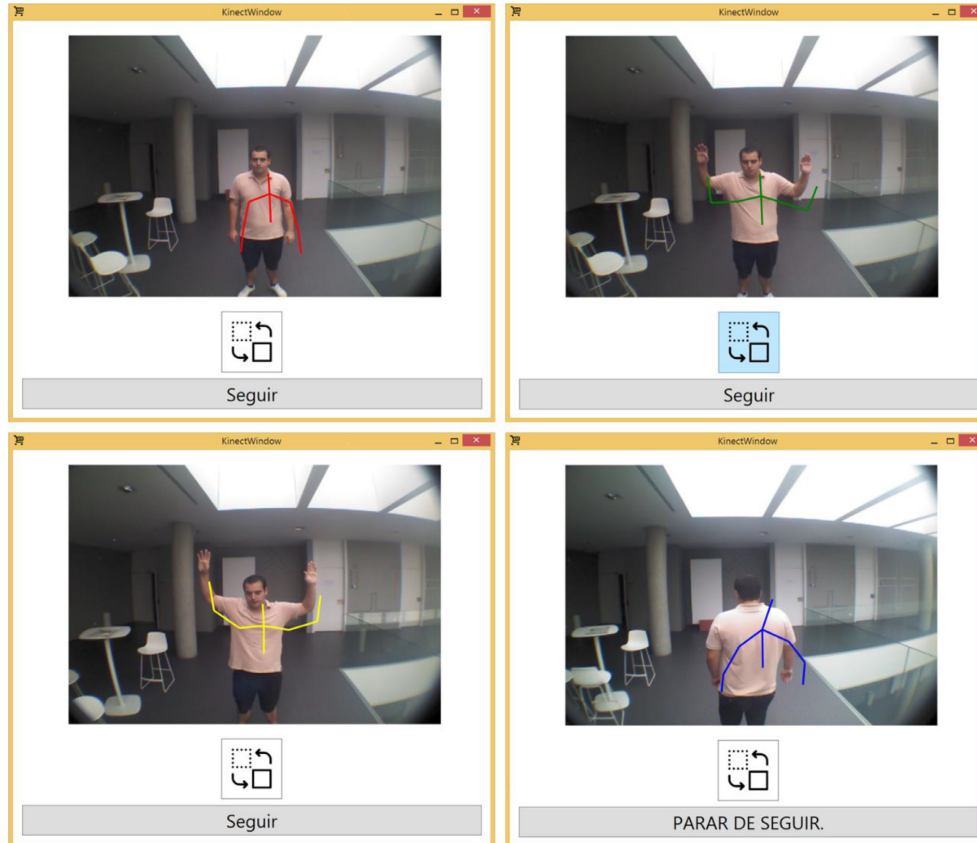


Fig. 6. The user synchronization and desynchronization window. (a) User detection, (b) User synchronization (c) User synchronized (d) Following the user.

controller, are evaluated using heuristic techniques and progressive refinements are made. However, in other areas such as position calculation, an extensive statistical analysis is required.

The system was tested in 14 aisles, with a total of 56 iBeacons and 20 Wi-Fi routers. In the tests, the synchronization, desynchronization and location systems were tested. In order to simplify the tests, an area of the supermarket, which we can see in Fig. 5, was chosen for the case study.

First, the functioning of the synchronization and desynchronization system is analyzed. In Fig. 6, we can see the steps needed to perform the synchronization. The four synchronization stages are represented by different skeleton colors. In Fig. 6a, the red skeleton is used to represent the users that are not synchronized. In Fig. 6b, green is used during the 2-s synchronization process. When the skeleton is yellow, as in Fig. 6c, the user can drop down his hands. At last, when is blue as in Fig. 6d, the user is already synchronized. Until the user does not desynchronize himself, the skeleton remains blue and the trolley follows the user.

In order to analyze the functioning of the system, it was calibrated as indicated in Fig. 4. The scanning frequency for Wi-Fi networks is approximately of 4.6 scans per second, while the iBeacons scan themselves 1.6 times per second. The iBeacon emission frequency was configured at 300ms. Every time the Wi-Fi scan is finished, the system proceeds storing the values obtained for

Wi-Fi and the last iBeacons registered. The system does the same procedure with the iBeacons. During the calibration phase, a total of 1596 values was obtained.

The first step was to determine the efficiency in identifying the supermarket aisles, each aisle was considered to be a different sector that is identified by the iBeacons associated to that aisle. In order to analyze average error, the use of different techniques was analyzed in order to establish the probabilities of belonging to each point and proceed to making the final triangulation. During the testing phase, a total of 10,824 measurements of Wi-Fi networks and iBeacons were made, for each of these measures were marked the x coordinate and the corresponding shelving. The measurements were taken on several routes and they were taken in the same order, due to the fact that they use time series to predict location. In Table 2, average error is shown in meters, obtained during the estimation of the position for the different classifiers. The classifier with the best results was the Bayesian network.

Fig. 7 shows the box diagram with the errors obtained in meters, for the different techniques. From the graph we can see that the Bayesian network and KStar are the algorithms with the best results.

To determine if the difference between the different classifiers is significant, we proceeded to perform a Mann Whitney. First, the

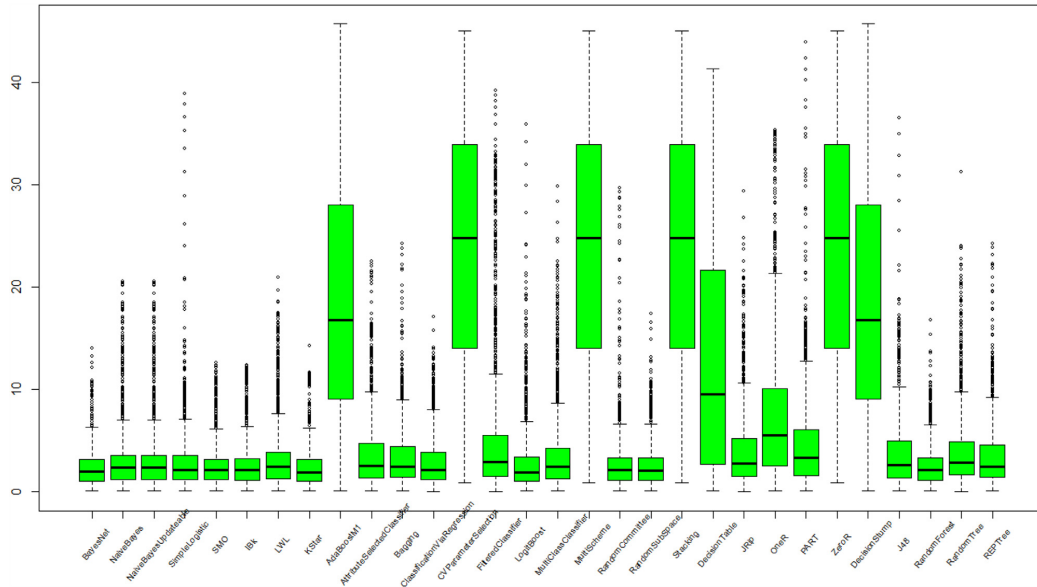


Fig. 7. Diagram of boxes with the error in meters for different techniques.

Table 2
Average error in meters, obtained by the different classifiers.

Classifier	Error	Classifier	Error
BayesNet	2.398849	MultiClassClassifier	3.665971
NaiveBayes	3.025434	MultiScheme	23.73343
NaiveBayesUpdateable	3.025434	RandomCommittee	2.806345
SimpleLogistic	2.974045	RandomSubSpace	2.656918
SMO	2.633645	Stacking	23.73343
IBk	2.659693	DecisionTable	13.13979
LWL	3.471543	JRip	4.040351
KStar	2.437436	OneR	7.443464
AdaBoostM1	18.95733	PART	4.705549
AttributeSelectedClassifier	3.679663	ZeroR	23.73343
Bagging	3.397746	DecisionStump	18.95733
ClassificationViaRegression	2.943992	J48	3.727805
CVParameterSelection	23.73343	RandomForest	2.549873
FilteredClassifier	5.380433	RandomTree	3.972994
LogitBoost	3.057921	REPTree	3.472747

Table 3
Average error in meters, obtained by the different classifiers.

Classifier	Error	Classifier	Error
NaiveBayes	1.92E-07	MultiScheme	0
NaiveBayesUpdateable	1.92E-07	RandomCommittee	0.01662141
SimpleLogistic	0.00036881	RandomSubSpace	0.0100968
SMO	0.0176855	Stacking	0
IBk	0.02355766	DecisionTable	1.06E-220
LWL	2.60E-13	JRip	5.84E-33
KStar	0.6363632	OneR	9.79E-185
AdaBoostM1	0	PART	6.54E-51
AttributeSelectedClassifier	2.12E-22	ZeroR	0
Bagging	4.05E-21	DecisionStump	0
ClassificationViaRegression	7.19E-06	J48	1.04E-22
CVParameterSelection	0	RandomForest	0.0678743
FilteredClassifier	4.06E-45	RandomTree	6.63E-41
LogitBoost	0.08278222	REPTree	7.87E-20
MultiClassClassifier	1.72E-16		

Bayesian network was compared with the rest of the classifiers; H0 the median values were equal and when H1 the median values were different. H0 was only accepted with KStar and was rejected with the other classifiers. Then H1 was changed and it was defined to be the lower value of the median. Therefore, when evaluating the Bayesian Network and the rest of the classifiers, it was not possible to accept H0, so H1 was accepted indicating that the median error of the Bayesian network was considered to be inferior to the rest of the classifiers. The result of the test can be seen in Table 3. Although the result for KStar cannot be considered statistically inferior, we can read from Table 1 that the mean error was lower.

The semi-automatic calibration system simplifies the tasks of calibrating and updating information in the environment, thus simplifying the tasks of deploying the system. In addition, the system allows to incorporate beacons for their calibration and subsequent elimination. However, if continuous calibration is desired, it is necessary to leave the iBeacon deployed. Continuous calibration facilitates the maintenance of the system since it is not necessary to carry out this process in any specific way.

With the use of the triangulation system, which calculates probabilities, it was possible to reduce error, in comparison to techniques like signpost. Signpost is limited to giving the discrete positions in the plane, associated with the points where the iBeacons are located. Similarly, due to the existence of obstacles, the use of fingerprint allowed the system to be more stable; it also allow to attain adaptable precision, depending on the number of iBeacons used and their deployment was at low-cost.

In areas where more precision will be required, it is only necessary to introduce more iBeacons. Thanks to continuous calibration, it is not necessary to carry out the whole fingerprint process manually; this simplifies the adaptation of the system.

In future work, we will propose the use of the vehicle's odometry, compass and accelerometers, in order to combine location with Wi-Fi signal levels. Odometry has still not been addressed, due to the fact that the motors used in the vehicle's construction have to be modified, since they are not equipped with the necessary encoders for odometry. Compass and accelerometers have not been used either, because sensors for their measurement are not installed.

Acknowledgments

This work has been supported by project Diseño y desarrollo de un carro autónomo de transporte de mercancías para la asistencia a personas con movilidad reducida en centros comerciales. Project co-financed with Junta de Castilla y León y Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) funds. Fundación General de la Universidad de Salamanca PC_TCUE15-17_F2_027.

References

- [1] T. Nishimura, K. Koji, Y. Nishida, H. Mizoguchi, Development of a nursing care support system that seamlessly monitors both bedside and indoor locations, *Procedia Manuf.* 3 (2015) 4906–4913.
- [2] L. Calderoni, M. Ferrara, A. Franco, D. Maio, Indoor localization in a hospital environment using random forest classifiers, *Expert Syst. Appl.* 42 (1) (2015) 125–134.
- [3] P.E. Lopez-de-Teruel, F.J. García, O. Canovas, R. Gonzalez, J.A. Carrasco, Human behavior monitoring using a passive indoor positioning system: a case study in a SME, *Procedia Comput. Sci.* 110 (2017) 182–189.
- [4] D. Gu, K.-S. Chen, Design and performance evaluation of wiimote-based two-dimensional indoor localization systems for indoor mobile robot control, *Measurement* 66 (2015) 95–108.
- [5] G. Ernesto Martín, L. Galilea, J. Luis, M. Meca, F. Javier, S.M. David, E.Z. Felipe, P.P. Luis, Infrared sensor system for mobile-robot positioning in intelligent spaces, *Sensors* 11 (5) (2011) 5416–5438.
- [6] R.M. Alkan, M.H. Saka, I.M. Ozulu, V. İlçi, Kinematic precise point positioning using GPS and GLONASS measurements in marine environments, *Measurement* 109 (2017) 36–43.
- [7] M. Juan, C. Javier Bajo, Y. de Paz, D.I. Tapia, Intelligent environment for monitoring alzheimer patients, agent technology for health care, *Decis. Support Syst.* 44 (2) (2008) 382–396 ISSN 0167-9236, doi:10.1016/j.dss.2007.04.008.
- [8] S. Seol, E.-K. Lee, W. Kim, Indoor mobile object tracking using RFID, *Futur. Gener. Comput. Syst.* 76 (2017) 443–451.
- [9] S.H. Fang, C.H. Wang, T.Y. Huang, C.H. Yang, Y.S. Chen, An enhanced ZigBee indoor positioning system with an ensemble approach, in: *IEEE Commun. Lett.* 16, 2012, pp. 564–567. April.
- [10] G. Villarrubia, J. Bajo, J.F. De Paz, J.M. Corchado, Monitoring and detection platform to prevent anomalous situations in home care, *Sensors* 14 (6) (2014) 9900–9921.
- [11] J.F. de Paz, D.I. Tapia, R.S. Alonso, C. Pinzón, J. Bajo, J.M. Corchado, Mitigation of the ground reflection effect in real-time locating systems based on wireless sensor networks by using artificial neural networks, *Knowl. Inf. Syst.* 34 (1) (2013) 193–217.
- [12] J. Bajo, J.F. De Paz, G. Villarrubia, J.M. Corchado, Self-organizing architecture for information fusion in distributed sensor networks, *Int. J. Distrib. Sens. Netw.* 11 (3) (2015).
- [13] G. de Blasio, A. Quesada-Arencibia, C.R. García, J.M. Molina-Gil, C. Caballero-Gil, Study on an indoor positioning system for harsh environments based on Wi-Fi and bluetooth low energy, *Sensors* 17 (6) (2017) 1299.
- [14] M. Neges, C. Koch, M. König, M. Abramovici, Combining visual natural markers and IMU for improved AR based indoor navigation, *Adv. Eng. Inf.*, 31, 2017, pp. 18–31.
- [15] G.C. La Delfa, S. Monteleone, V. Catania, J.F. De Paz, J. Bajo, Performance analysis of visual markers for indoor navigation systems, *Front. IT EE* 17 (8) (2016) 730–740.
- [16] X. Huang, S. Guo, Y. Wu, Y. Yang, A fine-grained indoor fingerprinting localization based on magnetic field strength and channel state information, *Pervasive Mob. Comput.* 41 (2017) 150–165 ISSN 1574-1192.
- [17] N.U.I. Hassan, A. Naem, M.A. Pasha, T. Jadoon, C. Yuen, Indoor positioning using visible LED lights: a survey, *ACM Comput. Surv.* 48 (2) (2015).
- [18] P. Barsocchi, M.G.C.A. Cimino, E. Ferro, A. Lazzeri, F. Palumbo, G. Vaglini, Monitoring elderly behavior via indoor position-based stigmergy, *Pervasive Mob. Comput.*, 23, 2015, pp. 26–42. ISSN 1574-1192.
- [19] Z. Li, T. Braun, D. Dimitrova, A passive wifi source localization system based on fine-grained power-based trilateration, in: *Proceedings of the IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, 2015.
- [20] S. He, G. Chan, Wi-fi fingerprint-based indoor positioning: recent advances and comparisons, *IEEE Commun. Surv. Tut.* 18 (1) (2016).
- [21] V. José Luis Carrera, Z. Zhao, T. Braun, Z. Li, A. Neto, A real-time robust indoor tracking system in smartphones, *Comput. Commun.* 117 (2017).



André Sales Mendes PhD Student on Computer Engineer. He is a researcher at the BISITE Research Group (<http://bisite.usal.es>). He has graduated in Computer Engineering at the University of Salamanca. In the same university he also has obtained a master's degree in Intelligent Systems. During the past years I have won several awards and scholarships related to innovation and artificial intelligence.



Gabriel Villarrubia González PhD Student on Computer Engineer. Currently, he is Assistant Professor at the Department of Computer Science at the University of Salamanca and member of the BISITE Research group. He obtained a Technical Engineering in Management of Computer in 2009 at the Pontifical University of Salamanca, then an Engineering in Computer Sciences degree in 2010 at the same university and postgraduate in Intelligent Systems at the University of Salamanca in 2011. He is co-author of more than 50 papers published in recognized journal, workshops and symposiums, most of them related to Intelligent Systems, Ambient Intelligence, and Distributed Systems. He has been member of the organizing and scientific committee of several international symposiums such as FUSION, PAAMS, MIS4TEL, ISAMI, PACBB.



Javier Caridad Hernández He is finishing his degree in Physical Sciences. He has developed his professional career developing sensors and electronic devices for industry and IoT applications.



Daniel Hernández de la Iglesia (PhD candidate) He has finished his studies in Technical Engineering in Computer Systems at the University of Salamanca (2013), and he has a degree in Computer Engineering from the same University (2014). He completed his studies with the Master in Intelligent Systems of the University of Salamanca (2015). He is currently a member of the computer and automatic department as a PhD student.



Juan Francisco De Paz (PhD.) Received a PhD in Computer Science from the University of Salamanca (Spain) in 2010. He is Assistant Professor at the University of Salamanca and researcher at the BISITE research group (). He obtained a Technical Engineering in Systems Computer Sciences degree in 2003, an Engineering in Computer Sciences degree in 2005 at the University of Salamanca and Statistic degree in 2007 in the same University. He has been co-author of published papers in several journals, workshops and symposiums.

3.2.1. Resumen en español

En este apartado se muestra el resumen del artículo titulado “*Automatic wireless mapping and tracking system for indoor location*” que traduciendo a castellano sería “*Sistema automático de mapeado y trazabilidad de interiores*”.

Objetivos de la investigación

Durante los últimos años varios investigadores han realizado avances y desarrollos referentes a sistemas de localización de interiores. Estos sistemas surgen debido a los problemas que presentan los sistemas tradicionales de posicionamiento global, como es el GPS, en el interior de los edificios. Los sistemas de interiores desarrollados hasta el momento permitían localizar y monitorizar a los usuarios y activos en tiempo real. Para lograr que estos sistemas funcionen se han diseñado varias técnicas. La más reciente, denominada fingerprint, basa su funcionamiento en la estimación de la posición a través de la intensidad de las señales inalámbricas recibidas en cierto punto, haciendo uso de la huella del entorno. El principal problema es la obtención de esta huella, este proceso consiste en la realización de calibraciones en los diferentes puntos, resultado ser un proceso laborioso ya que se realiza de forma manual. Además, este proceso se debe realizar de forma periódica ya que los niveles de las señales recibidas pueden cambiar al introducir nuevos elementos u obstáculos en el entorno.

Así pues, se ha propuesto la creación de una plataforma modelada con agentes virtuales que permita combinar información de diferentes mecanismos de localización al mismo tiempo que se automatizará el proceso de mapeado y obtención de la huella digital del entorno. Además, en este trabajo de investigación se ha planteado la creación de la plataforma de seguimiento la cual tendría las mismas funcionalidades que un carro de la compra con la capacidad de seguir al usuario al mismo tiempo que le facilita la tarea de compra diaria. Esta plataforma de seguimiento, aunque esté pensado para personas que dispongan de algún problema de movilidad reducida o para personas que vayan acompañados de carritos de bebés el prototipo diseñado puede ser usado por cualquier persona que no disponga de las restricciones descritas anteriormente. Con esta plataforma de seguimiento se integrará perfectamente con el sistema de automático de calibración y estimación de localizaciones ya que con su uso se permitirá realizar el proceso de mapeado constante y monitorizar a los usuarios de una forma indirecta constantemente.

Por tanto, los objetivos de investigación presentados en este artículo han sido los siguientes:

- Diseño de arquitectura basada en organizaciones virtuales de agentes que permitan calcular la posición y monitorizar un activo o persona en un espacio cerrado utilizando hardware que ya se encuentre instalado en los edificios o dispositivos de bajo coste.
 - Diseño de un algoritmo para automatizar el proceso de fingerprint y recalibrado de los niveles de las señales del sistema.
 - Desarrollo de una plataforma de seguimiento en formato carro de la compra autónomo que permita facilitar el proceso de compra, siguiendo al usuario de una forma automática.
-

- Diseño de mecanismos monitorización e interacción del usuario con la plataforma de seguimiento para la sincronización, desincronización y seguimiento.
- Diseño de mecanismos para la plataforma de seguimiento que permitan la evasión de obstáculos.

Metodología

Para la realización de este artículo se ha utilizado la metodología AR, explicada en la sección 1.2. A continuación, para cada uno de los pasos de esta metodología se explican resaltando cuales han sido los aspectos más relevantes de cada uno de los puntos y los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

- **Revisión del estado del arte:** Este apartado tiene como objetivo conocer como se encontraban los estudios y las técnicas utilizadas por otros investigadores para solventar problemas parecidos.

Se ha empezado por estudiar cómo se encontraban los sistemas de posicionamiento, determinando las limitaciones de los sistemas globales y cuáles eran las líneas de investigación que se estaban abordando respecto al posicionamiento de interiores. En los primeros trabajos analizados se ha visto que en zona a realizar la monitorización se debería desplegar algún tipo de baliza o tag, de la tecnología que fuera. Era posible encontrar trabajos que hacían uso tecnologías como son RFID, Bluetooth, Wi-Fi, etc. Una de las interesantes de usar era ZigBee debido a que se lograba la creación de sistemas con una mejor precisión. La principal desventaja que presentaba era que los dispositivos móviles no incluían esta tecnología y era necesario instalar hardware en el edificio y usar hardware adicional para llevar a cabo el posicionamiento. Igual que pasaba con el ZigBee existían también sistemas basados en el reconocimiento de imágenes o sistemas inerciales que necesitaban un hardware específico.

Mientras se estudiaban las diferentes tecnologías se han estudiados los algoritmos disponibles para la estimación de posiciones. Al tratarse de redes inalámbricas era bastante común hacer uso de la intensidad de la señal recibida (RSSI) para determinar la distancia que se encuentra el dispositivo de la fuente de la señal. Es posible usar el RSSI como métrica debido a que la intensidad de la señal se atenúa con el aumento de la distancia. Una vez estimada la distancia y conocida las posiciones de estaciones base se pueden usar técnicas de trilateración o multilateración para calcular la ubicación. Debido a que estas técnicas se basan en la atenuación de señal y esta se comporta diferente dependiendo de los obstáculos como alternativa se recomienda la técnica de fingerprint.

Cuando se aplican técnicas de fingerprint es necesario obtener la huella del entorno, este proceso se basa en realizar calibraciones en diferentes puntos del entorno midiendo la intensidad de la señal recibida y estimar la posición con algoritmo de clasificación. En el momento de la investigación y realización de pruebas iniciales se ha determinado que resulta bastante difícil poner en marcha y mantener actualizado un sistema de estas características debido a que la aparición de nuevos obstáculos modifica la atenuación de la señal.

- **Análisis y diseño de la propuesta:** analizando las debilidades existentes en el estudio de los trabajos previos, se ha determinado la necesidad de diseñar y desarrollar una arquitectura que tuviera la capacidad de automatizar el proceso de calibrado del fingerprint, facilitando el proceso de puesta en marcha y mantenimiento de sistemas que usen esta técnica como base de funcionamiento. Con esto también se ha planteado la creación de plataforma de seguimiento que facilitará estas tareas, al mismo tiempo que se le daba el enfoque de facilitar alguna tarea a los usuarios. Por ello se ha planteado su aplicación en el supermercado, la plataforma debería tener la capacidad de ayudar a los usuarios durante el proceso de compra, siguiéndolos de forma automática, actuando de carro de la compra. Con objetivo de que los diversos componentes realicen tareas de forma concurrente y que colaboren entre sí para lograr un objetivo común se ha planteado el diseño de una arquitectura basada multi-agentes y organizaciones virtuales. Repasando la arquitectura planteada, esta contaría con varios grupos de agentes, llamados organizaciones definidas por tipo de funcionalidad. La primera organización hace referencia al sistema de localización, en esta se pueden encontrar los agentes encargados del escaneo periódico de las señales inalámbricas obteniendo la intensidad de la señal recibida de cada estación base en ese momento. En esa organización también se encuentran los agentes encargados de llevar a cabo el proceso de calibración y aplicación de los diferentes algoritmos de calibración para la estimación de las posiciones. La siguiente organización planteada en la arquitectura es la encargada de la funcionalidad de seguimiento y movimiento del carro de la compra. Esta incorpora agentes responsables de la detección de los usuarios, detección de los obstáculos y control proporcional integral derivativo (PID) de los movimientos. Por último, debía existir una organización que tiene como funcionalidad mantener la persistencia de los datos donde se almacenan la información de las diferentes compras y usos y recorridos de los carros de la compra. Esta arquitectura dispone de todos los elementos necesarios para automatizar el proceso de calibración, monitorización y asistir a los usuarios con problemas de movilidad reducida en el proceso de compra.
 - **Definición del caso de estudio:** para llevar a cabo la validación de una propuesta de investigación esta debe ser probada en un caso de estudio. Para ello se ha diseñado un caso de estudio donde se puedan validar las diferentes partes del sistema. En un primer apartado se plantea la validación de la plataforma de seguimiento, comprobando las diferentes funcionalidades del sistema de seguimiento. En este apartado se ha diseñado un caso de estudio donde se aplicaban técnicas heurísticas, que consistían en realizar diferentes rutas con la plataforma de seguimiento supervisando las tareas de sincronización, desincronización, evasión de obstáculos y la facilidad que ofrecía el sistema a la hora de realizar la tarea de compra. El segundo apartado del caso de estudio se centraba en validar el sistema de localización, esta validación se debería realizar a modo estadístico utilizando como base la infraestructura existente en el edificio. Los resultados de este apartado tenían como objetivo determinar cuál era el algoritmo de clasificación que ofrecía la mejor posición con el menor error posible.
-

Resultados:

una vez diseñado y probado el caso de estudio para validar la propuesta es necesario comprobar los resultados obtenidos. Para ello se ha analizado el funcionamiento de los diferentes subsistemas comprobando el funcionamiento de cada una de las partes. Las características de la plataforma de seguimiento como es el control PID, sincronización y control de movimientos se han realizado pruebas heurísticas donde se han realizado refinamientos progresivos hasta lograr un funcionamiento ideal o que se adecuaba al resultado esperado por la mayoría de los usuarios. Sin embargo, tal como se había definido en el caso de estudio para el sistema de localización era necesario realizar un estudio estadístico donde se verificaría la eficiencia del sistema. Las pruebas de este sistema se han realizado en un supermercado en una zona con 14 pasillos aprovechando la instalación existente de 20 puntos de acceso Wi-Fi. Para el sistema de calibrado automático se han añadido 56 balizas de tipo iBeacon en la parte superior de las estanterías de cada uno de los pasillos. Tras la realización de las pruebas de validación, se ha determinado que la realización de escaneos con una periodicidad de 4,6 segundos para las redes Wi-Fi y 1,6 segundos para la tecnología bluetooth es la parametrización que mejor resultado ofrece. En una primera fase, en la fase de calibración, las pruebas han determinado que la capacidad en la detección del pasillo en la cuál el individuo se encontraba era satisfactoria. En esta fase, se han realizado 1596 escaneos donde únicamente se capturaban las redes bluetooth y se asignaban al pasillo correspondiente. La segunda fase consistía en determinar cuál era el algoritmo que ofrecía un mejor comportamiento, para ello se han realizado 10824 mediciones obteniendo las intensidades de las señales recibidas de las redes bluetooth y Wi-Fi en cada una de ellas. Una vez realizadas las mediciones se ha procedido a analizar cual algoritmo ofrece mejores resultados, llegando a la conclusión que las redes bayesianas y el KStar son los que mejor se comportan. Para comparar estadísticamente los diferentes métodos se ha usado Mann Whitney. Con el resultado de esta prueba se ha podido comprobar que KStar no se puede considerar estadísticamente inferior, aunque el error que ofrece el clasificador es ligeramente mayor.

Conclusiones:

A lo largo del desarrollo de este trabajo de investigación se ha conseguido desarrollar una arquitectura basada en organizaciones virtuales de agentes que colaboran entre si para lograr un objetivo común con éxito. Se ha logrado también el diseño y desarrollo de una plataforma de seguimiento con una funcionalidad similar a la de un carro de la compra que dispone de diferentes formas de iteración con los usuarios. Este prototipo facilita el proceso de la compra a personas con problemas de movilidad. La incorporación de balizas iBeacon al escenario permite crear un sistema de calibrado automático. El sistema de calibrado diseñado e implementado simplifica las engorrosas tareas de puesta en marcha y mantenimiento de los sistemas de localización. La creación de un sistema de localización basado en fingerprint con estimación de probabilidades reduce el error que está presente en técnicas de Singpost, técnicas que son muy utilizadas hasta el momento. Debido a la presencia de obstáculos, el uso de técnicas como fingerprint permite que el sistema sea más estable.

Como líneas de trabajo futuras para este trabajo se plantea incorporar sensores de odometría, brújula y acelerómetros con el hito de fusionar los datos obtenidos de estos sensores y compararlos con los niveles de las señales inalámbricas con objetivo de

mejorar la precisión del sistema de localización.

3.3. Connected Elbow Exoskeleton System for Rehabilitation Training Based on Virtual Reality and Context-Aware



Article

Connected Elbow Exoskeleton System for Rehabilitation Training Based on Virtual Reality and Context-Aware

Daniel H. de la Iglesia ^{1,2,*} , André Sales Mendes ¹, Gabriel Villarrubia González ¹ ,
Diego M. Jiménez-Bravo ¹ and Juan F. de Paz Santana ¹

¹ Expert Systems and Applications Lab, Faculty of Science, University of Salamanca, Plaza de los Caídos s/n, 37002 Salamanca, Spain; andremendes@usal.es (A.S.M.); gvg@usal.es (G.V.G.); dmjimenez@usal.es (D.M.J.-B.); fcofds@usal.es (J.F.d.P.S.)

² Facultad de Informática, Universidad Pontificia de Salamanca, C/Compañía 5, 37002 Salamanca, Spain

* Correspondence: danihiglesias@usal.es

Received: 15 December 2019; Accepted: 4 February 2020; Published: 6 February 2020



Abstract: Traditional physiotherapy rehabilitation systems are evolving into more advanced systems based on exoskeleton systems and Virtual Reality (VR) environments that enhance and improve rehabilitation techniques and physical exercise. In addition, due to current connected systems and paradigms such as the Internet of Things (IoT) or Ambient Intelligent (AmI) systems, it is possible to design and develop advanced, effective, and low-cost medical tools that patients may have in their homes. This article presents a low-cost exoskeleton for the elbow that is connected to a Context-Aware architecture and thanks to a VR system the patient can perform rehabilitation exercises in an interactive way. The integration of virtual reality technology in rehabilitation exercises provides an intensive, repetitive and task-oriented capacity to improve patient motivation and reduce work on medical professionals. One of the system highlights is the intelligent ability to generate new exercises, monitor the exercises performed by users in search of progress or possible problems and the dynamic modification of the exercises characteristics. The platform also allows the incorporation of commercial medical sensors capable of collecting valuable information for greater accuracy in the diagnosis and evolution of patients. A case study with real patients with promising results has been carried out.

Keywords: exoskeleton; elbow rehabilitation; virtual reality; edge computing

1. Introduction

Currently, there are more than 890 million people with chronic diseases worldwide [1]. It is estimated that 25% of these patients could benefit immediately from solutions for monitoring their health from home [2]; another 50% would benefit from the integration in their mobile phones or other devices of existing medical resources [3,4]. In Europe, there is a large group of people suffering from some type of chronic diseases, such as diabetes or cardiovascular diseases. To these data, we must add all those patients who suffer from some type of mobility problem or have suffered an accident or limb fracture. Considering the advances made in technologies such as the Internet of Things, e-health, or the Ambient Assisted Living, monitoring health and improving patients from their own homes is now an unquestionable reality. Ambient Intelligence (AmI) is a paradigm that seeks to build intelligent models capable of adapting to the user's environment, responding in an appropriate way to the needs detected and with the ability to sensor both physical and human assets [5]. In recent years, numerous scientific works related to this important area have proliferated. A large part of these works is focused on the use of different medical sensors for remote monitoring, disease monitoring or early warning of new

pathologies. There are fewer studies that investigate how the technologies listed above can help users to rehabilitate certain minor pathologies in the comfort of their home without going to medical centers. This work tries to contribute a new practical case of AML technology applied to medical domestic environments for the active rehabilitation of a patient.

One of these cases is physiotherapeutic rehabilitation patients who, through current technological advances, could benefit from adapted, effective and easy-to-use rehabilitation systems from their own home. The exoskeleton-based rehabilitation systems available today for upper limbs are complex systems, difficult to install on the arm, and difficult to use. In addition, they have a heavy size that prevents the arm from moving naturally, making rehabilitation tasks difficult. Another added problem lies in the price of these devices, which causes that only the institutions and health centers can acquire them. The user does not have the possibility of carrying out rehabilitation exercises from the comfort of their home, they are also forced to go periodically to the physiotherapy center, which has the necessary equipment. Traditional rehabilitation systems also have a lack of motivation problem for patients, the vast majority of the exercises are based on repetition and this makes the sessions become monotonous and not very stimulating.

The main objective of this work is to design a rehabilitation device based on an exoskeleton for the elbow of a degree of freedom (one DOF) connected to a virtual reality system called EXOMedical. This Virtual Reality (VR) system is specially designed for working immersively with the user, controlling the motor of the exoskeleton, and measuring the force exerted by the patient. In addition, a Context-Aware architecture [6] has been designed to control all the data generated by the exoskeleton, detecting user progress and identifying possible problems in advance. In addition, it will be able to generate new exercises adapted to progress and patient ability. This architecture will also have the assistance of the medical professional in charge of rehabilitation, which can continuously monitor its evolution, allowing personalized follow-up on each patient.

Currently, the rehabilitation process is carried out in a hospital or in specialized physiotherapy centers with the help and supervision of a professional in that area. The professional must perform the work of evaluation or triage as well as the monitoring and performance of the corresponding therapy. Due to the high number of patients, it may lead to the need for a large number of professionals to carry out all these activities and attend them correctly. In the same way, it is difficult to quantify the improvement or evolution of patients since there is currently no way to quantify them and the subjective assessment of an expert must be used. The developed system allows a quantitative measure of the evolution and capabilities of the patient over the Context-Aware architecture that has historical data on progress individually and in detail of the entire recovery. These data will serve the system to analytically measure the patient's recovery, as well as the generation of new exercises adapted to that evolution. Although these processes are normally carried out in physiotherapy centers, the user can use it in a more comfortable place, such as in their own home, transmitting the data of their evolution to the platform, generating a more favorable and collaborative attitude on the patient part. As for chronic patients, this device allows an increase in their quality of life by assisting in weightlifting. For example, a person who has suffered a car accident in which his arm has been damaged, or someone who has suffered a work accident or a stroke, can perform daily tasks such as moving weights of up to 15 kg without letting the effort fall on your body.

This article is structured as follows: Section 2 reviews the current state of the art; Section 3 describes the proposed system in detail; Section 4 introduces the case study with real patients; Finally, conclusions drawn from the work are outlined in Section 5.

2. Background

In the current literature, it is possible to find articles that address the use of robotic exoskeleton systems for the recovery of patients with mobility problems. The vast majority of these works are focused on the recovery of injuries and problems of the upper limbs. There are other works that focus on the study of injuries from other areas such as the ankle [7–9]. Other works focused on one of the

most important joints of the lower extremities such as the knee [10–15]. In all these works, the use of robotic exoskeleton systems is another part of the traditional physiotherapeutic rehabilitation that is advised by an expert and is performed in a traditional clinical setting.

In the works that address the recovery of the joints in the upper extremities, there are different projects that seek to provide significant progress [16]. These works combine, like this article, the use of a robotic exoskeleton, with virtual reality technology and environments that allow patients to develop the exercises in a more dynamic and interactive way. It is possible to identify, within the upper extremities, those works focused on the rehabilitation of the hand (wrist and fingers), the rehabilitation of the elbow and the integral rehabilitation of the entire upper limb. In the work [17], the authors present a study based on the generation of virtual reality-based interfaces for the rehabilitation of arms and hands, in which the use of optoelectronic sensors such as Leap Motion, Microsoft Kinect and Oculus VR is necessary. These devices are capable of capturing user movements and translating them into digital environments that motivate the user to participate in dynamic rehabilitation sessions. In the case of the studies [18,19], the authors focus their work on the treatment of hand-related problems. The authors of [20] propose a system based on fuzzy logic, virtual environments, and an active hand orthosis operated through servomotors that allow exerting a certain force with which users can perform different strengthening exercises. The combination of flexibility sensors, servomotors, and optoelectric control of the Leap Motion sensor generates an accurate simulation of hand movements in the virtual environment.

The article that addresses the integral physical rehabilitation of the arm, highlights numerous works that use virtual reality techniques as an additional recovery tool. The authors of the paper [21] propose the use of an exoskeleton device with 5 DOF for the integral rehabilitation of the arm using virtual environments during a session with a medical professional. In the article [22], the authors propose an active rehabilitation training system based on virtual reality technology specially designed for patients with upper limb hemiparesis. These authors develop several virtual games to increase the interest of patients when performing the exercises. In the same area, the authors of [23] use an exoskeleton of 5 DOF but making use of immersive environments with virtual reality as well as the work of the authors of [24].

Another researching lines in upper limb rehabilitation devices are stroke patients who require specific rehabilitation to recover effective arm movement. The authors of the work [25], in their pilot study with a stroke patient working with an exoskeleton for the arm, determined that its use was very advantageous with respect to patients following a more traditional recovery. Similarly, the study [26] highlights this type of therapy based on the use of exoskeletons and virtual environments as potentially more beneficial than traditional therapies as a result of a large study with real patients. The authors of [27] implement a modular and reconfigurable exoskeleton, which seeks to reduce costs and size by adopting different therapeutic end effectors for different training movements using a single robot in stroke patients.

As for the works that address the design of Context-Aware architectures and frameworks, it is possible to find a large number of works based on telemonitoring and disease monitoring systems [28–31]. It is less frequent to find works that present this type of architecture focused on rehabilitation exercises for home monitoring, in combination with telemonitoring and e-health. These works include the work of the authors of [32] whose objective is to integrate software architectures with person-computer interfaces to develop context-sensitive systems for telerehabilitation of people from their homes. Another outstanding work is that of the authors of [33] where a Context-Aware framework is proposed and validated for the use of animatronic biofeedback, as a way to potentially increase the compliance of older users with physical rehabilitation exercises performed in home. In this context, animatronic biofeedback involves the use of preprogrammed actions in a robot that are activated in response to certain changes detected in the biomechanical or electrophysiological signals of the users. Another paper presented is [34] where the authors present a model-based approach to the development of telerehabilitation systems through context-aware systems.

It is possible to summarize that there is no work in the current literature that comprehensively addresses the design of a Context-Aware system in combination with a low-cost exoskeleton integrated with a virtual reality environment for performing rehabilitation exercises. The current systems based on exoskeletons are supervised and unconnected systems, without the possibility of sharing the data obtained or generating new exercises dynamically as the device proposed in this work.

3. Proposed System

This section presents the system proposed in this work. Firstly, it is described in a connected hardware device that will serve as a rehabilitation exoskeleton for system patients. Next, the architecture based on Context-Aware technology for monitoring and control of the rehabilitation system is described. Finally, the virtual reality system that will connect to the hardware device and Context-Aware architecture and whose purpose is to provide an immersive user interface to make physical exercises is analyzed.

3.1. One DOF Exoskeleton for Elbow

The set of elements that make up the EXOMedical device are described below. This exoskeleton for the elbow consists of two parts that are attached to the outside of the arm and forearm with a series of velcro straps, as shown in Figure 1. The device has a rotation axis or DOF corresponding to the axis of rotation of the elbow joint.

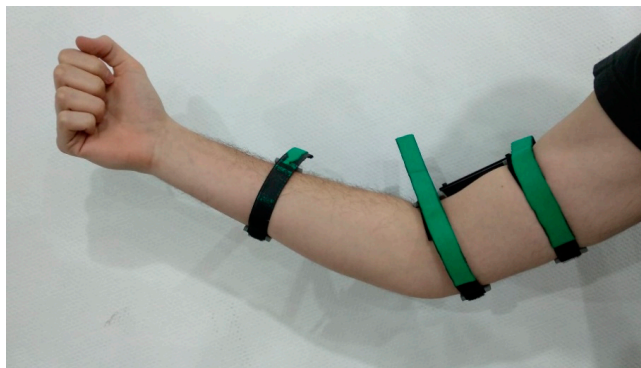


Figure 1. Designed device deployed on a user's arm. The device is fixed through the three velcro straps.

The structure of the prototype has been built using 3D printing technology since it allows the construction of low-cost prototypes in a short time. Before performing the printing process, the 3D modeling phase has been carried out. This phase has required a long period of time due to the measurement and adjustment of the design. So it is adjustable to a large number of users. Considering the parametric design, it has been possible to design the structural 3D pieces in different sizes to adapt to the measurements of the different patients. Once the structure has been designed, it has been 3D printed with resistant and low-cost material such as PLA (Polylactic Acid). In future versions of EXOMedical, for cases where greater resistance is required, it will be possible to print a new exoskeleton on more durable materials such as ABS, NYLON, or carbon fiber. The motor used in the exoskeleton is a servo motor with a force of 15 kg, which is responsible for assisting the user in the task of exercising the arm. This servo, at the same time, allows making known the position in which the arm is, that is, the opening angle that will be used as an input value in the VR environment. In the same way that happens with the types of plastic, this servo can be equally scalable to get a greater pushing force helping to lift a greater amount of weight. This will be interesting in cases in which the patient has a

superior muscular capacity. As can be seen, the device is highly configurable based on the needs and characteristics of the patients.

The load cell in the exoskeleton has the functionality of obtaining the force that the user is exerting at a given moment. In this way, it is possible to know if it is necessary to apply a greater or lesser amount of assistance force with the motor for the realization of the movement, or the lifting of loads, as well as to measure the performance and evolution throughout the realization of the exercises. Specifically, the load cell used is based on a Gauge type cell that measures the electrical resistance in response to a force that is applied to the device. Generally, the element that measures that resistance, also known as a deformation meter, is made up of a very fine wire usually made of copper or aluminum material. This measuring element is based on a grid design so that when pressure is applied to this element, a linear change in resistance occurs. The resistors used in strain gauges are typically 120, 350, and 1000 Ω . The resistances used in each of the load cells have a different sensitivity to the voltage, a variable called “gauge factor”, which is generally used in metal-type strain gauges that are commonly used in most devices, is close to 2.

The load cell model used in this work is the TAL220, industrially used in different fields. This load cell is designed for operating ranges between 2 and 200 kg. Specifically, the one that has been used is the 30 kg load cell since it is the closest assistance value to the average weight that a person can lift in a rehabilitation process. The internal resistance of the TAL220 model is all 1000 Ω .

However, experimentally the following is verified: The variations that occur in a deformation meter are relatively small, of about few millistrain ($e \cdot 10^{-3}$). The electrical resistance that provides the magnitude of the force being exerted on the device is very small. Therefore, most of the electronic devices used to digitally measure the value obtained are not adequate, since being so small they do not accurately detect the real value. Therefore, it is necessary to use an electronic device that is capable of accurately measuring the values and changes that occur in the electrical resistance and converting that unit into something that we can measure with a unit of mass (g). For this purpose, an HX711 model amplifier module will be used, the operation of which is based on the use of 4 resistors with a known voltage, forming the “Wheatstone bridge” as shown in Figure 2.

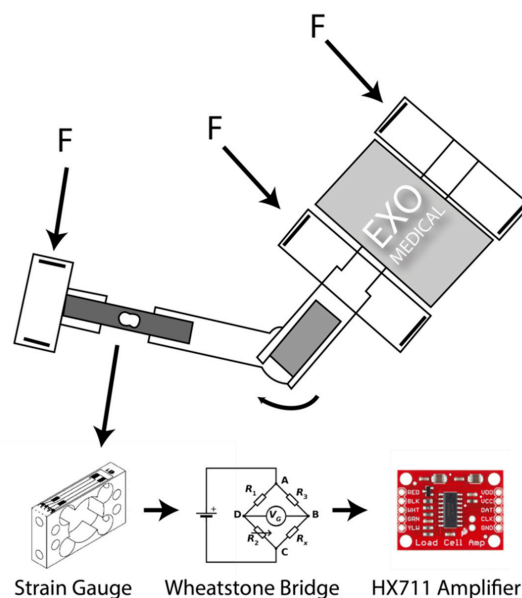


Figure 2. Measurement of the force (F) exerted by the user through the exoskeleton and measured through a Gauge type load cell that is amplified through a Wheatstone bridge.

If V_{in} is a voltage that is constant and known and the resulting V_{out} is measured as follows $R1/R2 = R3/R4$ it follows that V_{out} is 0, however, if there is a variation in one of the resistors, the V_{out} it will be affected, governed by the following Equation (Ohm's law) (1):

$$V_{out} = [(R3/(R3 + R4) - R2/(R1 + R2))] \times V_{in} \quad (1)$$

If one of the resistors in the Wheatstone bridge is replaced, the resulting value in V_{out} can easily be measured and the force applied to the load cell can be obtained. On the other hand, the microcontroller used is an ESP8266. It is a microcontroller that contains 8 digital outputs and an analog input. It also has the ability to connect to the data network through WIFI technology and thus be able to send and receive data from the software architecture and VR environment without cables. It is also a low-cost device that allows its incorporation in a large number of Internet of Things (IoT) projects today [35,36]. So that the system is portable and does not depend on an external power source, two 18,650 lithium batteries with a capacity of 3400 mah have been incorporated into the final system, which allows the user a minimum autonomy to perform exercises in a full rehabilitation session. This device can also be used to carry out movements and weight loads in the domestic or work environment as part of rehabilitation therapy and reintegration into everyday life. It should be noted that the final device has a very low cost, with the price of all components being less than €100. This allows becoming an affordable tool for any patient or rehabilitation center that needs it. Figure 3 shows the parts that make up the final device.

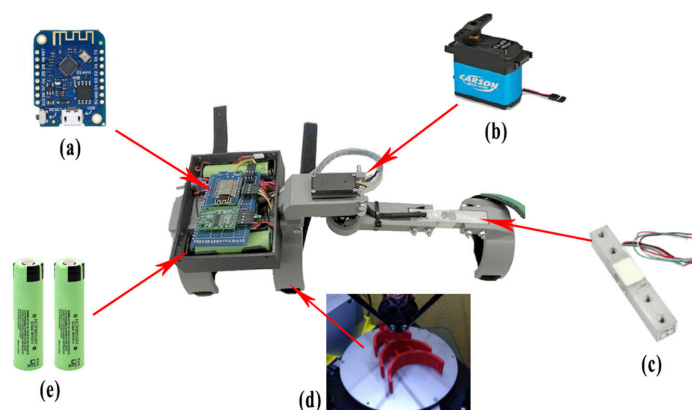


Figure 3. Components of the exoskeleton of a one degree of freedom (DOF) EXOMedical: (a) ESP8266 Wireless microcontroller; (b) 15 kg servo motor; (c) Load cell up to 25 kg; (d) 3D printed parts in PLA; (e) Two 18,650 lithium batteries of 3.7v 3400 mah each.

3.2. Context-Aware Architecture

The important boom that has emerged in recent years in areas such as the Internet of Things and specifically in the so-called Wearable Internet of Things (WIoT) for the collection of physiological and medical data, has led to the application of new paradigms. New paradigms such as medical distributed computing that combine medical IoT devices and sensors to generate from the home environment, medical telemonitoring systems, and remote telecare. The existing WIoT architectures are highly centralized. During the last decades, cloud computing has been the technology base used to process and store data in the cloud instead of using the devices with limited resources that are composing the IoT environment. Cloud infrastructures facilitate the processing, storage, visualization, and real-time analysis of WIoT medical data. However, that cloud-based IoT health system is finding many barriers to handling the large health data that IoT currently generates. Edge computing (EoT) is a new technology

that seeks to act as a service-oriented intermediate layer between the IoT health system and cloud computing. Edge computing is a solution that is in full expansion and offers efficient solutions to meet the important demands that telemedicine systems currently have. The objective is to increase the capacities available on the network, such as computing and storage capacity. These operations are performed on the edge of IoT-based systems, near data sources. Consequently, it moves calculations, storage and service provision from clouds to local peripheral devices, such as smartphones, gateways or smart routers, local wireless devices. These edge devices improve connectivity and allow to increase speed and data transfer for a faster and more efficient response.

Context-Aware systems for current e-health environments are very focused on patient monitoring and follow-up. Specifically, these environments have been highly developed to perform a specific assistance task that helps the elderly patient. In addition, these are very centralized systems, especially focused on traditional Cloud environments. The disadvantages of these systems are the inability to handle large data due to their local structure, the lack of ability to generalize to other patients and other diseases, and lack of context-awareness. To all this, it is necessary to highlight the fact that there are hardly any works of Context-Aware systems focused on the aspect of rehabilitation of tasks and physical pathologies as the case of this work. Figure 4 shows the Context-Aware architecture based on EoT environments for the integration of exoskeletons and rehabilitation of patients through VR environments that are divided into three layers.

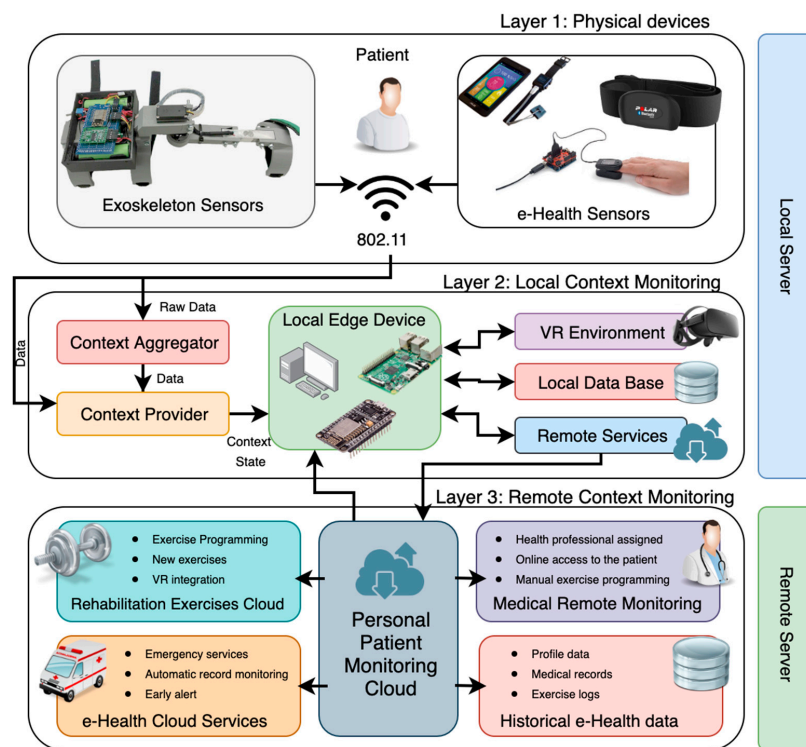


Figure 4. General diagram of the Context-Aware architecture for the EXOMedical system.

Layer 1: Physical devices: This is the physical layer that binds both the exoskeleton sensors (load cell, engine position, battery level) and the possible medical sensors that can be added to the system and that can be used to monitor added medical parameters. As in the case of the pulse sensor or the

EKG sensor that can emit valuable information about the patient's physical condition while performing a rehabilitation exercise. All these devices, including the exoskeleton, have an 802.11 WiFi connection through which the data can reach the platform wirelessly.

Layer 2: Local Context Monitoring: In this layer, which is deployed on the computer system at the local edge, there are the Context Provider and Context Aggregator modules that are responsible for managing the data generated by layer 1 (sensor system). There are also virtual reality blocks, the local database and the set of functionalities and remote services.

- *Context Aggregator:* This module is responsible for combining all simple contexts into a single Context State through the use of a context model [37]. This element is key when relating all the context data that alone cannot provide any data or be misinterpreted. Therefore, past and present contextual information must be added when making a correct classification of the situation. After performing this contextual aggregation, the information generated is sent to the Context Manager System module for each specific user.
- *Context Provider:* It is a service that is the main source for generating contexts. The Context Aggregator module transfers the low-level raw data generated by the different sensors to the Context Providers modules. These modules, in turn, are responsible for applying well-known techniques on this data to generate an elementary context from low-level data. For example, by applying pattern recognition techniques, it is possible to determine if a patient is correctly performing an exercise or is exhausted and therefore the exercise is being useless for rehabilitation.
- *VR Environment:* This module will be responsible for managing communication with the virtual reality simulation environment. It will act as coordination to send the exoskeleton data to the simulator and thus be able to make a real integration with the 3D environment. He will also be in charge of receiving back the values of the different tests that measure the performance and therefore the progress of the patient throughout the treatment. It will also be the key when generating the new scenarios and configure parameters generated by the system as the user advances or correct certain parameters that are determined to be unhelpful in case of detecting a lack of progress or regression.
- *Local DataBase:* It is a module responsible for managing the local database of the system that will store both the values of both the sensors deployed in layer 1 and the Context State generated by the Context Aggregator as well as all the results and evaluations produced during the VR exercises and simulations. This database has a double functionality. On the one hand, to perform a local persistence of the data to avoid loss or alteration of the data. On the other hand, a supporting function at the end of the computing tasks to identify patterns or anomalous situations in data.
- *Remote Services:* It is a module in charge of managing the remote services offered by Cloud architecture. Communications, data steps, and events are managed by this module, which will be in charge, for example, of managing and issuing the necessary alerts in the event that the system detects an abnormal situation in medical sensors. It will also be responsible for access services and medical records or request new exercises for a patient.

Layer 3: Remote Context Monitoring: This last layer is located in an external and environmental Cloud to the other two layers. Its mission will be to manage and integrate the remote services for monitoring the context generated in the previous layers. This layer is managed by the central Personal Patient Monitoring Cloud module that is responsible for managing the rest of the modules and services of the system. It is a personal cloud that will be instantiated by each of the users so that all users have a private and secure cloud space. Among the modules deployed are Rehabilitation Exercises Cloud, e-Health Cloud Services, Medical Remote Monitoring, and Historical e-Health data:

- *Medical Remote Monitoring:* It is a module that will be responsible for providing the assigned medical professional with a set of functions for the proper management of the patient. Among these functions are online access to patient data, statistics, and advances. Reassignment or

referral to other medical professionals to perform other treatments or alternative diagnoses. The assignment of new exercises for the patient or the modification of the configurations of certain exercises (modification of the number of repetitions, modification of the maximum weight or minimum weight, etc.).

- *Historical e-Health data*: This module will manage all the data generated in the previous layers and that can be accessed by authorized medical professionals, as well as by the rest of the modules. This is a copy of the local database, which will also have the patient's personal information and all his previous history.
- *e-Health Cloud Services*: This is the module in charge of the automatic management of the data generated and emitted by the system. This module will have the necessary internal tools and processes for the early detection of anomalies in medical data. As well as the constant monitoring of rehabilitation exercises performed by the user. It also has an automatic emergency called system if necessary.
- *Rehabilitation Exercises Cloud*: The system will have a large set of exercises and centralized configurations for performing rehabilitation exercises by patients. It will be possible to register new exercises, manage integration with the VR environment, and schedule exercise sessions that will be sent to the Local Context Monitoring environments of the different patients.

3.3. Virtual Reality System

The virtual reality system that integrates the EXOMedical exoskeleton is based on the Unity 3D environment engine [38]. Integrating VR technology into rehabilitation treatment is based on three key aspects: Repeat exercises, feedback, and patient motivation. The improvement and evolution of motor function will depend on the correct repetition of the exercises proposed. The VR technology-based training system can provide additional stimulation to promote motor learning and maintain those abilities over time. The interactive experience facilitated by VR environments makes patients naturally focused on training and evolved in a faster and more efficient way. There are five basic principles when designing VR environments for physical rehabilitation exercises:

- The content of the exercises or games must be attractive and reasonably logical to capture the patient's motivation.
- Positive feedback should be generated, encouraging rewards that help patients feel they are improving.
- Rehabilitation tasks and exercises should be integrated into exercises and games in an appropriate way and advised by an expert.
- Difficulty levels and settings must be designed to be applied to different patients and different stages of rehabilitation.
- Information on performance and evolution of patient training should be generated in real-time so that the system is able to assess its evolution and adapt to the context to generate new exercises or modify levels and settings.

The EXOMedical device is integrated with the Oculus VR device [39] through different virtual scenarios in which the patient must perform rehabilitation exercises. The block diagram in Figure 5 represents the main components of the configuration for the VR environment and the Context-Aware architecture.

The patient who is performing an exercise in the system, receives prior instructions on each of the exercises, visualizing through examples, the movements to be performed and the objective of the exercise or game. It also receives a set of visual and acoustic feedback that provides information about everything that happens in the VR environment. The user visualizes an avatar that represents their movements in the virtual environment and is able to recognize if they are performing the task correctly. In addition, visual or acoustic feedback can help patients understand the exact moments of the beginning and end of each exercise. This data is one of the most important because it provides the level of performance of a task, as well as the level of awareness of the patient about their evolution for

the required exercise. The system can automatically modify some of the task parameters according to the real-time analysis provided by the Unity control unit. It will be possible to modulate each difficulty level of the exercise or the maximum time to complete the exercise. The environment will provide a reward in the form of scoring or unlocking new levels as the user's skill progresses. All these data can also be modified by the medical expert in charge of the patient remotely, as well as visualize the results in real-time. The expert can monitor that the parameters generated automatically do not pose a danger to the patient. For example, to prevent the system from generating a very high simulated weight or a maximum unreachable time. Figure 6 shows some examples of exercises included in the system and which are simulated in the Unity VR environment through the Oculus device. Specifically, one of the first exercises designed for the user to learn to use the virtual environment by moving the weight from one point to another is shown.

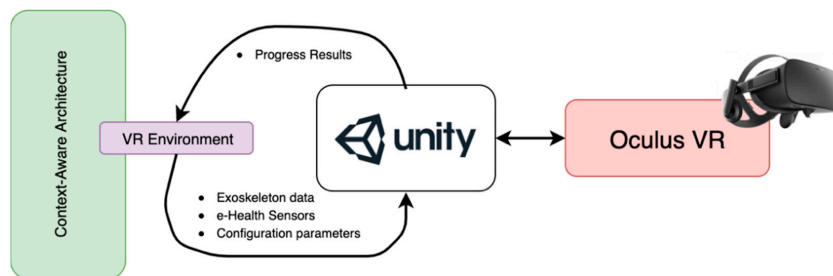


Figure 5. Main components of the virtual reality environment based on the Unity 3D engine and the Oculus system.



Figure 6. The capture of one of the exercises performed through the Unity 3D environment to be reproduced in the Virtual Reality environment. The user must move the disk and deposit it on the table as part of an initiation exercise in the system.

4. Experimental Results

With the aim of validating the system in a real environment, an experiment with 5 patients has been carried out over a period of one month. The study has been carried out due to the collaboration of a specialized physiotherapy rehabilitation clinic. All patients have voluntarily agreed to perform this experiment and have been duly informed. All procedures performed in studies involving human participants were in accordance with the ethical standards of the 1964 Helsinki declaration. The work has been approved by the ethical committee of the Expert Systems and Applications Laboratory

Research Group (approval code SA-2201/1). Four of the volunteers (three men between the ages of 23 and 47 and two women between 29 and 37) had previously been diagnosed with lateral epicondylitis of the elbow (or tennis elbow), while one of them was healthy (control patient). The study has been carried out over a month, where volunteers have held four sessions, the first session on day 1 of the study, the second at 7 days, the third at 14 days and the fourth at 30 days.

The activities carried out in each session were simple exercises in the Virtual Reality environment, with different configuration parameters. Specifically, the patients carried out a Virtual Reality version of the classic Buzz Wire Game as shown in Figure 7. It is a game where the user must move a ring through a cable from the starting point to the endpoint. This ring should not touch the cable at any time while moving from one point to another.

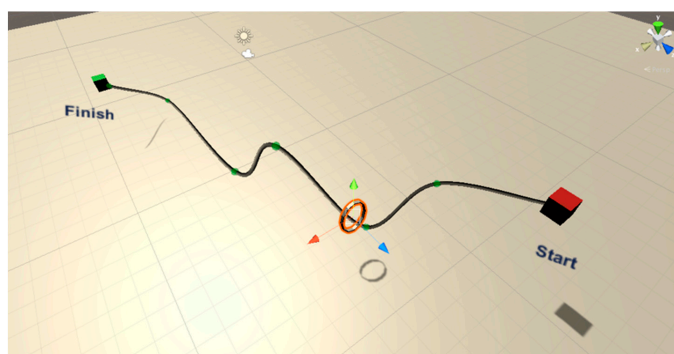
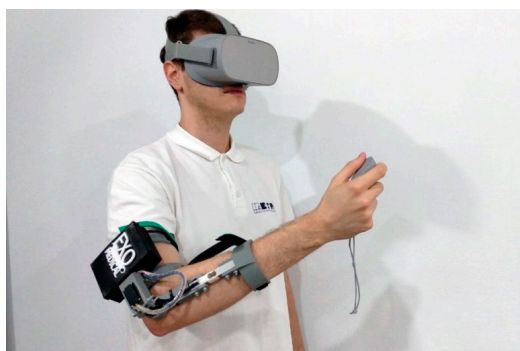


Figure 7. Virtual Reality version of the Buzz Wire Game performed in the case of study. In the center, it is possible to observe the ring (in orange) that the user must transport from the starting point (in red) to the endpoint (in green).

During each of the case study sessions, participants performed 20 activities of this game, progressively increasing the difficulty. Specifically, with each new exercise, the number of cable curves is increased, the internal diameter of the ring decreases and the estimated time to complete the exercise is reduced. As control variables, the positions, angle and time to perform each of the exercises have been analyzed. Of the 20 activities, 10 have been designed to be performed with simulated weight and the other 10 exercises with real weight. Figure 8 shows a user who performed a test on the system with the EXOMedical exoskeleton and the Oculus VR equipment.



(a)

Figure 8. *Cont.*



(b)

Figure 8. Patient performing a rehabilitation exercise through the VR environment and the exoskeleton for the elbow: (a) The user performing exercises with simulated weight through the control of the VR device; (b) The user performing exercises with real weight and exoskeleton assistance.

The results achieved by the patients involved in the case study can be observed in Table 1, though the number of collisions detected between the ring and the cable. As can be seen, in the initial sessions, the number of average collisions detected is greater in the initial sessions than in the last session. Similarly, the collisions detected by the VR system are greater in cases where the weight used was real, compared to cases in which the weight was simulated (through engine effort). In the case of the results obtained by the control patient, it is observed that despite not having an elbow injury, the difficulty of the exercise has caused that he makes some mistakes while performing the exercises with both real and simulated weight.

Table 1. The number of collisions detected in each session by the different patients, divided between exercises with real and simulated weight.

Patient/weight		Session 1	Session 2	Session 3	Session 4
1	Simulated	47	31	28	9
	Real	58	50	39	18
2	Simulated	68	55	46	19
	Real	137	112	64	27
3	Simulated	90	75	66	18
	Real	147	122	98	34
4	Simulated	60	47	20	11
	Real	67	40	32	21
5 ¹	Simulated	6	7	6	4
	Real	11	9	9	6

¹ Control patient.

By individually analyzing one of the patients during the four sessions, it is possible to observe the evolution in their performance with the passing of the sessions. As can be seen in Figure 9, the first two sessions were more difficult for patient number 3 than the last two sessions where the deviation in both time and angle and position was clearly lower. The deviation value represents the distance from the same exercise performed perfectly. This value is measured at three points: Distance, angle, and

time with respect to the perfect path. The value of the difficulty is calculated based on Equation (2) where the deviation of time has a weight less than the deviation of the other two parameters.

$$Difficulty = [(\sum \text{Position deviation} + \sum \text{Angle deviation}) * 0.6] + (\sum \text{Time deviation} * 0.4) \quad (2)$$

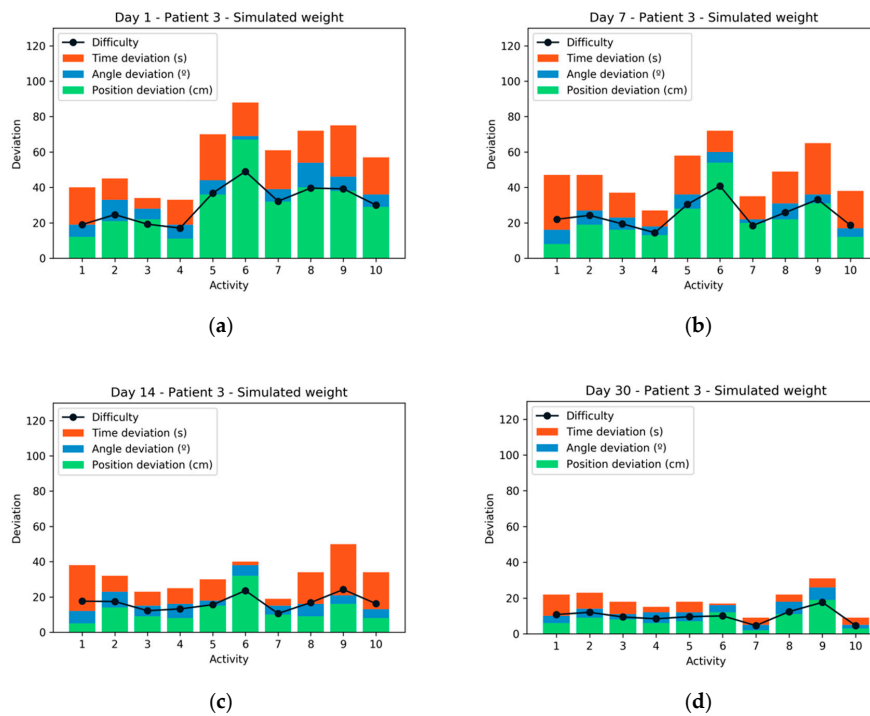


Figure 9. Performance and difficulty experienced by patient 3 during the 4 sessions with simulated weight: (a) Session 1; (b) Session 2; (c) Session 3; (d) Session 4.

If patient 3 is analyzed for the same activities but performed with the real weight, it is possible to observe how the average performance was worse than in the case with simulated weight (as shown in Figure 10). In the final sessions, the patient achieved a high-performance due to the strengthening and practice with the same exercises. After each training session, patients were consulted through a paper test about their experience. They all agreed that simulated weight training was more comfortable and useful for performing their exercises. There was also unanimity when preferring the virtual reality-based system, to the traditional rehabilitation system.

Figure 11 compares the results obtained in difficulty for each patient in each of the sessions. As can be seen, the average difficulty in exercises performed with real weight is greater than exercises performed with simulated weight. It can also be seen how patient 2 has very high results with simulated weight. Very close to the results of the control patient (patient 5). The patient who experienced the greatest difficulty is patient 1, both with real weight and with simulated weight.

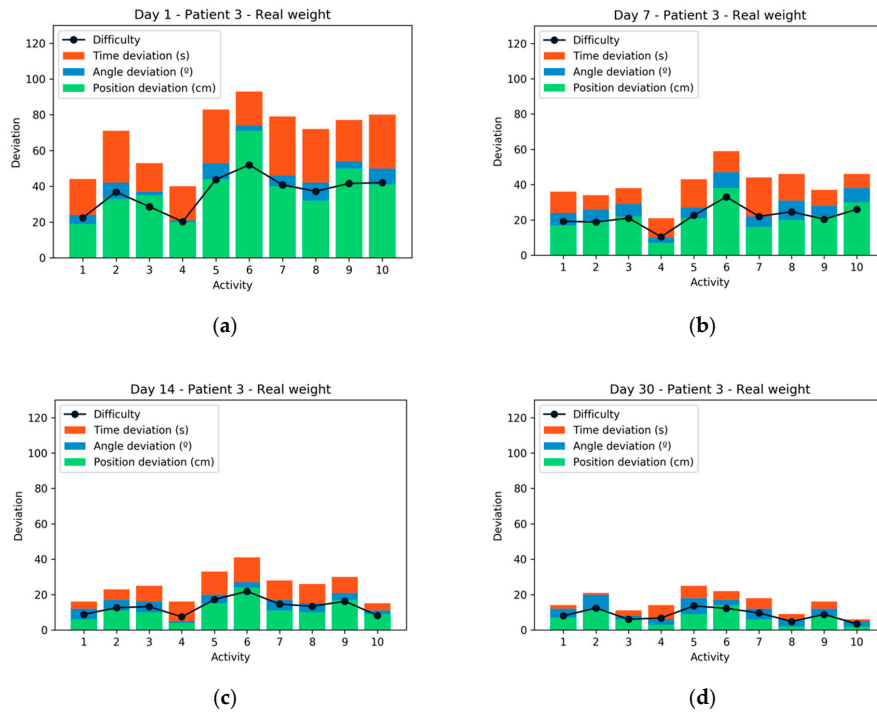


Figure 10. Performance and difficulty experienced by patient 3 during the 4 sessions with real weight: (a) Session 1; (b) Session 2; (c) Session 3; (d) Session 4.

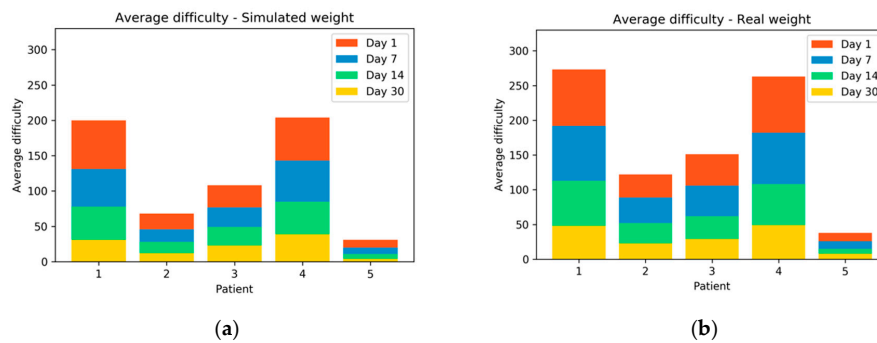


Figure 11. The average difficulty of each patient in the four sessions performed; (a) With simulated weight; (b) With real weight.

5. Conclusions

This article presents the design of a training system for the rehabilitation of the elbow through a low-cost exoskeleton that is integrated with a virtual reality system. On this system, an architecture based on Context-Aware has been designed for intelligent management, the detection, and monitoring of the advances made by a patient in the system. The system has the functions of evaluating the rehabilitation, the advances, and all the data generated, with the aim of inferring knowledge that allows helping in its rehabilitation. Virtual reality technology is integrated into patient rehabilitation

training in the form of interactive activities and games that generate a positive and motivating effect. These games and exercises are designed in such a way that the patient knows the state in which the exercise is, as well as its evolution and performance. Joint rehabilitation is achieved through fun repetitive training tasks where levels of difficulty are gradually increasing. In addition, through the Context-Aware architecture designed, a layer of intelligence is added to the system that allows, among other things, to track the automatic patient that, depending on the context data, allows new levels to be generated for their exercises or to detect possible anomalies or health problems.

Compared to other rehabilitation systems based on exoskeletons and similar VR environments, this system has differential advantages. For example, in data acquisition, compared to other existing systems, the designed exoskeleton allows it to be installed in a simple way. It has a low cost and without cables that prevent a natural movement of the arm. In the aspect of the design of the exercises, the mechanisms and activities of this system are patterned according to the training specifications that are most suitable for proper rehabilitation. In addition, the exercises and games are extensible and easily expandable, due to the powerful engine designed by Unity3D and Oculus. It is also important to highlight how the rehabilitation plan will be generated automatically for the Context-Aware system and the observations of the medical expert in charge of the rehabilitation. This represents an important advance with respect to the systems in which only the expert could modify the parameters of the exercises. Considering the important database generated, and the different cases treated by the system, as new workouts are generated, the system will further refine its diagnoses and configurations. It should also be noted that the contents of the exercises and rehabilitation games can be loaded remotely by the system, being possible to add more elements to daily activities and generating a new sense of motivation about the patient. This allows the system to enrich the content of the activities and adapt them to the advances and performances of the patients. It is also possible to include more rehabilitation techniques in the future since the architecture is designed to open enough to do so. It is a connected device, aligned with the new technologies and paradigms based on IoT that allow managing data remotely, being accessible from anywhere in the world. In addition, the platform will allow not only the rehabilitation of patients but constant monitoring and follow-up of their medical parameters, being a very useful tool to be deployed in domestic environments.

As a line of future work, we will study how to expand the exoskeleton to allow the rehabilitation of more arm joints and even the leg or neck. It will also be interesting to study exoskeletons for the rehabilitation of hands and phalanges of the fingers. In a future version of the system, a more friendly backend interface will be included so that any medical expert can configure the system parameters in a simpler way. Another line of future research will be to conduct a case study with a higher number of patients and with different medical problems to compare the evolution according to the pathology.

Author Contributions: Data curation, A.S.M.; formal analysis, D.H.d.l.l.; investigation, D.H.d.l.l.; resources, D.M.J.-B.; software, D.H.d.l.l. and A.S.M.; writing—original draft, D.H.d.l.l.; writing—review and editing, G.V.G., D.M.J.-B., and J.F.d.P.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work has been supported by the Junta De Castilla y León—Consejería De Economía Y Empleo: System for simulation and training in advanced techniques for the occupational risk prevention through the design of hybrid-reality environments with ref J118.

Acknowledgments: The research of André Filipe Sales Mendes has been co-financed by the European Social Fund and Junta de Castilla y León (Operational Programme 2014–2020 for Castilla y León, EDU/556/2019 BOCYL). The research of Diego M. Jiménez-Bravo has been co-financed by the European Social Fund and Junta de Castilla y León (Operational Programme 2014–2020 for Castilla y León, EDU/574/2018 BOCYL).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Knai, C.; Brusamento, S.; Legido-Quigley, H.; Saliba, V.; Panteli, D.; Turk, E.; Car, J.; Mckee, M.; Busse, R. Systematic review of the methodological quality of clinical guideline development for the management of chronic disease in Europe. *Health Policy* **2012**, *107*, 157–167. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]

2. Huang, F.-H. Explore Home Care Needs and Satisfaction for Elderly People with Chronic Disease and their Family Members. *Procedia Manuf.* **2015**, *3*, 173–179. [[CrossRef](#)]
3. Varshney, U. Mobile health: Four emerging themes of research. *Decis. Support Syst.* **2014**, *66*, 20–35. [[CrossRef](#)]
4. Preuveneers, D.; Berbers, Y.; Joosen, W. The Future of Mobile E-health Application Development: Exploring HTML5 for Context-aware Diabetes Monitoring. *Procedia Comput. Sci.* **2013**, *21*, 351–359. [[CrossRef](#)]
5. Ramos, C.; Augusto, J.C.; Shapiro, D. Ambient intelligence the next step for artificial intelligence. *IEEE Intell. Syst.* **2008**, *23*, 15–18. [[CrossRef](#)]
6. Schilit, B.; Adams, N.; Want, R. Context-aware computing applications. In Proceedings of the 1994 First Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, Santa Cruz, CA, USA, 8–9 December 1994; pp. 85–90.
7. Erdogan, A.; Celebi, B.; Satici, A.C.; Patoglu, V. Assist On-Ankle: A reconfigurable ankle exoskeleton with series-elastic actuation. *Auton. Robots* **2017**, *41*, 743–758. [[CrossRef](#)]
8. Wang, C.; Wang, L.; Qin, J.; Wu, Z.; Duan, L.; Li, Z.; Cao, M.; Li, W.; Lu, Z.; Wang, Y.; et al. Development of an ankle rehabilitation robot for ankle training. In Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Information and Automation, Lijiang, China, 8–10 August 2015; pp. 94–99.
9. Lu, Z.; Li, W.; Li, M.; Wu, Z.; Duan, L.; Li, Z.; Ou, X.; Wang, C.; Wang, L.; Wang, Y.; et al. Development of a three freedoms ankle rehabilitation robot for ankle training. In Proceedings of the IEEE Region 10 Annual International Conference, Macao, China, 1–4 November 2015; Volume 2016.
10. Pan, C.T.; Lin, Z.C.; Sun, P.Y.; Chang, C.C.; Wang, S.Y.; Yen, C.K.; Yang, Y.S. Design of virtual reality systems integrated with the lower-limb exoskeleton for rehabilitation purpose. In Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Applied System Innovation 2018, Chiba, Japan, 13–17 April 2018; pp. 498–501.
11. Singh, R.; Chaudhary, H.; Singh, A.K. Shape synthesis of an assistive knee exoskeleton device to support knee joint and rehabilitate gait. *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.* **2019**, *14*, 462–470. [[CrossRef](#)]
12. Rifai, H.; Mohammed, S.; Djouani, K.; Amirat, Y. Toward Lower Limbs Functional Rehabilitation Through a Knee-Joint Exoskeleton. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.* **2017**, *25*, 712–719. [[CrossRef](#)]
13. Lyu, M.; Chen, W.-H.; Ding, X.; Wang, J.; Pei, Z.; Zhang, B. Development of an EMG-Controlled Knee Exoskeleton to Assist Home Rehabilitation in a Game Context. *Front. Neurobot.* **2019**, *13*, 67. [[CrossRef](#)]
14. Tu, X.; Huang, J.; He, J. Leg hybrid rehabilitation based on hip-knee exoskeleton and ankle motion induced by FES. In Proceedings of the ICARM 2016—2016 International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics, Macau, China, 18–20 August 2016; pp. 237–242.
15. Tu, X.; Li, J.; Li, J.; Su, C.; Zhang, S.; Li, H.; Cao, J.; He, J. Model-Based Hybrid Cooperative Control of Hip-Knee Exoskeleton and FES Induced Ankle Muscles for Gait Rehabilitation. *Int. J. Pattern Recognit. Artif. Intell.* **2017**, *31*, 1759019. [[CrossRef](#)]
16. Gopura, R.A.R.C.; Bandara, D.S.V.; Kiguchi, K.; Mann, G.K.I. Developments in hardware systems of active upper-limb exoskeleton robots: A review. *Robot. Auton. Syst.* **2016**, *75*, 203–220. [[CrossRef](#)]
17. Holmes, D.; Charles, D.K.; Morrow, P.; McClean, S.; McDonough, S.M. Usability and performance of leap motion and oculus rift for upper arm virtual reality stroke rehabilitation. In Proceedings of the 11th International Conference on Disability, Los Angeles, CA, USA, 20–22 September 2016.
18. Zhou, X.; Mont, A.; Adamovich, S. Evaluation of a 1-DOF Hand Exoskeleton for Neuromuscular Rehabilitation. *arXiv* **2019**, arXiv:1907.07311.
19. Park, Y.; Jo, I.; Lee, J.; Bae, J. A Dual-cable Hand Exoskeleton System for Virtual Reality. *Mechatronics* **2018**, *49*, 177–186. [[CrossRef](#)]
20. Cartagena, P.D.; Naranjo, J.E.; Saltos, L.F.; Garcia, C.A.; Garcia, M.V. Multifunctional Exoskeletal Orthosis for Hand Rehabilitation Based on Virtual Reality. In *Advances in Intelligent Systems and Computing*; Springer: Cham, Switzerland, 2019; Volume 884, pp. 209–221.
21. Liu, F.; Han, X.; Lin, M.; Wu, X.; Sun, Q.; Song, A. Remote Upper Limb Exoskeleton Rehabilitation Training System Based on Virtual Reality. In Proceedings of the 2019 16th International Conference on Ubiquitous Robots (UR), Jeju, Korea, 24–27 June 2019; pp. 323–327.
22. Han, J.; Lian, S.; Guo, B.; Li, X.; You, A. Active rehabilitation training system for upper limb based on virtual reality. *Adv. Mech. Eng.* **2017**, *9*, 168781401774338. [[CrossRef](#)]
23. Frisoli, A.; Salsedo, F.; Bergamasco, M.; Rossi, B.; Carboncini, M.C. A force-feedback exoskeleton for upper-limb rehabilitation in virtual reality. *Appl. Bionics Biomech.* **2009**, *6*, 115–126. [[CrossRef](#)]

24. Montagner, A.; Frisoli, A.; Borelli, L.; Procopio, C.; Bergamasco, M.; Carboncini, M.C.; Rossi, B. A pilot clinical study on robotic assisted rehabilitation in VR with an arm exoskeleton device. In Proceedings of the 2007 Virtual Rehabilitation, Venice, Italy, 27–29 September 2007; pp. 57–64.
25. Lambercy, O.; Dovat, L.; Yun, H.; Wee, S.K.; Kuah, C.W.; Chua, K.S.; Burdet, E. Effects of a robot-assisted training of grasp and pronation/supination in chronic stroke: A pilot study. *J. Neuroeng. Rehabil.* **2011**, *8*, 63. [[CrossRef](#)]
26. Klamroth-Marganska, V.; Blanco, J.; Campen, K.; Curt, A.; Dietz, V.; Ettlin, T.; Felder, M.; Fellinghaue, B.; Guidali, M.; Luft, A.; et al. Three-dimensional, task-specific robot therapy of the arm after stroke: A multicentre, parallel-group randomised trial. *Lancet Neurol.* **2014**, *13*, 159–166. [[CrossRef](#)]
27. Khor, K.X.; Chin, P.J.H.; Yeong, C.F.; Su, E.L.M.; Narayanan, A.L.T.; Rahman, H.A.; Khan, Q.I. Portable and Reconfigurable Wrist Robot Improves Hand Function for Post-Stroke Subjects. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* **2017**, *25*, 1864–1873. [[CrossRef](#)]
28. Forkan, A.R.M.; Khalil, I.; Tari, Z.; Foufou, S.; Bouras, A. A context-aware approach for long-term behavioural change detection and abnormality prediction in ambient assisted living. *Pattern Recognit.* **2015**, *48*, 628–641. [[CrossRef](#)]
29. Forkan, A.R.M.; Khalil, I.; Atiqzaman, M. ViSiBiD: A learning model for early discovery and real-time prediction of severe clinical events using vital signs as big data. *Comput. Networks* **2017**, *113*, 244–257. [[CrossRef](#)]
30. Zhang, W.; Thurow, K.; Stoll, R. A context-aware mHealth system for online physiological monitoring in remote healthcare. *Int. J. Comput. Commun. Control* **2016**, *11*, 142–156. [[CrossRef](#)]
31. de la Iglesia, D.H.; de Paz, J.F.; González, G.V.; Barriuso, A.L.; Bajo, J. A context-aware indoor air quality system for sudden infant death syndrome prevention. *Sensors* **2018**, *18*, 757. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
32. Sánchez, C.R. Considering Adaptation in the Development of Context-Aware Systems for Tele-Rehabilitation. Ph.D. Thesis, University of Castilla–La Mancha, Ciudad Real, Spain, 2017.
33. Gamecho, B.; Silva, H.; Guerreiro, J.; Gardeazabal, L.; Abascal, J. A Context-Aware Application to Increase Elderly Users Compliance with Physical Rehabilitation Exercises at Home via Animatronic Biofeedback. *J. Med. Syst.* **2015**, *39*, 11. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
34. López-Jaquero, V.; Rodríguez, A.C.; Teruel, M.A.; Montero, F.; Navarro, E.; Gonzalez, P. A bio-inspired model-based approach for context-aware post-WIMP tele-rehabilitation. *Sensors* **2016**, *16*, 689. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Villarrubia, G.; Hernández, D.; de Paz, J.F.; Bajo, J. Combination of multi-agent systems and embedded hardware for the monitoring and analysis of diuresis. *Int. J. Distrib. Sens. Networks* **2017**, *13*, 155014771772215. [[CrossRef](#)]
36. de la Iglesia, D.H.; González, G.V.; Mendes, A.S.; Jiménez-Bravo, D.M.; Barriuso, A.L. Architecture to Embed Software Agents in Resource Constrained Internet of Things Devices. *Sensors* **2018**, *19*, 100. [[CrossRef](#)]
37. Forkan, A.; Khalil, I.; Tari, Z. CoCaMAAL: A cloud-oriented context-aware middleware in ambient assisted living. *Futur. Gener. Comput. Syst.* **2014**, *35*, 114–127. [[CrossRef](#)]
38. Plataforma de Desarrollo en Tiempo Real de Unity|Visualizaciones de VR y AR en 3D y 2D. 2019. Available online: <https://unity.com/es> (accessed on 30 October 2019).
39. Oculus. 2019. Available online: https://www.oculus.com/?locale=es_ES (accessed on 30 October 2019).



3.3.1. Resumen en español

En este apartado se muestra el resumen del artículo titulado “*Connected Elbow Exoskeleton System for Rehabilitation Training Based on Virtual Reality and Context-Aware*” que traduciéndolo a castellano sería “*Sistema de exoesqueleto de codo conectado para el entrenamiento de rehabilitación basado en la realidad virtual y Context-Aware*”.

Objetivos de la investigación

Actualmente, hay más de 890 millones de personas con enfermedades crónicas en todo el mundo. Se calcula que el 25 % de estos pacientes podría beneficiarse inmediatamente de soluciones para controlar su salud desde casa otro 50 % se beneficiaría de la integración en sus teléfonos móviles u otros dispositivos de los recursos médicos existentes. En Europa, existe un amplio grupo de personas que padecen algún tipo de enfermedad crónica, como la diabetes o las enfermedades cardiovasculares. A estos datos hay que añadir todos aquellos pacientes que padecen algún tipo de problema de movilidad o han sufrido algún accidente o fractura de extremidades. La Inteligencia Ambiental (AmI) es un paradigma que busca construir modelos inteligentes capaces de adaptarse al entorno del usuario, respondiendo de forma adecuada a las necesidades detectadas y con la capacidad de sensorizar tanto activos físicos como humano.

Dentro de los entornos médicos domésticos para la rehabilitación activa de un paciente, nos encontramos a los pacientes de rehabilitación fisioterapéutica que, gracias a los avances tecnológicos actuales, podrían beneficiarse de sistemas de rehabilitación adaptados, eficaces y fáciles de usar desde su propio hogar. Los sistemas de rehabilitación basados en exoesqueletos disponibles hoy en día para las extremidades superiores son sistemas complejos, difíciles de instalar en el brazo y difíciles de usar. Además, tienen un tamaño pesado que impide que el brazo se mueva de forma natural, lo que dificulta las tareas de rehabilitación. Otro problema añadido radica en el precio de estos dispositivos, que hace que sólo las instituciones y centros sanitarios puedan adquirirlos.

Actualmente, el proceso de rehabilitación se lleva a cabo en un hospital o en centros de fisioterapia especializados con la ayuda y supervisión de un profesional en esa área. Debido al elevado número de pacientes, puede conllevar la necesidad de un gran número de profesionales para realizar todas estas actividades y atenderlas correctamente. La plataforma desarrollada permite una medición cuantitativa de la evolución y de las capacidades del paciente sobre la arquitectura context-aware que dispone de datos históricos sobre el progreso individual y en detalle de toda la recuperación. Estos datos servirán al sistema para medir analíticamente la recuperación del paciente, así como la generación de nuevos ejercicios adaptados a esa evolución.

Por tanto, los objetivos de investigación presentados en este artículo son los siguientes:

- Diseño de un dispositivo de rehabilitación basado en un exoesqueleto para el codo de un grado de libertad (un DOF).
- Diseño y desarrollo de un sistema de Realidad Virtual (VR) para trabajar de forma inmersiva con el usuario, controlar el motor del exoesqueleto y medir la fuerza ejercida por el paciente.

- Diseño de una arquitectura context-aware para monitorizar los ejercicios y movimientos realizados por el paciente, detectando el progreso del usuario e identificando posibles problemas con antelación.
- Diseño de un sistema que contará con la asistencia del profesional médico encargado de la rehabilitación, que podrá monitorizar continuamente su evolución, permitiendo un seguimiento personalizado de cada paciente.
- Realización de un caso de estudio del comportamiento de los usuarios utilizando esta herramienta y su progreso a lo largo del proceso de rehabilitación.

Metodología

La metodología utilizada para la elaboración de este artículo científico es la ya explicada en la sección 1.2. No obstante, en esta subsección se explicarán cada uno de los pasos o aspectos relevantes tenidos en cuenta durante el proceso de investigación. Para ilustrar este proceso vamos a utilizar algunos de los pasos de la metodología AR.

- **Revisión del estado del arte:** ha sido necesario realizar una investigación en relación a los trabajos previos realizados por otros investigadores en el área de conocimiento de la investigación realizada en este artículo. El objetivo de esta investigación previa consistía en analizar al detalle los trabajos actuales y poder ampliarlos, mejorarlos o reutilizarlos para que el conocimiento científico plasmado en este artículo fuese de calidad para otros investigadores. Por este motivo, se realiza un estudio de los trabajos realizados basados en el diseño y desarrollo de exoesqueletos, arquitecturas context-aware y Realidad Virtual (VR)).

Teniendo en cuenta estas características, se han estudiado diversos artículos realizados dentro del ámbito de la telerehabilitación. En los estudios analizados se ha determinado que la rehabilitación utilizando exoesqueletos robóticos se realiza en un entorno clínico tradicional asesorada de forma constante por un experto. Además, se encuentran trabajos en los que es necesario el uso de sensores optoelectrónicos como Leap Motion, Microsoft Kinect y Oculus VR. Estos dispositivos son capaces de capturar los movimientos del usuario y traducirlos en entornos digitales que motiven al usuario a participar en sesiones dinámicas de rehabilitación

- **Análisis y diseño de la propuesta:** analizando lo aprendido en el estado del arte, se ha propuesto el diseño de dos subsistemas que interactúan entre sí. El primero de ellos era la construcción de un prototipo haciendo uso de impresión 3D, un motor servo, células de carga, un microcontrolador y baterías. Con objetivo de obtener un prototipo de un exoesqueleto que facilite la realización de determinados movimientos del brazo a la vez que recogiera información de los mismos. El segundo subsistema sería una arquitectura context-aware con tres capas: la *capa física* que recoge la información de los sensores utilizados por el paciente y la transmite, la *capa de monitorización del contexto local* donde se gestionan los datos generados en la primera capa coordinando los distintos elementos y servicios de la arquitectura, y la *capa de monitorización remota del contexto* gestionar e integrar los servicios remotos para monitorizar el contexto generado en capas anteriores, además, es una nube personal instanciada por cada uno de los usuarios para que cada uno de ellos posean el suyo propio, privado y seguro.

- **Definición del caso de estudio:** la propuesta debería de ser validada por un caso de estudio. En este sentido se ha llevado a cabo un experimento con 5 pacientes durante un período de un mes. El estudio se ha llevado a cabo gracias a la colaboración de una clínica especializada en rehabilitación de fisioterapia. En concreto, los pacientes llevaron a cabo una versión de Realidad Virtual (VR) del clásico Buzz Wire Game. Durante cada una de las sesiones de estudio de caso, los participantes realizaron 20 actividades de este juego, aumentando progresivamente la dificultad. Como variables de control, se han analizado las posiciones, el ángulo y el tiempo para realizar cada uno de los ejercicios. De las 20 actividades, 10 han sido diseñadas para realizarse con peso simulado y los otros 10 ejercicios con peso real.

Resultados

Los resultados de la investigación se dividen en dos partes. Primero, un estudio sobre los resultados en la ejecución del ejercicio propuesto. En esta parte, los resultados obtenidos para cada paciente y su evolución a lo largo de 4 sesiones, lo que ha demostrado las colisiones detectadas por el sistema VR son mayores en los casos en los que el peso utilizado fue real, en comparación con los casos en los que se simuló el peso (a través del esfuerzo del motor), demostrando la eficacia y utilidad del exoesqueleto desarrollado.

El segundo aspecto es un seguimiento del rendimiento de los pacientes a medida que avanzaban las sesiones. De los resultados obtenidos y centrados en el tercer paciente, se observa que el rendimiento del paciente al realizar las sesiones con peso real es peor que realizándolas con el peso simulado a través del brazo. Además, se comprueba que la dificultad media en los ejercicios realizados con peso real es mayor que los ejercicios realizados con peso simulado. Los pacientes coincidieron en que el entrenamiento con pesas simulado era más cómodo y útil para realizar sus ejercicios. También hubo unanimidad a la hora de preferir el sistema basado en la realidad virtual al sistema de rehabilitación tradicional.

Conclusiones

En este artículo se ha presentado el diseño de un sistema de entrenamiento para la rehabilitación del codo mediante un exoesqueleto de bajo coste que se integra en un sistema de realidad virtual. Además, se ha diseñado una arquitectura basada en context-aware para la gestión inteligente, la detección y el seguimiento de los avances realizados por el paciente en el sistema. A partir de los resultados obtenidos se puede decir que el sistema presenta ventajas diferenciales respecto a otros sistemas similares, destacando la adquisición de datos, su bajo coste, facilidad de uso, generación del plan de rehabilitación automático según la evolución del paciente y la monitorización y seguimiento constante de los parámetros médicos del usuario. Los resultados obtenidos han demostrado con certeza la presencia de estas ventajas en el sistema.




Como línea de trabajo futura, se plantea ampliar el exoesqueleto para permitir la rehabilitación de más articulaciones del brazo e incluso de la pierna o el cuello. Además, otra línea de investigación futura sería realizar un estudio de casos con un mayor número de pacientes y con diferentes problemas médicos para comparar la evolución según la patología.

3.4. Multi-Agent Approach Using LoRaWAN Devices: An Airport Case Study



Article

Multi-Agent Approach Using LoRaWAN Devices: An Airport Case Study

André Sales Mendes ^{1,*} , Diego M. Jiménez-Bravo ¹ , María Navarro-Cáceres ¹, Valderi Reis Quietinho Leithardt ^{2,3,4} and Gabriel Villarrubia González ¹ 

¹ Expert Systems and Applications Lab, Faculty of Science, University of Salamanca, Plaza de los Caídos s/n, 37008 Salamanca, Spain; dmjimenez@usal.es (D.M.J.-B.); maria90@usal.es (M.N.-C.); gvg@usal.es (G.V.G.)

² Laboratory of Embedded and Distribution Systems, University of Vale do Itajaí, Itajaí 88302-901, Brazil; valderi@ippportalegre.pt

³ COPELABS, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, 1749-024 Lisboa, Portugal

⁴ VALORIZA, Research Center for Endogenous Resources Valorization, Instituto Politécnico de Portalegre, 7300-555 Portalegre, Portugal

* Correspondence: andremendes@usal.es; Tel.: +34-923-294-500 (ext. 6072)

Received: 29 July 2020; Accepted: 27 August 2020; Published: 2 September 2020



Abstract: The current situation with COVID-19 is changing our courses of action toward ensuring health security. This is particularly crucial in airports, which usually receive more than 300,000 travellers in one single day. In this work, we present an Internet of Things (IoT) network to monitor the status of toilets and improve their maintenance. The system is based on IoT networks with different sensors to control soap levels, room capacity, distances, temperature, and humidity. This information is processed by a multi-agent system that detects possible anomalies and makes decisions accordingly. A case study in a real environment is developed in order to demonstrate the usefulness of the system. The results show that the proposed method can be used to successfully manage and control airport toilets.

Keywords: airports; IoT network; multi-agent system; LoRaWAN

1. Introduction

The Internet of Things (IoT) is a new paradigm in which several devices are interconnected to monitor activities and extract information that can be useful for different purposes. Advances in the design of sensors and communications have allowed the development of IoT networks in different fields, such as smart cities [1], the agroindustry [2], economics [3], and healthcare [4,5].

The advantages of IoT networks are essential for industry to optimize their resources and benefits. Companies, like Bosch, Repsol, and Thyssenkrupp, have applied the IoT to retrieve information and improve their services. IoT is especially important for companies when the number of users of those services increases as it provides additional benefits, such as in airports. More users are using airports to travel, either for business or pleasure. According to [6], the international tourist arrivals increased to 1.186 billion in 2015. This number is going to keep growing in the next years. This fact, together with the current COVID-19 situation, has created an ideal scenario to apply intelligent strategies [7] and maximize the comfort and satisfaction of travellers during their use of airports.

One of the services that usually receives the highest number of complaints is the maintenance of the toilets. It is also one of the places where the visitors can catch COVID-19 more easily [8]. Currently, these companies must address how to plan cleaning shifts, control the capacity of toilets, and the lack of soap or paper. Some of these tasks are usually challenging, as predicting how many users will need the toilet in the next few hours is a complex task. We constructed an IoT system based on a sensors

network to improve the user's experience and optimize company resources. This system combines the information provided by different sensors mechanisms to determine the status of toilets and improve the cleaning services.

An IoT network needs two main components: communication and sensors. For two devices to communicate, different technologies have been developed, including Wi-Fi, RFID, and Bluetooth. In [9], the authors compared energy consumption with the use of the LoRa protocol in the communication of the data. The results showed promise in conjunction with other protocols. However, these technologies usually have a limited range and they consume a large amount of resources. Recently, a new communication protocol, called LoRa, was developed. The main advantage of LoRa compared with Wi-Fi or Bluetooth is its low power requirement and long-range capability. Therefore, we selected LoRa as our communication channel to improve the communications among devices in IoT networks.

To connect the devices and construct a new architecture, we combined a multi-agent system with LoRa protocol [10] and devices that detect the user's activity and the soap load. We incorporated load cells, such as Wheatstone bridges, PIRs, and time of flight devices, in order to detect users' movements and the soap levels. An architecture of these characteristics must implement a behavior that can adapt to possible errors or changes that may occur in the environment or the system, such as possible failings or changes in the monitoring areas. Modelling the system as a multi-agent system (MAS) enabled the description of the elements of a specific architecture and the incorporation of mechanisms that provide the system with the needed robustness to cope with the dynamic changes that may occur during operation.

The remainder of the paper is structured, as follows: Section 2 provides a brief background about the communication protocol and the sensors applied in the present work. Section 3 describes the proposed architecture. Section 4 outlines technical details of the developed case study. Finally, Section 5 describes the results, along with the discussion and conclusions.

2. Background

Nowadays, IoT systems are widely used in different applications, including the airport management. One of the main topics addressed is the security. Li et al. [11] propose a novel radar system to detect objects or drones. It makes use of Wi-Fi connection to communicate the sensors and obtain information. Martelli et al. [12] also develop a multi-sensor network to detect drones near the airport space. The system includes the use of infrared sensors, camera, and radars that are connected via Wi-Fi. Galati et al. [13] generate a system that is capable of detecting drones and intruder through a sensor network connected by Wi-Fi.

The current situation with the COVID-19 pandemic has encouraged to many scientists to propose solutions that involve new technologies and sensors to control crowds or maximize cleaning issues. There are some works that develop a mobile platform that traces the position of the user to control contact between people [14–16]. However, most part of the recent literature that involves new technologies and COVID-19 have been centered on improving smart cities [5], or, above all, in healthcare to improve the situation of patients or the efficiency of the health system [17,18].

In general contexts, there are interesting developments to manage the airport resources. Milbredth et al. [19] manage the traffic in airports by detecting the position of passengers and aircrafts and transmitting this information through a Wi-Fi connection. Toth et al. [20] monitor the trajectory of an aircraft through a complex sensor network that gives information of the topography, air, objects, etc. Other proposals try to improve the experience at the airport. This is the case of the work proposed by [21], which develops a guidance system that helps passengers to move in the airport. Nuijten et al. [22] propose a sensor network to detect and predict conditions for possible slippery and get the best decision to avoid it. Ghazal et al. [23] create a mobile application that is based on QR Codes and Wi-Fi connection to track your luggage in the airport.

After a deep study of the state of the art, we detect two limitations. Firstly, most part of the solutions are centered in security and transport problems in airports, rather than in the cleaning services. However, such services are currently essential in order to minimize the number of infections of COVID-19 as much as possible. Additionally, the use of Wi-Fi connection, despite its advantages, increase the consumption levels regarding energy and resources, as this kind of connection has a low range, and usually requires the installation of a high number of devices. Therefore, we propose an IoT system for the management of cleaning services, applying a new protocol, called LoRa, in order to communicate sensors for localization and levels measurement.

Two main challenges are then present: make them communicate; handle their energy consumption while respecting some cost constraints. Low-power wide area networks (LPWANs) tackle these challenges by offering long-distance coverage while guaranteeing the use of a very little amount of energy for communications. Among many LPWAN technologies, long range (LoRa) networks provide a very promising but incomplete basis for satisfying the needs expressed by the applications running on low-power devices [24]. They will ease the connection of billions of low-power devices to the Internet, thus increasing the M2M traffic that is offered for novel IoT applications [25].

LoRa technology has been applied to smart cities [26], indoor localization [27] and PV Panels [28]. The advantages shown in these works against Wi-Fi and similar standards include the low cost of maintenance, the high range, and the facility of installation and communication of IoT heterogeneous devices. LoRa is also preferred to mount sensor networks, as is demonstrated in works like [29,30]. Drawing on the positive results in previous works, this work will present an IoT network whose devices are communicated via a LoRa protocol.

When dealing with IoT networks, not only the communication technology that will be used has to be considered, but also the sensors that will be applied to create the system. Currently, there is a growing interest in reducing costs of power generation, transmission, and consumption of electrical energy through efficient energy management, as well as the possibility of extending the lifespan of power system components and users appliances. These features are of particular interest for our problem, as it supposes an important energy and logistic saving. Therefore, this work makes use of sensors that reduces energy costs and extends the life of the components, such as PIRs, Wheatstone bridges, and time of flights.

We apply PIR and Time of Flight sensors to detect user's presence and movement. PIR are switching devices that respond to the presence and absence of people in its field of view [31]. Its low cost design makes PIR sensor an ideal option for monitory purposes, as demonstrated in [32]. Likewise, time of flight sensors are a highly accurate technology, capable of mapping objects and measuring distances mapping and 3D imaging technology with a single shot [33], which makes it an ideal option to detect objects saving energy and time (Ringbeck, n.d.). There are a few applications that demonstrate their successful results to construct collaborative robots [34], to help people with visual difficulties [35,36], or to detect fluids in channels [37].

A load cell is needed in order to measure the soap load. Wheatstone bridges are low cost sensors that are used for measuring the very low resistance values precisely. Applications include calculations of hydrogen levels or gases levels in a recipient [38,39], in order to measure the wind speed and direction [40] or for tactile touch monitoring [41]. Accordingly, with these sensors, the system obtained the state of the bathrooms. This information can be used to help the airport cleaners and minimize the time that they spend cleaning the bathrooms and maximize the satisfaction of the airport's users. Therefore, a fuzzy control system is proposed to determinate when a bathroom needs cleaning. Fuzzy control systems have been applied in the field of airports [42–44]. However, none of them are applied to the task of bathroom cleaning.

3. Proposed Architecture

The architecture that is proposed in this section provides a solution to a problem that occurs in different environments. The Internet of Things (IoT) aims to maximize the use of devices with

limited resources and low cost, such as microcontrollers that have low processing power and low energy consumption. In an IoT architecture, one of the main characteristics is the hybrid and dynamic topologies that can offer service availability, high security, and data redundancy. The architecture of these characteristics must have the ability to adapt to anomalies, errors, or changes that may occur in the network, such as the appearance of a new area to monitor or a sensor that stops working. One of the characteristics of this architecture is a design that is based on organizational theory, which can both imitate and collaborate with human organizations, such as a team responsible for cleaning bathrooms. Multi-agent architectures do not have organizational aspects that allow the definition of rules for the incorporation of new agents, or the reorganizations and defined communications with the system.

Given the requirements that are described above, we propose using a multi-agent system (MAS) platform for automatic construction of organizations of intelligent agents (PANGEA) as a starting point. PANGEA allows elements to dynamically move in and out of the platform, and it can be part of the architecture at any time satisfying the specific demands of the system. MAS architectures have to offer services on demand, because agents, when they join the network, are responsible for reporting the services they have and can offer to other entities within the architecture market. Figure 1 Multi-agent architecture of system based in PANGEA shows the different virtual organizations and main agents that compose the multi-agent architecture designed for this system.

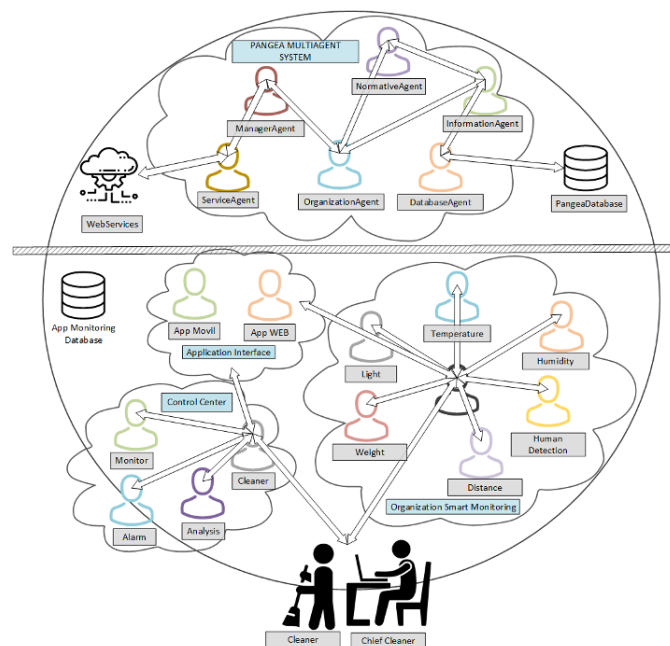


Figure 1. Multi-agent architecture of system based in MAS PANGEA.

PANGEA is an open system that we previously developed; we have extensive experience with the integration of PANGEA with many systems based on wireless sensor networks. The principal decision to use PANGEA was based on its ability to create virtual organizations, which are characterized by their dynamic nature. PANGEA is a free to anyone or any research group who wants to use it. What distinguishes PANGEA from the different multi-agent systems is its rule engine and load distribution, which enable the system to adapt to the computational needs of the system at any given time. The last characteristic that distinguishes PANGEA from other systems, such as THOMAS or the java agent development framework (JADE), is that it allows computing features.

The designed architecture is composed of two different parts. The top of Figure 1 shows the minimum agents for the operation of the PANGEA multi-agent system; the bottom shows the virtual organizations upon which the case study was based.

The organizations are detailed, as follows:

- **Organization Smart Monitoring:** This organization refers to the extraction and collection of information from different sensors. Its main functionality is based on transforming the data of the physical layer, so that it can be used by other organizations. Communications that occur with agents are one-way with the central agent, which is in charge of communications with the other architecture organizations. These agents are deployed in the nodes; the central node represents the microcontroller and the others represent the attached sensors. Table 1 describes the hardware agents of this organization, which represent the hardware sensors.
- **Organization Control Center:** this organization monitors the agents that belong to organization smart monitoring. The most important task of this organization is intelligence in information analysis and prediction based on the information collected from the sensors. The main agent of this organization is the cleaner, which is in charge of coordinating the monitoring, analysis, and alert generation tasks. These alerts are generated in the event of an anomaly in a reading from the sensors, or if it is necessary to perform cleaning, reloading some roll of toilet paper, or refilling soap. These notifications are sent to the nearest cleaner's mobile device or to the person in charge of the task in the area. The analysis agent is responsible for using the information obtained from the organization smart monitoring to determine if the bathrooms need to be maintained. To solve this problem, the agent has an intelligent fuzzy logic system. The fuzzy system uses the information stored in the database to determine an action in the system. In the proposed method, the actions are sent to notify the cleaners if a bathroom in the system needs cleaning. This agent can obtain and report metrics regarding people in a certain space. This agent can notify security agents or gambling controllers if gambling is not being respected in certain rooms or areas.
- **Organization Application Interface:** this organization can adapt the information generated by the other organizations to the application layer. This organization is the interface; the applications that belong to this organization can interact directly with the system. As an example, in this case study, an external device may require functionality in the system or any application that workers carry on their mobile devices. The data are adapted from raw format to a format that can be easily understood by a human. In this case study, several connectors or gateways were provided so that the information could be represented both by the mobile application, web app, or external applications.
- **PANGEA Multi-Agent System:** as mentioned above, this organization is composed of the minimum agents for the PANGEA system to work. The agents of this organization are specialized in managing virtual organizations and each of their agents. Below, the basic functionality of each of the agents of this organization is described.
 - **Database Agent:** the only agent with access privileges to the database. This agent provides persistent information storage within the organization. It is responsible for making backups and ensuring the consistency of information.
 - **Information Agent:** manages the services within the virtual organization. It has access to the directory and allows the other agents to publish the services that each one has available that can be accessed by the others. When a new device or application uses the architecture for the first time, the corresponding agent must consult the services that are offered by the virtual organization.
 - **Normative Agent:** one of the most important components in a virtual organization is the rules used for governance. This agent is responsible for security when establishing connections between devices.
 - **Service Agent:** this agent distributes functionality through web services. It is the gateway that allows communication of external services with the agents of the organization. It is used

as an abstraction layer of the internal architecture and allows easy integration of different programming languages.

- Manager Agent: in charge of checking the state of the system periodically, verifying whether there is any overloaded functionality, and ensuring that there are no errors between the agents of different organizations.
- Organization Agent: responsible for verifying all operations of virtual organizations, checking security and load balancing, and offering encryption among the most important agents.

Table 1. Description of hardware agents.

Variable	Description
LightAgent	Agent that measures the luminosity of the environment.
Temperature Agent	Agent that measures ambient temperature.
HumidityAgent	Agent responsible for measuring air humidity.
HumanDetectionAgent	Agent that detects the presence of a person.
DistanceAgent	Agent that measures distances, used to identify the level of paper or the level of filling of a bin.
DistanceAgent	Agent that measures weight, used to determine the weight of the soap dish and the buckets in the bins.

The APP monitoring database includes different types information, such as the values at which alerts are generated and the geographical locations of each of the sensors. This database is synchronized with the central server to manage cleanings.

The architecture that is described above was used in the case study due to the robustness offered by PANGEA, which allows the dynamic integration of new sensor functionalities without affecting the other parts of the system. One of the main characteristics of the architecture is that it allows for the acquisition and processing of information independent of the technology used by the sensors, being able to easily adapt to each case of the specific application. Finally, this architecture based on PANGEA was designed based on our previous experience of the development of this multi-agent system and understanding of the robustness it offers.

4. Case Study

This section presents the case study of the application of a monitoring system for optimizing resources and improving the cleanliness of the bathrooms in a low-cost building, monitoring capacity, helping to maintain existing regulations and social distancing, and a multi-agent system that allows the fusion of captured information from different sensors. In the first phase, the system of the devices was installed in the public toilets of the Santander and Malaga airports in Spain in order to test the application prior to installation at all of the airports in Spain.

It was necessary to identify the largest number of metrics that can influence the cleanliness of the bathrooms or their state to monitor the state of the bathrooms. Various nodes were developed to obtain these metrics wirelessly. The metrics captured by these nodes include the flow of people in a given interval, the percentage of paper available on a roll of paper, and the percentage of soap available in a soap dispenser. We also obtained environmental metrics, such as luminosity, temperature, and humidity.

A device must be used to warn the user at the time of entry if they can continue or must stop in order to control gauging and determine the current state of the bathroom to let people know whether they can enter or must wait.

In IoT devices, the electrical consumption of a device is important. In some cases, these can be connected to the electrical network, which can be a minor problem, but for autonomous devices such as people-counting devices, soap dispensers, toilet paper dispensers and indicator devices in all bathrooms in an airport, electrical installations cannot be provided for each of the devices due to the high cost of installation. Apart from being economically unfeasible, the regulation imposed by

the airport regulatory entity regarding the installation of devices states that the installation must be reversible, which is, they must be able to be removed without leaving a trace of existence. Given this context, the main requirement is that the monitoring nodes have low power consumption. The low power consumption of the devices is affected both by the consumption of the microcontroller and the communication required to send the data, since their communication must be wireless.

To construct wireless sensor networks, a multitude of technologies are used that have different characteristics, such as operating frequencies, transmission speeds, maximum connection distances, the maximum number of nodes, the power consumed, and the system implementation cost. These characteristics were compared by an expert in bluetooth blog (<https://www.bluetooth.com/blog/wireless-connectivity-options-for-iot-applications-technology-comparison/> Accessed in 10/08/2020), as shown in Table 2.

Table 2. Wireless data transmission technology analysis.

Technology	Nominal Range	Speed	Power TX	Ongoing Cost	Module Cost	Topology
Bluetooth Low Energy	10 m to 1.5 km	125 kbps to 2 Mbps	Low	One-Time	<5 Euros	P2P, Star, Mesh, Broadcast
WiFi	15 m to 100 m	54 mbps to 1.3 Gbps	Medium	One-Time	Under 10 Euros	Star, Mesh
Z-Wave	30 m to 50 m	10 kbps to 100 kbps	Low	One-Time	Under 10 Euros	Mesh
Zigbee	10 m to 100 m	20 kbps to 250 kbps	Low	One-Time	8 Euros to 15 Euros	Mesh
LTE-M	1 km to 10 km	Up to 1 Mbps	Medium	Recurring	8 Euros to 20 Euros	Star
NB-IOT	1 km to 10 km	Up to 200 kbps	Medium	Recurring	8 Euros to 20 Euros	Star
Sigfox	3 km to 50 km	Up to 100 bps	Low	Recurring	Under 5 Euros	Star
LoRaWAN	2 km to 20 km	10 kbps to 50 kbps	Low	One-Time	8 Euros to 15 Euros	Star

Given the data produced by the sensors in the system, it will be carried out for long periods of more than several minutes, and very small amounts of data, such as four bytes. We were interested in the system being low-cost with a large nominal range that consumes the least amount of energy possible. Of the analyzed technologies, we opted for the LoRaWAN technology. The communication is explained in detail in Section 4.1.

In order to evaluate the proposed system, visualization applications were developed to monitor the global state of the system and the application for workers so they can identify the toilets to be cleaned and determine the status of each toilet paper roll, soap dispenser, and fill status of the waste bins. These applications are described in detail in Section 4.6.

4.1. LoRa and LoRaWAN

The LoRa technology is separated into three parts: the physical layer, which is patented by Semtech, the MAC layer of the protocol, and the network architecture, called LoRaWAN. The physical layer can operate different frequency bands such as 433, 868, or 915 MHz; in Europe, it can only operate on the 868 and 915 MHz frequencies. In the physical layer, spread spectrum modulation and error correction techniques are used to create robust communications against noise and interference in order to increase receiver sensitivity. LoRaWAN architecture was previously used in monitoring tasks, as described in the previous sections.

The LoRaWAN network architecture uses a star topology, where end devices can only communicate with LoRaWAN gateways and not directly with other end nodes. The gateways are connected to the central server. Gateways are only responsible for routing packets from end nodes to the server in raw format. LoRa's server is responsible for sending downlink packets to devices if necessary.

As for the end nodes of a LoRaWAN network, the standard defines three classes. Class A is supported by almost all devices because it is the one that offers higher energy savings, since it only enters listening mode after sending data to the gateway, which is ideal for devices that use a battery as a source of power. In class B, the devices have reception windows that are based on predetermined times with the gateway. Currently, some services offer this implementation. Class C offers less energy savings because the nodes are always in listening mode and only when necessary do they change their mode to transmission mode, normally used in devices that have a power supply.

The next step after selecting LoRaWAN was the selection of the LoRaWAN network server type and all the software involved. For a deployment, there are three types of possibilities that offer the same functionality, but with different prices and responsibilities. The first option is to use an implementation of the LoRaWAN network server provided by a company, such as The Things Industries (TTI), which offers turnkey solutions for infrastructure and data storage and analysis. The second option on the market is a collaborative solution, such as The Things Network (TTN), which provides a self-hosted solution, in which they are in charge of deploying and maintaining the LoRaWAN server, but the gateways are deployed by the community. These are used by all the nodes that use that platform. The last option available is the free and open option, such as LoRa (LoRaserver.io), which provides all of the software for the implementation of the functionality required for LoRaWAN to work, especially the LoRa gateway bridge (forwarder package), LoRaWAN network server, and LoRaWAN application server. The maintenance of the network, the host, and the applications is the responsibility of the user.

Two conditions were considered when choosing the network server. The first condition was imposed by the company requesting the system, which indicated that the system should be closed regarding the deployment of nodes, such as in an airport. With this restriction, collaborative solutions, such as TTN, were discarded. The other condition was that it should be inexpensive. Given these conditions, we chose to implement the LoRaWAN closed network server using the software provided by [LoRaserver.io](https://lora.io/).

In our application, the services are deployed on a single server (private LoRa server) that provides the following services: MQTT broker, LoRa server, and the LoRa APP server. Figure 2 shows the architecture used for the deployment of a private LoRa server network. Deployment can be performed by providing all of the necessary services on a single server or on independent or replicated servers to increase availability and replicate the system. These services can be easily separated in the future without affecting the system. The LoRa packet-forwarder and LoRa gateway were deployed on each of the network gateways.

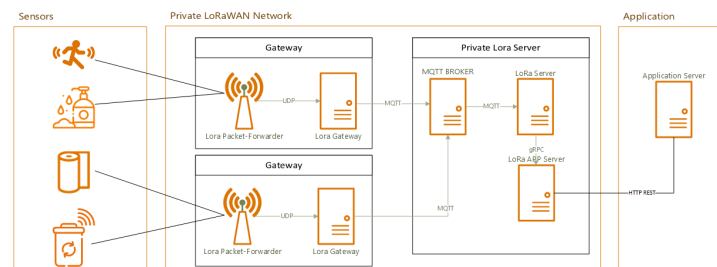


Figure 2. Long range wide area networks (LoRaWAN).

4.2. LoRa Network Protocol and LoRa Frame Format

The LoRa protocol was developed by LoRa Alliance. LoRaWAN's protocol consists of a MAC layer, and an application layer; its operates on the LoRa physical layer. Figure 3 shows the LoRa frame structure for the physical, MAC, and application layers.

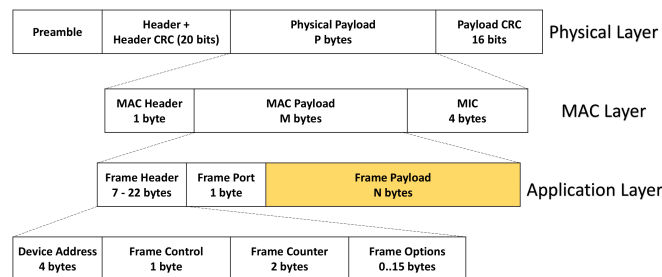


Figure 3. LoRa frame protocol.

The physical layer starts with a preamble. The preamble of synchronization defines the packet modulation scheme. The preamble is followed by the physical header and header CRC. The physical header contains information about the length of the physical layer payload. The physical payload contains a MAC frame. The CRC payload is present in the LoRa physical frame, but it is only present in UPLINKS.

The MAC layer consists of a MAC header, a MAC payload, and message integrity code (MIC). In the MAC header, the protocol version of message is defined. The MAC payload contains all frames of the application layer. The MAC header and protocol are used to compute the MIC value with a network session key. The MIC value validates whether messages sent by the node were previously authenticated in the network.

The application layer contains the frame header, port, and payload. The frame header includes a device address and any frame parameters. The frame port depends on the application. The frame payload value is encrypted with value from the app session key. This frame payload is used for sending data from the end nodes to our application.

4.3. Gateway LoRa

LoRa gateways are a transparent bridge between the end devices and the core network server. These devices contain the necessary software for the rerouting of the packets in their software. Many gateways are currently on the market; their main differences are mainly the number of available channels, price, and whether they are indoor or outdoor. A single channel gateway has only one channel for receiving data from the nodes. A gateway with these characteristics does not have the ability to send downlinks to the nodes. A dual-channel gateway has two channels: one for uplinks and one for downlinks. Lastly, multi-channel gateways have eight channels for uplinks and an extra channel for the broadcast of downlinks. We compare Dragino Single Channel (<https://www.dragino.com/products/lora/item/143-lg01n.html> Accessed in 10/08/2020), Dragino dual channel (<https://www.dragino.com/products/lora-lorawan-gateway/item/135-lg02.html> Accessed in 10/08/2020), Raspberry PI + RAK (<https://store.rakwireless.com/products/rak831-gateway-module> Accessed in 10/08/2020), and lorix (<https://www.lorixone.io/en/products> Accessed in 10/08/2020) in Table 3.

Table 3. Gateway LoRa.

Model	Num Channels	Downlink Support	Interior Exterior	Max Range	Price
Dragino Single Channel	Single Channel	No	Interior	5–10 km	52 EUR
Dragino dual Channel	Dual Channel	Yes	Interior	5–10 km	70 EUR
Raspberry PI + RAK	Multi-Channel	Yes	Interior/Exterior	15 km	200 EUR
Lorix	Multi-Channel	Yes	Exterior	12 km	550 EUR

When choosing the LoRa gateway, two main characteristics were considered: (1) the need for the support of downlinks, so that the messages can be confirmed once the messages are received by the LoRa network server. Downlinks are also necessary to remotely change the configuration of the node, such as the transmission frequency. (2) Low cost was the other consideration. Given the other elements of the system, the dual-channel Draginos gateway was chosen due to these characteristics. Because the network that was deployed is privately owned, the number of nodes is not excessively high.

4.4. Monitoring Nodes

This section presents the different nodes that have been developed to carry out the complete monitoring of the toilets. These nodes are intended to measure the greatest number of metrics that may affect or that can indicate the state of the toilets. For this, the first metric that is considered to be necessary to know for monitoring is to know the flow of people who accessed the bathrooms for a moment of time. Another piece of information requested by the cleaning experts was to know exactly the level of the hand soap dispensers and the paper available in each of the dispensers on the assigned route, in order to optimize the amount to move both soap and of paper before the completion of the route, without the need to make extra trips for more quantities or carry too many.

Next, the microcontroller used as the basis for each of the nodes will be explained, and the technical specifications of each of the monitoring nodes will also be detailed.

4.4.1. Microcontroller and LoRa Transmissor

A microcontroller unit is used to manage each of the end nodes and to capture the values of the different sensors and send them to the LoRaWAN network. The LoRa frame is generated by the MCU and it is sent by the LoRa transmitter. This process is coupled due to the existence of devices that integrate a microcontroller and a LoRa transmitter on the same board on the market. Rocket Scream's Mini Ultra Pro node has been used as a low-power version of the Arduino Zero. It features an ARM Cortex M0 + ATSAMD21G18A 32 bit to 48 MHz processor that provides high processing power capacity and a low price.

This node has an RFM95W module as a LoRa long-range modem that provides high immunity against interference with low power consumption. This module has been tested in urban areas and with a spreading factor of 12, with a 15 dBi antenna, a power of 20 dBm, and reaching distances of 8 km.

In the node, there are characteristics that differentiate it from others, which we considered when selecting this node as a basis for the development of the final nodes of the network. The first characteristic is related to the energy consumption of the device when it is in sleep mode, which is only 20.0 μ A. The nodes are in this mode most of the time; they only leave this mode when a person passes through the device, when they have to measure the factors to be monitored and send the messages. The second characteristic that was considered for the choice of the node was that the board incorporates an RTC device with calendar support. This can be achieved with periodic-sending nodes that can simultaneously receive external interruptions that allow for it to be lifted from deep sleep mode. Another important feature of this node is the incorporation of a voltage sensor that allows the remote monitoring of the battery status. The last characteristic that led to the choice of these nodes was that their development was under the open-source license, which allows future adjustments or the creation of hardware with the integrated sensors.

4.4.2. People Counter

People counting is a spatiotemporal function of human perception at any given time in a particular area. People counting is useful because it helps to understand the flow of people. The constant movement of people, different age groups, and different body types make counting people a challenging task. The people counter also includes an integrated ambient temperature and humidity sensor so they are also able to monitor two of the most important environmental constants at precise locations.

The people detector consists of a passive pyroelectric sensor, which is capable of detecting infrared emission. The human body emits this type of radiation due to being warmer than the surrounding environment.

A pyroelectric sensor has an element that is sensitive to small changes in temperature. A black coating on the element absorbs infrared radiation in the form of heat, minimally heating the pyroelectric element. A compensation element mounted next to the sensor ensures that changes in the external temperature do not affect the measurement. As such, the sensor is only dependent on the temperature variation produced by infrared radiation.

The tiny signal that is produced by the sensor is amplified by very low noise JFET field junction transistors. A light filter in the front of the sensor ensures that it only passes infrared radiation of a certain frequency in order to prevent other types of radiation, such as visible light, from affecting the sensor.

The model of pyroelectric sensor used is HC-501. Its principal characteristics that we came to use is because its current in normal use is less than 50 μA and your possibility that wake up from deep sleep the microcontroller with your incorporated trigger when the sensor is activated by the detection of a human. The sensor's angle of actuation is 110 degrees, which can cover most of the doors at 8 m width if the sensor is placed at one distance of 3.2 m of the floor.

The environmental temperature and humidity sensors are integrated into the same digital sensor, which is an SHT21 integrated circuit. The integrated circuit includes the temperature sensor, the humidity sensor, an AD converter, and an inter-integrated circuit (I2C) digital interface.

The first cause that comes us to use this sensor is your power consumption. In sleep mode, this sensor only consumes 0.4 μA and in measuring mode this sensor consumes 333 μA .

The temperature sensor is based on the small change in conductivity of a silicon PN junction when its temperature changes. The signal produced is amplified and converted into digital data inside the sensor.

The humidity sensor has an external element with variable capacitance, depending on the amount of water vapor in the atmosphere. The variation in the capacitance is detected and amplified for its subsequent conversion to digital data.

The sensor sends the temperature and relative humidity data directly in digital values through an I2C serial interface.

The data sent by this sensor in the application layer payload, described in Section 4.2, of the LoRa network, are shown in Table 4. The fist byte, the battery, is encoded from 0% to 100%; the next two bytes are reserved for the number of people counted since the last sending of data to the server, with a range of a 16 bit signed integer. The last bytes provide data from the temperature sensor and relative sensor humidity.

Table 4. Bytes sent by the people counter sensor frame payload in the application layer through the LoRa channel.

Byte 4	Byte 3	Byte 2	Byte 1	Byte 0
Percentage Battery	High byte Number of people	Low byte Number of people	Environmental temperature	Relative humidity

Our custom electronic diagram of the sensor is shown in Figure 4a, with its placement in the door shown in Figure 4b.

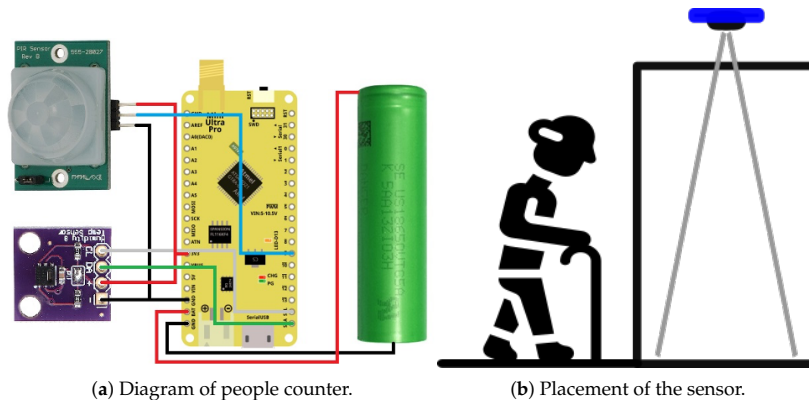


Figure 4. People counter diagrams.

4.4.3. Soap Dispenser

Monitoring the amount of soap in each of the different dispensers in public services is useful when optimizing bathroom cleaning hours and the speed of soap renewal in the event of a low level. It can also be used as an extra element for monitoring the relative number of people who use the service.

The soap dispenser is mounted on an electronic pressure sensor that measures the weight of the entire assembly, determining the amount of soap by relating the weight to the density.

A load cell is a sensor that uses a series of pressure transducer elements together in order to obtain a measurement of a force with very high precision. Strain gauges are the transducers used in load cells. They are able to modify their resistance according to an external physical deformation or pressure. This type of transducer is considerably affected by temperature changes, leading to unstable measurements in a variable temperature environment.

Using four strain gauges in an electronic configuration, called the Wheatstone bridge [45] (Figure 5), high measurement accuracy is achieved while minimizing the negative effect of temperature on the transducers.

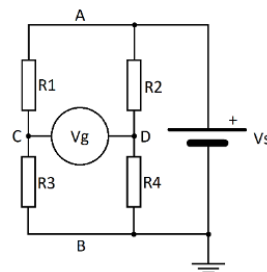


Figure 5. Schema of the Wheatstone bridge.

When applying a force on the load cell, two diagonally opposite transducers are excited by compression (positive pressure), while the other two located on the other diagonal of the Wheatstone bridge are excited by decompression (negative pressure). In this way, the electrical resistance of the

transducers changes oppositely in pairs, resulting in a variation in the output voltage of the Wheatstone bridge (Equation (1)).

$$V_g = V_s \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} + \frac{R_4}{R_2 + R_4} \right) \quad (1)$$

This voltage is too small to be used directly by a microcontroller; therefore, it needs to be amplified. For this purpose, an HX711 integrated circuit is used to amplify the signal from the Wheatstone bridge and digitally convert and encode the measurement. Subsequently, a microcontroller can directly use the data without performing any type of analog–digital conversion.

The HX711 in sleep mode the power consumption is less than 1 μ A and in normal mode is the approx. of 1.6mA. The model of load cell is CZL635, it can translate up to 20 kg of pressure to electric signal than is used by HX711 to calculate the total weight of the device.

Unlike the previous sensor, the data can be encoded in two bytes (Table 5). The first byte represents the percentage of the battery and the second one, the percentage of soap inside the dispenser.

Table 5. Bytes sent by the soap dispenser in the frame payload in the application layer through the LoRa channel.

Byte 1	Byte 0
Percentage Battery	Percentage of soap

Figure 6a shows our custom diagram of the sensor; Figure 6b shows the placement of the load cell sensor to load soap dispenser.

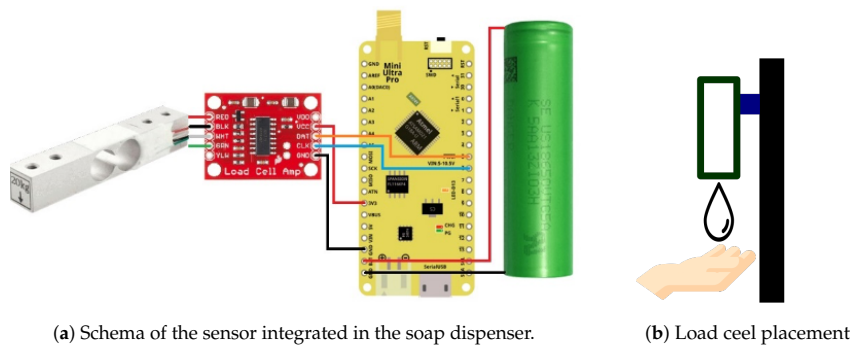


Figure 6. Soap dispenser diagrams.

4.4.4. Toilet Paper Dispenser

Like the soap dispensers that are explained above, monitoring the amount of toilet paper in each toilet considerably increases the efficiency of cleaning times, which, in turn, improves the optimization and speed when changing paper rolls. The amount of paper in real time is information that can be contrasted with the data provided by other sensors and, therefore, increase the precision of the measurement of the number of people.

We can calculate the amount of paper by measuring the radius of the toilet paper roll. This requires the sensor to be calibrated beforehand, so that the system knows its thickness.

In a roll cross-section, the area of the circular crown formed by the inside and the outside diameters of the roll correspond to the amount of toilet paper. Likewise, in a cross-section of the fully unrolled paper, the total length of the paper and its thickness form another area that, by definition of the problem, must be the same as the area of the circular crown calculated by the internal and external

diameters of the roll. This is illustrated in Figure 7a,b. With the thickness measurement, we can apply Equation (2) and calculate the length from the measured radius.

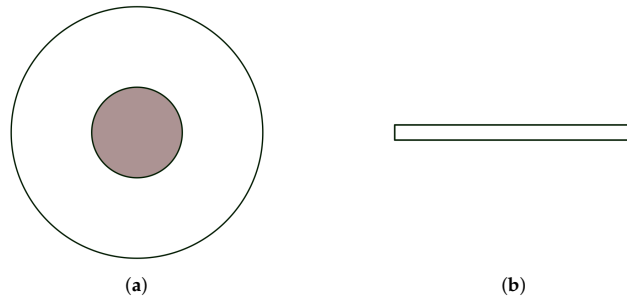


Figure 7. (a) Paper roll side face, (b) Extended paper side face.

$$A_1 = \pi * (R^2 - r^2) \quad A_2 = L * e$$

$$A_1 = A_2 \equiv \pi * (R^2 - r^2) = L * e \tag{2}$$

$$e = \frac{\pi * (R^2 - r^2)}{L} \tag{3}$$

For this purpose, a digital time of flight (ToF) sensor measures the distance by emitting a laser pulse and measuring the time that it takes to return to a detector on the same sensor. Using the speed of light (299,792,458 m/s) and the time measured by the sensor, the distance from the sensor to the roll is obtained, and thereby the radius of the roll.

Using the equation defined below and the value of the paper thickness, obtained while using the previously defined calibration equation, the remaining length of paper and, therefore, the remaining percentage of paper, are obtained with high accuracy.

$$L = \frac{\pi * (R^2 - r^2)}{e} \tag{4}$$

The model of sensor used in this case is VL53L0X. Its have a nominal range at 2 m, but the principal characteristic that comes us to choose this sensor is your resolution that is 1 mm with a 3% error. This resolution permits calculating the exact percentage of paper available in the dispenser.

The data that are obtained from the sensor are encoded in the remaining paper percentage and sent via LoRa using the same frame model as the two-byte sensor above (Table 6).

Table 6. Bytes sent by the toilet paper dispenser sensor frame payload in the application layer through the LoRa channel.

Byte 1	Byte 0
Percentage batter	Percentage of paper

Figure 8a shows our custom diagram of the sensor and Figure 8b shows the placement of the laser sensor inside the paper dispenser.

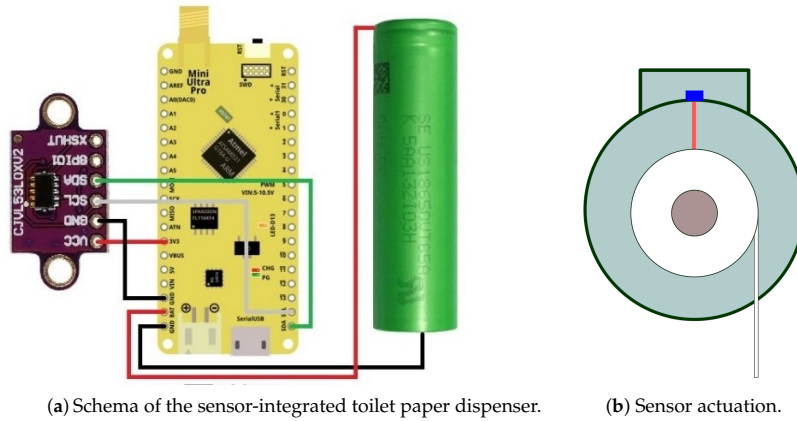


Figure 8. Toilet paper roll dispenser diagrams.

4.4.5. Garbage Bin

The last of the devices developed to monitor of public baths is the monitoring of garbage bins. The state of a litter bin can describe the state of cleanliness of the bathroom, according to experts. This is why we been decided to incorporate this monitoring into the bins to decide whether it is necessary to collect the garbage and clean the bathroom.

Low-cost sensors were incorporated to determine two types of metrics to monitor the garbage bins: (1) the percentage of filling of the paper mill. To calculate this metric, we decided to use a sensor of distance placed in the upper side of the bin, as identifying the distance to the bottom of the bin would determine the percentage of filling. (2) The second metric was used to monitor the weight of the bin, which is important for larger bins, as there is a limit on the number of bins a worker can pick up without exceeding the recommended weight on their transport trolleys.

To detect the weight, the same mechanism, as described in Section 4.4.3, was used, but after several attempts, the best result was the placement of a load cell in each of the four lower corners of the bin.

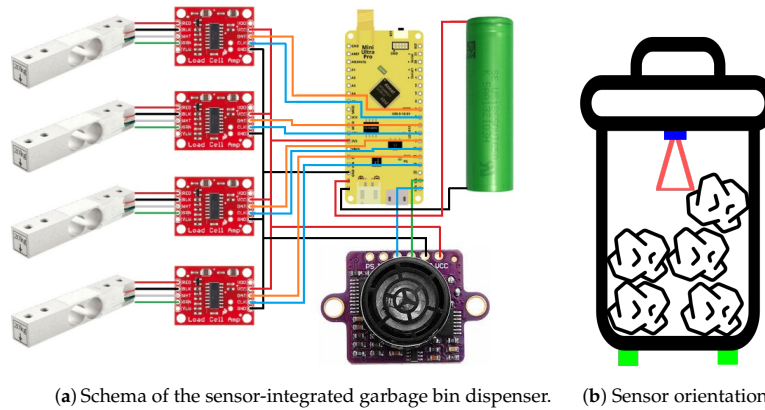
For the volumetric sensor, although it was tested with different sensors, the sensors that offered the best results were the ultrasonic sensors that are completely directional when compared to the laser sensors, such as the sensor used in the toilet paper dispenser. Ultrasonic sensors have a larger degree of openness during detection, reaching 15 degrees. The sensor used in this case is GY-US42, it includes an internal MCU to calculate the distance and send it by I2C serial interface, the power consumption of this sensor is approx. of 9mA in normal use.

Unlike the previous sensors, the data can be encoded in three bytes (Table 7). The first byte represents the percentage of the battery, the second represents the percentage of filling, and the last represents the weight of the garbage.

Table 7. Bytes sent by the trash monitor sensor at the frame payload in the application layer through the LoRa channel.

Byte 2	Byte 1	Byte 0
Percentage Battery	Filling rate	Garbage weight

The sensor is depicted in Figure 9a,b shows the placements of the ultrasound sensor on top of trash and the installed load cells under the trash.



(a) Schema of the sensor-integrated garbage bin dispenser. (b) Sensor orientation.

Figure 9. Garbage bin diagrams.

4.5. Fuzzy Logic System

One of the contributions of this work is the implementation of an intelligent Mamdani fuzzy system in order to determinate whether a bathroom needs to be checked. In the current section, we explain how the system is configured. As a Mamdani fuzzy system uses a series of rules that try to imitate the behavior of a human expert, both the rules and fuzzy variables were defined with the help of airport cleaners with the experience to ensure the effectiveness of the fuzzy system.

The fuzzy system was tested in the MATLAB module Simulink, which allowed us to deploy a system and visualize its behavior. The fuzzy system was designed considering the opinion of experts in the field. The system contains a series of variables with different possible states. These states are usually fuzzy states, the limits of which limits have to be defined to identify when a variable changes state. Hence, according to the experience of the airport cleaners, the membership functions of the variables were defined, as illustrated in Table 8. The variables are related to the data that were obtained from the Organization Smart Monitoring. The system includes one input for every sensor. In the case where the bathroom includes several sensors of the same type, the fuzzy system includes an input for every deployed sensor. This was the case considered in this study, where the system was tested on a bathroom with one people count sensor, three paper count sensors, three gel soap count sensors, three hydroalcoholic gel count sensors, and two trash count sensors. The membership function for every input was defined according to the advice of the airport cleaners. The toilet paper, soap, and hydroalcoholic gel membership functions are identical, with five different states; the trash function has another five states. The people count sensor has five different membership functions.

In order to better understand the information gathered in Table 8, we decided to include Figure 10, where the membership functions of the different variables defined in the table are displayed visually.

Table 8. Definitions of input membership functions.

Input	Input Universe	Input Intervals	Membership Functions' Type	
People	[0, 100]	Very low	[0, 0, 5]	Triangular
		Few	[5, 10, 15]	Triangular
		Normal	[15, 20, 30, 35]	Trapezoidal
		Much	[35, 40, 60, 65]	Trapezoidal
		Too much	[65, 70, 100, 100]	Trapezoidal
Toilet paper	[0, 100]	Very low	[0, 0, 10]	Triangular
		Low	[8, 20, 32]	Triangular
		Normal	[30, 40, 60, 70]	Trapezoidal
		Lot	[68, 80, 92]	Triangular
		Full	[90, 100, 100]	Triangular

Table 8. Cont.

Input	Input Universe	Input Intervals	Membership Functions' Type	
Soap	[0, 100]	Very low	[0, 0, 10]	Triangular
		Low	[8, 20, 32]	Triangular
		Normal	[30, 30, 60, 70]	Trapezoidal
		Lot	[68, 80, 92]	Triangular
		Full	[90, 100, 100]	Triangular
Hydroalcoholic gel	[0, 100]	Very low	[0, 0, 10]	Triangular
		Low	[8, 20, 32]	Triangular
		Normal	[30, 40, 60, 70]	Trapezoidal
		Lot	[68, 80, 92]	Triangular
		Full	[90, 100, 100]	Triangular
Trash	[0, 100]	Very low	[0, 0, 10]	Triangular
		Low	[8, 20, 32]	Triangular
		Normal	[30, 35, 67, 70]	Trapezoidal
		Lot	[68, 80, 92]	Triangular
		Full	[90, 100, 100]	Triangular

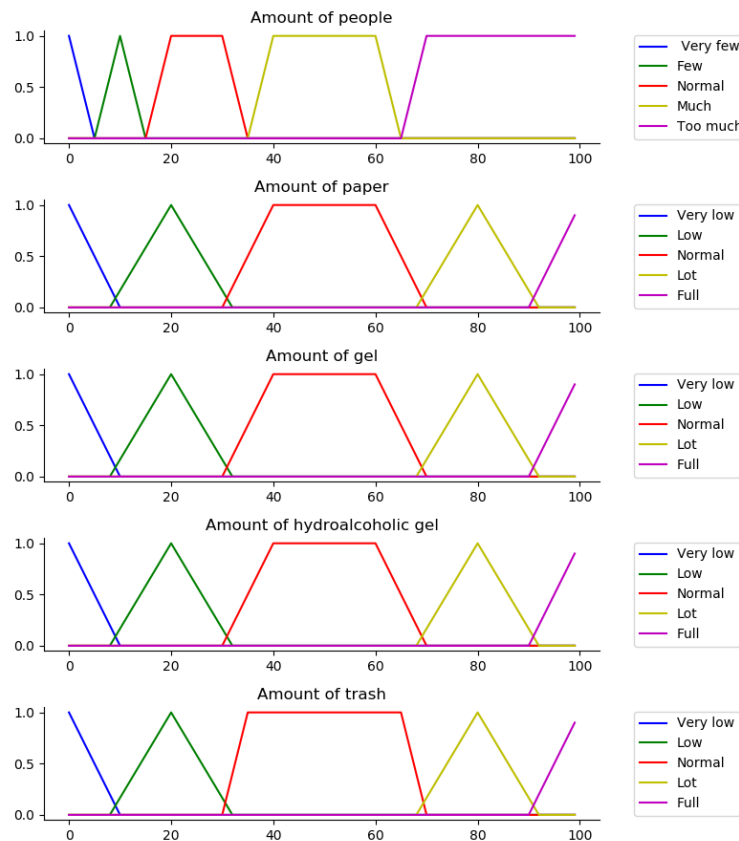


Figure 10. Inputs' membership functions.

The fuzzy system must also have membership functions for the output variable, as shown in Table 9. As the fuzzy system only has two possible actions (to clean or not to clean), the output only provides two possible states: "Clean" and "Do not clean". The first state has a value that is close to

one and the second has a value close to zero. Figure 11 visually displays the same information shown in the table.

Table 9. Definitions of output membership functions.

Output	Input Universe	Input Intervals	Membership Function Type
Output	[0, 1]	No clean	[0, 0, 0.1]
		Clean	[0.9, 1, 1]

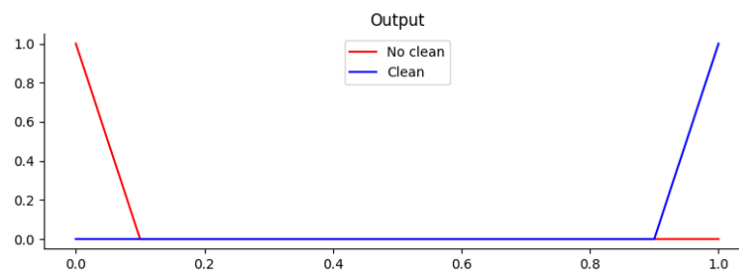


Figure 11. Output's membership functions.

Once the variables' intervals were defined, we defined the rules that were considered to respond to the system. In this step, the airport cleaners were consulted to define the most appropriate rules. Accordingly, the rules for the current fuzzy system were defined, as follows (the number after each rule indicates the weight of each rule; the weight can be assigned a value from 0 to 1; the higher the value, the more relevant it is):

- IF ("people" IS "much") OR ("people" IS "too much") OR ("paper1" IS "very low") OR ("paper2" IS "very low") OR ("paper3" IS "very low") OR ("gel1" IS "very low") AND ("gel2" IS "very low") AND ("gel3" IS "very low")) OR (("hydroalcoholic gel1" IS "very low") AND ("hydroalcoholic gel2" IS "very low") AND ("hydroalcoholic gel3" IS "very low")) OR (("trash1" IS "full") AND ("trash2" IS "full")) THEN ("output" IS "clean") (1)
- IF ("people" IS "normal") AND (("paper1" IS "low") OR ("paper2" IS "low") OR ("paper3" IS "low")) AND ("gel1" IS "low") AND ("gel2" IS "low") AND ("gel3" IS "low") AND (("hydroalcoholic gel1" IS "low") OR ("hydroalcoholic gel2" IS "low") OR ("hydroalcoholic gel3" IS "low")) AND (("trash1" IS "lot") OR ("trash2" IS "lot")) THEN ("output" IS "clean") (0.5)
- IF ("people" IS "normal") AND ("trash1" IS "lot") AND ("trash2" IS "lot") THEN ("output" IS "clean") (0.5)
- IF ("people" IS "normal") AND ("hydroalcoholic gel1" IS "low") AND ("hydroalcoholic gel2" IS "low") AND ("hydroalcoholic gel3" IS "low") THEN ("output" IS "clean") (0.5)
- IF ("people" IS "normal") AND (("paper1" IS "low") OR ("paper2" IS "low") OR ("paper3" IS "low")) THEN ("output" IS "clean") (0.5)
- IF ("people" IS "few") OR ("people" IS "very few") THEN ("output" IS "no clean") (0.5)
- ELSE THEN ("output" IS "no clean") (0.5)

Hence, the fuzzy system guarantees cleaning action when any of the sensors reach some of their negative limits (rule number one), according to these rules. The fuzzy system controls when several sensors are close to their negative limits and places them earlier in the cleaning order (rules number two and three). The rest of the possible combinations propose a "do not clean" action. The MATLAB module does not allow for the combination of "AND" and "OR" operators, so, in the case study, the fuzzy system has to include more rules to integrate all the possible combinations of rules number one, two, five, and six.

4.6. Developed Prototype

This section describes the prototypes and modifications to existing devices that were implemented for the validation and deployment of the system at airports. We also describe some of the features of the software that was developed and some of the additional features that were implemented in the architecture that uses PANGEA and the LoRaWAN as a means of intercommunication.

All of the sensor devices of the system were designed to perform without the need for power; each device is powered by type CR18650 rechargeable batteries. The only device that has some requirements for its installation is the Dragino dual-channel gateway. These devices require a power supply and Internet connection.

Figure 12 shows the final architecture of the system, which is divided into five main sections. The section that captures information is the hardware-embedded agents, the transmission or information propagation layer is the private LoRaWAN Network, the self-organization layer is PANGEA, and the other sections are additional services, information persistence, and user applications.

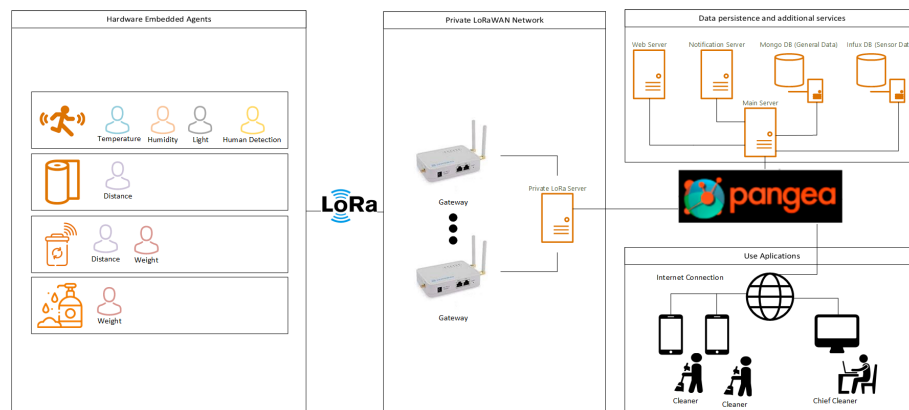


Figure 12. Final architecture.

Next, some characteristics of the monitoring devices are detailed, some of which are depicted in Figure 13.

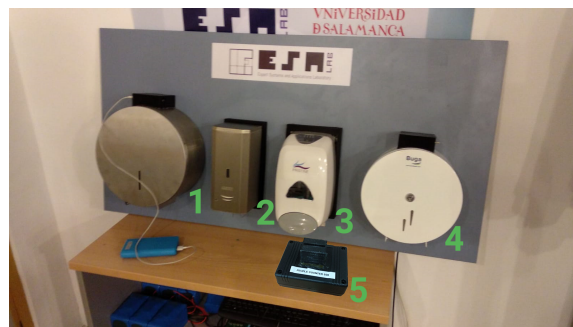


Figure 13. Finished devices: 1 and 4 indicate two toilet paper dispensers, 2 and 3 denote the hydrogel dispensers, and 5 indicates the people counter.

The installation was designed to be as simple as possible, so we attempted to minimize the aesthetic modifications to the devices. With in this mind, the modification to the paper dispensers consisted of creating a hole in the upper side of the dispenser, as shown in Figure 14a, so the sensor

could easily measure the distance left to the paper. A 3D-printed piece was manufactured to cover and protect the electronics and improve the aesthetics.

For the soap dispenser, the modification consisted of attaching the device to the load cell, and the load cell was attached to the wall, as shown in Figure 6b. For this small adaptation, a small 3D part was fabricated, which, with a small modification, allows the use of any type of dispenser. The position of the load cell is displayed in Figure 14b. For the people counters, there was no device to modify, as this was a new device. Accordingly, a waterproof box was used to store all of the components, as shown in Figure 14c. A small gap was made in the box, so that the PIR sensor would only detect in that orientation. Figure 14d shows the installation of this sensor in the laboratory.

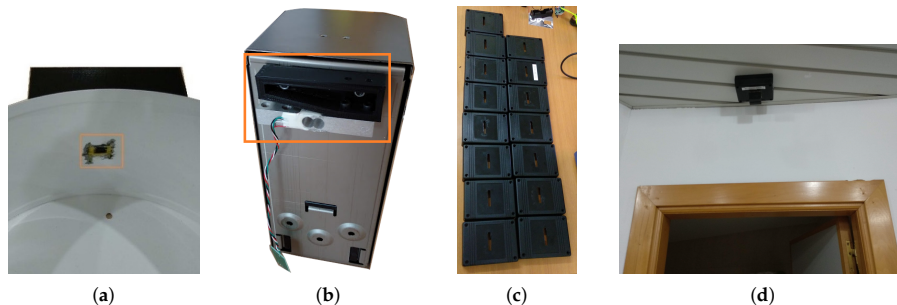


Figure 14. Device details: (a) paper dispenser, (b) load cell in soap dispenser, (c) people counter, and (d) people counter installation in laboratory.

Each one of the devices are represented as agents within the system; their functionality is basic, since their task only consists of sending the data from each one of the sensors periodically through the physical LoRa layer until they reach the gateways.

Regarding software in the architecture in Figure 12, the use of the LoRaServer as a private LoRa network is detailed. A small REST was integrated in the LoRa Server to allow PANGEA agents to extract data from the LoRa server. For data persistence, we used two different types of database. The open source database InfluxDB was used; it is a high availability database for writing and querying. Using this database is convenient for data that will not be modified over time, such as sensor data, generated alerts, etc. The second database was MongoDB, since it allows for changes to be simply made in the models and it is scalable. This database allows changes in the user data, configuration of bathrooms, etc. Finally, the web server and the notification server were used for the applications of the users in charge of cleaning. In the applications, the users can monitor the actual state of each one of the sensors, as shown in Figure 15a. The historical configuration of the fuzzy logic rules and the mobile applications are shown in Figure 15b, including notifications sent to the person in charge of cleaning that location about the need to replace any item in the bathroom.

The system has the capacity to continue working and, in some, cases detect the anomaly in the case of failures in the system due to the loss of a sensor package or a sensor sending erroneous measurements. As all the developed devices are only for monitoring and send data periodically, during sending, collisions can occur when using LoRaWAN. Because most of the devices send the status read by each one of the sensors using a value between 0 and 100, as it is the case of the soap dispenser, toilet paper dispenser, or the trash can, the loss of a transmitted message is not a problem because with the next message, the status is updated successfully. However, in the case of the people counter, only increases in people entering and leaving since the last time the measurement was sent are sent. In this case, the LoRaWAN confirmation of reception is used, which consists of a configuration in which the node sends the messages repeatedly until the gateway answers it with a confirmation. This increases energy consumption, but ensures the arrival of the messages. For the detection of failures of the

sensors, the system knows the periodic sending time at which each of the devices are configured. If data are not received X times during the configured time, whether it has no coverage or it has run out of battery, the system creates an alert to send a person responsible to check the device.

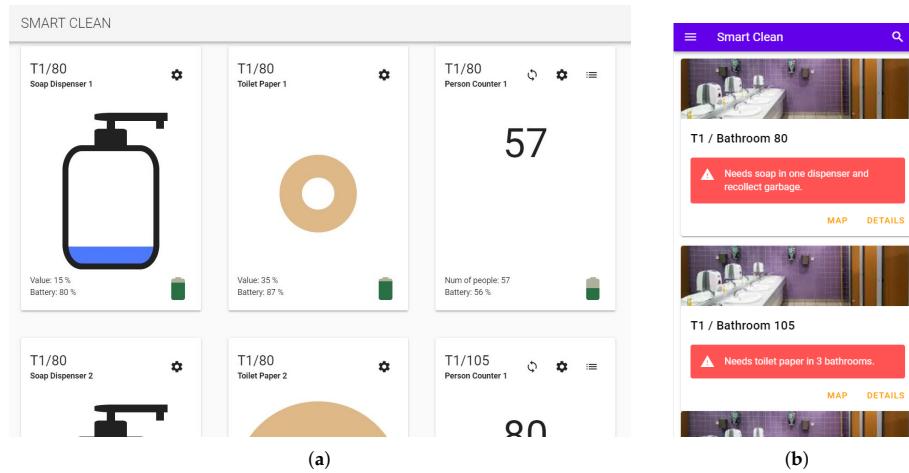


Figure 15. Application details. (a) real time monitor, (b) mobile application.

The developed fuzzy control system provides an intelligent system that is able to determine when a bathroom needs cleaning. The fuzzy system calculates the most accurate output based on the value of the inputs and the rules determined. Figure 16 shows how the Mamdani control determines the output of the system.



Figure 16. Mamdani control operation.

The use of this system helps cleaners to minimize the number of times that they clean the bathrooms in the airport. With the help of the fuzzy system, the global system notifies the cleaners when they need to clean the bathroom. With this system, we also increase the satisfaction of bathroom users.

5. Conclusions

Analyzing the results of this research, we found that it is possible to design an IoT system that is capable of improving the cleaning services in an airport. A multi-agent architecture based on the PANGEA platform was designed to maximize efficiency. This architecture obtains data from sensors to process and extracting information that can be analyzed and studied by the users. The proposed system provides a solution that is based on sensor networks, using fuzzy logic to improve the cleaning organization, which is a problem of vital importance given the current worldwide situation caused by the COVID-19 pandemic. Specifically, the system displays the level of use of different airport bathroom supplies to intelligently infer when airport cleaners must clean and/or check the public bathroom. With this case study, the effort that is required by employees to check the toilets is minimized and the cleanliness of the airport services are improved. All of these improvements minimize the chance of contracting a COVID-19 infection in the bathroom facilities, which are places that trigger feelings of worry and anxiety about human health, according to the literature researched and described previously.

As the origin of the problem, the monitoring devices had to be as simple and low consumption as possible, since, at the product start-up level, electrical installation for each of the devices was not economically viable. The use of LoRaWAN technology for communication enabled the creation of the devices with the lowest cost and low energy consumption, thereby offering a wider range of operation. The use of the Rocket Scream's Mini Ultra Pro board and its configuration allow for the microcontroller to sleep and the disabling of all the sensors during the entire period they are asleep.

The fuzzy logic system that was developed in this study was designed to help those responsible for cleaning by informing them of the state of each of the bathrooms before starting work and knowing the number of provisions needs for each of the utilities. This system was successful not only in reducing the number of times the cleaners have to check the condition of the toilets, but also in increasing the satisfaction of the users because everything is in a clean and usable condition and replacement is performed when indicated by the system.

Future lines of this research work will include the fusion of information on the departure and arrival of flights at airports and the number of passengers on each flight. This will allow reinforcing the need to clean of the toilets not only from when there is more influx, but also when flights arrive from countries where there the pandemic situation is more critical than the country where the system is installed. Some intelligent algorithms could be incorporated in order to predict the presence of COVID-19. The focus of this research work was the use of low consumption sensors, although there are currently no sensors that can control the temperature or social distance with these characteristics. We will continue researching this area and the integration of information obtained from sensors outside the system. We also plan to incorporate a method of validating user satisfaction with cleaning services into the proposed system.

Author Contributions: Conceptualization, A.S.M. and G.V.G.; Investigation, A.S.M. and G.V.G.; Methodology, A.S.M. and G.V.G.; Project Administration, A.S.M. and G.V.G.; Resources, A.S.M. and G.V.G.; Supervision, G.V.G. and V.R.Q.L. Validation, G.V.G. and D.M.J.-B.; Writing—original draft, A.S.M. and D.M.J.-B.; Writing—review and editing, V.R.Q.L. and M.N.-C.; Financial M.N.-C. and G.V.G. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This work was supported by the Junta De Castilla y León—Consejería De Economía Y Empleo: System for simulation and training in advanced techniques for the occupational risk prevention through the design of hybrid-reality environments with ref. J118. André Filipe Sales Mendes's research was co-financed by the European Social Fund and Junta de Castilla y León (Operational Programme 2014–2020 for Castilla y León, EDU/556/2019 BOCYL). Diego M. Jiménez-Bravo's research was co-financed by the European Social Fund and Junta de Castilla y León (Operational Programme 2014–2020 for Castilla y León, EDU/574/2018 BOCYL).

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Centenaro, M.; Vangelista, L.; Zanella, A.; Zorzi, M. Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wirel. Commun.* **2016**, *23*, 60–67, doi:10.1109/mwc.2016.7721743. [CrossRef]
2. Talavera, J.M.; Tobón, L.E.; Gómez, J.A.; Culman, M.A.; Aranda, J.M.; Parra, D.T.; Quiroz, L.A.; Hoyos, A.; Garreta, L.E. Review of IoT applications in agro-industrial and environmental fields. *Comput. Electron. Agric.* **2017**, *142*, 283–297, doi:10.1016/j.compag.2017.09.015. [CrossRef]
3. Niyato, D.; Lu, X.; Wang, P.; Kim, D.I.; Han, Z. Economics of Internet of Things: An information market approach. *IEEE Wirel. Commun.* **2016**, *23*, 136–145, doi:10.1109/mwc.2016.7553037. [CrossRef]
4. Bhatt, C.; Dey, N.; Ashour, A.S. Internet of things and big data technologies for next generation healthcare. In *Studies in Big Data*; Springer: Berlin, Germany, 2017.
5. Allam, Z.; Jones, D.S. On the coronavirus (COVID-19) outbreak and the smart city network: Universal data sharing standards coupled with artificial intelligence (AI) to benefit urban health monitoring and management. *Healthcare* **2020**, *8*, 46, doi:10.3390/healthcare8010046. [CrossRef]
6. Glaesser, D.; Kester, J.; Paulose, H.; Alizadeh, A.; Valentin, B. Global travel patterns: An overview. *J. Travel Med.* **2017**, *24*, doi:10.1093/jtm/tax007. [CrossRef]
7. Alwashmi, M.F. The Use of Digital Health in the Detection and Management of COVID-19. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2020**, *17*, 2906, doi:10.3390/ijerph17082906. [CrossRef]
8. World Health Organization. *Water, Sanitation, Hygiene, and Waste Management for the COVID-19 Virus: Interim Guidance*, 23 April 2020; Technical Report; World Health Organization: Geneva, Switzerland, 2020.
9. Leithardt, V.; Santos, D.; Silva, L.; Viel, F.; Zeferino, C.; Silva, J. A Solution for Dynamic Management of User Profiles in IoT Environments. *IEEE Lat. Am. Trans.* **2020**, *18*, 1193–1199, doi:10.1109/TLA.2020.9099759. [CrossRef]
10. Abdellaoui, G.; Bendimerad, F.T. Dynamic reconfiguration of lpwans pervasive system using multi-agent approach. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* **2018**, *9*, 300–305, doi:10.14569/IJACSA.2018.090242. [CrossRef]
11. Li, X.; Mao, W.; Zeng, D.; Wang, F.Y. Agent-based social simulation and modeling in social computing. In Proceedings of the International Conference on Intelligence and Security Informatics, Taipei, Taiwan, 17–20 June 2008; pp. 401–412. doi:10.1007/978-3-540-69304-8_41. [CrossRef]
12. Martelli, T.; Bongioanni, C.; Colone, F.; Lombardo, P.; Testa, L.; Meta, A. Security enhancement in small private airports through active and passive radar sensors. In Proceedings of the 17th International Radar Symposium (IRS), Krakow, Poland, 10–12 May 2016; doi:10.1109/irs.2016.7497360. [CrossRef]
13. Galati, G.; Piracci, E.G.; Ferri, M. High resolution, millimeter-wave radar applications to airport safety. In Proceedings of the 8th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS), Odessa, Ukraine, 5–11 September 2016; doi:10.1109/uwbuis.2016.7724144. [CrossRef]
14. Ekong, I.; Chukwu, E.; Chukwu, M. COVID-19 Mobile Positioning Data Contact Tracing and Patient Privacy Regulations: Exploratory Search of Global Response Strategies and the Use of Digital Tools in Nigeria. *JMIR mHealth and uHealth* **2020**, *8*, e19139. [CrossRef]
15. De Carli, A.; Franco, M.; Gassmann, A.; Killer, C.; Rodrigues, B.; Scheid, E.; Schoenbaechler, D.; Stiller, B. WeTrace—A Privacy-preserving Mobile COVID-19 Tracing Approach and Application. *arXiv* **2020**, arXiv:2004.08812.
16. Abeler, J.; Bäcker, M.; Buermeyer, U.; Zillessen, H. COVID-19 Contact tracing and data protection can go together. *JMIR mHealth uHealth* **2020**, *8*, e19359. [CrossRef]
17. Zaidi, K.; Kumar Prasad, D. Impact of IoT Adoption in Healthcare: COVID-19 and Online Medical Learning Environments. 2020. Available online: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720323755> (accessed on 15 May 2020).
18. Elavarasan, R.M.; Pugazhendhi, R. Restructured society and environment: A review on potential technological strategies to control the COVID-19 pandemic. *Sci. Total Environ.* **2020**, *725*, 138858. [CrossRef] [PubMed]

19. Milbredt, O.; Rudolph, F.; Grunewald, E.; Christ, T. Evaluating conditions and impact of intermodal traffic management involving airports and railways. *Trans. Res. Procedia* **2017**, *25*, 1735–1744, doi:10.1016/j.trpro.2017.05.132. [[CrossRef](#)]
20. Toth, C.; Jozkow, G.; Koppanyi, Z.; Young, S.; Grejner-Brzezinska, D. Monitoring aircraft motion at Airports by lidar. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inform. Sci.* **2016**, *III-1*, 159–165, doi:10.5194/isprsannals-iii-1-159-2016. [[CrossRef](#)]
21. Triebel, R.; Arras, K.; Alami, R.; Beyer, L.; Breuers, S.; Chatila, R.; Chetouani, M.; Cremers, D.; Evers, V.; Fiore, M.; et al. SPENCER: A Socially Aware Service Robot for Passenger Guidance and Help in Busy Airports. In *Springer Tracts in Advanced Robotics*; Springer International Publishing: New York, NY, USA, 2016; pp. 607–622, doi:10.1007/978-3-319-27702-8_40. [[CrossRef](#)]
22. Nuijten, A. Runway temperature prediction, a case study for Oslo Airport, Norway. *Cold Reg. Sci. Technol.* **2016**, *125*, 72–84, doi:10.1016/j.coldregions.2016.02.004. [[CrossRef](#)]
23. Ghazal, M.; Ali, S.; Haneefa, F.; Sweleh, A. Towards smart wearable real-time airport luggage tracking. In Proceedings of the 2016 International Conference on Industrial Informatics and Computer Systems (CIICS), Sharjah, UAE, 13–15 March 2016; doi:10.1109/iccsii.2016.7462422. [[CrossRef](#)]
24. Accettura, N.; Alata, E.; Berthou, P.; Dragomirescu, D.; Monteil, T. Addressing scalable, optimal, and secure communications over LoRa networks: Challenges and research directions. *Internet Technol. Lett.* **2018**, *1*, e54, doi:10.1002/itl2.54. [[CrossRef](#)]
25. Bor, M.C.; Roedig, U.; Voigt, T.; Alonso, J.M. Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale? In Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, Valletta, Malta, 13–17 November 2016; doi:10.1145/2988287.2989163. [[CrossRef](#)]
26. Magrin, D.; Centenaro, M.; Vangelista, L. Performance evaluation of LoRa networks in a smart city scenario. In Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Communications (ICC), Paris, France, 21–25 May 2017; doi:10.1109/icc.2017.7996384. [[CrossRef](#)]
27. Goldoni, E.; Prando, L.; Vizziello, A.; Savazzi, P.; Gamba, P. Experimental data set analysis of RSSI-based indoor and outdoor localization in LoRa networks. *Internet Technol. Lett.* **2018**, *2*, e75, doi:10.1002/itl2.75. [[CrossRef](#)]
28. Shuda, J.; Rix, A.; Booyesen, M. Towards Module-Level Performance and Health Monitoring of Solar PV Plants Using LoRa Wireless Sensor Networks. In Proceedings of the 2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica, Cape Town, South Africa, 28–29 June 2018; doi:10.1109/powerafrica.2018.8521179. [[CrossRef](#)]
29. Wixted, A.J.; Kinnaird, P.; Larijani, H.; Tait, A.; Ahmadiania, A.; Strachan, N. Evaluation of LoRa and LoRaWAN for wireless sensor networks. In Proceedings of the 2016 IEEE SENSORS, Orlando, FL, USA, 30 October–3 November 2016; doi:10.1109/icsens.2016.7808712. [[CrossRef](#)]
30. Pham, C. Investigating and experimenting CSMA channel access mechanisms for LoRa IoT networks. In Proceedings of the 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Barcelona, Spain, 15–18 April 2018; doi:10.1109/wcnc.2018.8376997. [[CrossRef](#)]
31. Simeon, M.; Elizabeth, A.; Wara, S.; Adoghe, A.; Hope, O. Efficient Energy Management System Using Pir Sensor. In Proceedings of the 2018 IEEE PES/IAS PowerAfrica, Cape Town, South Africa, 28–29 June 2018; pp. 601–606, doi:10.1109/PowerAfrica.2018.8521059. [[CrossRef](#)]
32. Kaur, B.; Pateriya, P.K.; Rai, M.K. An Illustration of Making a Home Automation System Using Raspberry Pi and PIR Sensor. In Proceedings of the 2018 International Conference on Intelligent Circuits and Systems (ICICS), Phagwara, India, 19–20 April 2018; doi:10.1109/icics.2018.00095. [[CrossRef](#)]
33. Yamada, K.; Akihito, K.; Takasawa, T.; Yasutomi, K.; Kagawa, K.; Kawahito, S. A Distance Measurement Method Using A Time-of-Flight CMOS Range Image Sensor with 4-Tap Output Pixels and Multiple Time-Windows. *Electron. Imaging* **2018**, *2018*, 326-1–326-4, doi:10.2352/issn.2470-1173.2018.11.imse-326. [[CrossRef](#)]
34. Tsuji, S.; Kohama, T. Proximity Skin Sensor Using Time-of-Flight Sensor for Human Collaborative Robot. *IEEE Sens. J.* **2019**, *19*, 5859–5864, doi:10.1109/jsen.2019.2905848. [[CrossRef](#)]
35. Galarza, L.; Martin, H.; Adjouadi, M. Time-of-Flight Sensor in a Book Reader System Design for Persons With Visual Impairment and Blindness. *IEEE Sens. J.* **2018**, *18*, 7697–7707, doi:10.1109/jsen.2018.2859772. [[CrossRef](#)]

36. Katschmann, R.K.; Araki, B.; Rus, D. Safe Local Navigation for Visually Impaired Users with a Time-of-Flight and Haptic Feedback Device. *IEEE Trans. Neural Syst. Rehabil. Eng.* **2018**, *26*, 583–593, doi:10.1109/tnsre.2018.2800665. [[CrossRef](#)]
37. Mahvi, A.J.; Fil, B.E.; Garimella, S. Accurate and inexpensive thermal time-of-flight sensor for measuring refrigerant flow in minichannels. *Int. J. Heat Mass Transf.* **2019**, *132*, 184–193, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.11.133. [[CrossRef](#)]
38. Illyaskutty, N.; Kansizoglu, O.; Akdag, O.; Ojha, B.; Knoblauch, J.; Kohler, H. Miniaturized Single Chip Arrangement of a Wheatstone Bridge Based Calorimetric Gas Sensor. *Chemosensors* **2018**, *6*, 22, doi:10.3390/chemosensors6020022. [[CrossRef](#)]
39. Jiang, H.; Tian, X.; Deng, X.; Zhao, X.; Zhang, L.; Zhang, W.; Zhang, J.; Huang, Y. Low Concentration Response Hydrogen Sensors Based on Wheatstone Bridge. *Sensors* **2019**, *19*, 1096, doi:10.3390/s19051096. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
40. Gao, S.; Yi, Z.; Ye, Y.; Qin, M.; Huang, Q.A. Configuration of a Self-Heated Double Wheatstone Bridge for 2-D Wind Sensors. *J. Microelectromech. Syst.* **2019**, *28*, 125–130, doi:10.1109/jmems.2018.2883131. [[CrossRef](#)]
41. Gao, Y.; Ota, H.; Schaler, E.W.; Chen, K.; Zhao, A.; Gao, W.; Fahad, H.M.; Leng, Y.; Zheng, A.; Xiong, F.; et al. Wearable Microfluidic Diaphragm Pressure Sensor for Health and Tactile Touch Monitoring. *Adv. Mater.* **2017**, *29*, 1701985, doi:10.1002/adma.201701985. [[CrossRef](#)]
42. Larkin, L. A fuzzy logic controller for aircraft flight control. In Proceedings of the 23rd IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, NV, USA, 12–14 December 1984; doi:10.1109/cdc.1984.272141. [[CrossRef](#)]
43. Skorupski, J.; Uchroński, P. Fuzzy inference system for the efficiency assessment of hold baggage security control at the airport. *Saf. Sci.* **2015**, *79*, 314–323, doi:10.1016/j.ssci.2015.06.020. [[CrossRef](#)]
44. Skorupski, J.; Uchroński, P. Managing the process of passenger security control at an airport using the fuzzy inference system. *Expert Syst. Appl.* **2016**, *54*, 284–293, doi:10.1016/j.eswa.2015.11.014. [[CrossRef](#)]
45. Chattopadhyay, S.; Banerjee, M.; Pal, S. Modified AC Wheatstone Bridge Network for Accurate Measurement of Pressure Using Strain Gauge Type Pressure Sensor. *Sens. Transducers* **2012**, *136*, 25–34.



3.4.1. Resumen en español

En este apartado se muestra el resumen del artículo titulado “*Multi-Agent Approach Using LoRaWAN Devices: An Airport Case Study*” que traducéndolo a castellano sería “*Enfoque multi-agente utilizando dispositivos LoRaWAN: Un caso de estudio en un aeropuerto*”.

Objetivos de la investigación

El Internet de las Cosas (IoT) es un nuevo paradigma en el que se interconectan varios dispositivos para monitorizar actividades y extraer información que puede ser útil para diferentes fines. El IoT es especialmente importante para las empresas cuando aumenta el número de usuarios de esos servicios, ya que proporciona beneficios adicionales, como en los aeropuertos. Cada vez más usuarios utilizan los aeropuertos para viajar, ya sea por negocios o por placer. Las llegadas de turistas internacionales aumentaron a 1.186 millones en 2015. Esta cifra seguirá creciendo en los próximos años. Este hecho, junto con la situación actual de COVID-19, ha creado un escenario ideal para aplicar estrategias inteligentes y maximizar la comodidad y la satisfacción de los viajeros durante su uso de los aeropuertos.

Uno de los servicios que suele recibir mayor número de quejas es el mantenimiento de los aseos. Además, es uno de los lugares donde los visitantes pueden contagiarse más fácilmente de COVID-19. En la actualidad, estas empresas deben ocuparse de planificar los turnos de limpieza, controlar la capacidad de los aseos y la falta de jabón o papel. Algunas de estas tareas suelen ser un reto, ya que predecir cuántos usuarios necesitarán el aseo en las próximas horas es una tarea compleja.

En este artículo se propone el diseño de un sistema IoT junto a una arquitectura multi-agente que, basado en la información de la red de sensores, mejore la experiencia del usuario y optimice los recursos de la empresa. Este sistema combina la información proporcionada por diferentes mecanismos de sensores para determinar el estado de los aseos y mejorar los servicios de limpieza.

Por tanto, los objetivos de investigación presentados en este artículo han sido los siguientes:

- Diseño de la red de sensores que formarán parte de un sistema IoT.
 - Diseño del subsistema de comunicación LoRa entre los distintos dispositivos de la red de sensores.
 - Diseño de una arquitectura multi-agente capaz de adaptarse a los posibles errores o cambios que puedan producirse en el entorno o en el sistema, como posibles fallos o cambios en las zonas de vigilancia.
 - Diseño de un sistema capaz de analizar la presencia de viajeros en las zonas monitorizadas sin invadir su privacidad.
 - Diseño de dispositivos que no dependan de la corriente eléctrica para abaratar los costes de instalación.
 - Optimización y eficiencia de los recursos de las empresas de limpieza.
-

Metodología

La metodología utilizada para la elaboración de este artículo científico es la ya explicada en la sección 1.2. No obstante, en esta subsección se explicarán cada uno de los pasos o aspectos relevantes tenidos en cuenta durante el proceso de investigación. Para ilustrar este proceso vamos a utilizar algunos de los pasos de la metodología AR.

- **Revisión del estado del arte:** hoy en día, los sistemas IoT se utilizan ampliamente en diferentes aplicaciones, incluida la gestión de aeropuertos, por ejemplo, detectar objetos. La situación actual con la pandemia de COVID-19 ha animado a muchos científicos a proponer soluciones que implican nuevas tecnologías y sensores para controlar a las multitudes o maximizar los problemas de limpieza, por ejemplo, rastrear la posición del usuario para detectar contactos o su uso en las smart cities para la mejora y eficiencia del sistema de salud.

En contextos generales, existen desarrollos interesantes para gestionar los recursos de los aeropuertos, ya sea gestionar el tráfico en los aeropuertos detectando la posición de los usuarios cruzando la información con los vuelos o monitorizando la trayectoria de un avión. Así mismo, existen sistemas de guiado de pasajeros para mejorar su experiencia en su paso por el aeropuerto.

Tras un profundo estudio del estado del arte, se detectan dos limitaciones. En primer lugar, la mayor parte de las soluciones se centran en los problemas de seguridad y transporte en los aeropuertos, más que en los servicios de limpieza. Sin embargo, estos servicios son actualmente esenciales para minimizar al máximo el número de infecciones de COVID-19. Además, el uso de la conexión Wi-Fi, a pesar de sus ventajas, aumenta los niveles de consumo en cuanto a energía y recursos, ya que este tipo de conexión tiene un bajo alcance, y suele requerir la instalación de un elevado número de dispositivos.

- **Análisis y diseño de la propuesta:** analizando las necesidades detectadas en la revisión estado del arte, se ha propuesto el diseño de una plataforma multi-agente donde los agentes trabajen de forma independiente para lograr el objetivo común, en este caso el de facilitar el proceso de monitorización y optimización de tareas de limpieza de los baños públicos. Para llevar a cabo el estudio era necesario diseñar mecanismos que permitan monitorizar las diferentes métricas de una forma remota haciendo uso de tecnologías de bajo consumo. Para ello se han diseñado una serie sensores que permitirían controlar la afluencia de personas baños públicos, así como el nivel de papel, jabón e hidrogel en los diferentes dispensadores. Estos dispositivos deberían ser autónomos y no depender de la energía eléctrica, y con esto ser nodos de bajo consumo. Para la transmisión de los datos de forma inalámbrica se han analizado las diferentes tecnologías existentes, decantándose por el uso de LoRaWan. Cada uno de estos nodos ha sido modelado como un agente que tiene una funcionalidad simple y bien definida dentro del sistema. Dentro de la arquitectura también se pueden encontrar agentes encargados del análisis de los datos, generación de alertas. Estos agentes hacen uso de un sistema inteligente basado en lógica difusa, con reglas definidas por expertos del área de limpieza, de modo que se determine en qué estado se encuentra cada uno de los baños y la necesidad de limpieza.
-

- **Definición del caso de estudio:** la propuesta debería ser validada por un caso de estudio. En este sentido, el sistema se instaló en los aseos públicos de los aeropuertos de Santander y Málaga en España para probar el correcto funcionamiento. Se desarrollaron varios nodos para obtener las métricas del sistema de forma inalámbrica. Las métricas capturadas por estos nodos incluyen el flujo de personas en un intervalo determinado, el porcentaje de papel disponible en un rollo de papel y el porcentaje de jabón disponible en un dispensador de jabón. También se obtuvieron métricas ambientales, como la luminosidad, la temperatura y la humedad. Para evaluar el sistema propuesto, se desarrollaron aplicaciones de visualización para monitorizar el estado global del sistema junto a la aplicación para que los trabajadores puedan identificar los aseos a limpiar y determinar el estado de cada rollo de papel higiénico, el dispensador de jabón y las papeleras.

Resultados

Los resultados de este trabajo de investigación se pueden dividir en dos partes. La primera de ellas hace referencia al diseño de dispositivos de recogida de las métricas. Los dispositivos diseñados han permitido monitorizar las métricas referentes a la limpieza de los baños sin invadir la privacidad de los usuarios en los baños públicos. Con el uso de redes de transmisión de datos de bajo consumo de energía se ha conseguido que los nodos diseñados fueran independientes de la red eléctrica y que su instalación resultara lo más sencilla posible. Su instalación consiste únicamente en reemplazar los dispensadores existentes por otros que integren los sensores para la monitorización. El segundo logro relevante ha sido la creación de una plataforma basada en una arquitectura multi-agente que permitiera la creación de un sistema completamente modular. De esta manera se permite el replazo de los agentes por otros de las mismas características sin la necesidad de afectar las demás partes del sistema. Esta arquitectura también ha permitido la integración de un sistema inteligente basado en lógica difusa que hace uso del conocimiento de los expertos para la creación de las reglas base del sistema. Todo en conjunto ha resultado ser una plataforma funcional con una aplicación real que se encuentra desplegado en varios aeropuertos que actualmente permite monitorizar y facilitar las tareas de limpieza y reposición de productos de higiene.

Conclusiones

Analizando los resultados de esta investigación, descubrimos que es posible diseñar una plataforma IoT capaz de mejorar los servicios de limpieza en un aeropuerto. Se diseñó una arquitectura multi-agente basada en la plataforma PANGEA para maximizar la eficiencia. Con este caso práctico, se minimiza el esfuerzo que requieren los empleados para revisar los aseos y la limpieza de los servicios del aeropuerto. El uso de la tecnología LoRaWAN para la comunicación permitió crear los dispositivos de menor coste y bajo consumo energético, ofreciendo así un mayor rango de funcionamiento. Además, el sistema de lógica difusa tuvo éxito, no sólo en la reducción del número de veces que los limpiadores tienen que comprobar el estado de los baños, sino también en el aumento de la satisfacción de los usuarios.

Para finalizar, se plantean posibles líneas de investigación futuras que resultan interesantes como la posibilidad de fusión de la información sobre la salida y la llegada de los vuelos a los aeropuertos y el número de pasajeros de cada vuelo. Se seguirá investi-

gando en este ámbito y en la integración de la información obtenida de sensores externos al sistema.

Capítulo 4

Conclusions

The primary purpose of this chapter is to list the general conclusions of the research carried out during the last few years and which that has reflected in the previous chapters. Since the format of presentation of this research work is through a compendium of three related scientific articles, the individualized and more specific conclusions of each of the papers are in Section 3 of this document.

4.1. General Contributions

The main objective of the current subsection is to describe the main contributions carried out during this work. The initial starting point was a detailed literature review of multi-agent architectures, everyday sensors, and wireless communication protocols used to design and develop user applications. During this period, I was able to identify the strengths of this work verify the existence of dozens of communication protocols that were strongly linked and dependent on particular hardware. In this phase, I understood how the information transmission protocols worked and the different existing technologies for transferring data efficiently that optimized energy consumption, giving me the necessary fluency to carry out tasks of design and construction of distributed sensor networks.

After analyzing the different intelligent algorithms and the advantages and disadvantages of each of the multi-agent architectures, I was able to determine the best technology and way to propose a robust solution to the problem for each case study. The intelligent algorithms I was interested in had to be executed in a distributed manner, adapting to the new computing paradigms and capable of handling a large volume of information in a reasonable computing time. Because of this, I had to understand the functioning of multi-agent systems, particularly architectures based on virtual organizations that allowed introducing an abstraction layer that allowed adapting computational resources according to the requirements of the context.

Once completed the stage of analysis and state of the art, I was able to identify the shortcomings of the existing protocols in specific scenarios. That allowed me to design three different case studies; each one applied to another sector, where I could focus my efforts and validate the hypothesis of my work.

The first case study proposes creating a multi-agent architecture based on virtual organizations that aim to monitor assets or people in enclosed spaces, taking advantage of

the hardware already installed in the buildings and allowing the automation of calibration procedures.

In the second case study, a platform is designed based on the analysis of the context and the creation of novel hardware to carry out rehabilitation. This study also uses Realidad Virtual (VR) to offer the user an immersive experience.

The third case study focuses on designing a sensor network interconnected to a multi-agent architecture that can adapt to possible errors or changes in the environment. The main objective of this platform was to analyze the presence of travelers in airports within the monitored areas without invading their privacy. In addition, this platform monitors the resources available in the restrooms, increasing the efficiency of the human resources involved in the cleaning service.

Another strong point of this work, which has had great relevance during its elaboration, is that certain paradigms of ambient intelligence have been emphasized. In particular, the technology and the solutions formulated were intended to be abstract for the user so that the technology would solve their day-to-day problems without interposing an additional layer of difficulty.

In general, it can be stated that each of the objectives set for validating the hypothesis of this doctoral thesis has been achieved. For this purpose, an exhaustive study of the state of the art of paradigms and technologies to be used has been carried out, studying the mechanisms of information acquisition through existing sensor networks and identifying their needs and limitations. We have investigated and designed mechanisms that allow the detection of patterns using intelligent technologies and data mining. On the other hand, research has been done on context-sensitive architectures that allow the incorporation of new elements or the resolution of failures in the environment. Sensor and actuator networks have been designed and implemented to retrieve information from the environment, process it in Edge Computing, and act according to the information analysis. Agent models have been designed to be embedded in devices with limited computational resources. Finally, I designed three well-differentiated case studies where techniques are applied to determine the behavior of users and improve the tasks they perform, obtaining satisfactory results in the operation and purpose of the platforms in these cases.

Finally, I would like to emphasize that I have attended different academic events, being able to divulge the progress and difficulties that have been present in this work. The attendance at congresses and different specialization courses have allowed me to broaden my knowledge in Computer Science and Artificial Intelligence. During the realization of this work, I have the opportunity to formalize the results obtained with this research work in more than twenty scientific publications, of which 14 have index JCR.

4.2. Future Works

In particular, the first case study has possible improvements. Among them is the introduction of new sensors such as a compass and accelerometers, raising a new milestone of merging the information from the data obtained from these sensors and using them together with the perceived values of wireless signals to improve the accuracy of the location system.

The second study has detailed research and improvement potential. It is about adding new joints to the exoskeleton, even going so far as to sense or act on the whole arm

or body, making it possible to contemplate a more significant number of chronic diseases and extending its use to a wider variety of recovery plans. In this study, it would also be interesting to carry out a study with a more significant number of patients and compare how the system would behave in users with other similar problems, but that has not been possible to study at the point at which this work arrived.

In the last case study, it would be essential to start a line of research were to incorporate information such as the arrival or departure of flights and the number of passengers on each flight. The objective of this would be to increase the system's accuracy, allowing to make future predictions such as forecasts of possible insufficiencies of material, oversaturation in the areas, the impossibility of cleaning at certain hours, etc.

Apéndice A

Factor de impacto de las revistas

A.1. Neurocomputing

- **Nombre de la revista:** Neurocomputing
- **Url:** <https://www.journals.elsevier.com/neurocomputing>
- **Editorial:** El Selvier
- **ISSN:** 0925-2312
- **Categorías:** COMPUTER SCIENCE, ARTIFICIAL INTELLIGENCE
- **Factor de impacto 2019:** 4,438
- **Quartil 2019:**
 - COMPUTER SCIENCE, ARTIFICIAL INTELLIGENCE: Q1
- **Ranking 2019:**
 - COMPUTER SCIENCE, ARTIFICIAL INTELLIGENCE: 28/137

A.2. Sensors

- **Nombre de la revista:** Sensors
- **Url:** <https://www.mdpi.com/journal/sensors>
- **Editorial:** MDPI
- **ISSN:** 1424-8220
- **Categorías:** ENGINEERING, ELECTRICAL ELECTRONIC, INSTRUMENTS INSTRUMENTATION, CHEMISTRY, ANALYTICAL
- **Factor de impacto 2020:** 3,576
- **Quartil 2020:**
 - ENGINEERING, ELECTRICAL: Q2

- ELECTRONIC,INSTRUMENTS INSTRUMENTATION: Q1
- CHEMISTRY, ANALYTICAL: Q2
- **Ranking 2020:**
 - ENGINEERING, ELECTRICAL: 82/273
 - ELECTRONIC,INSTRUMENTS INSTRUMENTATION: 14/64
 - CHEMISTRY, ANALYTICAL: 26/87

A.3. Electronics

- **Nombre de la revista:** Electronics
 - **Url:** <https://www.mdpi.com/journal/electronics>
 - **Editorial:** MDPI
 - **ISSN:** 2079-9292
 - **Categorías:** ENGINEERING, ELECTRICAL ELECTRONIC, COMPUTER SCIENCE, INFORMATION SYSTEMS, PHYSICS, APPLIED
 - **Factor de impacto 2020:** 2,397
 - **Quartil 2020:**
 - ENGINEERING, ELECTRICAL ELECTRONIC: Q3
 - COMPUTER SCIENCE, INFORMATION SYSTEMS: Q3
 - PHYSICS, APPLIED: Q3
 - **Ranking 2020:**
 - ENGINEERING, ELECTRICAL ELECTRONIC: 145/273
 - COMPUTER SCIENCE, INFORMATION SYSTEMS: 93/161
 - PHYSICS, APPLIED: 88/160
-

Apéndice B

Conclusiones

Este capítulo tiene como hito principal enumerar las conclusiones generales de la investigación realizada durante los últimos años y que han sido previamente reflejadas en los capítulos anteriores. Dado que el formato de presentación de este trabajo de investigación se realiza mediante un compendio de tres artículos científicos relacionados, las conclusiones individualizadas y más específicas de cada uno de los trabajos pueden ser consultadas en la Sección 3 de este documento.

B.1. Contribuciones Generales

La actual subsección tiene como objetivo principal describir las principales contribuciones llevadas a cabo durante este trabajo. En el punto de partida inicial se realizó una revisión detallada de la literatura acerca de las arquitecturas multi-agente, los sensores existentes en el día a día y los protocolos de comunicaciones inalámbricos empleados para el diseño y desarrollo de aplicativos de usuario. Durante este periodo pude identificar los puntos fuertes de este trabajo, verificar la existencia de decenas de protocolos de comunicación que se encontraban fuertemente ligados y totalmente dependientes de un hardware muy específico. En esta fase comprendí como funcionaban los protocolos de transmisión de información y las diferentes tecnologías existentes para la transferencia de datos de una forma eficiente que optimizase el consumo energético, dándome la soltura necesaria para llevar a cabo tareas de diseño y construcción de redes de sensores distribuidas.

Después de analizar los diferentes algoritmos inteligentes y las ventajas e inconvenientes de cada una de las arquitecturas multi-agente, pude determinar para cada caso de estudio la mejor tecnología y forma de plantear una solución robusta al problema. Los algoritmos inteligentes por los que me interesé debían ser ejecutados de una forma distribuida, adaptándose a los nuevos paradigmas de computación y capaces de manejar un gran volumen de información en un tiempo de computación razonable. Debido a ello tuve que comprender el funcionamiento de los sistemas multi-agente, más en particular de las arquitecturas basadas en organizaciones virtuales que permitían introducir una capa de abstracción que permitía adaptar los recursos computacionales en función de los requerimientos del contexto.

Una vez finalizada la etapa de análisis y cumplimentación del estado del arte pude identificar las carencias de los protocolos existentes en determinadas situaciones, lo que me permitió diseñar 3 casos de estudio diferenciados, cada uno de ellos aplicado a un

sector diferente, donde pude centrar mi esfuerzo y validar la hipótesis de mi trabajo.

En el primer caso de estudio se propone la creación de una arquitectura multi-agente basada en organizaciones virtuales que tiene como objetivo llevar a cabo la monitorización de activos o personas en espacios cerrados aprovechando el hardware que ya se encuentre instalado en los edificios y que permita la automatización de los procedimientos de calibración.

En el segundo caso de estudio se diseña una plataforma basada en el análisis del contexto y la creación de un novedoso hardware que usados forma conjunta pueden ser utilizados para llevar a cabo la rehabilitación. En este estudio también se hace uso de Realidad Virtual (VR) para ofrecer al usuario de una experiencia inmersiva.

En el tercer caso de estudio se hace foco en el diseño de una red de sensores que interconectada a una arquitectura multi-agente que es capaz de adaptarse a los posibles errores o cambios que se producen en el entorno. El principal objetivo de esta plataforma era analizar la presencia de viajeros en los aeropuertos dentro de las zonas monitorizadas sin invadir su privacidad. Además, esta plataforma monitoriza los recursos disponibles en los baños logrando aumentar la eficiencia de los recursos humanos implicados con el servicio de limpieza.

Otro punto fuerte de este trabajo y que ha tenido gran relevancia durante su elaboración es que se ha hecho hincapié en ciertos paradigmas de la inteligencia ambiental. Particularmente, se ha buscado que la tecnología y las soluciones formuladas fueran abstractas para el usuario de forma que la tecnología solventase sus problemas del día a día sin interponer una capa de dificultad adicional.

De forma general se puede indicar que se han cumplido cada uno de los objetivos que se habían planteado para la validación de la hipótesis de esta tesis doctoral. Para ello se ha llevado a cabo un exhaustivo estudio del estado del arte de los paradigmas y tecnologías a utilizar, estudiando los mecanismos de adquisición de información a través de redes de sensores existentes e identificando las necesidades y las limitaciones que poseen. Se ha investigado y diseñado en mecanismos que permiten la detección de patrones utilizando tecnologías inteligentes y de minería de datos. Por otro lado, se ha investigado sobre arquitecturas sensibles al contexto que permiten la incorporación de nuevos elementos o la resolución de fallos que se pueden producir en el entorno. Se han diseñado e implementado redes de sensores y actuadores que permiten recuperar información del entorno, procesarla en el Edge Computing y actuar en función del análisis de la información. Se han diseñado modelos de agentes que pueden ser embebidos en dispositivos con recursos computacionalmente limitados. Para finalizar, se han diseñado tres casos de estudio bien diferenciados donde se aplican técnicas que permitan determinar el comportamiento de los usuarios y mejorar la tareas que realizan, obteniendo resultados satisfactorios en el funcionamiento y finalidad de las plataformas en dichos casos.

Para finalizar me gustaría resaltar que he asistido a diferentes eventos académicos, pudiendo divulgar los progresos y dificultades que han estado presentes en este trabajo. La asistencia a congresos y diferentes cursos de especialización, me han permitido ampliar los conocimientos en la rama de las Ciencias de la computación e Inteligencia Artificial. Durante la realización de este trabajo he tenido la oportunidad de formalizar los resultados obtenidos en más de una veintena de publicaciones científicas de las cuales 14 están indexadas en el JCR.

B.2. Trabajos Futuros

En esta sección se resumen las líneas futuras de investigación de este trabajo. En primer lugar, cabe destacar que los tres casos de estudio permiten determinar comportamientos de usuarios y actuar consecuentemente de modo que se facilita la realización de tareas mejorando de esta manera su calidad de vida.

De forma particular, el primer caso de estudio tiene posibles mejoras. Entre ellas, la introducción de nuevos sensores como puede ser una brújula y acelerómetros, planteando un nuevo hito de fusión de la información de los datos obtenidos de estos sensores y utilizarlos de forma conjunta con los valores percibidos de las señales inalámbricas con el objetivo de mejorar la precisión del sistema de localización.

El segundo estudio tiene una clara posibilidad de investigación y mejora. Se trata de añadir nuevas articulaciones al exoesqueleto llegando incluso a sensorizar o actuar sobre todo el brazo o cuerpo, permitiendo contemplar una mayor cantidad de enfermedades crónicas y extendiendo su uso a una mayor variedad de planes de recuperación. En este estudio también sería interesante llevar a cabo un estudio con un mayor número de pacientes y comparar como se comportaría el sistema en usuarios otros problemas similares pero que no han sido posible poder estudiar en el punto al cual llegó este trabajo.

En el último caso de estudio resultaría importante comenzar una línea de investigación donde para incorporar información como puede ser la llegada o la salida de vuelos y el número de pasajeros de cada ellos con objetivo de incrementar la precisión del sistema permitiendo hacer predicciones futuras como previsiones de posibles insuficiencias de material, sobresaturación en las zonas, imposibilidad de limpieza en determinadas horas, etc.

Bibliografía

- [1] Brendan Tran Morris and Mohan Manubhai Trivedi. A survey of vision-based trajectory learning and analysis for surveillance. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 18(8):1114–1127, 2008.
- [2] Sk. Arif Ahmed, Debi Prosad Dogra, Samarjit Kar, and Partha Pratim Roy. Trajectory-based surveillance analysis: A survey. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 29(7):1985–1997, 2019.
- [3] Dongfang Yang, Ekim Yurtsever, Vishnu Renganathan, Keith A. Redmill, and Ümit Özgüner. A vision-based social distancing and critical density detection system for covid-19. *Sensors*, 21(13), 2021.
- [4] Kwang-Eun Ko and Kwee-Bo Sim. Deep convolutional framework for abnormal behavior detection in a smart surveillance system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 67:226–234, 2018.
- [5] S. Sarkar, P.J. Phillips, Z. Liu, I.R. Vega, P. Grother, and K.W. Bowyer. The humanoid gait challenge problem: data sets, performance, and analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 27(2):162–177, 2005.
- [6] Sumair Aziz, Muhammad Umar Khan, Zainoor Ahmad Choudhry, Afeefa Aymin, and Adil Usman. Ecg-based biometric authentication using empirical mode decomposition and support vector machines. In *2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, pages 0906–0912, 2019.
- [7] Yande Li, Taiqian Wang, Aamir khan, Lian Li, Caihong Li, Yi Yang, and Li Liu. Hand gesture recognition and real-time game control based on a wearable band with 6-axis sensors. In *2018 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, pages 1–6, 2018.
- [8] Hee-Deok Yang. Sign language recognition with the kinect sensor based on conditional random fields. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 15:135–47, 12 2014.
- [9] Ismail Ben Abdallah, Yassine Bouteraa, and Chokri Reikik. Kinect-based sliding mode control for lynxmotion robotic arm. *Adv. Hum. Comput. Interact.*, 2016:7921295:1–7921295:10, 2016.
- [10] Matej Hoffmann, Hugo Marques, Alejandro Arieta, Hidenobu Sumioka, Max Lungarella, and Rolf Pfeifer. Body schema in robotics: A review. *IEEE Transactions on Autonomous Mental Development*, 2(4):304–324, 2010.

-
- [11] Francisca Rosique, Fernando Losilla, and Pedro J. Navarro. Applying vision-based pose estimation in a telerehabilitation application. *Applied Sciences*, 11(19), 2021.
- [12] Woojoo Kim, Jaeho Sung, Daniel Saakes, Chunxi Huang, and Shuping Xiong. Ergonomic postural assessment using a new open-source human pose estimation technology (openpose). *International Journal of Industrial Ergonomics*, 84:103164, 2021.
- [13] Krishna Prasad Karani, Sreeramana Aithal, Geetha Poornima K, and Vinayachandira Kirlaya. Tracking and monitoring fitness of athletes using iot enabled wearables for activity recognition and random forest algorithm for performance prediction. *International Journal of Health Sciences and Pharmacy*, pages 72–86, 04 2021.
- [14] Toshiya Watanabe, Naohiro Ohtsuka, Susumu Shibusawa, Masaru Kamada, and Tatsuhiro Yonekura. Design of lower limb chair exercise support system with depth sensor. In *2014 IEEE 11th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence and Computing and 2014 IEEE 11th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2014 IEEE 14th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops*, pages 104–111, 2014.
- [15] Geetanjali Kale and Varsha Patil. Bharatna yam adavu recognition from depth data. In *2015 Third International Conference on Image Information Processing (ICIIP)*, pages 246–251, 2015.
- [16] Ray Ison. Systems thinking and practice for action research. *The Sage handbook of action research participative inquiry and practice*, 2:139–158, 2008. DOI: <http://dx.doi.org/10.4135/9781848607934>.
- [17] Thumeera R. Wanasinghe, Raymond G. Gosine, Lesley Anne James, George K. I. Mann, Oscar de Silva, and Peter J. Warrian. The internet of things in the oil and gas industry: A systematic review. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(9):8654–8673, 2020.
- [18] Wei Zhou, Yan Jia, Anni Peng, Yuqing Zhang, and Peng Liu. The effect of iot new features on security and privacy: New threats, existing solutions, and challenges yet to be solved. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2):1606–1616, 2019.
- [19] Naser Hossein Motlagh, Tarik Taleb, and Osama Arouk. Low-altitude unmanned aerial vehicles-based internet of things services: Comprehensive survey and future perspectives. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(6):899–922, 2016.
- [20] Fatima Hussain, Rasheed Hussain, Syed Ali Hassan, and Ekram Hossain. Machine learning in iot security: Current solutions and future challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 22(3):1686–1721, 2020.
- [21] Francesco Piccialli, Salvatore Cuomo, Vincenzo Schiano Di Cola, and Giampaolo Casolla. A machine learning approach for iot cultural data. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 09 2019.
- [22] Mohsen Marjani, Fariza Nasaruddin, Abdullah Gani, Ahmad Karim, Ibrahim Abaker Targio Hashem, Aisha Siddiqa, and Ibrar Yaqoob. Big iot data analytics: Architecture, opportunities, and open research challenges. *IEEE Access*, 5:5247–5261, 2017.
-

-
- [23] Adnan Akbar, George Kousiouris, Haris Pervaiz, Juan Sancho, Paula Ta-Shma, Francois Carrez, and Klaus Moessner. Real-time probabilistic data fusion for large-scale iot applications. *IEEE Access*, 6:10015–10027, 2018.
- [24] Luca Mottola and Gian Pietro Picco. Programming wireless sensor networks: Fundamental concepts and state of the art. *ACM Comput. Surv.*, 43(3), apr 2011.
- [25] Liu Yong-Min, Wu Shu-Ci, and Nian Xiao-Hong. The architecture and characteristics of wireless sensor network. In *2009 International Conference on Computer Technology and Development*, volume 1, pages 561–565, 2009.
- [26] Akhilesh Shrestha and Liudong Xing. A performance comparison of different topologies for wireless sensor networks. In *2007 IEEE Conference on Technologies for Homeland Security*, pages 280–285, 2007.
- [27] Pengfei Wang, Chao Yao, Zijie Zheng, Guangyu Sun, and Lingyang Song. Joint task assignment, transmission, and computing resource allocation in multilayer mobile edge computing systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2):2872–2884, 2019.
- [28] Yuvraj Sahni, Jiannong Cao, and Lei Yang. Data-aware task allocation for achieving low latency in collaborative edge computing. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(2):3512–3524, 2019.
- [29] Jinke Ren, Yinghui He, Guan Huang, Guanding Yu, Yunlong Cai, and Zhaoyang Zhang. An edge-computing based architecture for mobile augmented reality. *IEEE Network*, 33(4):162–169, 2019.
- [30] Nina Cvar, Jure Trilar, Andrej Kos, Mojca Volk, and Emilija Stojmenova Duh. The use of iot technology in smart cities and smart villages: Similarities, differences, and future prospects. *Sensors*, 20(14), 2020.
- [31] Cristian González García, Daniel Meana-Llorián, Begoña Cristina Pelayo García-Bustelo, Juan Manuel Cueva Lovelle, and Néstor García-Fernández. Midgar: Detection of people through computer vision in the internet of things scenarios to improve the security in smart cities, smart towns, and smart homes. *ArXiv*, abs/1701.02632, 2017.
- [32] Rghioui Amine and Abdelmajid Oumnad. Challenges and opportunities of internet of things in healthcare. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 8:2753, 10 2018.
- [33] Ricardo S. Alonso, Inés Sittón-Candanedo, Óscar García, Javier Prieto, and Sara Rodríguez-González. An intelligent edge-iot platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario. *Ad Hoc Networks*, 98:102047, 2020.
- [34] Konstantinos Demestichas, Nikolaos Peppes, and Theodoros Alexakis. Survey on security threats in agricultural iot and smart farming. *Sensors*, 20(22), 2020.
- [35] Mohamed Ben-Daya, Elkafi Hassini, and Zied Bahroun. Internet of things and supply chain management: a literature review. *International Journal of Production Research*, 57(15-16):4719–4742, 2019.
-

-
- [36] Pravin Kshirsagar, Varsha More, Vaibhav Hendre, Pranav Chippalkatti, and Krishan Paliwal. Iot based baby incubator for clinic. In Amit Kumar and Stefan Mozar, editors, *ICCCE 2019*, pages 349–355, Singapore, 2020. Springer Singapore.
- [37] Diego M. Jiménez-Bravo, Juan F. De Paz, Gabriel Villarrubia, and Javier Bajo. Dealing with demand in electric grids with an adaptive consumption management platform. *Complexity*, 2018:4012740, Mar 2018.
- [38] Diego M. Jiménez-Bravo, Javier Pérez-Marcos, Daniel H. De la Iglesia, Gabriel Villarrubia González, and Juan F. De Paz. Multi-agent recommendation system for electrical energy optimization and cost saving in smart homes. *Energies*, 12(7), 2019.
- [39] Athul Jayaram. Smart retail 4.0 iot consumer retailer model for retail intelligence and strategic marketing of in-store products. In *17th International Business Horizon-INBUSH ERA-2017*, 02 2017.
- [40] Shu-Hsien Liao and Ling-Ling Yang. Mobile payment and online to offline retail business models. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 57:102230, 11 2020.
- [41] Seppo Leminen, Mervi Rajahonka, Robert Wendelin, and Mika Westerlund. Industrial internet of things business models in the machine-to-machine context. *Industrial Marketing Management*, 84:298–311, 01 2020.
- [42] Abdallah Namoun, Ali Tufail, Nikolay Mehandjiev, Ahmed Alrehaili, Javad Akhlaghinia, and Evtim Peytchev. An eco-friendly multimodal route guidance system for urban areas using multi-agent technology. *Applied Sciences*, 11(5), 2021.
- [43] Héctor Sánchez San Blas, André Sales Mendes, Francisco García Encinas, Luís Augusto Silva, and Gabriel Villarubia González. A multi-agent system for data fusion techniques applied to the internet of things enabling physical rehabilitation monitoring. *Applied Sciences*, 11(1), 2021.
- [44] Alberto L. Barriuso, Gabriel Villarrubia González, Juan F. De Paz, Álvaro Lozano, and Javier Bajo. Combination of multi-agent systems and wireless sensor networks for the monitoring of cattle. *Sensors*, 18(1), 2018.
- [45] Abdur Rahim Mohammad Forkan, Ibrahim Khalil, Zahir Tari, Sebti Foufou, and Abdelaziz Bouras. A context-aware approach for long-term behavioural change detection and abnormality prediction in ambient assisted living. *Pattern Recognition*, 48(3):628–641, 2015.
- [46] Daniel H. De La Iglesia, Juan F. De Paz, Gabriel Villarrubia González, Alberto L. Barriuso, and Javier Bajo. A context-aware indoor air quality system for sudden infant death syndrome prevention. *Sensors*, 18(3), 2018.
- [47] Weiping Zhang, Kerstin Thurow, and Regina Stoll. A context-aware mhealth system for online physiological monitoring in remote healthcare. *INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS COMMUNICATIONS CONTROL*, 11(1):142–156, 2015.
-

-
- [48] Abdur Rahim Mohammad Forkan, Ibrahim Khalil, and Mohammed Atiquzzaman. Visibid: A learning model for early discovery and real-time prediction of severe clinical events using vital signs as big data. *Computer Networks*, 113:244–257, 2017.
- [49] Iqbal H. Sarker. Machine learning: Algorithms, real-world applications and research directions. *SN Computer Science*, 2(3):160, Mar 2021.
- [50] S. B. Kotsiantis, I. D. Zaharakis, and P. E. Pintelas. Machine learning: a review of classification and combining techniques. *Artificial Intelligence Review*, 26(3):159–190, Nov 2006.
- [51] Frederick W. Faltin Fabrizio Ruggeri, Ron S. Kenett. *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*, John Wiley Sons, Hoboken, N. willey, 2007.
- [52] Johannes Fürnkranz and Gerhard Widmer. Incremental reduced error pruning. In William W. Cohen and Haym Hirsh, editors, *Machine Learning Proceedings 1994*, pages 70–77. Morgan Kaufmann, San Francisco (CA), 1994.
- [53] Eibe Frank and Ian Witten. Generating accurate rule sets without global optimization. *Machine Learning: Proceedings of the Fifteenth International Conference*, 06 1998.
- [54] Yun lei Cai, Duo Ji, and Dong feng Cai. A knn research paper classification method based on shared nearest neighbor.
- [55] Husain Aljazzar and Stefan Leue. K*: A heuristic search algorithm for finding the k shortest paths. *Artificial Intelligence*, 175(18):2129–2154, 2011.
- [56] Leo Breiman. Random forests. *Machine Learning*, 45(1):5–32, Oct 2001.
- [57] Y. Lecun, L. Bottou, Y. Bengio, and P. Haffner. Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11):2278–2324, 1998.
- [58] Rahmanifard H. and Plaksina T. Application of artificial intelligence techniques in the petroleum industry: a review. *Artif. Intell. Rev.*, 53(5):1 – 24, 2018. Cited by: 20.
- [59] Oscar Araque, Ignacio Corcuera-Platas, J. Fernando Sánchez-Rada, and Carlos A. Iglesias. Enhancing deep learning sentiment analysis with ensemble techniques in social applications. *Expert Systems with Applications*, 77:236–246, 2017.
- [60] D.E. RUMELHART, G.E. HINTON, and R.J. WILLIAMS. Learning internal representations by error propagation. In Allan Collins and Edward E. Smith, editors, *Readings in Cognitive Science*, pages 399–421. Morgan Kaufmann, 1988.
- [61] Isaac Amundson and Xenofon D. Koutsoukos. A survey on localization for mobile wireless sensor networks. In Richard Fuller and Xenofon D. Koutsoukos, editors, *Mobile Entity Localization and Tracking in GPS-less Environments*, pages 235–254, Berlin, Heidelberg, 2009. Springer Berlin Heidelberg.
- [62] Klaitheem Al Nuaimi and Hesham Kamel. A survey of indoor positioning systems and algorithms. In *2011 International Conference on Innovations in Information Technology*, pages 185–190, 2011.
-

-
- [63] A. Yaeli, P. Bak, G. Feigenblat, S. Nadler, H. Roitman, G. Saadoun, H. J. Ship, D. Cohen, O. Fuchs, S. Ofek-Koifman, and T. Sandbank. Understanding customer behavior using indoor location analysis and visualization. *IBM Journal of Research and Development*, 58(5/6):3:1–3:12, 2014.
- [64] Gabriel Villarrubia, Javier Bajo, Juan F. De Paz, and Juan M. Corchado. Monitoring and detection platform to prevent anomalous situations in home care. *Sensors*, 14(6):9900–9921, 2014.
- [65] Luis Brás, Nuno Borges Carvalho, Pedro Pinho, Lukasz Kulas, and Krzysztof Nyka. A review of antennas for indoor positioning systems. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2012:953269, Dec 2012.
- [66] Hui Liu, Houshang Darabi, Pat Banerjee, and Jing Liu. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 37(6):1067–1080, 2007.
- [67] Rahman Reza. Data fusion for improved toa/tdoa position determination in wireless systems. Master's thesis, MASTER OF SCIENCE in Electrical Engineering, Blacksburg, Virginia, 2000.
- [68] Reza Zekavat and R. Michael Buehrer. *Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances*. Wiley-IEEE Press, 1st edition, 2011.
- [69] Fazli Subhan, Halabi Hasbullah, Azat Rozyyev, and Sheikh Tahir Bakhsh. Indoor positioning in bluetooth networks using fingerprinting and lateration approach. In *2011 International Conference on Information Science and Applications*, pages 1–9, 2011.
- [70] Jinhong Xiao, Zhi Liu, Yang Yang, Dan Liu, and Xu Han. Comparison and analysis of indoor wireless positioning techniques. In *2011 International Conference on Computer Science and Service System (CSSS)*, pages 293–296, 2011.
- [71] Yanying Gu, Anthony Lo, and Ignas Niemegeers. A survey of indoor positioning systems for wireless personal networks. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 11(1):13–32, 2009.
- [72] Rainer Mautz and Sebastian Tilch. Survey of optical indoor positioning systems. In *2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*, pages 1–7, 2011.
- [73] Da Zhang, Feng Xia, Zhuo Yang, Lin Yao, and Wenhong Zhao. Localization technologies for indoor human tracking. In *2010 5th International Conference on Future Information Technology*, pages 1–6, 2010.
- [74] Robert Harle. A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(3):1281–1293, 2013.
- [75] Rainer Mautz. *Indoor positioning technologies*. PhD thesis, ETH Zurich, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering, Institute of Geodesy and Photogrammetry, 2012.
-

-
- [76] Sverre Holm. Ultrasound positioning based on time-of-flight and signal strength. In *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–6, 2012.
- [77] Carlos Medina, José Carlos Segura, and Ángel De la Torre. Ultrasound indoor positioning system based on a low-power wireless sensor network providing sub-centimeter accuracy. *Sensors*, 13(3):3501–3526, 2013.
- [78] Oliver J. Woodman and Robert K. Harle. Concurrent scheduling in the active bat location system. In *2010 8th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)*, pages 431–437, 2010.
- [79] Nissanka B. Priyantha, Allen K.L. Miu, Hari Balakrishnan, and Seth Teller. The cricket compass for context-aware mobile applications. In *Proceedings of the 7th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MobiCom '01*, page 1–14, New York, NY, USA, 2001. Association for Computing Machinery.
- [80] Alessio De Angelis, Antonio Moschitta, Paolo Carbone, Massimo Calderini, Stefano Neri, Renato Borgna, and Manuelo Peppucci. Design and characterization of a portable ultrasonic indoor 3-d positioning system. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(10):2616–2625, 2015.
- [81] Alejandro Lindo, Enrique García, Jesús Ureña, María del Carmen Pérez, and Álvaro Hernández. Multiband waveform design for an ultrasonic indoor positioning system. *IEEE Sensors Journal*, 15(12):7190–7199, 2015.
- [82] Ugur Yayan, Hikmet Yucel, and Ahmet Yazıcı. A low cost ultrasonic based positioning system for the indoor navigation of mobile robots. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 78(3):541–552, Jun 2015.
- [83] Ish Rishabh, Don Kimber, and John Adcock. Indoor localization using controlled ambient sounds. In *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–10, 2012.
- [84] Navid Fallah, Ilias Apostolopoulos, Kostas Bekris, and Eelke Folmer. Indoor Human Navigation Systems: A Survey. *Interacting with Computers*, 25(1):21–33, 01 2013.
- [85] A. Mandal, C.V. Lopes, T. Givargis, A. Haghighat, R. Jurdak, and P. Baldi. Beep: 3d indoor positioning using audible sound. In *Second IEEE Consumer Communications and Networking Conference, 2005. CCNC. 2005*, pages 348–353, 2005.
- [86] Chunyi Peng, Guobin Shen, and Yongguang Zhang. Beepbeep: A high-accuracy acoustic-based system for ranging and localization using cots devices. *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.*, 11(1), apr 2012.
- [87] Kaikai Liu, Xinxin Liu, and Xiaolin Li. Guoguo: Enabling fine-grained indoor localization via smartphone. In *Proceeding of the 11th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services, MobiSys '13*, page 235–248, New York, NY, USA, 2013. Association for Computing Machinery.
-

-
- [88] Binghao Li, Thomas Gallagher, Andrew G Dempster, and Chris Rizos. How feasible is the use of magnetic field alone for indoor positioning? In *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–9, 2012.
- [89] Brandon Gozick, Kalyan Pathapati Subbu, Ram Dantu, and Tomyo Maeshiro. Magnetic maps for indoor navigation. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(12):3883–3891, 2011.
- [90] Zahid Farid, Rosdiadee Nordin, and Mahamod Ismail. Recent advances in wireless indoor localization techniques and system. *Journal of Computer Networks and Communications*, 2013:185138, Sep 2013.
- [91] Yuan Zhuang, Jun Yang, You Li, Longning Qi, and Naser El-Sheimy. Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy beacons. *Sensors*, 16(5), 2016.
- [92] Carles Gomez, Joaquim Oller, and Josep Paradells. Overview and evaluation of bluetooth low energy: An emerging low-power wireless technology. *Sensors*, 12(9):11734–11753, 2012.
- [93] Yapeng Wang, Xu Yang, Yutian Zhao, Yue Liu, and Laurie Cuthbert. Bluetooth positioning using rssi and triangulation methods. In *2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pages 837–842, 2013.
- [94] Mohamed Er Rida, Fuqiang Liu, Yassine Jadi, Amgad Ali Abdullah Algawhari, and Ahmed Askourih. Indoor location position based on bluetooth signal strength. In *2015 2nd International Conference on Information Science and Control Engineering*, pages 769–773, 2015.
- [95] Gabriel Deak, Kevin Curran, and Joan Condell. A survey of active and passive indoor localisation systems. *Computer Communications*, 35(16):1939–1954, 2012.
- [96] Alessio De Angelis, John Nilsson, Isaac Skog, Händel Peter, and Paolo Carbone. Indoor positioning by ultrawide band radio aided inertial navigation. *Metrology and Measurement Systems*, 17(3):447–460, 2010.
- [97] Enrique García, Pablo Poudereux, Álvaro Hernández, Jesús Ureña, and David Gualda. A robust uwb indoor positioning system for highly complex environments. In *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, pages 3386–3391, 2015.
- [98] Vishal Singh, Gorish Aggarwal, and B V S Ujwal. Ensemble based real-time indoor localization using stray wifi signal. In *2018 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, pages 1–5, 2018.
- [99] Suining He and S.-H. Gary Chan. Wi-fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 18(1):466–490, 2016.
- [100] Kamol Kaemarungsi. *Design of Indoor Positioning Systems Based on Location Fingerprinting Technique*. PhD thesis, School of Information Science, University of Pittsburgh, 2005.
-

-
- [101] Landu Jiang. *A WLAN Fingerprinting Based Indoor Localization Technique*. PhD thesis, University of Nebraska, 07 2012.
- [102] Jianwei Niu, Banghui Lu, Long Cheng, Yu Gu, and Lei Shu. Ziloc: Energy efficient wifi fingerprint-based localization with low-power radio. In *2013 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pages 4558–4563, 2013.
- [103] L.M. Ni, Yunhao Liu, Yiu Cho Lau, and A.P. Patil. Landmarc: indoor location sensing using active rfid. In *Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, 2003. (PerCom 2003).*, pages 407–415, 2003.
- [104] C. Wang, H. Wu, and N.-F. Tzeng. Rfid-based 3-d positioning schemes. In *IEEE INFOCOM 2007 - 26th IEEE International Conference on Computer Communications*, pages 1235–1243, 2007.
- [105] Daqiang Zhang, Laurence Tianruo Yang, Min Chen, Shengjie Zhao, Minyi Guo, and Yin Zhang. Real-time locating systems using active rfid for internet of things. *IEEE Systems Journal*, 10(3):1226–1235, 2016.
- [106] Samer S. Saab and Hamze Msheik. Novel rfid-based pose estimation using single stationary antenna. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(3):1842–1852, 2016.
- [107] Masoumeh Hasani, Jukka Talvitie, Lauri Sydänheimo, Elena-Simona Lohan, and Leena Ukkonen. Hybrid wlan-rfid indoor localization solution utilizing textile tag. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14:1358–1361, 2015.
- [108] Andreas Ettlinger and Günther Retscher. Positioning using ambient magnetic fields in combination with wi-fi and rfid. In *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–8, 2016.
- [109] Oscar De Silva, George K. I. Mann, and Raymond G. Gosine. An ultrasonic and vision-based relative positioning sensor for multirobot localization. *IEEE Sensors Journal*, 15(3):1716–1726, 2015.
- [110] Sergio Sosa-Sesma and Antoni Perez-Navarro. Fusion system based on wifi and ultrasounds for in-home positioning systems: The utopia experiment. In *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, pages 1–8, 2016.
-