

# Plataforma IoT para la provisión de servicios en procesos industriales

**Doctorado en Informática**

**UNIVERSIDAD DE ALMERÍA**



Autor:

**Manuel Muñoz Rodríguez**

Supervisores:

Jorge Antonio Sánchez Molina

Manuel Torres Gil

Almería,  
marzo 2023



## Tesis doctoral

Plataforma IoT para la provisión de servicios en procesos industriales



Tesis presentada en el Departamento de Informática y en la Escuela Internacional de Doctorado de la Universidad de Almería para la obtención del grado de Doctor en Informática (RD 99/11)

Autor

**Manuel Muñoz Rodríguez**

Supervisores

Dr. Jorge Antonio Sánchez Molina

Dr. Manuel Torres Gil

Almería, marzo 2023

PUBLICADO POR UNIVERSIDAD DE ALMERÍA



Licencia bajo Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 Spain (CC BY-NC-SA 4.0 ES). No puede utilizar este archivo excepto en cumplimiento de la Licencia. Puede obtener una copia de la Licencia en <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.en>. A menos que sea requerido por la ley aplicable o acordado por escrito, el software distribuido bajo la licencia se distribuye «COMO ES» EN BASE, SIN GARANTÍAS NI CONDICIONES DE NINGÚN TIPO, ya sea expresa o implícita. Consulte la Licencia para ver el idioma específico que rige los permisos y limitaciones bajo la Licencia.

Fotos e ilustraciones: Flaticon.

Créditos del documento: Mathias Legrand (plantilla de  $\LaTeX$ ), Juan Diego Gil Vergel y Jerónimo Ramos Teodoro (adaptaciones de la plantilla).

*Primera impresión, marzo 2023*



## Ph.D. Thesis

IoT platform for service provisioning in industrial processes



A thesis submitted to the Department of Informatics and the International PhD School  
of the University of Almería for the degree of Doctor of Philosophy in Informatics  
(RD 99/11)

Author

**Manuel Muñoz Rodríguez**

Supervisors

Dr. Jorge Antonio Sánchez Molina

Dr. Manuel Torres Gil

Almería, March 2023

PUBLISHED BY UNIVERSITY OF ALMERÍA



Licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 Spain (CC BY-NC-SA 4.0 ES). You may not use this file except in compliance with the License. You can obtain a copy of the License at <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.en>. Unless required by applicable law or agreed to in writing, software distributed under the License is distributed on an “AS IS” BASIS, WITHOUT WARRANTIES OR CONDITIONS OF ANY KIND, either express or implied. See the License for the specific language governing permissions and limitations under the License.

Photo and illustration credits: Flaticon.

Document layout credits: Mathias Legrand (L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X template), Juan Diego Gil Vergel y Jerónimo Ramos Teodoro (adaptations of the template).

*First printing, March 2023*



*A mis padres, Juan y Jali,  
a mis hermanos, Juan y María,  
a María,  
y  
amigos.*



## Agradecimientos

Deseo aprovechar estas primeras páginas para expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que han estado presentes y han contribuido de alguna manera en el desarrollo de esta tesis doctoral, especialmente a aquellos que siempre han confiado en mí y me han animado a no rendirme en el camino.

En primer lugar, me gustaría hacer una mención especial a mis directores de tesis, Jorge Sánchez y Manolo Torres. Sus enseñanzas, orientación y apoyo incondicional han sido fundamentales en el camino. A ellos les doy las gracias por ser una fuente constante de inspiración y motivación. Jorge, aún recuerdo el primer café que nos tomamos en la cafetería de Humanidades donde me explicaste la magnitud del proyecto IoF2020 y la posibilidad de mi contratación; la oportunidad de desarrollar un proyecto Europeo junto a un Grupo de Investigación como el de Automática, Robótica y Mecatrónica era muy difícil de rechazar, aunque me encontrara profesionalmente fuera del ámbito académico. Muchas gracias por confiar en mí, por enseñarme el valor de la multitarea y por empujarme a cursar el doctorado. Nunca olvidaré todos los viajes que hemos hecho juntos, aún queda pendiente Cancún, gracias por todo. Manolo, solo puedo agradecerte el sacrificio y la implicación que has mostrado durante este camino, es un placer coincidir contigo. Tu mente abierta y tu pasión por aprender me han inspirado a buscar nuevas formas de abordar los problemas. Aunque no tuve la oportunidad de tenerte como profesor durante mis estudios como ingeniero informático, puedo ver la pasión y el asombro que despiertas en las personas cuando defiendes una idea. De una forma o de otra has despertado en mí esa pasión por aprender cada día algo nuevo. Gracias por participar en esta tesis.

Me gustaría agradecer a todos mis compañeros del Grupo de Investigación de Automática, Robótica y Mecatrónica su apoyo y colaboración durante este tiempo. Siempre me he sentido rodeado de un grupo de amigos, gracias a su cercanía y forma de tratar a las personas. Paco, Manolo, José Luis Guzmán, José Carlos, Antonio, Manolo Pérez, María del Mar, José Luis Torres, Domingo, José Luis Blanco, Juan Diego, Jero, Marta, Ángeles, Paco García, Kiko, Quique, Fernando, Pablo, Malena, Rubén, Lidia, Pepe Carballo, Javi Bonilla, Andrzej, Julián, Luis, un placer aprender de los mejores y trabajar con vosotros. Me gustaría hacer una mención especial a Manolo Berenguel por la confianza depositada en mí para el desarrollo del proyecto

loF2020 y la comprensión con alguna que otra PSI perdida en el camino, me has demostrado que confías más en mí que yo mismo; a José Luis Guzmán, no tengo palabras suficientes para expresar mi gratitud. Me has enseñado a ver las cosas de forma más positiva y a luchar la «carrera» hasta el final sin rendirme. Eres un referente tanto a nivel profesional como personal, un ejemplo de superación, dedicación y pasión en todo lo que haces; una parte importante de esta tesis. A Paco Rodríguez, por apoyar mi crecimiento personal y profesional, dentro y fuera de la Universidad, siempre disponible en el momento preciso. Ahora podemos decir que no serás el único Rodríguez con un doctorado. A los «Los compadres», José Luis Torres, Domingo, Juan Diego y Jero, un grupo de amigos con el que se puede contar en las buenas y en las malas, gracias por aguantar mi asedio de preguntas a altas horas de la madrugada y por casi obligarme a coger la famosa PSI. Me gustaría agradecer en particular a Domingo por enseñarme cómo se da una auténtica clase magistral de robótica antes de mi primera sesión de prácticas; José Luis Torres y tú, grandes culpables de mis inicios en la docencia; a Jero, por tratar de contagiarme su perfección a la hora de realizar un documento y por nuestro viaje a Portugal, probablemente los primeros COVID no reconocidos en Almería. A Juan Diego, por ayudarme con mi primer artículo. Aun siendo doctorando, sacaste tiempo para enseñarme algunos de los entresijos del mundo de la investigación, gracias. No puedo olvidarme del despacho 2.10 del edificio CITIC, han pasado muchos compañeros por él, pero me gustaría agradecer en especial a Paco García la disciplina que muestra a la hora de trabajar y aguantar mis insistentes cuestiones acerca de la vida y temas burocráticos. Gracias por hacer de ese despacho un entorno de trabajo perfecto (aunque algunas veces haga frío por la famosa ventana abierta). Cada día intento aprender cómo tener una mesa de trabajo bien ordenada.

Quiero dar las gracias a la Escuela Internacional de Doctorado, en especial a Luis Iribarne por su labor como coordinador del programa de doctorado y al Departamento de Informática.

No puedo olvidarme de mis amigos Granadinos, Tailandeses, Jerezanos, Alicanteños y Almerienses, que aunque durante esta etapa hemos estado más distanciados de lo normal, siempre sacáis un rato para ese «¿Qué tal va la tesis, Manolo?». Manuel, gracias por esas llamadas de 30 minutos para ponernos al día y saber que todo va bien. Al Comité de Expertos (Lyra), a Pablo y David por soportar esos audios de *WhatsApp* y sus insistentes frases de «Manolo, vente al sector privado que vivimos muy bien». Gracias por apoyarme y animarme siempre a seguir luchando.

Lógicamente, quiero agradecer a mi familia todo el apoyo y ánimo recibido durante este camino. Juan y Jali, gracias por ser unos padres así, quien me conoce sabe que he pasado algunos momentos difíciles en la vida y para mí es un orgullo decir que nunca me he sentido solo. No podría haber nacido en una familia mejor, os quiero. Juanito y María, gracias por ser mis hermanos, siempre me sacáis una sonrisa y me demostráis que los límites me los pongo yo. Tenéis confianza ciega en mí y eso me impulsa a luchar por lo que realmente deseo. Me habéis apoyado en las mejores decisiones y quizás, en algunas no tan buenas, pero en ese momento probablemente necesitaba de ese apoyo, gracias. Sin vosotros 4 no hubiera llegado hasta aquí.

Finalmente, quiero agradecer a María, uno de los pilares fundamentales de mi vida, por todo el apoyo, cariño, dedicación, ayuda y comprensión que ha mostrado a lo largo de este camino. No sé si alguna vez te lo he dicho, pero sinceramente siento admiración por ti, eres incansable e inagotable cuando te propones algo. Has despertado en mí ese espíritu de superación y lucha que llevaba dormido desde hace tiempo. Eres una persona que brilla por sí sola y haces brillar a todos los que están a tu alrededor. Solo os puedo recomendar que pongáis una Lolilla en vuestra vida.

*Muchas gracias a todos,  
Manolo*



**Apoyo económico:**

Esta investigación no se podría haber llevado a cabo sin el apoyo económico del proyecto IoF2020, financiado por el programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea, bajo el acuerdo de subvención n.º 731884.

## Resumen

La sociedad actual se enfrenta a una serie de preocupaciones ambientales y de sostenibilidad que tienen un gran impacto en el planteamiento de la vida tal y como se venía desarrollando hasta ahora. Una de las principales preocupaciones es el cambio climático, que está provocando cambios en el clima y el medioambiente a nivel mundial. Además, la escasez de recursos vitales como el agua dulce y los alimentos está siendo un problema cada vez más importante debido al crecimiento de la población mundial y la demanda cada vez mayor de estos suministros. Estos problemas ambientales y de sostenibilidad tienen un impacto directo en la calidad de vida de las personas y en el funcionamiento de los sistemas económicos y sociales. Por lo tanto, es crucial abordar estas preocupaciones y buscar soluciones sostenibles para garantizar un futuro habitable para todos.

En este contexto, la escasez de recursos naturales y el cambio climático son problemas que preocupan a autoridades a nivel global y que han llevado a la implementación de diversas iniciativas socioeconómicas y proyectos de investigación para tratar de abordarlos. La tecnología, y en particular la tecnología del Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*), se postula como una herramienta que puede jugar un papel fundamental en la solución de estos problemas, ya que puede ayudar a mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en diversos ámbitos de la sociedad y en particular del sector industrial.

El IoT es una tecnología en constante crecimiento que permite la conexión de dispositivos para recopilar y transmitir información del entorno en el que se encuentran. Estos entornos se llaman ecosistemas IoT y están compuestos por todos los objetos inteligentes con capacidad de conexión a Internet. Se espera que en el futuro cercano haya un aumento significativo en el número de dispositivos IoT, permitiendo disponer de entornos inteligentes. Sin embargo, esta tecnología presenta una serie de desafíos relacionados con la comunicación a Internet y la gestión de los datos generados por los dispositivos. Estos retos o desafíos están asociados a la naturaleza heterogénea del IoT, que hace referencia a la gran variedad de dispositivos, fabricantes y tecnologías que se emplean en la implementación del IoT. Esto incluye dispositivos de diferentes tamaños, formas y funciones, así como diferentes tecnologías de conectividad y plataformas de *hardware* y *software*. Esta heterogeneidad dificulta la integración y el uso efectivo del IoT, ya que puede ser difícil hacer que los diferentes dispositivos y tecnologías trabajen

conjuntamente de manera coherente. Es importante tener en cuenta esta heterogeneidad al diseñar y desplegar soluciones basadas en el IoT y asegurarse de que se tienen en cuenta las necesidades y requisitos de los diferentes dispositivos y tecnologías involucradas.

Hasta la fecha, la mayoría de los trabajos de investigación se han visto centrados en el desarrollo de plataformas de gestión para la monitorización del sector industrial centradas en la investigación de nuevas líneas de mejora, como la utilización de sensores de bajo coste y *software* para la ayuda a la toma de decisiones con el objetivo de mejorar la eficiencia de producción del sector. Estos trabajos han provocado una gran inquietud por parte de los investigadores para tratar de obtener sistemas más eficientes y sostenibles que traten de ayudar a las dificultades de esta tecnología. Por lo tanto, la tecnología de IoT ha entrado en una nueva fase de investigación, en la cual, los trabajos deben estar dirigidos a aportar soluciones a la heterogeneidad de los ecosistemas y a la gestión eficiente de los datos. Esto incluye la implementación de soluciones que permitan la aplicación de la tecnología de IoT en múltiples dominios con plataformas escalables y la mejora de la forma en que se almacenan, procesan y analizan los datos, homogeneizándolos y estandarizándolos para obtener información valiosa y ayudar a la toma de decisiones.

El objetivo principal de esta tesis doctoral es desarrollar una plataforma IoT para la provisión de servicios en procesos industriales. Esta plataforma debe integrar diferentes tipos de datos y reunirlos en un único lugar para facilitar la gestión y acceso de los usuarios. La plataforma IoT debe garantizar la homogeneidad e interoperabilidad entre plataformas y dispositivos en términos sintácticos y semánticos mediante el uso de estándares en modelos de datos para el intercambio de información. Además, debe incluir modelos predictivos para apoyar en la toma de decisiones y ser accesible en línea sin depender de un *software*. La plataforma IoT debe ser versátil para permitir su escalabilidad a otros sectores industriales y cubrir el ciclo completo de producción, proporcionando servicios en la nube para la provisión de dispositivos, monitorización y gestión de la planta.

La primera fase de desarrollo de la tesis doctoral se centra en una revisión de la literatura relevante sobre el IoT, características, objetivos, arquitecturas de referencia, niveles de interoperabilidad, tecnologías complementarias y la utilización de modelo para la optimización de recursos, con el fin de proponer una solución a la interoperabilidad y a los sistemas de apoyo a la toma de decisiones tradicionales. Seguidamente, se procede con la fase dos del proyecto de tesis, el desarrollo de una plataforma IoT para la gestión de cultivo en invernadero que permita adaptarse fácilmente a diferentes sectores industriales, promoviendo la estandarización de los servicios y la optimización de los recursos. Para ello se desarrolla una arquitectura modular dividida en capas formada por microservicios sobre contenedores, lo que aporta escalabilidad al sistema. Además, se emplea como núcleo un modelo de datos estándar para abordar la problemática de la interoperabilidad. Seguidamente, se procede con el desarrollo e implementación de los modelos en invernadero como servicios accesibles a través de Internet, aportando modelos de clima, producción y riego, cubriendo dos de los principales objetivos de la tesis. Esta segunda fase es validada en un invernadero piloto y posteriormente escalada a invernaderos en producción real en la provincia de Almería. Esto da como resultado la aplicación *iVeg*, que cuenta con un registro de propiedad intelectual n.º 04/2022/956. La plataforma IoT propuesta ha sido aplicada a diferentes sectores industriales heterogéneos y diferenciados, asociados a tres proyectos Europeos financiados por la Unión Europea y un proyecto nacional.

En tercera fase del desarrollo de la tesis doctoral, se busca mejorar la solución IoT propuesta aplicándola a la gestión de datos a gran escala de un sistema de producción de biomasa a escala industrial mediante el cultivo de microalgas. Esto se hace en respuesta a la falta de

digitalización del sector y los problemas de accesibilidad a los datos. La solución permite la monitorización del ciclo completo de producción de la planta, incluyendo el provisionamiento de nuevos sensores, fotobiorreactores y consulta de datos. Se ha utilizado una planta de producción de biomasa real para validar el correcto funcionamiento de la plataforma. Además, esta solución proporciona servicios gráficos y de consulta a técnicos, investigadores y empresas para la extracción de datos a través de servicios en la nube con datos estandarizados, cumpliendo con otro de los objetivos de esta tesis.

La cuarta fase se centra en el desarrollo teórico de una arquitectura de gestión del agua basada en IoT para la aplicación en distritos agroindustriales con el objetivo de facilitar la integración de datos y el uso de algoritmos de optimización y control en la nube. Se han realizado pruebas de simulación en un entorno agroindustrial formado por tres instalaciones reales que incluye una planta desalinizadora, conexión a la red de servicios públicos y varios agentes consumidores. Esta arquitectura ofrece servicios en la nube basados en modelos de datos interoperables y estándares, permitiendo efectuar operaciones de control y optimización en tiempo real. El análisis comparativo de costes realizado con una operación manual muestra un ahorro de aproximadamente el 75% del coste operativo.

Para concluir, la estructura del presente documento se ha dividido en cuatro partes de acuerdo a la normativa de la Universidad de Almería para tesis presentadas en la modalidad por compendio de publicaciones:

- El capítulo 1 describe el contexto que motivó el desarrollo de esta tesis y la tecnología del IoT. También se presenta la estructura del trabajo y las publicaciones que cubren cada uno de los temas tratados.
- El capítulo 2 presentan las contribuciones científicas que respaldan esta tesis por compendio.
- El capítulo 3 presenta las conclusiones generales y específicas derivadas de las diferentes contribuciones, así como las nuevas líneas de investigación futuras.
- Para finalizar, el capítulo 4 incluye una lista de otras aportaciones científicas derivadas de esta tesis doctoral.



## Abstract

Today, society faces a number of environmental and sustainability concerns that are having a major impact on the way of life we have been living. One of the main concerns is climate change, which is causing changes in the global climate and environment. In addition, the scarcity of vital resources such as fresh water and food is becoming an increasingly important issue due to the growth of the world's population and the ever-increasing demand for these supplies. These environmental and sustainability issues have a direct impact on people's quality of life and the functioning of economic and social systems. It is therefore crucial to address these concerns and seek sustainable solutions to ensure a livable future for all.

In this context, the scarcity of natural resources and climate change are issues of concern to authorities globally and have led to the implementation of various socioeconomic initiatives and research projects to try to address them. Technology, and in particular Internet of Things (IoT) technology, are tools that can play a key role in addressing these issues, as it can help improve efficiency and sustainability in various areas of society and particularly in the industrial sector.

IoT is an ever-growing technology that enables the connection of devices to collect and transmit information from the environment in which they are located. These environments are called IoT ecosystems and are composed of all smart objects with Internet connectivity capabilities. It is expected that in the near future there will be a significant increase in the number of IoT devices, enabling smart environments. However, this technology presents a number of challenges related to Internet communication and the management of data generated by the devices. These challenges are associated with the heterogeneous nature of IoT, which refers to the wide variety of devices, manufacturers and technologies used in IoT implementation. This includes devices of different sizes, shapes and functions, as well as different connectivity technologies and hardware and software platforms. This heterogeneity makes it difficult to integrate and effectively use the IoT, as it can be difficult to make the different devices and technologies work together in a coherent way. It is important to take this heterogeneity into account when designing and deploying IoT-based solutions and ensure that the needs and requirements of the different devices and technologies involved are taken into account.

To date, most of the research work has been focused on the development of management

platforms for monitoring the industrial sector, focusing on the investigation of new lines of improvement, such as the use of low-cost sensors and software for decision support with the aim of improving the sector's production efficiency. These works have provoked a great concern for researchers to try to obtain more efficient and sustainable systems that try to help the difficulties of this technology. Therefore, IoT technology has entered a new phase of research, in which, the works must be aimed at providing solutions to the heterogeneity of ecosystems and efficient data management. This includes implementing solutions that enable the application of IoT technology in multiple domains with scalable platforms and improving the way data is stored, processed and analyzed, homogenizing and standardizing it to obtain valuable information and aid decision-making.

The main objective of this doctoral thesis is to develop an IoT platform for the provision of services in industrial processes. This platform must integrate different types of data and bring them together in a single place to facilitate user management and access. The IoT platform must ensure homogeneity and interoperability between platforms and devices in syntactic and semantic terms by using standards in data models for information exchange. In addition, it must include predictive models to support decision-making and be accessible online without relying on software. The IoT platform must be versatile to allow scalability to other industrial sectors and cover the entire production cycle, providing cloud services for device provisioning, monitoring and plant management.

The first phase of development of the PhD thesis focuses on a review of the relevant literature on IoT, characteristics, objectives, reference architectures, levels of interoperability, complementary technologies and the use of a model for resource optimization, to propose a solution to interoperability and traditional decision support systems. Next, we proceed with phase two of the thesis project, the development of an IoT platform for greenhouse crop management that can be easily adapted to different industrial sectors, promoting the standardization of services and the optimization of resources. For this purpose, a modular architecture divided into layers formed by microservices on containers is developed, which provides scalability to the system. In addition, a standard data model is used at the core to address interoperability issues. The next step is the development and implementation of greenhouse models as a service accessible through the Internet, providing climatic, production, and irrigation models, covering two of the main objectives of the thesis. This second phase was validated in a pilot greenhouse and later scaled to real production greenhouses in the province of Almeria. This results in the *iVeg* application, which has an intellectual property registration no. 04/2022/956. The proposed IoT platform has been applied to different heterogeneous and differentiated industrial sectors, associated to three European projects funded by the European Union and one national project.

The third phase of the development of the doctoral thesis seeks to improve the proposed IoT solution by applying it to the large-scale data management of an industrial-scale biomass production system through the cultivation of microalgae. This is done in response to the lack of digitization of the sector and the problems of data accessibility. The solution allows monitoring of the complete production cycle of the plant, including provisioning of new sensors, photobioreactors and data query. A real biomass production plant has been used to validate the correct functioning of the platform. In addition, this solution provides graphical and query services to technicians, researchers, and companies for data extraction through cloud services with standardized data, fulfilling another objective of this thesis.

The fourth phase of the development of the thesis focuses on the theoretical development of an IoT-based water management architecture for application in agro-industrial districts, with the aim of facilitating data integration and the use of optimization and control algorithms in the cloud.

Simulation tests have been performed in an agro-industrial environment consisting of three real facilities including a desalination plant, utility grid connection and several consuming agents. This architecture offers cloud services based on interoperable and standard data models, allowing real-time control and optimization operations. The comparative cost analysis performed with a manual operation shows how around 75% of the operating cost can be saved.

To conclude, the structure of this document has been divided into four parts according to the regulations of the University of Almeria for theses presented in the modality of compendium of publications:

- Chapter 1 describes the context that motivated the development of this thesis and IoT technology. It also presents the structure of the work and the publications that cover each of the topics covered.
- The second chapter presents the scientific contributions that support this thesis by compendium.
- Chapter 3 presents the general and specific conclusions derived from the different contributions, as well as new lines of future research.
- Finally, Chapter 4 includes a list of other scientific contributions derived from this doctoral thesis.





## Índice general

Agradecimientos .....	III
Resumen .....	VII
Abstract .....	XI
Índice de figuras .....	XIX
Índice de tablas .....	XXI
Siglas y acrónimos .....	XXIII

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Contexto y motivación .....</b>	<b>1</b>
1.1.1 Escasez de recursos, nuevas necesidades .....	2
1.1.2 La importancia de la digitalización .....	3
1.1.3 Internet of Things: respuesta a las nuevas necesidades .....	4
1.1.4 Heterogeneidad de los dispositivos, falta de interoperabilidad .....	6
1.1.5 Contexto de investigación .....	7
<b>1.2 Breve introducción al IoT: conceptos básicos y arquitectura .....</b>	<b>9</b>
1.2.1 ¿Qué es el IoT? Características .....	9
1.2.2 Objetos inteligentes .....	11
1.2.3 Arquitecturas IoT .....	14
1.2.4 Aplicaciones del IoT .....	16
1.2.5 Retos en el desarrollo IoT .....	17

<b>1.3</b>	<b>Breve introducción a la interoperabilidad en el IoT</b> .....	<b>18</b>
1.3.1	Interoperabilidad entre dispositivos .....	20
1.3.2	Interoperabilidad de red .....	21
1.3.3	Interoperabilidad sintáctica .....	27
1.3.4	Interoperabilidad semántica .....	29
1.3.5	Interoperabilidad entre plataformas .....	29
<b>1.4</b>	<b>Tecnología habilitadora para el IoT Cloud Computing</b> .....	<b>33</b>
1.4.1	Edge Computing .....	33
1.4.2	Fog Computing .....	35
1.4.3	Cloud Computing .....	36
1.4.4	Cloud of Things .....	39
<b>1.5</b>	<b>Modelos como servicio para la optimización de recursos</b> .....	<b>40</b>
<b>1.6</b>	<b>Investigación realizada</b> .....	<b>42</b>
1.6.1	Breve descripción de las instalaciones usadas como referencia .....	43
1.6.2	Arquitectura conceptual empleada en la investigación realizada .....	47
1.6.3	Plataforma IoT para la integración de datos y modelos como servicio en el sector agrícola .....	50
1.6.4	Plataforma IoT para la gestión de datos en una planta de cultivo de microalgas a escala industrial .....	51
1.6.5	Arquitectura IoT para la gestión de los recursos hídricos en entornos agroindustriales .....	52
<b>Capítulo 2.</b>	<b>Contribuciones a revistas científicas</b> .....	<b>55</b>
<b>2.1</b>	<b>Plataforma IoT para la integración de datos y modelos como servicio en el sector agrícola</b> .....	<b>57</b>
<b>2.2</b>	<b>Plataforma IoT para la gestión de datos en una planta de cultivo de microalgas a escala industrial</b> .....	<b>69</b>
<b>2.3</b>	<b>Arquitectura IoT para la gestión de los recursos hídricos en entornos agroindustriales</b> .....	<b>82</b>
<b>Capítulo 3.</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b> .....	<b>105</b>
<b>3.1</b>	<b>Conclusiones generales</b> .....	<b>105</b>
3.1.1	Conclusiones de la plataforma IoT para la integración de datos y modelos como servicio en el sector agrícola .....	107
3.1.2	Conclusiones de la plataforma IoT para la gestión de datos en una planta de cultivo de microalgas a escala industrial .....	108
3.1.3	Conclusiones de la arquitectura IoT para la gestión de los recursos hídricos en entornos agroindustriales .....	108
<b>3.2</b>	<b>Líneas futuras de investigación</b> .....	<b>109</b>
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Otras contribuciones</b> .....	<b>113</b>
<b>4.1</b>	<b>Publicaciones y trabajos de investigación derivados</b> .....	<b>113</b>
4.1.1	Contribuciones a conferencias internacionales .....	113
4.1.2	Contribuciones a conferencias nacionales .....	114
4.1.3	Colaboración en proyectos de investigación .....	114
4.1.4	Contratos con empresas .....	115
4.1.5	Colaboración en proyectos docentes .....	115
4.1.6	Contribución como revisor .....	115

<b>4.2</b>	<b>Actividades pedagógicas .....</b>	<b>115</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>117</b>



## Índice de figuras

1.1	Previsión del crecimiento mundial para 2100 [5]	2
1.2	Evolución industrial. Adaptación de [26]	4
1.3	Evolución de los dispositivos IoT conectados. Adaptación de [38]	5
1.4	Falta de interoperabilidad entre empresas	7
1.5	Características del IoT	10
1.6	Arquitectura IoT por capas. Adaptación de [62]	14
1.7	Aplicaciones del IoT	16
1.8	Retos en el desarrollo IoT. Adaptación de [67]	17
1.9	Niveles de interoperabilidad en el IoT. Adaptación de [40]	19
1.10	Arquitectura de referencia FIWARE	31
1.11	Ubicación de los dispositivos IoT en la computación por capas. Adaptación de [131]	34
1.12	Virtualización basada en contenedores y en hipervisores	37
1.13	Modelos disponibles en el <i>cloud computing</i>	39
1.14	Modalidad de uso de GMaaS	42
1.15	Invernadero piloto empleado, a la derecha, los cultivos más representativos de la zona: tomate y pimiento	44
1.16	Instalaciones SABANA	45
1.17	Representación del distrito agroindustrial	46
1.18	Diseño de la arquitectura conceptual utilizada	47
1.19	Flujo de trabajo JWT en <i>iVeg</i>	49



## Índice de tablas

1.1	Clases de dispositivos IoT restringidos: clase 0, clase 1, clase 2. Adaptación de [58]	13
1.2	Características de los protocolos	24
1.3	Estructura de JWT	49
2.1	Información de la contribución 1	57
2.2	Información de la contribución 2	69
2.3	Información de la contribución 3	82





## Siglas y acrónimos

<b>6lowPAN</b>	Ipv6 Sobre Redes Inalámbricas de Área Personal de Baja Potencia, del inglés <i>IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks</i>
<b>API</b>	Interfaz de Programa de Aplicación, del inglés <i>Application Program Interface</i>
<b>ARIB</b>	Asociación de Industrias y Empresas de Radio, del inglés <i>Association of Radio Industries and Businesses</i>
<b>ARM TEP-197</b>	Automática, Robótica y Mecatrónica Tep-197
<b>ATIS</b>	Alianza para las Soluciones del Sector de las Telecomunicaciones, del inglés <i>Alliance for Telecommunications Industry Solutions</i>
<b>BG</b>	Crecimiento Azul, del inglés <i>Blue Growth</i>
<b>BLE</b>	Bluetooth de Baja Energía, del inglés <i>Bluetooth Low Energy</i>
<b>Bluetooth SIG</b>	Grupo de Interés Especial Bluetooth, del inglés <i>Bluetooth Special Interest Group</i>
<b>CASAGRAS</b>	Consortio Acción de Coordinación y Apoyo a las Actividades Mundiales Relacionadas con la RFID y la Normalización, del inglés <i>Coordination And Support Action for Global RFID-related Activities and Standardisation</i>
<b>CCSA</b>	Asociación China de Normas de Comunicación, del inglés <i>China Communications Standards Association</i>
<b>CERP-IoT</b>	Clúster de Proyectos Europeos de Investigación sobre IoT, del inglés <i>Cluster of European Research Project on the Internet of Things</i>
<b>CHROMAE</b>	Control y Gestión Óptima de Recursos Heterogéneos en Distritos Productivos Agroindustriales Integrando Energías Renovables, del inglés <i>Control and Optimal Management of Heterogeneous Resources in Agroindustrial Production Districts Integrating Renewable Energies</i>

<b>CoAP</b>	Protocolo de Aplicación Restringida, del inglés <i>Constrained Application Protocol</i>
<b>CoT</b>	Nube de los Objetos, del inglés <i>Cloud of Things</i>
<b>D2C</b>	Dispositivo a Nube, del inglés <i>Device to Cloud</i>
<b>D2D</b>	Dispositivo a Dispositivo, del inglés <i>Device to Device</i>
<b>D2G</b>	Dispositivo a <i>Gateway</i> , del inglés <i>Device to Gateway</i>
<b>MD</b>	Destilación por Membranas, del inglés <i>Membrane Distillation</i>
<b>DSS</b>	Sistema de Ayuda a la Toma de Decisiones, del inglés <i>Decision Support System</i>
<b>DTLS</b>	Seguridad de la Capa de Transporte de Datagramas, del inglés <i>Datagram Transport Layer Security</i>
<b>ETL</b>	Extracción, Transformación y Carga, del inglés <i>Extract, Transform and Load</i>
<b>ETSI</b>	Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación, del inglés <i>European Telecommunications Standards Institute</i>
<b>FAO</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, del inglés <i>Food and Agriculture Organization</i>
<b>FCN</b>	Nodos <i>Fog</i> de Computación, del inglés <i>Fog Computing Nodes</i>
<b>FMI</b>	Sistema de Gestión Agrícola, del inglés <i>Farm Management System</i>
<b>GEs</b>	Habilitadores Genéricos, del inglés <i>Generic Enablers</i>
<b>GMaaS</b>	Modelos de Invernadero como Servicio, del inglés <i>Greenhouse Models as a Service</i>
<b>GSP</b>	Alianza Mundial sobre Suelos para la Seguridad Alimentaria y la Adaptación al Cambio Climático, del inglés <i>Global Soil Partnership</i>
<b>H2020</b>	Horizonte 2020, del inglés <i>Horizon 2020</i>
<b>HTTP</b>	Protocolo de Transferencia de Hipertexto, del inglés <i>Hypertext Transfer Protocol</i>
<b>HTTPS</b>	Protocolo de Transferencia de Hipertexto Seguro, del inglés <i>HyperText Transfer Protocol Secure</i>
<b>IaaS</b>	Infraestructura como Servicio, del inglés <i>Infrastructure as a Service</i>
<b>IAB</b>	Junta de Arquitectura de Internet, del inglés <i>Internet Architecture Board</i>
<b>IEC</b>	Comisión Electrotécnica Internacional, del inglés <i>International Electrotechnical Commission</i>
<b>IEEE</b>	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, del inglés <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>IETF</b>	Grupo Operativo de Ingeniería de Internet, del inglés <i>Internet Engineering Task Force</i>

---

<b>IFAPA</b>	Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera Andaluz
<b>IoF2020</b>	Internet de los Alimentos y la Agricultura 2020, del inglés <i>Internet of Food and Farm 2020</i>
<b>IoT</b>	Internet de las Cosas, del inglés <i>Internet of Things</i>
<b>IP</b>	Protocolo de Internet, del inglés <i>Internet Protocol</i>
<b>ISO</b>	Organización Internacional de Normalización, del inglés <i>International Organization for Standardization</i>
<b>ITU</b>	Unión Internacional de Telecomunicaciones, del inglés <i>International Telecommunication Union</i>
<b>JCR</b>	<i>Journal Citation Report</i>
<b>JSON</b>	Notación de Objetos Javascript, del inglés <i>JavaScript Object Notation</i>
<b>JWT</b>	Token Web Json, del inglés <i>JSON Web Token</i>
<b>KVM</b>	Máquina Virtual Basada en el Núcleo, del inglés <i>Kernel-based Virtual Machine</i>
<b>LAN</b>	Red de Área Local, del inglés <i>Local Area Network</i>
<b>LR-WPAN</b>	Red de Área Personal Inalámbrica de Baja Velocidad, del inglés <i>Low-Rate Wireless Personal Area Network</i>
<b>LXC</b>	Contenedores Linux, del inglés <i>LinuX Containers</i>
<b>M2M</b>	Máquina a Máquina, del inglés <i>Machine-to-Machine</i>
<b>MAC</b>	Control de Acceso a los Medios, del inglés <i>Media Access Control</i>
<b>MEC</b>	Computación Perimetral de Acceso Múltiple, del inglés <i>Multi-access Edge Computing</i>
<b>MPC</b>	Control Predictivo por Modelo, del inglés <i>Model Predictive Control</i>
<b>NFC</b>	Comunicación de Campo Cercano, del inglés <i>Near Field Communication</i>
<b>NGSI</b>	Interfaz de Servicios de Próxima Generación, del inglés <i>Next Generation Service Interface</i>
<b>NIST</b>	Instituto Nacional de Normalización y Tecnología, del inglés <i>National Institute of Standards and Technology</i>
<b>OASIS</b>	Organización para el Avance de la Norma de Información Estructurada, del inglés <i>Organization for the Advancement of Structured Information Standard</i>
<b>OCB</b>	Agente de Contexto Orion, del inglés <i>Orion Context Broker</i>
<b>OMA</b>	Alianza Móvil Abierta, del inglés <i>Open Mobile Alliance</i>
<b>OPC UA</b>	Arquitectura Unificada de Comunicación de Protocolo Abierto, del inglés <i>Open Protocol Communication Unified Architecture</i>

---

<b>OSI</b>	Modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos, del inglés <i>Open Systems Interconnection Model</i>
<b>OWL</b>	Lenguaje de Ontologías Web, del inglés <i>Web Ontology Language</i>
<b>PaaS</b>	Plataforma como Servicio, del inglés <i>Platform as a Service</i>
<b>PPP</b>	Asociación Público-Privada, del inglés <i>Public Private Partnership</i>
<b>PSA</b>	Plataforma Solar de Almería
<b>QoS</b>	Calidad de Servicio, del inglés <i>Quality of Service</i>
<b>RAMI</b>	Modelo Arquitectónico de Referencia Industria 4.0, del inglés <i>Reference Architectural Model Industry 4.0</i>
<b>RAN</b>	Red de Acceso Radioeléctrico, del inglés <i>Radio Access Network</i>
<b>RDF</b>	Marco de Descripción de Recursos, del inglés <i>Resource Description Framework</i>
<b>REST</b>	Transferencia de Estado Representacional, del inglés <i>Representational State Transfer</i>
<b>RFID</b>	Identificación por Radiofrecuencia, del inglés <i>Radio-frequency identification</i>
<b>SaaS</b>	Software como Servicio, del inglés <i>Software as a Service</i>
<b>SABANA</b>	Biorrefinería de Algas Sostenible para la Agricultura y la Acuicultura, del inglés <i>Sustainable Algae Biorefinery for Agriculture aNd Aquaculture</i>
<b>SCADA</b>	Control de Supervisión y Adquisición de Datos, del inglés <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
<b>SCTP</b>	Protocolo de Transmisión de Control de Flujos, del inglés <i>Stream Control Transmission Protocol</i>
<b>SMD</b>	Destilación Solar de Membrana, del inglés <i>Solar Membrane Distillation</i>
<b>SSL</b>	Capa de Sockets Seguros, del inglés <i>Secure Sockets Layer</i>
<b>SSN</b>	Red de Sensores Semánticos, del inglés <i>Semantic Sensor Network</i>
<b>TCP</b>	Protocolo de Control de Transmisión, del inglés <i>Transmission Control Protocol</i>
<b>TEDS</b>	Hoja de Datos Electrónicos del Transductor, del inglés <i>Transducer Electronic Data Sheet</i>
<b>TIA</b>	Asociación de la Industria de Telecomunicaciones, del inglés <i>Telecommunications Industry Association</i>
<b>TIC</b>	Tecnologías de la Información y la Comunicación, del inglés <i>Tecnologías de la Información y la Comunicación</i>
<b>TLS</b>	Seguridad de la Capa de Transporte, del inglés <i>Transport Layer Security</i>
<b>TTA</b>	Asociación de Tecnología de las Telecomunicaciones, del inglés <i>Telecommunications Technology Association</i>

<b>TTC</b>	Comité de Tecnología de las Telecomunicaciones, del inglés <i>Telecommunication Technology Committee</i>
<b>UDP</b>	Protocolo de Datagramas de Usuario, del inglés <i>User Datagram Protocol</i>
<b>VM</b>	Máquina Virtual, del inglés <i>Virtual Machine</i>
<b>VMM</b>	Gestor de Máquinas Virtuales, del inglés <i>Virtual Machine Manager</i>
<b>W3C</b>	Consortio <i>World Wide Web</i> , del inglés <i>World Wide Web Consortium</i>
<b>WLAN</b>	Red de Área Local Inalámbrica, del inglés <i>Wireless Local Area Network</i>
<b>WPAN</b>	Red Inalámbrica de Área Personal, del inglés <i>Wireless Personal Area Network</i>
<b>WSSN</b>	Ontología de la Red Semántica de Sensores Inalámbricos, del inglés <i>Wireless Semantic Sensor Network Ontology</i>
<b>XaaS</b>	Todo como Servicio, del inglés <i>Everything as a Service</i>
<b>XML</b>	Lenguaje de Marcado Extensible, del inglés <i>Extensible Markup Language</i>
<b>ZVEI</b>	Asociación Alemana de Fabricantes Eléctricos y Electrónicos, del inglés <i>German Electrical and Electronic Manufacturer Association</i>



# Plataforma IoT para la provisión de servicios en procesos industriales

<b>1</b>	<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Contribuciones a revistas científicas</b> .....	<b>55</b>
<b>3</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b> .....	<b>105</b>
<b>4</b>	<b>Otras contribuciones</b> .....	<b>113</b>
	<b>Bibliografía</b> .....	<b>117</b>







## 1. Introducción

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar al lector una visión general del trabajo de investigación llevado a cabo. En primer lugar, se presenta el contexto en el que se desarrolla esta tesis doctoral y se explica la escasez de recursos y las nuevas necesidades a las que se enfrentará el mundo en 2050. Además, se presenta la digitalización como una aportación a la solución de la escasez de recursos y el Internet de las Cosas (IoT, del inglés *Internet of Things*) como una posible herramienta y respuesta a las nuevas necesidades y heterogeneidad de los dispositivos y los problemas de interoperabilidad. En segundo lugar, dado que la línea de investigación de esta tesis doctoral se centra en el provisionamiento de servicios en el sector industrial, se presentan una serie de apartados como una breve introducción al IoT, una breve introducción a la interoperabilidad, el *cloud computing* como tecnología habilitadora y los modelos como servicio para la optimización de recursos. Por último, se describen las instalaciones utilizadas como referencia, la arquitectura empleada de forma conceptual y el trabajo de investigación realizado, incluyendo los antecedentes y las principales contribuciones llevadas a cabo.

### 1.1 Contexto y motivación

En los últimos años, se han puesto de manifiesto importantes transformaciones en el sector industrial como respuesta a las latentes preocupaciones que vienen azotando a la sociedad actual. El crecimiento de la población mundial, el cambio climático, la escasez de recursos como el agua dulce, el aire y el suelo cultivable, son algunas de las preocupaciones que ocupan las agendas políticas de estados y organismos internacionales [1, 2]. Así, hacer una adecuada planificación, un uso responsable y sostenible de dichos recursos y la búsqueda de fuentes energéticas y materiales alternativos se plantea como uno de los principales retos de este tiempo.

En esta tesis se tratan de abordar dichos problemas, aportando soluciones basadas en la digitalización del sector industrial mediante el uso de la tecnología IoT para el provisionamiento de servicios en procesos industriales.

### 1.1.1 Escasez de recursos, nuevas necesidades

Como se ha estado anticipando, la creciente inquietud por la escasez de recursos está suponiendo un cambio en la orientación de la planificación mundial en el uso de los mismos, que en la visión futura se muestran como limitados y finitos.

En los últimos 50 años, la población mundial ha aumentado de tres mil millones a más de seis mil millones, lo que ha generado una gran demanda de alimentos [3]. Según estudios realizados por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, del inglés *Food and Agriculture Organization*), la población mundial aumentará a 9.730 millones de personas en 2050 y a 11.200 millones a finales de 2100 (véase la figura 1.1). La FAO [4] estima que para satisfacer las crecientes necesidades alimentarias, los países en desarrollo necesitarán duplicar su producción agrícola para 2050.

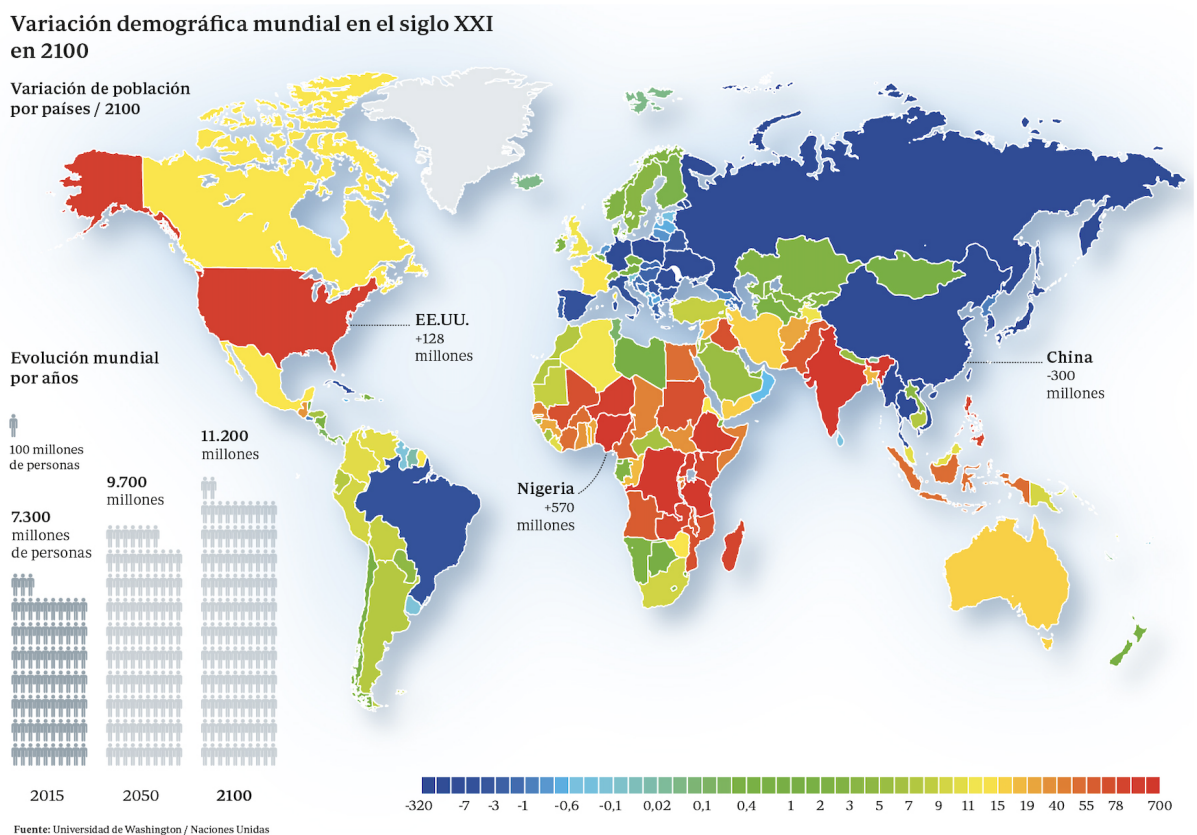


Figura 1.1. Previsión del crecimiento mundial para 2100 [5]

El cambio climático [6, 7], el aumento de la salinidad del agua dulce [7], la intensificación de la agricultura en los últimos tiempos, el rápido desarrollo industrial [8, 9], las políticas gubernamentales y las fluctuaciones del mercado, aumentan la incertidumbre en lo que a la seguridad alimentaria se refiere [10], en tanto que el abuso desmedido de los recursos disponibles se viene traduciendo en un aumento de la escasez de agua dulce, una reducida productividad de las tierras degradadas, un aumento en la contaminación de las aguas, un aumento de las presiones migratorias, un desarrollo limitado y la destrucción de los ecosistemas [4].

La escasez de agua afecta ya a más del 40% de la población mundial y el 25% depende de cultivos en tierras degradadas [4]. En septiembre de 2011, se creó la Alianza Mundial sobre Suelos para la Seguridad Alimentaria y la Adaptación al Cambio Climático (GSP, del inglés Global

Soil Partnership), cuyo objetivo principal es promover la conciencia a nivel mundial sobre la rapidez con la que se está perdiendo este recurso esencial y la necesidad de adoptar medidas para invertir la degradación del suelo y promover su gestión sostenible para garantizar la suficiencia futura de alimentos y la capacidad de recuperación de los sistemas de producción mundiales [4].

Ciertamente, a la vista de los datos expuestos, es posible afirmar que la industria, el sector agrícola y las políticas socioeconómicas a nivel internacional, se encuentran en un momento crucial, siendo prioridad el diseño e implementación de formas alternativas y más sostenibles de producción que permitan dar respuesta a las nuevas necesidades alimentarias, solventando los problemas asociados a la escasez de recursos y la contaminación que, presente en el día a día, no hará sino agravarse en los años venideros.

### 1.1.2 La importancia de la digitalización

La digitalización se presenta como el proceso por el cual se capta una señal analógica para generar una representación digital que pueda ser almacenada o procesada electrónicamente [11], o dicho de otra manera, la digitalización es la conversión de datos de muestras de señales analógicas a digitales [12].

Actualmente, la digitalización está presente en todos los ámbitos de la vida, desde los aspectos más cotidianos (p. ej. la casi obsolescencia de las facturas en papel y la sustitución de las mismas por las facturas digitales) a aquellas facetas más complejas o tecnificadas que determinan las variables de actuación de gobiernos, organizaciones internacionales, sectores industriales o agrícolas, tejido empresarial, etc. En concreto, a través de los procesos de digitalización se generan un amplio volumen de datos e información disponible en cualquier lugar, en cualquier momento, en cualquier contexto y para cualquier usuario que utilice cualquier dispositivo y tipo de acceso.

En los últimos años, la digitalización ha evolucionado significativamente, pasando de una posición marginal a un papel importante en el tratamiento y almacenamiento de datos. En 1993, solo el 3% de la información registrada en el mundo se almacenaba de forma digital, mientras que en 2007 el 94% de los datos se almacenaban digitalmente [13].

Además, la digitalización se presenta no solo como un mecanismo de conversión de datos analógicos en digitales, sino que se encuentra estrechamente relacionada con la creciente escasez de recursos y la seguridad alimentaria futura. La digitalización en la industria da lugar a la creación de multitud de datos [14], lo que unido a una adecuada recopilación, almacenamiento, tratamiento, modelado y análisis de los mismos [15] permite ajustar los entornos de producción futuros, buscando así un mejor aprovechamiento de los recursos, más sostenible y eficaz, aumentando la productividad, reduciendo costes y disminuyendo la huella ambiental [16].

En lo que respecta a los avances en el uso de esta tecnología y en relación con la industria, estos se encuentran en una nueva fase de revolución industrial. Hasta ahora estas revoluciones han ido relacionadas con el avance de la maquinaria y la cadena de producción (véase la figura 1.2). En la actualidad dicha revolución está orientada a la digitalización de los procesos, también conocida como Industria 4.0 [17]. La digitalización industrial viene respaldada por la biotecnología [18], por la combinación de herramientas como el IoT [19-21], el procesamiento de datos en *big data* [22], el *cloud computing* [23], la inteligencia artificial y el *deep learning* [24] y por el uso de *smart factories*. Estas herramientas facilitan la gestión y la toma de decisiones en contexto [25] y permiten adaptar los procesos productivos a las necesidades y exigencias actuales, lo que es clave para llevar a cabo una correcta transformación digital.

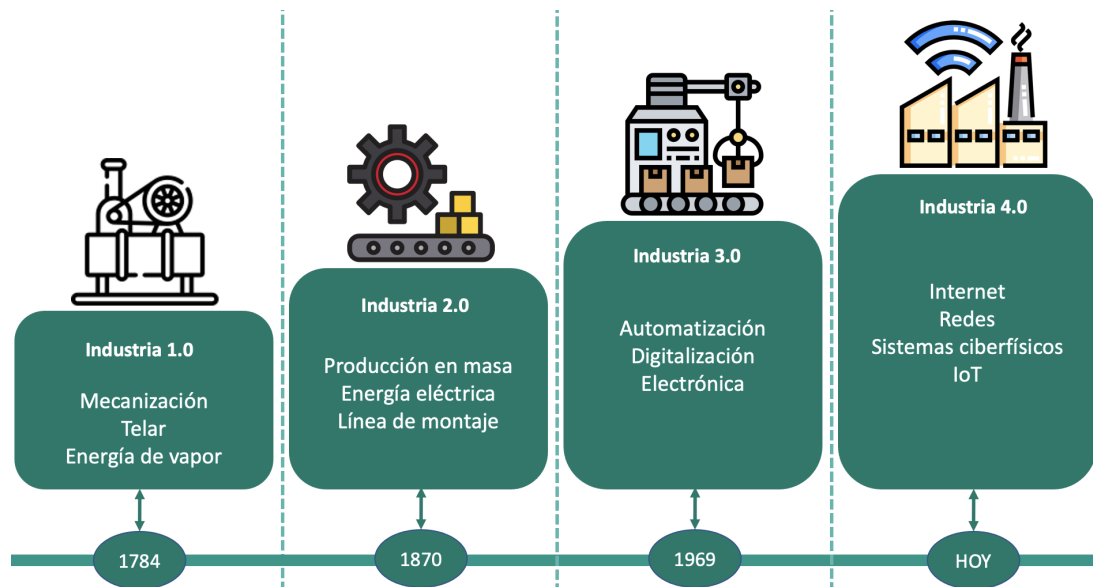


Figura 1.2. Evolución industrial. Adaptación de [26]

### 1.1.3 Internet of Things: respuesta a las nuevas necesidades

A raíz de los problemas planteados en las secciones anteriores, la industria está experimentando una importante transformación. El cambio en las formas tradicionales de producción y el cambio en su orientación y planificación futuras serán claves en la evolución de la industria [26]. En este contexto, el uso de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TICs) como es el IoT se presenta como la respuesta clara a las nuevas necesidades industriales. La capacidad de conectar dispositivos y sistemas a Internet, recopilar y compartir datos en tiempo real, permite optimizar el uso de recursos como el agua, la energía, la producción de alimentos y la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

Hoy día, el término IoT se ha vuelto popular para describir marcos en los que la conectividad a Internet y las necesidades de cómputo se extienden a multitud de actividades cotidianas [27]. Este paradigma encuentra aplicación en múltiples campos, como la industria conectada [28, 29], la agricultura inteligente [30, 31], las ciudades inteligentes [32, 33], la atención sanitaria [34, 35], la logística de transporte [36, 37] y otros, por lo que su aplicación en el sector industrial y las utilidades y beneficios que reporta en el mismo son incuestionables.

En el ámbito industrial, el IoT permite la monitorización y control en tiempo real de los procesos y el consumo de recursos, lo que permite identificar problemas y oportunidades de mejora en tiempo real y tomar medidas para optimizar el uso de los recursos [28]. También permite la automatización de tareas y procesos, lo que reduce el consumo de recursos y la generación de residuos, así como aumenta la eficiencia y la productividad. Además, los datos recopilados por el IoT pueden ser utilizados para realizar predicciones sobre la utilización futura de los recursos y para planificar la producción y el suministro de manera más eficiente.

Algunas de las formas en las que el IoT puede mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en el ámbito industrial son:

- **Monitorización y control en tiempo real:** los sensores y dispositivos conectados a Internet permiten recopilar datos en tiempo real sobre el uso de los recursos y el rendimiento de los procesos industriales. Esto permite identificar problemas y oportunidades de mejora en tiempo real y tomar medidas para optimizar el uso de los recursos.

- **Automatización y control:** el IoT permite la automatización de tareas y procesos mediante la conexión de dispositivos y sistemas. Esto puede reducir el consumo de recursos y la generación de residuos, así como aumentar la eficiencia y la productividad.
- **Predicción y planificación:** los datos recopilados por el IoT pueden ser utilizados para realizar predicciones sobre el uso futuro de los recursos y para planificar la producción y el suministro de manera más eficiente.

Actualmente, hay más de treinta mil millones de dispositivos conectados a Internet y se espera que este número aumente a más de setenta y cinco mil millones en los próximos años (véase la figura 1.3). Esto genera una gran cantidad de datos que deben ser recogidos y procesados para convertirlos en información útil. Se estima que se generan terabytes de datos a diario gracias al IoT, lo que requiere una infraestructura y una capacidad de procesamiento masivo para poder utilizar esta información de manera efectiva.

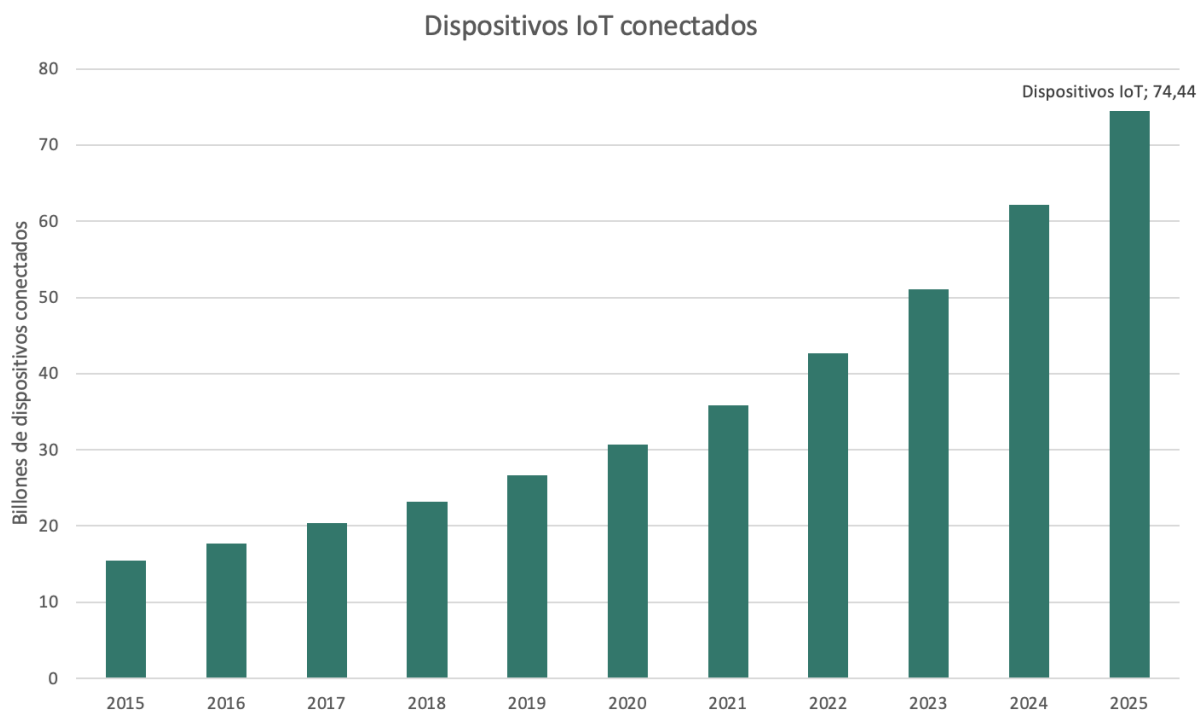


Figura 1.3. Evolución de los dispositivos IoT conectados. Adaptación de [38]

En resumen, el IoT permite a través de sensores, actuadores, componentes de red y otros elementos similares, optimizar la gestión de los recursos, aumentar la producción y adoptar actitudes más respetuosas con el medioambiente, facilitando el uso adecuado y responsable del agua y del suelo, abordando así las principales preocupaciones de este tiempo y dotando de nuevas herramientas a la industria para asegurar su provisionamiento presente y futuro.

Sin embargo, a pesar de todas sus ventajas, el IoT también se enfrenta a una serie de retos. Uno de los principales retos es la interoperabilidad, es decir, la capacidad de diferentes dispositivos y sistemas para conectarse y compartir datos de manera efectiva. Esto es importante, ya que el IoT se basa en la conexión de muchos dispositivos y sistemas diferentes, y si estos no pueden interoperar entre sí, no se podrá obtener el máximo beneficio.



### 1.1.4 Heterogeneidad de los dispositivos, falta de interoperabilidad

Debido a la heterogeneidad de los ecosistemas IoT, estos están formados por una gran cantidad de sensores y actuadores, lo que dificulta la interoperabilidad entre dispositivos, plataformas y servicios. Este es uno de los principales retos a los que se enfrenta esta tecnología, debido a que cada fabricante desarrolla sensores conforme a unas especificaciones propietarias que utilizan formatos de datos cerrados, protocolos de comunicación específicos y *hardware* inaccesible.

La forma en la que el IoT interactúa con el medio y los objetos que rodean un ecosistema son completamente diferentes a los vistos en sistemas informáticos tradicionales [39]. Anteriormente, cuando estos dispositivos eran conectados a Internet recibían el mismo trato y únicamente variaban en función de su interacción con el usuario. Cuando se debate el uso de los dispositivos IoT, cada uno de ellos presenta características diferentes, como son la capacidad de cálculo, seguridad, limitaciones energéticas por el uso de baterías e implementaciones de diferentes protocolos de comunicación. Esto dificulta la interoperabilidad de dispositivos, ya que no tienen por qué conectarse a Internet del mismo modo que otros sistemas.

El problema de la interoperabilidad en la tecnología IoT no es nuevo, ya que se ha conocido desde 1988 con la existencia de los sistemas de información [39]. Según el diccionario de *Oxford*, interoperabilidad se refiere a la «*capacidad de funcionar conjuntamente*». Los problemas de interoperabilidad en el IoT se deben a la heterogeneidad de los dispositivos, al igual que ocurre en otros ámbitos en los que se requiere un lenguaje común o un traductor para facilitar la comunicación. Para obtener el máximo rendimiento de un ecosistema IoT, es necesario que todos estos componentes trabajen de manera coherente entre sí.

En la actualidad, existe una tendencia entre empresas (p. ej. Amazon, Google, IBM, Microsoft) de centrar el desarrollo en ecosistemas IoT propietarios e interoperables. Estas compañías tratan de establecer sus propios estándares, protocolos, interfaces, formatos y semántica, lo que produce ecosistemas cerrados que convierten a los usuarios en dependientes de estas plataformas. Se requiere un cambio de perspectiva en estas empresas, apostando por la interoperabilidad mediante el uso de estándares [40].

La falta de interoperabilidad entre empresas y dispositivos está obligando a desarrolladores de aplicaciones y servicios a realizar adaptaciones a los estándares definidos por estas empresas, dificultado la creación aplicaciones multiplataforma que operen en diferentes dominios. Esto está generando problemas a los proveedores de soluciones IoT, ya que se ven sometidos a dispositivos y *software* que actúan como integradores. En la figura 1.4 se muestra como tres de las empresas más importantes en cuanto a plataformas IoT crean escalabilidad e interoperabilidad vertical entre dispositivos IoT, *gateways* y plataformas, pero no existe escalabilidad e interoperabilidad horizontal entre ellas. Desde la Unión Europea se han financiado proyectos para el desarrollo de aplicaciones IoT de modalidad *open source* asociadas a programas investigadores como el «Horizonte 2020 (H2020, del inglés *Horizon 2020*)» para tratar de hacer frente a los monopolios de empresas y falta de estándares.

En conclusión, la combinación de la digitalización y el uso de tecnologías como el IoT en el sector industrial puede ser una solución para abordar los problemas de escasez de recursos y las nuevas necesidades del planeta. No obstante, es importante mejorar la integración entre sistemas IoT y tener datos homogéneos y estandarizados para poder utilizar plataformas multidominio y generar modelos en la nube para optimizar los recursos a través de una adecuada interoperabilidad.

Dentro del marco contextual expuesto, esta tesis doctoral se centra en la aportación de una solución IoT que permita el provisionamiento de servicios en el sector industrial, con el objetivo de desarrollar una plataforma IoT que integre diferentes fuentes de datos heterogéneos y unifique toda la información en una sola plataforma para facilitar la gestión y el acceso a los datos por parte de los usuarios. La plataforma IoT debe garantizar la homogeneidad e interoperabilidad entre plataformas y dispositivos a nivel sintáctico y semántico a través del uso de estándares en modelos de datos para el intercambio de información. Además, debe integrar modelos predictivos para ayudar en la toma de decisiones, siendo accesibles en línea y sin dependencia de un *software* específico a través de una Interfaz de Programa de Aplicación (API REST, del inglés *Application Program Interface*). La plataforma IoT debe ser generalista para permitir su escalabilidad a otros sectores industriales y cubrir el ciclo completo de producción, ofreciendo servicios API REST para el provisionamiento de dispositivos, la monitorización y la gestión de la planta.

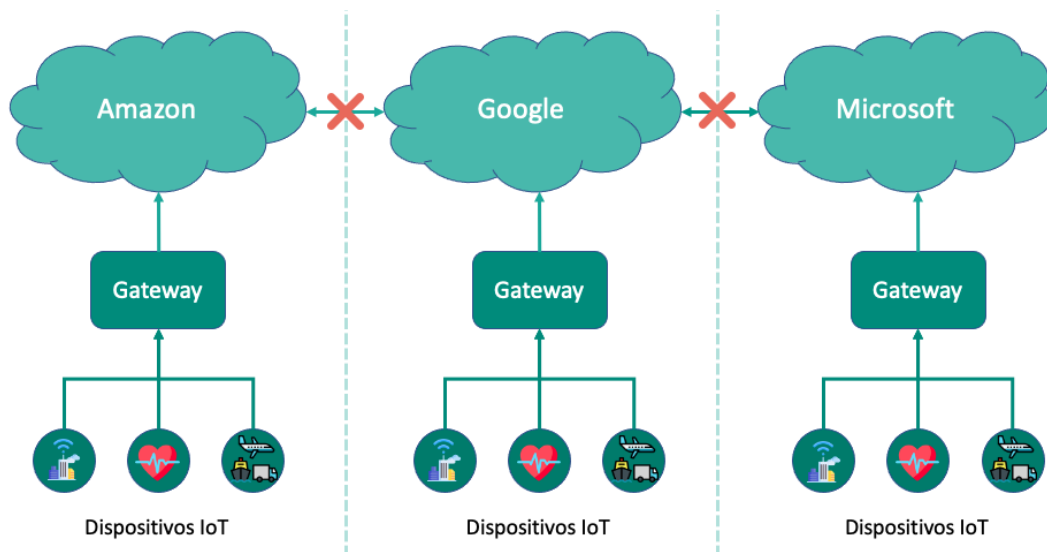


Figura 1.4. Falta de interoperabilidad entre empresas

### 1.1.5 Contexto de investigación

La presente tesis doctoral ha sido desarrollada y en el marco de investigación de tres proyectos de la Unión Europea y uno nacional. Estos han sido liderados o desarrollados en colaboración con el Grupo de Investigación Automática, Robótica y Mecatrónica TEP-197 (ARM TEP-197) de la Universidad de Almería perteneciente al Departamento de Informática en el cual se desarrolla esta tesis.

- **Proyecto IoF2020:** Programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención no. 731884 - Proyecto Internet de los Alimentos y la Agricultura 2020 (**IoF2020**, del inglés *Internet of Food and Farm 2020*). 01/01/2017-31/03/2021 (34 089 926 €).

El proyecto IoF2020 se desarrolla en el marco del programa de Investigación e Innovación de la Unión Europea «H2020», tiene por objeto introducir y potenciar la digitalización en varios sectores, como la agricultura, la ganadería y la alimentación en Europa, con el objetivo de mejorar significativamente la productividad y la sostenibilidad del sistema. Dentro de este proyecto, el caso de uso 4.2 liderado por el grupo de investigación ARM TEP-197 trata de la digitalización de la agricultura protegida basada en la integración y el uso de los datos generados por sensores, bucles de control, modelos y técnicas de optimización.



- **Proyecto SABANA:** Programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención no. 727874 - Proyecto Biorrefinería Sostenible de Algas para la Agricultura y la Acuicultura (**SABANA**, del inglés *Sustainable Algae Biorefinery for Agriculture and Aquaculture*). 01/12/2016-30/11/2021 (10 646 705 €).

El proyecto SABANA se desarrolla en el marco del programa de Investigación e Innovación de la Unión Europea «H2020» y bajo la convocatoria «Crecimiento Azul (BG, del inglés *Blue Growth*)», que pretende reconocer la importancia de los mares y océanos para impulsar la economía europea por su gran potencial de innovación y crecimiento [41]. El objetivo de este proyecto es producir bioestimulantes, biopesticidas, aditivos para piensos y biofertilizantes, utilizando principalmente agua de mar y nutrientes procedentes de aguas residuales en una planta de biorrefinería de microalgas. Otro objetivo es crear un centro de datos en línea disponible para diferentes grupos de investigación a nivel internacional que dé acceso a los datos generados por la planta.

- **Proyecto CHROMAE:** Proyecto I+D+i del Plan Nacional DPI2017-85007-R del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y Fondos FEDER - Control y Gestión Óptima de Recursos Heterogéneos en Distritos Productivos Agroindustriales Integrando Energías Renovables (**CHROMAE**, del inglés *Control and Optimal Management of Heterogeneous Resources in Agroindustrial Production Districts Integrating Renewable Energies*). 01/01/2018–31/12/2020 (64 308 €).

El objetivo principal del proyecto CHROMAE es contribuir, desde el punto de vista del control automático, a la gestión óptima de recursos como el agua, la energía y otras fuentes de energía renovables para garantizar su uso equitativo, eficiente y sostenible, tratando de minimizar el impacto ambiental.

Actualmente, la plataforma IoT desarrollada en esta tesis doctoral se encuentra en fase de integración y evolución en la arquitectura basada en sistemas ciberfísicos del Proyecto de Investigación del plan Nacional de Generación de Conocimiento, n.º PID2021-122560OB-I00, financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por «FEDER Una manera de hacer Europa», Arquitectura Ciberfísica de Control para la Optimización del Nexo Agua-Energía-Carbono-Alimentación en Invernaderos (**Cybergreen**, del inglés *Cyber Physical Control Architecture for the Optimization of the Water-Energy-Carbon-Food Nexus in Greenhouses*). 01/09/2022-01/09/2025 (113 000 €).

### Software y servicios

Los servicios, aplicaciones y configuraciones desarrollados en esta tesis doctoral basada en el desarrollo de una plataforma IoT para el provisionamiento de servicios en procesos industriales se encuentran en un repositorio privado en la plataforma GitHub. Esto permitió poder realizar un control de versiones y la creación de nuevas ramas para el desarrollo y escalabilidad de los servicios ante nuevas funcionalidades o integraciones. Estos servicios están desarrollados por completo en código JavaScript y utilizando los *Frameworks* de Angular y NodeJS. Para más información, acerca de las tecnologías empleadas se recomienda consultar el capítulo 2 donde se presentan las contribuciones científicas desarrolladas a lo largo de la tesis doctoral.

## 1.2 Breve introducción al IoT: conceptos básicos y arquitectura

En los últimos años, el uso del IoT ha surgido como una tendencia para abordar los desafíos mencionados anteriormente. Esto se debe a las capacidades potenciales que el IoT promete ofrecer. Esta sección pretende proporcionar al lector una idea general de esta tecnología en la que se centra esta tesis. Así, se presenta una breve descripción de la tecnología IoT. Además, se hace una revisión de sus características, objetos inteligentes, arquitecturas, aplicaciones del IoT, y retos a los que se enfrenta.

### 1.2.1 ¿Qué es el IoT? Características

El término IoT fue utilizado inicialmente en 1999 por el británico Kevin Ashton [42], quien lo conceptuaba como la capacidad que tendrían las computadoras de recopilar datos sin ayuda humana para convertirlos en información útil, sirviéndose para ello de tecnologías como los sensores y la Identificación por Radiofrecuencia (RFID, del inglés *Radio Frequency Identification*), que les permitirían observar, identificar y comprender el mundo.

Desde esta primera conceptualización del IoT, son muchos los que se han aventurado a dar una definición del mismo, sin embargo, a pesar de no ser conceptos idénticos, todos giran en torno a un mismo punto de origen: conectividad/interconexión. Se destacan los siguientes conceptos:

- «*El IoT es una infraestructura de red global dinámica con capacidad de autoconfiguración basada en protocolos de comunicación estándar e interoperables en la que los «objetos» físicos y virtuales tienen identidades, atributos físicos y personalidades virtuales y utilizan interfaces inteligentes, y están perfectamente integrados en la red de información*». La Comisión Europea, en el denominado Clúster de Proyectos Europeos de Investigación sobre IoT (CERP-IoT, del inglés *Cluster of European Research Project on the Internet of Things*, 2009) [43].
- «*IoT es una infraestructura de red global, que vincula objetos físicos y virtuales a través de la explotación de las capacidades de comunicación y captura de datos*». En el Consorcio Acción de Coordinación y Apoyo a las Actividades Mundiales Relacionadas con la RFID y la Normalización (CASAGRAS, del inglés *Coordination And Support Action for Global RFID-related Activities and Standardisation*, 2009) [44].
- «*IoT es una red mundial de objetos interconectados direccionables de forma única, basada en protocolos de comunicación estándar*». Por la organización Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (IETF, del inglés *Internet Engineering Task Force*, 2012) [45].
- «*IoT es una infraestructura global de la sociedad de la información, que permite ofrecer servicios avanzados mediante la interconexión de objetos, físicos y virtuales, gracias a la interoperabilidad de las tecnologías de la información y la comunicación, presentes y futuras*». Por el organismo Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, del inglés *International Telecommunication Union*, 2012) [46].
- «*Una infraestructura de red global y dinámica con capacidad de autoconfiguración basada en protocolos de comunicación estándar e interoperables, en la que los «objetos» físicos y virtuales tienen identidades, atributos físicos y personalidades virtuales y utilizan interfaces inteligentes, y se integran perfectamente en la red de información*». Por el investigador Rob van Kranenburg [47].

A partir de estas definiciones, es posible afirmar que IoT consiste en la interconexión de dispositivos físicos con conectividad de red (p. ej. sensores, actuadores), lo que permite que los datos sean recopilados y que la información se intercambie entre ellos. El IoT tiene como objetivo integrar lo físico y el mundo virtual mediante el uso de Internet como medio de comunicación e intercambio de información de una manera autónoma [48], con el fin de habilitar una interacción en cualquier momento y en cualquier lugar [49] y generalmente, por cualquier ruta, para proporcionar servicios avanzados a los usuarios finales. Esto sería lo que tradicionalmente se conoce como las «tres dimensiones de la comunicación en IoT» [46].

Dicha interacción es posible a través de la utilización de tecnologías habilitadoras que permitan identificar fácilmente a los objetos IoT o dispositivos IoT, y comunicarse e interactuar con ellos. De esta manera, los pilares tecnológicos de la visión de IoT son las tecnologías de identificación de Redes Inalámbricas de Sensores y Actuadores (WSAN, del inglés *Wireless Sensor and Actuator Network*) y de comunicación de Red de Área Local Inalámbrica (WLAN, del inglés *Wireless Local Area Network*) [50].

### Características

Dentro de las características del IoT como generador de servicios avanzados, destacan fundamentalmente las siguientes (véase la figura 1.5):

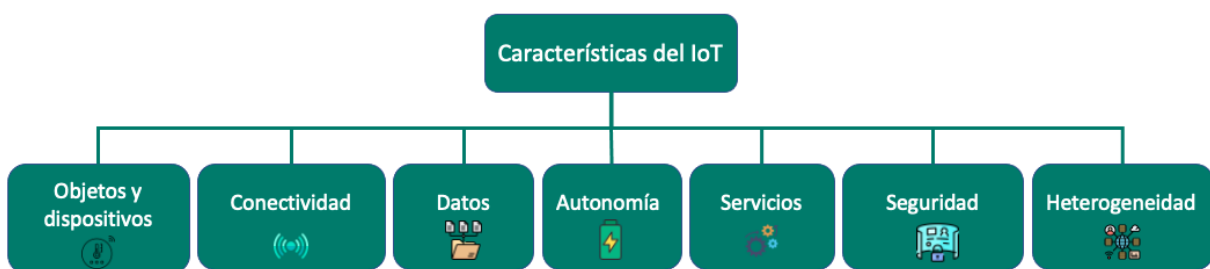


Figura 1.5. Características del IoT

- **Objetos y dispositivos IoT - «objetos»:** cada día, millones de objetos equipados con la conjunción de las tecnologías anteriormente referenciadas son conectados a Internet [51]. Estos objetos son los denominados «dispositivos inteligentes o *smart devices*». Los dispositivos IoT presentan características limitadas computacionales, de consumo de energía, memoria y uso de red, por lo que requieren de capacidades adicionales para el almacenamiento y procesamiento de los datos que recolectan [52]. Han de ser fácilmente reconocibles, identificables, direccionales y/o controlables y han de presentar capacidades de detección y/o actuación y comunicación [46]. Dichas capacidades de detección y/o accionamiento se presentan, probablemente, como las más esenciales notas diferenciadoras de los dispositivos IoT, en tanto que abarcan/permiten las operaciones de monitorización y actuación, que suponen la posibilidad de realizar un acoplamiento completo entre el mundo físico y el virtual. Además, permiten diferenciarlos de otros dispositivos o entidades, tradicionalmente integrados en los sistemas de red (p. ej. *routers, hubs, switches*).

En consecuencia, se podría afirmar que los objetos inteligentes o dispositivos IoT ocupan un papel fundamental dentro de la infraestructura que esta tecnología presenta. Son el origen de la transformación de un entorno físico en un entorno «inteligente». En un *smart environment* los dispositivos IoT trabajan continuamente a fin de hacer la vida de los habitantes más cómoda [53].

- **Conectividad:** como se ha estado anticipando, la comunicación entre los objetos inteligentes o dispositivos IoT es esencial para alcanzar los fines que esta tecnología se propone. Dicha comunicación no es posible sin la presencia de una infraestructura de red o conectividad de red que satisfaga las necesidades de interoperabilidad y escalabilidad que el IoT demanda.
- **Datos:** en un ecosistema IoT se generan infinidad de datos, provenientes de cada uno de los diferentes dispositivos IoT que forman parte del entorno, todos ellos interconectados entre sí.

Los datos son hechos brutos no organizados que necesitan ser procesados; pueden ser algo simple y aparentemente aleatorio e inútil, hasta que se organizan. Así, un dato pasa a ser útil desde el momento en que se organiza, estructura o presenta en un contexto determinado, convirtiéndose así en información útil.

- **Autonomía:** se presenta como una de las notas características de todo dispositivo IoT, ya que cada dispositivo IoT debe tener la capacidad necesaria para realizar sus tareas sin necesidad de intervención humana y, en la medida de lo posible, con independencia de otros dispositivos, manteniendo así un mayor grado de control sobre sus propias acciones y su estado interno según el contexto, las condiciones cambiantes o el entorno detectado [54].
- **Servicios:** el principal valor añadido de la tecnología IoT es la creación de servicios para dispositivos y usuarios. Dichos servicios pueden ser simples o complejos y deben garantizar la interoperabilidad entre dispositivos o plataformas [46]. Los servicios disponibles pueden consistir tanto en la recogida de datos, integración, análisis y explotación de ellos a través de *middleware* intermediarios o aplicaciones finales.
- **Seguridad:** dado el amplio dominio de aplicación del IoT, la seguridad es una de las características a tener en cuenta. El volumen masivo de datos privados y públicos generados por los dispositivos IoT ha abierto la puerta a la ciberseguridad tratando de proteger a aplicaciones y usuarios del robo de información y de su manipulación
- **Heterogeneidad:** el IoT se caracteriza por la inclusión de multitud de dispositivos de diferentes fabricantes tanto a nivel *hardware* y *software*. Esta naturaleza dificulta la interoperabilidad entre ellos. La heterogeneidad entre dispositivos IoT supone un reto importante para este tipo de entornos. Para tratar de solucionar este problema es necesario el uso de estándares de comunicaciones y protocolos de red que faciliten la interoperabilidad entre dispositivos y plataformas.

Como se puede apreciar tras la exposición de las principales características de la tecnología IoT, la conjunción de todas ellas hace del IoT un ecosistema seguro, interconectado y escalable, en el que cada uno de los intervinientes tiene un papel fundamental para el correcto funcionamiento del mismo. Si la cadena funcional es interrumpida (p. ej. se rompe la conectividad entre los diversos dispositivos IoT), estos no podrían comunicarse entre sí, los datos generados por cada uno de ellos no podrán ser almacenados, tratados y analizados y, en consecuencia, no se dispondría la información útil que desencadena la generación de servicios para el usuario, tales como la ayuda a la toma de decisiones, la monitorización de procesos y el aumento de la productividad y eficiencia en los sectores industriales.

### 1.2.2 Objetos inteligentes

Dadas las definiciones del concepto de IoT descritas en la sección 1.2.1, esta tecnología se encuentra ligada al uso de objetos físicos y virtuales con capacidad de comunicación y captura de datos.

Para presentar el concepto de objeto inteligente es preciso abordar conceptos estrechamente relacionados con el mismo como son sensores, sensores inteligentes y objetos inteligentes. En la literatura tales conceptos se emplean indistintamente como sinónimos o como conceptos diferenciados. Por esto, es clave marcar la distinción entre unos y otros. A continuación, se presenta la diferencia entre los términos sensores, sensores inteligentes y objetos inteligentes:

- **Sensores:** «*Un sensor es un transductor que convierte un parámetro físico, biológico o químico en una señal eléctrica*». Esta definición es aportada por el Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST, del inglés National Institute of Standards and Technology).
- **Sensores inteligentes:** el término sensores inteligentes es utilizado anteriormente a la creación del IoT, en 1997 en el estándar 1451 [55] del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, del inglés *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), donde se presentó la definición de sensores inteligentes de la siguiente forma «*para hacer que los sensores sean inteligentes, la norma IEEE 1451 exige que los transductores estén dotados de un dispositivo de memoria, el dispositivo de memoria almacena una Hoja de Datos Electrónicos del Transductor (TEDS, del inglés Transducer Electronic Data Sheet) que contiene la identificación del transductor, la calibración, los datos de corrección y la información relacionada con el fabricante*». El objetivo de la norma IEEE 1451 es permitir el acceso a los datos del transductor desde redes informáticas, cableadas o inalámbricas.
- **Objetos inteligentes:** con la llegada del IoT el término objeto inteligente fue cogiendo más fuerza y aportando nuevas características. En la literatura, diferentes investigadores aportan una definición para este término como «*los objetos inteligentes son objetos físicos/digitales autónomos con capacidades de detección, procesamiento y red, y llevan una lógica de aplicación*» utilizada por Kortuem [56].

Tipos de dispositivos IoT: *gateway-like* y *constrained*. El primer tipo de dispositivo se caracteriza por no disponer de limitaciones a nivel de procesador, memoria o energía. Estos pueden enviar datos al servidor en la nube, almacenar datos tratando de evitar problemas de latencia sin necesidad de intermediarios. Suelen ser ejecutados en sistemas operativos como Linux o contenedores de aplicaciones. El segundo tipo de dispositivos, recientemente fue acuñado con el término «*constrained devices*» [57] para referirse a la clasificación de dispositivos con capacidad de conexión pero con limitaciones de recursos en comparación con otros dispositivos. Son nodos finales con sensores y actuadores conectados a dispositivos del tipo *gateway*. Usan redes de comunicación de baja potencia (p. ej. IPv6 en Redes de Área Personal Inalámbricas de Baja Potencia (6LowPAN, del inglés *IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks*), Zigbee, Thread, WirelessHART, etc.) y en su mayoría alimentados por baterías, lo que dificulta el tiempo de muestreo de los datos. A continuación, se presentan algunos de los problemas de estos dispositivos como son el almacenamiento y computación, comunicación y formato de los datos:

- **Almacenamiento y computación:** dada la naturaleza de los dispositivos IoT, estos presentan limitaciones en el almacenamiento y en las necesidades de computación. Por lo general estos dispositivos depende de otros *gateways* para realizar ciertas operaciones. A continuación, se presentan las clases de dispositivos según el almacenamiento y computación:
  1. **Dispositivos de clase 0:** en esta clase se engloban los dispositivos como sensores, actuadores y etiquetas RFID de bajo coste. Disponen de un almacenamiento mínimo con respecto a información y código. No disponen de comunicación directa con Internet y necesitan de otros dispositivos que actúen como pasarela entre ellos y el servidor.

Normalmente, utilizan los estándares de comunicación inalámbrica Zigbee, Comunicación de Campo Cercano (NFC, del inglés Near Field Communication), Bluetooth y RFID para la comunicación. Son dispositivos portátiles con alimentación por batería.

2. **Dispositivos de clase 1:** estos dispositivos pueden comunicarse con el resto empleando una pila de protocolos como el Protocolo de Aplicación Restringida (CoAP, del inglés *Constrained Application Protocol*) y el Protocolo de Datagramas de Usuario (UDP, del inglés *User Datagram Protocol*) diseñados para nodos restringidos. Aun así, estos están limitados en las comunicaciones, ya que solo permiten protocolos de seguridad de bajo peso, como el protocolo de Seguridad de la Capa de Transporte de Datagramas (DTLS, del inglés *Datagram Transport Layer Security*). Estos protocolos están diseñados para consumir menos recursos a nivel energético y en el envío de datos. Al disponer de un espacio limitado a nivel de código y en computación, no pueden utilizar una pila de protocolos completa como el Protocolo de Transferencia de Hipertexto (HTTP, del inglés *Hypertext Transfer Protocol*), protocolos criptográficos como la Seguridad de la Capa de Transporte (TLS, del inglés *Transport Layer Security*) y protocolos de seguridad sin una pasarela.
3. **Dispositivos de clase 2:** estos dispositivos tienen un almacenamiento y procesamiento mayor que las clases anteriores, por lo que son compatibles con las pilas de comunicación del Protocolo de Control de Transmisión (TCP, del inglés *Transmission Control Protocol*) y Protocolo de Internet (IP, del inglés *Internet Protocol*) IPV4 e IPV6 más usados por otros dispositivos de red. El uso de estos dispositivos puede ayudar al IoT a resolver problemas de interoperabilidad.

La tabla 1.1 muestra una comparativa de las clases de dispositivos restringidos.

Tabla 1.1. Clases de dispositivos IoT restringidos: clase 0, clase 1, clase 2. Adaptación de [58]

Clase	RAM	FLASH	Descripción
Clase 0	< 1 kB	< 100 kB	Usa <i>gateway</i> para necesidades básicas de comunicación.
Clase 1	≈ 10 kB	≈ 100 kB	Interactúan con otros dispositivos sin necesidad de pasarela.
Clase 2	≈ 50 kB	≈ 250 kB	Compatibles con los protocolos IPV4 e IPV6 regulares. Funcionan de manera similar a otros dispositivos de red.

- **Comunicación:** los dispositivos IoT disponen de multitud de posibilidades para realizar las comunicaciones (p. ej. redes móviles, comerciales o propietarias). La inclusión de esta tecnología ha abierto la puerta al uso de redes móviles (3G/4G/5G) y Wi-Fi por parte de los dispositivos. Además, es posible utilizar soluciones propietarias emergentes no estandarizadas (p. ej. LoRa y Sigfox) o tecnologías comerciales basadas en radiofrecuencia (p. ej. Bluetooth, NFC). Con la continua evolución de esta tecnología surgen nuevos protocolos y mecanismo de comunicaciones diseñados especialmente para dispositivos IoT (p. ej. Zigbee, Wi-Fi HaLow, WirelessHart) y diferentes soluciones de enrutamiento y encapsulación de los datos (p. ej. RPL, CORPL, 6LoWPAN, Thread, etc.).
- **Formato de los datos:** el objetivo del IoT no es solo capturar los datos del entorno. Estos datos deben de ser interpretados adecuadamente. Debido a que el formato de los datos es crucial, dada la heterogeneidad sintáctica esta se presenta en diferentes formatos (p. ej. Notación de Objeto de JavaScript (JSON, del inglés *JavaScript Object Notation*), Lenguaje de Marcado Extensible (XML, del inglés *Extensible Markup Language*), XLS, W3C del inglés *World Wide Web Consortium*, etc.).

### 1.2.3 Arquitecturas IoT

Una vez presentada la idea conceptual de IoT y los componentes necesarios para su funcionamiento, es importante hablar de cómo realizar su integración en el mundo real. La tecnología IoT se enfrenta a una serie de retos a la hora de introducirla en cualquier sector o entorno, dado el gran número de dispositivos u objetos inteligentes y condiciones necesarias para su correcto funcionamiento. Por lo tanto, es necesario disponer de una arquitectura de referencia [59] que permita la integración de diferentes funcionalidades, dando como resultado una arquitectura modular y escalable [60] para hacer frente al complejo escenario que se presenta.

Antes de la llegada del IoT las arquitecturas de redes tradicionales orientadas a servicios han sido válidas para funcionalidades como aplicaciones de correo, páginas webs, etc. Estas arquitecturas han quedado obsoletas cuando se habla de IoT, ya que el núcleo de esta tecnología son los datos generados por los sensores y cómo se usan. Dada esta problemática, en los últimos años han surgido diferentes arquitecturas para hacerle frente. Estas nuevas arquitecturas han evolucionado a una estructura de múltiples capas (véase la figura 1.6) donde cada una de ellas dispone de una funcionalidad específica. Estas arquitecturas por capas deben cubrir las necesidades mínimas como son la recogida de datos, el transporte, procesamiento/análisis y por último la actuación sobre los datos [61]. A continuación, se presentan las arquitecturas de tres y cinco capas.



Figura 1.6. Arquitectura IoT por capas. Adaptación de [62]

#### Arquitectura de 3 capas

Esta arquitectura es presentada en la primera fase de la investigación. Es una arquitectura a alto nivel dividida en tres capas [63] (véase la figura 1.6a). Esta es conceptualmente aceptada, ya que describe el funcionamiento lógico de esta tecnología: los datos recopilados por los dispositivos físicos se transmiten a otros dispositivos, servidores o elementos de red y se procesan en la aplicación final para un uso específico. Sin embargo, esta arquitectura es algo escueta cuando se quiere integrar el IoT en un sistema real:



- **Capa de percepción:** ubicada en la parte inferior de la figura 1.6a, es la capa sensorial del IoT donde los objetos identifican su entorno, recogen información del mundo físico e interactúan con él. Esta capa está compuesta por todo tipo de sensores y actuadores que convierten toda la información en señales eléctricas más fáciles de transmitir para su posterior análisis.
- **Capa de red:** esta capa es responsable de establecer la comunicación entre objetos inteligentes, dispositivos de red o servidores. Además, tiene las características de transmisión y procesamiento de información. Las tecnologías inalámbricas como Bluetooth, Zigbee, 6LowPAN, Wi-Fi, LTE y protocolos de aplicación de bajo consumo de energía como el Transporte de Telemetría de Colas de Mensajes (MQTT, del inglés *Message Queue Telemetry Transport*) y CoAP son utilizadas por los dispositivos de la capa de percepción.
- **Capa de aplicación:** es el nivel más alto de la arquitectura, en esta capa se encuentran las aplicaciones y plataformas que aportan funcionalidad a la infraestructura IoT. Es la capa responsable de exponer al exterior las aplicaciones y servicios al usuario final. En ella se encuentran las aplicaciones inteligentes, servicios como API REST y los servicios de datos. Esta capa es empleada por las empresas para adquirir el valor comercial de la infraestructura IoT. Además, esta permite el intercambio de datos entre sistemas.

### Arquitectura de 5 capas

Dada la continua evolución del IoT, han ido surgiendo nuevas arquitecturas aportando nuevas capas. En el caso de la arquitectura de 5 capas, esta se basa en la inclusión de *middlewares* [64] y de servicios [50]. Esta arquitectura respeta las capas de percepción y de aplicación heredadas de la arquitectura de tres capas, pero añadiendo tres nuevas como son la capa de transporte, capa de procesamiento y capa de negocio (véase la figura 1.6b):

- **Capa de transporte:** esta capa es responsable de transferir los datos generados a la capa de percepción y transferirlos a una capa de procesamiento superior. Por tanto, se puede decir que soluciona la comunicación entre dispositivos a nivel de red (3G, Wi-Fi, Zigbee).
- **Capa de procesamiento:** esta capa es la encargada de recoger, almacenar y realizar todas las tareas de procesamiento de los datos. En ella se encuentran los servicios como bases de datos, el *cloud computing* o *big data*, lo que a través del análisis de datos permite ayudar a la toma de decisiones. Por tanto, se puede afirmar que es una de las capas principales de la arquitectura.
- **Capa de negocio:** esta capa es la encargada de la gestión completa de la infraestructura IoT. En ella se encuentra toda la parte de gestión de aplicaciones, los permisos de usuario, privacidad y modelos de negocio.

La continua evolución de esta tecnología y sus diferentes aplicaciones, dependiendo del campo el que se encuentren, está promoviendo la continua búsqueda de una arquitectura de referencia capaz de solventar los problemas del IoT descritos. En la sección 1.3.5 se aborda la interoperabilidad entre plataformas. En ella se presentan algunas plataformas y arquitecturas de referencia.



### 1.2.4 Aplicaciones del IoT

El IoT se encuentra en proceso de integración en multitud de campos y con diferentes aplicaciones [65, 66]. La integración del IoT en estos dominios genera un ecosistema que permite controlar de manera más eficiente los recursos mediante la monitorización, lo que mejora la toma de decisiones. Algunas de sus aplicaciones se ilustran en la figura 1.7 y se detallan a continuación [67]:



Figura 1.7. Aplicaciones del IoT

- **Atención sanitaria:** la monitorización de la actividad corporal está en auge en los últimos años [34, 35]. Este campo es uno de los más prometedores dando como resultado la salud inteligente. Existen multitud de dispositivos conectados que permiten registrar los principales parámetros de salud del ser humano como son la frecuencia cardiaca, el número de pasos, kilómetros recorridos, glucosa y oxígeno en sangre, etc. El uso del IoT está permitiendo mejorar la calidad de los pacientes. Su aplicación enfocada al cuidado de personas mayores permite controlar al paciente en caso de caídas o problemas de salud. Otra de las aplicaciones relacionadas es el control de la temperatura en medicamentos o vacunas y la trazabilidad de estas, pudiendo detectar posibles lotes defectuosos de una forma rápida.
- **Ciudades inteligentes:** el núcleo de la población mundial reside en ciudades y cada día menos en pueblos o lugares rurales, por lo que, la sostenibilidad ambiental y la optimización de recursos es fundamental en este sector. La eficiencia y reducción de costes es uno de los principales objetivos de los ayuntamientos, promoviendo iniciativas como el uso de IoT en alumbrado público, servicios de transporte, gestión de aguas residuales o medioambientales y la gestión de residuos en la recogida de basura [32, 33].
- **Sector del transporte:** es uno de los sectores con mayor impacto económico en el mundo. La integración de IoT en este sector permite una mayor eficiencia de las industrias y del transporte. Su funcionalidad se centra en monitorizar las rutas de transporte y comprobar que los estándares de calidad del productor son respetados en cada eslabón de la cadena [36, 37]. Otra de sus funcionalidades es la gestión del tráfico informando al usuario de atascos, accidentes, plazas de aparcamiento libres, etc. Esta información ayuda a empresas y usuarios en la toma de decisiones.
- **Sector industrial:** el objetivo principal del uso de IoT en este sector es la mejora de la eficiencia de las industrias y la optimización de la producción. Dotar a máquinas de sensores

que permitan recoger información del entorno en el que se encuentran está permitiendo a empresas detectar averías antes de que estas ocurran, implementado el llamado mantenimiento predictivo [28, 29]. La inclusión del IoT está permitiendo una mejor gestión de las plantas, consiguiendo que se utilicen los mínimos recursos para la obtención de la fabricación.

- **Sector agrícola:** con la llegada del IoT al sector agrícola, la forma de trabajar tradicional ha sido modificada, permitiendo monitorizar en tiempo real variables climáticas y de suelo. Sensores de temperatura, humedad, conductividad eléctrica o CO<sub>2</sub> están permitiendo a los agricultores y técnicos de campo poder realizar una mejor gestión y supervisión de las explotaciones. Además, el uso de actuadores en riegos automatizados, ventilaciones, humidificaciones o inyección de CO<sub>2</sub> está permitiendo optimizar los procesos de producción y alargar los ciclos de cultivo para obtener una mejor relación de calidad, cantidad y precio máximo en el momento que el mercado lo necesite [30, 31]. Además, el uso de herramientas de inteligencia artificial de la mano del IoT están permitiendo la detección de plagas y enfermedades en los cultivos, uno de los principales retos de la agricultura moderna.

### 1.2.5 Retos en el desarrollo IoT

Las dificultades tecnológicas son siempre uno de los principales retos en la creación de una nueva tecnología [68]. El IoT se presenta como una posible solución a los problemas de escasez de recursos, optimización y producción, pero actualmente esta tecnología se enfrenta a una serie de desafíos técnicos para poder hacer frente a esas mejoras en diferentes sectores y aplicaciones [69]. A continuación, se muestran algunos de ellos (véase la figura 1.8):

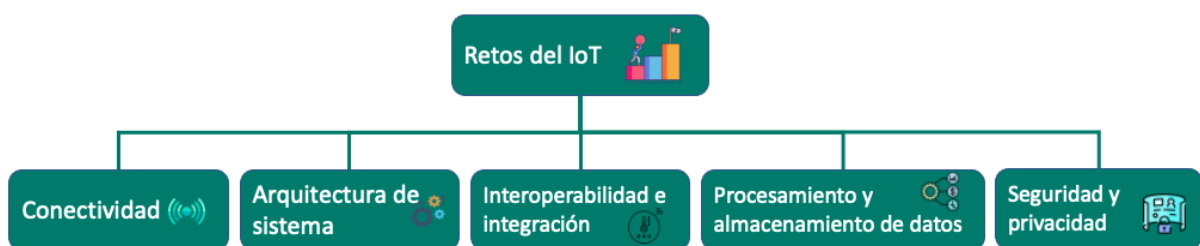


Figura 1.8. Retos en el desarrollo IoT. Adaptación de [67]

- **Conectividad y energía:** la conectividad es uno de los principales pilares de la tecnología IoT. Actualmente, se están tratando de solucionar retos relacionados con la falta de cobertura y la transmisión de un gran volumen de datos con baja latencia [70]. El retraso o pérdida de conexión en algunos dominios como en el control de procesos industriales o el sector de los vehículos inteligentes puede provocar problemas catastróficos en la ayuda a la toma de decisiones. La búsqueda de nuevos protocolos y estándares de conectividad con un bajo consumo energético y capaces de trabajar en medios hostiles con perturbaciones externas como ruidos o inclemencias meteorológicas son algunos de los retos a los que se enfrenta esta tecnología. Por tanto, para garantizar un correcto funcionamiento, las comunicaciones deben de ser fiables, robustas y con un bajo consumo.
- **Arquitectura de sistema:** dado el amplio entorno de operación de la tecnología IoT en los diferentes sectores y sus diferentes aplicaciones, la búsqueda de una arquitectura estándar y válida es una tarea muy compleja. En el dominio de las aplicaciones cada sector dispone de sus propias funcionalidades. Por lo tanto, la existencia de una arquitectura de referencia global que cubra todas las funcionalidades y entorno es casi imposible de encontrar. Una de las claves del desarrollo de esta arquitectura es soportar una infraestructura de sistemas

que combinen datos de diversas fuentes y determinen las características relevantes, que interpreten los datos y muestren sus relaciones, que comparen los datos con la información histórica útil y que apoyen la toma de decisiones. De esta forma, uno de los desafíos del IoT es desarrollar arquitecturas de referencia heterogéneas [71]. Es decir, las arquitecturas deben ser abiertas y, siguiendo los estándares, no deben restringir a los usuarios al uso de soluciones fijas de extremo a extremo.

- **Interoperabilidad e integración:** un ecosistema IoT está formado por datos heterogéneos. Esta heterogeneidad no es más que un reflejo de la diversidad de dispositivos, interfaces y protocolos de comunicación que conforman el núcleo del IoT. Dada la competitividad del mercado, los dispositivos son desarrollados por diferentes empresas utilizando estándares propietarios, lo que dificulta la interoperabilidad e integración [40]. Cada dispositivo tiene diferentes componentes de comunicación y computación, lo que dificulta la integración de los datos. Una forma de solucionar esta problemática es con la utilización de estándares abiertos.
- **Procesamiento y almacenamiento de datos:** los dispositivos están constantemente conectados y generando simultáneamente grandes cantidades de datos de todo tipo y formato (p. ej. datos estructurados o no estructurados). Por lo tanto, las infraestructuras deben poder transportarlos, almacenarlos, procesarlos y analizarlos [72]. Esta última fase de procesamiento y análisis debe de ser a una velocidad adecuada, a menudo buscando la aproximación más cercana a la respuesta en «tiempo real».
- **Seguridad y privacidad:** dada la naturaleza del IoT, grandes cantidades de datos son generados por los dispositivos. Estos dispositivos por lo general están limitados en las tareas de computación para garantizar largos periodos de tiempo de monitorización y bajos costes; por lo que estas características que aportan ventajas por un lado. Por otro, dificultan la inclusión de algoritmos que proporcionen seguridad y privacidad. Este es uno de los retos que más preocupa a empresas y usuarios, ya que cada día existen más dispositivos conectados siendo necesario garantizar la seguridad durante la transmisión y autenticación para el acceso a los dispositivos [67].

A partir de los retos expuestos, se percibe cómo el desarrollo o la evolución del IoT se ve condicionado a la evolución de otras tecnologías como el *cloud computing* [23], el *fog computing* [73], el *edge computing* [74], la inteligencia artificial, el *deep learning* [24], el procesamiento y seguridad de los datos [22, 75], entre otras.

### 1.3 Breve introducción a la interoperabilidad en el IoT

La clave del IoT está en la capacidad de conectar infinidad de dispositivos físicos, por lo que la heterogeneidad entra en juego, dando como resultado la inclusión de un gran número de datos heterogéneos. Uno de los mayores desafíos en esta tecnología es la interoperabilidad, es decir, la capacidad de los dispositivos para trabajar juntos de manera eficiente. Empresas como Amazon (AWS IoT), Cisco (Jasper), IBM (Watson), Google (Brillo), Microsoft (Azure IoT) se están posicionando a la cabeza como plataformas IoT. Estas compañías a menudo promueven sus propios estándares, protocolos e interfaces, formatos y semántica, lo que puede crear ecosistemas cerrados y limitar la libertad de los usuarios. Es necesario que estas empresas cambien su enfoque y apuesten por la interoperabilidad mediante el uso de estándares comunes [40].

La falta de interoperabilidad en el IoT plantea un desafío para los desarrolladores de aplicaciones y servicios, ya que deben adaptar sus aplicaciones a las API REST de diferentes

empresas y a los modelos de datos de cada una de ellas. Esto dificulta la creación de aplicaciones multiplataforma y aumenta la dependencia de dispositivos o *software* que actúan como integradores entre estos dispositivos y las plataformas propietarias. Esta dependencia puede generar problemas económicos a la hora de integrar nuevas funcionalidades y adaptar el producto ante cambios en las plataformas propietarias.

El problema de interoperabilidad no es algo nuevo de la tecnología IoT. Este es conocido desde la existencia de los sistemas de información en 1988 [39], y posiblemente incluso antes. En relación con el contexto presente existen diferentes tipos de definiciones en la literatura [40]:

- La Organización Internacional de Normalización (ISO, del inglés *International Organization for Standardization*) y la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, del inglés *International Electrotechnical Commission*) definen la interoperabilidad como «*la capacidad de comunicar, ejecutar programas o transferir datos entre varias unidades funcionales de una manera que requiere que el usuario tenga poco o ningún conocimiento de las características únicas de esas unidades*» [76].
- En una visión más amplia, IEEE define la interoperabilidad como «*la capacidad de dos o más sistemas o componentes para intercambiar información y utilizar la información que se ha intercambiado*» [77].

Según las definiciones enumeradas anteriormente, la interoperabilidad se realiza mediante la elaboración de normas. En el IoT, la interoperabilidad puede definirse como la capacidad de dos sistemas para comunicarse y compartir servicios entre sí [78]. En esta sección se presenta la importancia de la interoperabilidad y la heterogeneidad a la que enfrentan los ecosistemas IoT.

La figura 1.9 tomada como referencia para el diseño propuesto en [40] muestra los diferentes niveles o perspectivas en los que puede enfrentarse la interoperabilidad del IoT. Estos niveles incluyen la interoperabilidad entre dispositivos, la interoperabilidad de la red, la interoperabilidad sintáctica, la interoperabilidad semántica y la interoperabilidad de plataformas, que se describirán a continuación.

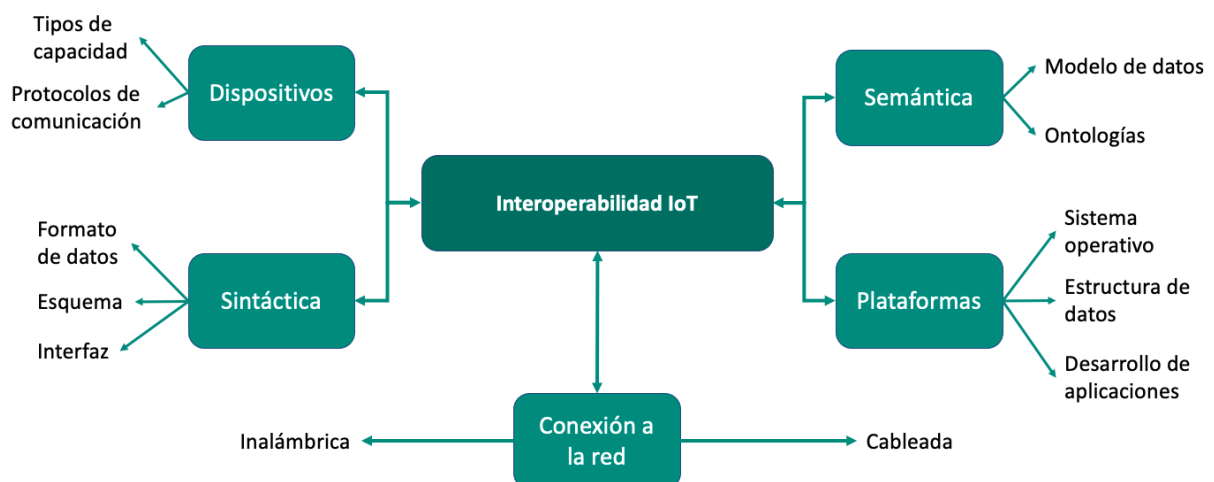


Figura 1.9. Niveles de interoperabilidad en el IoT. Adaptación de [40]

### 1.3.1 Interoperabilidad entre dispositivos

La interoperabilidad de dispositivos se puede definir como «*la capacidad de dos o más dispositivos para conectarse, intercambiar información e interactuar entre sí*» [79]. Sin embargo, en la actualidad, muchos ecosistemas IoT ofrecen plataformas cerradas e inaccesibles, lo que dificulta la interoperabilidad de dispositivos. Para abordar este problema, diferentes sectores intentan abordar este reto a través de la estandarización.

En los últimos años, se han llevado a cabo varias iniciativas para establecer normas que permitan la interoperabilidad entre dispositivos, redes, servicios y formatos de datos IoT de fuentes de datos heterogéneas. Por ejemplo, la Unión Europea ha financiado proyectos de investigación en el marco del programa H2020 que se centran en la conexión de plataformas IoT. Sin embargo, estas normas pueden tardar mucho tiempo en acordarse y aceptarse plenamente, si es que llegan a hacerlo. Por esta razón, investigadores de la industria y el mundo académico han estado trabajando en soluciones innovadoras para abordar la interoperabilidad y la heterogeneidad en los diferentes sistemas IoT. La heterogeneidad de los datos dificulta esta tarea, especialmente cuando se trata de integrar plataformas IoT y dispositivos a nivel más alto. Para sacar el máximo provecho de un ecosistema IoT, es necesario que todos los elementos (p. ej. objetos, comunicaciones, aplicaciones, servicios) trabajen juntos de manera eficiente:

- **Patrones de comunicación** A fin de garantizar la interoperabilidad entre dispositivos IoT para asegurar la comunicación entre los mismos, es preciso hacer un estudio de los patrones de comunicación comúnmente utilizados. Partiendo del estándar RFC 7452 definido por la Junta de Arquitectura de Internet (IAB, del inglés *Internet Architecture Board*) [80] se pueden describir tres patrones de comunicación:

1. **Comunicación de dispositivo a dispositivo:** la comunicación de Dispositivo a Dispositivo (D2D, del inglés *Device to Device*) viene caracterizada por la inmediatez de la misma. Esta se produce de dispositivo a dispositivo directamente, sin necesidad de intermediarios. Los dispositivos intercambian información de manera directa, valiéndose para ello de diversos tipos de redes (p. ej. redes IP e Internet), así como redes de corto alcance (p. ej. Bluetooth, Zigbee o Z-Wave).

Este tipo de comunicación es especialmente importante para dispositivos IoT residenciales en la llamada «domótica». Por lo general, estos dispositivos forman parte de una malla donde cada uno de ellos se comporta como un nodo independiente, comunicándose entre sí a través del envío de pequeños paquetes de datos.

El patrón D2D se caracteriza esencialmente por la vinculación de dispositivos a protocolos de comunicación específicos para garantizar el intercambio de datos con los requisitos de Calidad de Servicio (QoS, del inglés *Quality of Service*). En consecuencia, el principal problema que plantea este tipo de comunicación es la falta de compatibilidad entre los protocolos asociados a los dispositivos y los empleados por cada fabricante, por lo que se limita la experiencia del usuario y la libertad en la elección de dispositivos.

2. **Comunicación de dispositivo a la nube:** en el patrón de comunicación de Dispositivo a la Nube (D2C, del inglés *Device to Cloud*), los dispositivos IoT establecen comunicación con un servicio en la nube de Internet, aprovechando, normalmente, las comunicaciones preexistentes como son las conexiones por cable (*Ethernet*) o inalámbricas (*Wi-Fi*). Una vez hecha la conexión entre el dispositivo IoT y la red IP, se realiza la conexión al servicio en la nube. Existen varios protocolos de comunicación basados en IP que permiten la comunicación entre dispositivos y plataformas de servicio como HTTP, REST y CoAP.

Esta comunicación se presenta como una solución a los problemas que presentan los dispositivos D2D vistos anteriormente. Sin embargo, a su vez genera nuevas problemáticas basadas en redes de comunicación tradicionales y, por lo tanto, en protocolos de comunicación que no fueron diseñados para el uso de estos dispositivos; lo que genera un consumo excesivo de datos y batería o incluso la pérdida de paquetes dada la naturaleza de estos protocolos.

3. **Comunicación de dispositivo a gateway:** la comunicación de Dispositivo a *Gateway* (D2G, del inglés *Device to Gateway*) funciona a través en un *middleware* o *proxy* operando en un *gateway*. «*El middleware blindará la complejidad de los dispositivos subyacentes y proporciona un entorno de ejecución y desarrollo para las aplicaciones superiores. Con el middleware, los usuarios pueden centrarse en el desarrollo de aplicaciones sin tener que considerar los detalles técnicos del sistema y el hardware*» [81].

Este tipo de comunicación se caracteriza fundamentalmente por la necesaria intervención de un intermediario entre el dispositivo IoT y el servicio en la nube. Este intermediario permite la traducción de datos y protocolos y aumenta la seguridad y flexibilidad de la red de dispositivos IoT. Un ejemplo de la utilización de esta comunicación son los dispositivos de monitorización de actividad física, donde el reloj actúa como herramienta de medición y los datos son enviados a un *gateway* como un *smartphone* que es el encargado de enviar los datos al servicio en la nube.

#### 1.3.2 Interoperabilidad de red

La interoperabilidad de red es un aspecto clave de la interoperabilidad y se encuentra relacionada con los protocolos de comunicación y las infraestructuras de red necesarias para interoperar o lo que es lo mismo para la conectividad de dispositivos IoT. Sin conectividad, no es posible la comunicación. En esta fase, los dispositivos solo intercambian mensajes sin interpretar el contenido de ellos. La figura 1.9 representa los dos tipos de interoperabilidad a nivel de red como son la inalámbrica y la cableada. El uso de estándares en la capa física y Control de Acceso a Medios (MAC, del inglés *Media Access Control*) surgen como una posible solución. Sin embargo, la puesta en marcha de estos no son válidos para todas las implementaciones, por lo tanto, se ven afectadas las comunicaciones de los dispositivos.

Un ejemplo de cómo los estándares pueden ser interoperables es el protocolo IEEE 802.15.4 [82]. Este estándar es compatible e interoperable en las capas física y MAC. Sin embargo, en la capa de red, tecnologías como 6LoWPAN y Zigbee no son interoperables, aunque hagan uso del mismo estándar. Esto significa que la interoperabilidad de un estándar depende del contexto en el que se utilice y se implemente.

En la actualidad, para tratar de abordar el problema de la interoperabilidad entre diferentes dispositivos y tecnologías de comunicación, muchos dispositivos, como los *smartphone*, utilizan la comunicación D2G. Estos dispositivos *gateways* actúan como enrutadores soportando diferentes tecnologías de comunicación (p. ej. Wi-Fi, Bluetooth, IEEE 802.15.4, etc.). En el caso anterior mencionado de incompatibilidad entre 6LoWPAN y Zigbee empleando el mismo estándar (IEEE 802.15.4), esto se puede solucionar a través de *software* especializado para permitir la comunicación entre estos dispositivos.

Las tecnologías mencionadas anteriormente, junto con los protocolos utilizados actualmente, tienen un gran potencial en el campo de IoT. A continuación, se describen algunos de los protocolos más comúnmente utilizados en IoT, divididos por las capas de la pila de protocolos



en las que se encuentran: la capa física y de enlace, la capa de red y transporte y finalmente la capa de aplicación.

1. **Capa física y de enlace:** la capa física es responsable de la comunicación entre dispositivos en un entorno físico específico. Es la primera capa de la pila de protocolos y se encarga de definir las especificaciones eléctricas y físicas de los dispositivos. La capa de red, por su parte, se encarga de la transferencia de datos en la arquitectura del sistema y trata de identificar y corregir errores en la capa física. Esta capa se encarga del direccionamiento lógico y del control del enrutamiento:

- **Wi-Fi:** el principal objetivo del estándar IEEE802.11 es permitir una conectividad inalámbrica a través de una banda sin licencia, de fácil conexión, interoperable entre proveedores y de bajo alcance [75]. Su funcionamiento se basa en ondas de radio y fue creada por Wi-Fi Alliance. Surge como sustitución del estándar Ethernet IEEE 802.3 basado en la comunicación por cable. Este estándar se encuentra en constante evolución, por lo tanto, se han generado diferentes especificaciones dependiendo de sus características (IEEE802.11a/b/g/n/ac/ah/ax).

La especificación IEEE802.11b y IEEE802.11g disponen de una mejor calidad de señal atenuando las interferencias, una cobertura mayor y un menor consumo de energía, lo que permite su uso en dispositivos IoT. El rango de alcance se encuentra cerca de los 30 metros en interiores y los 100 metros exteriores. En cambio, la especificación IEEE802.11n aumenta la velocidad de transmisión pero también el consumo de energía. Para hacer frente a los problemas de bajo alcance y alto consumo energético surgió un nuevo estándar para IoT llamado, Wi-Fi HaLow (802.11 ah).

- **Wi-Fi HaLow (802.11ah):** el estándar 802.11ah surge con el nombre de Wi-Fi HaLow y es una propuesta para solucionar los problemas de alcance del resto de estándares Wi-Fi. Este trabaja en un rango de 900 MHz frente a los 2,4 GHz del resto, lo que aporta mayor cobertura y baja velocidad en el envío de los datos, pudiendo alcanzar un rango máximo de un 1 km. Dada el alto rango de alcance, este no está diseñado para envíos de paquetes a grandes velocidades, por lo tanto, proporciona un ancho de banda como máximo de 150 kbps. Dadas estas características, los dispositivos conectados bajo este estándar pueden funcionar durante meses o incluso años con baterías más pequeñas sin necesidad de estar conectados a la corriente [83]. No obstante, esta tecnología aún se encuentra en desarrollo y necesitará de puntos de acceso inalámbricos y clientes específicos.
- **Bluetooth:** el estándar IEEE 802.15.1 se basa en el uso de tecnología inalámbrica para el envío de datos entre dispositivos. Esta tecnología surge como reemplazo de las conexiones por cable entre teléfonos, cámaras, ordenadores, etc. Es una tecnología de bajo coste y consumo reducido, por eso es ampliamente utilizada. Esta surge para tratar de ayudar a la interoperabilidad entre dispositivos propietarios con adaptadores específicos, proporcionando una conexión inalámbrica entre ellos. Su rango de trabajo se encuentra en una banda no comercial de 2.4 GHz empleando las Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN, del inglés *Wireless Personal Area Network*) con un alcance entre los 8 y 10 m y una velocidad comprendida entre 1 Mbps y 32 Mbps.

Es una tecnología en constante evolución, para el caso particular de dispositivos de bajo consumo se desarrolló una especificación llamada Bluetooth de Baja Energía (BLE, del inglés *Bluetooth Low Energy*) [84] basada en Bluetooth 4.1 y 4.2 por lo que dispone de las mejoras de estas especificaciones como son el acceso directo a Internet a través

de 6LoWPAN, haciendo posible el uso de las infraestructuras IP existentes [85]. Dada la complejidad de esto, el Grupo de Interés Especial en Bluetooth (Bluetooth SIG, del inglés *Bluetooth Special Interest Group*) propone una forma más sencilla de realizar las conexiones a través de *gateway*. La inclusión de la versión 5.0 promete una mejora en la combinación de esta tecnología y el IoT, dando como resultado una duplicación de la velocidad, aumentando la capacidad de transmisión de datos, menor consumo energético y un mayor alcance.

- **Zigbee:** se basa en el estándar 802.15.4 [86], que define las capas física y MAC para Redes Inalámbricas de Área Personal con Tasas Bajas de Transmisión de Datos (LR-WPAN, del inglés *Low-Rate Wireless Personal Area Network*). Trabaja en el espectro entre los 915 MHz y 2.4 GHz al igual que otras tecnologías inalámbricas. Zigbee define las especificaciones de la capa de red para las topologías de red de estrella, árbol y punto a punto. Proporciona un marco para la programación de aplicaciones en la capa de aplicación [87].

Este conjunto de protocolos se encuentran en uso en multitud de sectores como industrias, comercios y servicios gubernamentales. Es el competidor directo del Bluetooth, dispone de una velocidad de transferencia de 250 kB/s comparado con los 3000 kB/s de la tecnología Bluetooth. Además, el consumo energético en reposo es 3  $\mu$ A y 30mA transmitiendo, comparados con los 0,2 mA y 40 mA del Bluetooth. Esto es debido a que Zigbee se encuentra la mayoría del tiempo en reposo, cosa que Bluetooth no puede hacer y mantiene una conexión constante.

- **LoRaWAN:** este protocolo es desarrollado en 2015 por la Alianza LoRa [88]. Fue especialmente desarrollado para su empleo en IoT para poder conectar miles de dispositivos, aparatos y módulos en una gran red. Su utilización se encuentra muy extendido en las ciudades inteligentes, pero actualmente se encuentra en expansión en el resto de sectores [89]. Utiliza una topología de estrella, lo que le obliga a disponer de *gateways* en cada nodo de dispositivos, mientras que Zigbee al usar la topología de malla permite que cada nodo se pueda comunicar con otro, lo que lo hace ideal en los saltos. La ventaja de LoRaWAN es la eficiencia energética y el largo alcance de trabajo comprendido entre 2 km y 15 km. Fue desarrollado con el propósito de ser un protocolo RFID de largo alcance y abajo consumo energético.

Cuando se habla de LoRa, se habla únicamente de una tecnología similar al Wi-Fi o Bluetooth centrada en las comunicaciones de dispositivos IoT. El problema de utilizar de forma independiente esta tecnología es la falta de eficiencia en el envío de datos por su alto consumo. Para solucionar este problema se emplea LoRaWAN un protocolo de red de punto a multipunto perteneciente a la capa MAC, permitiendo un control de acceso medio.

- **Z-Wave** es un estándar de comunicación inalámbrica basado en el protocolo de comunicación 908.42 MHz, desarrollado por la compañía danesa Zensys. Fue lanzado en 2001 y se utiliza principalmente en dispositivos domésticos inteligentes, como electrodomésticos, iluminación, cerraduras de puertas, termostatos, entre otros. Es un estándar abierto y se utiliza en una amplia variedad de dispositivos de diferentes fabricantes. Z-Wave es conocido por su baja potencia y alcance limitado, lo que lo hace ideal para su uso en hogares y edificios pequeños. Además, se utiliza en el IoT para conectar y controlar dispositivos en una red doméstica.



La tabla 1.2 muestra una comparativa de los protocolos de comunicación más utilizados en el IoT.

Tabla 1.2. Características de los protocolos

Características	Wi-Fi	Bluetooth	Zigbee	LoRa	Sigfox	Z-Wave
Estandar	IEEE 802.11ah	IEEE 802.15.1	IEEE 802.15.4	LoRaWan	Sigfox	Z-Wave Alliance ZAD12837
Frecuencia (MHz)	1000	2400	868 /915 /2400	433 /868 /915	900	800 /900
Velocidad de datos (kbps)	150/780	1000	250	0,3 a 5	1	9,6/40/100
Distancia de trabajo (m)	1000	10-100	10	2500 /15000 /45000	30000 /50000	30
Tipo de red	WLAN	WPAN	WPAN	WWAN	LPWAN	WPAN
Topología de red	Estrella	Estrella	Estrella, malla y arbol	Estrella	Estrella	Rejilla

2. **Capa de red y transporte:** la capa de red es la encargada de proporcionar una dirección «identificador» a cada dispositivo para comunicarse con el *router*. La capa de transporte es la encargada de supervisar la comunicación de los datos entre capas. Se encuentra formada por los protocolos TCP, UDP y el Protocolo de Transmisión de Control de Flujos (SCTP, del inglés Stream Control Transmission Protocol). TCP proporciona una conexión fiable y orientada a la conexión, garantiza la entrega completa y en orden de los datos y permite la detección y corrección de errores. UDP, por otro lado, envía datagramas sin establecer una conexión previa y sin garantizar la entrega completa y en orden, lo que lo hace más rápido pero también más propenso a errores. SCTP es similar a TCP, pero permite manejar múltiples flujos de datos simultáneamente e incluye la detección y corrección de errores y la reconexión automática en caso de pérdida de conexión. A continuación, se presenta el estándar 6LowPAN:

- **6LowPAN:** es un estándar de red inalámbrica y abierto creado por IETF en 2011 para reemplazar a LR-WPAN. Utiliza la red IP de Internet y el estándar IEEE 802.15.4 para enviar paquetes de datos utilizando IPv6 de manera eficiente. 6LowPAN es una capa de adaptación que permite la implementación de protocolos superiores como MQTT, HTTP, TCP y UDP. Tiene una topología en malla robusta, escalable y autorregenerativa.

El principal beneficio de 6LowPAN es la interoperabilidad y la compatibilidad entre dispositivos que utilizan IPv4 (que es la mayoría de los dispositivos actuales) e IPv6, el nuevo protocolo de Internet. Las redes 6LowPAN pueden conectarse a Internet a través de un *router* frontera compatible con 6LowPAN, que a su vez tiene soporte para ambas versiones de IP. A diferencia de otras arquitecturas, como Zigbee o Bluetooth, 6LowPAN no necesita *gateways* de aplicación complejos para conectarse a redes IP, ya que reenvía tramas a nivel de la capa de red.

3. **Capa de aplicación:** esta capa se encarga de proporcionar una interfaz entre las aplicaciones y los dispositivos IoT. Debido a las características de los dispositivos IoT, es necesario utilizar protocolos seguros, ligeros y eficientes. Los sistemas IoT necesitan que los dispositivos que forman el ecosistema IoT intercambien información o lo que es lo mismo que se comuniquen entre ellos a través de mensajes. La elección del protocolo de transferencia adecuado no es una tarea fácil y se presenta como un reto. Algunos de los protocolos más utilizados son:

- **HTTP:** es un protocolo de código abierto y con un gran número de librerías, lo que lo hace muy accesible y fácil de implementar. Este es usado en páginas web e Internet y, por lo tanto, es natural que también sea usado en aplicaciones IoT.

HTTP es un protocolo de red basado en una arquitectura cliente/servidor que funciona mediante peticiones y respuestas. Se utiliza a menudo sobre TCP con el protocolo IP a nivel de capa de red. Las aplicaciones IoT se basan en APIs que utilizan los propios métodos de HTTP como GET, PUT, POST y DELETE.

- GET: este método se utiliza para obtener información de un recurso específico. Es el método más utilizado y se utiliza cuando se accede a una página web.
- POST: este método se utiliza para enviar información a un servidor para su procesamiento. Se utiliza a menudo cuando se envía un formulario a una página web.
- PUT: este método se utiliza para actualizar un recurso existente en el servidor.
- DELETE: este método se utiliza para eliminar un recurso específico del servidor.

HTTP tiene la ventaja de permitir el envío de grandes paquetes de datos, pero esto también lo hace ineficiente para la actualización en tiempo real de sensores, ya que consume mucho ancho de banda por petición (1288 bytes). Por esta razón, no es adecuado para todos los dominios del IoT, por lo que se han desarrollado otros protocolos más ligeros como CoAP y MQTT. Además, HTTP no proporciona seguridad por sí solo, por lo que es necesario utilizar protocolos de cifrado como la Capa de *Sockets Seguros* (SSL, del inglés *Secure Sockets Layer*) y TLS para mejorar la seguridad. TLS es una mejora de SSL con diferentes opciones de cifrado, lo que resulta en el Protocolo de transferencia de hipertexto seguro (HTTPS, del inglés *HyperText Transfer Protocol Secure*).

- **CoAP:** es un protocolo de transferencia web que trabaja en la capa de aplicación del modelo creado por la Organización Internacional para la Normalización (OSI, del inglés *Open Systems Interconnection Model*). Está diseñado para dispositivos que trabajan en redes restringidas como por ejemplo de baja potencia y con pérdidas [90]. Diseñado para aplicaciones Máquina a Máquina (M2M, del inglés *Machine-to-Machine*), es un protocolo que permite correr en dispositivos simples de bajos recursos y que no pueden utilizar HTTP, permitiendo que estos se comuniquen a través de Internet.

Fue originado para trasladar el modelo de petición y respuesta usado en HTTP a los dispositivos y redes con recursos limitados, pero incluyendo otras características como *multicast*, bajo *overhead* y simplicidad. CoAP, al emplear los principales conceptos web de HTTP, también implementa el modelo REST. Por lo tanto, dispone de los métodos GET, POST, PUT y DELETE descritos en el apartado anterior sobre HTTP. La ventaja de CoAP frente a HTTP es el uso de cabeceras reducidas, ya que los métodos y códigos de estado se codifican en binario, limitando el número de transacciones y añadiendo soporte UDP. Como resultado, CoAP es un protocolo que consume menos energía, siendo un

protocolo apto para el IoT. En el artículo de Colitti [91] se presenta una comparación de CoAP frente a HTTP presentando como resultado el tamaño de transacción de uno frente a otro, en el caso de HTTP es de 1.288 bytes frente a los de 128 bytes de CoAP. Aun así, CoAP está diseñada para interactuar con HTTP a través de *cross proxies*, lo que permite traducir las peticiones entre los dos protocolos.

- **MQTT**: es un protocolo desarrollado en 1999 por la empresa IBM y estandarizado por Organización para el Avance de las Normas de Información Estructurada (OASIS, del inglés *Organization for the Advancement of Structured Information Standards*) en 2013 para el envío de mensajería ligera en aplicaciones M2M. Es un protocolo de la capa de aplicación del modelo OSI basado en TCP/IP, al igual que HTTP. MQTT [92] sigue una arquitectura asimétrica y tiene un tamaño de cabecera fijo de solo 2 bytes, en comparación con los 26 bytes de HTTP, lo que lo convierte en un protocolo muy ligero y adecuado para IoT, M2M y WSN

Su funcionamiento se basa en el modelo de publicación y suscripción [93] para el intercambio de información. Tiene un *broker* central o nodo, que es un servidor que almacena la información en forma de *topics*. Los *topics* son alimentados por los publicadores y recibidos por los suscriptores. Los usuarios publican mensajes a un *topic* determinado y otros pueden suscribirse a ese *topic* para recibir la información. Los clientes pueden desempeñar el papel de publicadores y suscriptores simultáneamente, y pueden existir varios *brokers*, por lo que pueden suscribirse a varios. Un *broker* también puede actuar como publicador o suscriptor de otro *broker*, lo que hace que MQTT sea un protocolo bidireccional.

Una de las ventajas de este protocolo es preservar las transmisiones fiables. Por lo tanto, se definen tres niveles de *QoS* con relación a la forma de entregar los mensajes:

- **QoS 0**: este se encuentra en el nivel más bajo de comprobación. En este nivel, el mensaje se envía una sola vez y luego se elimina de la cola. Es el más rápido de los tres niveles de comprobación debido a que no se valida su entrega a través de la red ni se almacena en el remitente. Sin embargo, esto también significa que no puede haber mensajes duplicados en este nivel.
- **QoS 1**: se encuentra en el nivel intermedio de comprobación y es el nivel predeterminado de transferencia. A través del mecanismo *ACKs* (confirmaciones de entrega), MQTT garantiza la entrega del mensaje. El publicador envía el mensaje y espera una respuesta en forma de un paquete *PUBACK* del receptor. Si la respuesta no es recibida en el tiempo establecido, el publicador volverá a enviar el mensaje con *DUP* a 1. Una vez recibido el mensaje, el receptor debe responder con un mensaje *PUBACK* cuando recibe un mensaje con *DUP* 1. El receptor puede aceptar el mismo mensaje varias veces.
- **QoS 2**: es el nivel más alto de calidad de servicio de MQTT. En este nivel, los publicadores y suscriptores se aseguran de que los mensajes se publiquen solo una vez, por lo que la pérdida de mensajes y la duplicación no son aceptables. Es el nivel más seguro, pero también el más lento de los tres. Cuando el publicador envía el mensaje, este se almacena y espera una respuesta en forma de un mensaje *PUBREC* del receptor. Una vez recibida esta respuesta, el publicador puede eliminar el mensaje publicado. El publicador guarda el mensaje *PUBREC* y responde con un *PUBREC*, esperando una respuesta en forma de un mensaje *PUBCOMP* del receptor. Cuando el emisor recibe el mensaje *PUBCOMP*, eliminará el estado previamente guardado.

- **OPC UA:** Arquitectura Unificada de Comunicaciones de Plataforma Abierta (OPC UA, del inglés *Open Protocol Communication Unified Architecture*) se presenta como la evolución de OPC tradicional. Fue diseñado por la Fundación OPC para permitir la transferencia segura, fiable e interoperable de datos brutos [94]. A diferencia del OPC clásico, que estaba vinculado a Microsoft y, por lo tanto, dependía de una plataforma específica, OPC UA es multiplataforma y es adecuado para su uso en escenarios multidominio y en Internet [95]. OPC UA fue creado en 2003 como una arquitectura orientada a servicios que permite la comunicación independientemente de fabricantes y plataformas.

OPC UA se centra en la comunicación entre cliente y servidor y opera sobre TCP/IP. Al ser una arquitectura unificada, aporta un nivel de interoperabilidad completa desde el dispositivo hasta el modelo de datos semántico para el intercambio de datos entre plataformas y empresas.

El objetivo de OPC UA es lograr la interoperabilidad entre dispositivos independientemente del servicio API del que proceda. OPC es el estándar en el sector de la automatización, monitorización y control de procesos en el sector industrial. En el ámbito de la comunicación se podría decir que OPC UA está orientado a comunicaciones pesadas, mientras que MQTT está orientado a comunicaciones ligeras. No obstante, MQTT puede vincularse con OPC UA generando sistemas híbridos, lo que aporta un valor añadido a este.

### 1.3.3 Interoperabilidad sintáctica

Una vez que se logra la interoperabilidad a nivel de red entre los dispositivos IoT, permitiendo el envío de información a través de una conectividad exitosa, se puede avanzar a la segunda fase de interoperabilidad: la interoperabilidad sintáctica. Esta se produce cuando el emisor y el receptor del mensaje utilizan estructuras de datos diferentes.

La variedad de dispositivos IoT dificulta el desarrollo de la interoperabilidad sintáctica. Estos dispositivos son producidos por diferentes empresas que utilizan diferentes formatos y estructuras para los datos. Por lo tanto, es necesario estandarizar los formatos para que puedan ser interpretados por cualquier elemento del ecosistema IoT. La interoperabilidad sintáctica se refiere a la estructura de los datos en un mensaje, lo que incluye su formato y su sintaxis y codificación. Es importante que estos estén bien definidos para garantizar que sean interpretados correctamente.

Antes de la llegada del IoT, los problemas de interoperabilidad sintáctica eran inexistentes en el sector industrial. Los primeros sistemas de comunicación M2M cableados eran sistemas diseñados con unos requisitos cerrados, lo que permitía conocer las funcionalidades exactas del sistema al igual que sus interacciones con el resto de sistemas. Esto tenía un problema y era la limitación o imposibilidad de añadir nuevos sensores o funcionalidades a los sistemas, pero a su vez generaba sistemas predecibles y robustos. Este enfoque no es válido cuando se trata de dispositivos IoT y sus ecosistemas. A continuación, se presentan los dos estándares más utilizados actualmente en la interoperabilidad sintáctica:

- **XML:** es un lenguaje de marcado que evolucionó del SGML debido a la complejidad de este último [96]. W3C especifica que «XML debe ser directamente utilizable en Internet» y «los documentos XML deben ser legibles para el ser humano y razonablemente claros». Una de las ventajas de XML es que es un lenguaje basado en texto. Al igual que en HTML, en XML se usan etiquetas que deben cerrarse para dar lugar a documentos XML bien formados. Además, las etiquetas pueden tener atributos que añaden valor semántico al documento. Sin embargo, la estructura rigurosa de XML y la necesidad de que las aplicaciones conozcan el

nombre de las etiquetas pueden dificultar la lectura e interpretación por parte del ser humano y prolongar el tiempo de procesamiento.

Por otro lado, XML es un lenguaje semiestructurado, lo que requiere un tiempo de procesamiento y comprobar que se ajusta al esquema XML. XML se ha centrado en la flexibilidad. Aunque en la actualidad se utiliza menos que antes, XML sigue siendo valorado por su flexibilidad.

Seguidamente, se presenta un ejemplo del lenguaje XML.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<root>
  <invernaderos>
    <id>01</id>
    <nombre>IFAPA</nombre>
    <apellido>ARM</apellido>
    <finca>Poniente</finca>
    <sensor1>Temperatura</sensor1>
    <sensor2>Humedad</sensor2>
  </invernaderos>
</root>
```

- **JSON:** es un formato de texto abierto y ligero [96] que se está convirtiendo en un estándar cada vez más importante en el sector del IoT. Al igual que XML, está diseñado para ser leído y comprendido tanto por humanos como por aplicaciones. Aunque es independiente del lenguaje de programación, comparte convenciones comunes con varios lenguajes de programación (p. ej. C, C++, Java, JavaScript, Perl, Python), lo que lo convierte en una opción ideal para el intercambio de datos.

JSON está consolidado por dos estructuras: en primer lugar, dispone de una colección de pares (clave/valor) también conocidos como objetos y en segundo lugar, un listado ordenado de valores también conocido como *arrays*. Este estándar se ha centrado más en la simplicidad y por este motivo está ganando más adeptos que sus competidores.

Seguidamente, se presenta un ejemplo del lenguaje JSON.

```
{
  "invernaderos": [
    {
      "id": "01",
      "nombre": "IFAPA",
      "apellido": "ARM",
      "finca": "Poniente",
      "sensor1": "Temperatura",
      "sensor2": "Humedad"
    }
  ]
}
```

En resumen, la interoperabilidad sintáctica está relacionada con los tipos de datos, la estructura, la sintaxis y el formato. Además, permite intercambiar información entre distintos sistemas convirtiendo los datos en un formato de representación armonizado [97].

### 1.3.4 Interoperabilidad semántica

La interoperabilidad semántica se refiere a la capacidad de dos o más sistemas informáticos para comprender y procesar el significado del contenido que se intercambian. Esto implica una comprensión común del significado del mensaje original y la preservación de su semántica [98]. A diferencia de la interoperabilidad sintáctica, que se centra en el formato de los datos (como XML o JSON), la interoperabilidad semántica se enfoca en el uso de modelos de datos y esquemas comunes para garantizar la comprensión mutua de la información. Esta es una capa superior de interoperabilidad, y su importancia radica en la necesidad de valorar y comprender el contenido del mensaje original para poder intercambiar información de manera efectiva y automatizada.

La W3C define la interoperabilidad semántica como «*permitir que diferentes agentes, servicios y aplicaciones intercambien información, datos y conocimientos de forma significativa, dentro y fuera de la Web*» [99]. Para tratar de hacer frente al problema de interoperabilidad semántica en el IoT, se emplean ontologías [100, 101]. Una ontología se define como «*una especificación explícita de una conceptualización compartida*» [102]. Este término es heredado de la filosofía, donde una ontología es una explicación sistemática de la existencia. Por lo tanto, se puede decir que una ontología es una forma de almacenar conocimiento.

El reto de la interoperabilidad semántica ya se trató de resolver con la aparición del paradigma del Internet del futuro. Este dio como resultado la creación de la Web semántica [103], la cual está formada por tecnologías como la Infraestructura para la Descripción de Recursos (RDF, del inglés *Resource Description Framework*), el esquema RDF [104] y el Lenguaje de Ontologías Web (OWL, del inglés *Web Ontology Language*) [99]. Estos lenguajes y esquemas fueron diseñados para la representación de información en la Web, y pueden ser utilizadas igualmente en los dominios del IoT. Por lo tanto, las tecnologías de la Web semántica proporcionan la estructura técnica y operativa, así como los medios para facilitar la interoperabilidad semántica.

En el ámbito del IoT es posible encontrar ontologías que abarca, entre otras, la descripción de sensores, redes de sensores y servicios. La ontología más conocida es la Red de Sensores Semánticos (SSN, del inglés *Semantic Sensor Network*) [105] creada por W3C. Se trata de una creación conjunta de centros investigadores y utilizada como estándar para las redes semánticas de sensores. Esta ha sufrido una serie de actualizaciones añadiendo extensiones como la propuesta por Bendadouche con la inclusión de la Ontología de la Red Semántica de Sensores Inalámbricos (WSSN, del inglés *Wireless Semantic Sensor Network Ontology*) [106] y la ontología de Müller con la creación de nubes de sensores [107].

Este problema de interoperabilidad viene relacionado con él desconociendo de un modelo consensuado del dominio a la hora de desarrollar las aplicaciones y servicios IoT. No disponer de modelos de datos estándares dificulta el entendimiento e interpretación del contenido del mensaje. Por tanto, es necesario mantener y actualizar las ontologías y vocabularios compartidos.

### 1.3.5 Interoperabilidad entre plataformas

En los últimos años, el uso del IoT ha crecido exponencialmente en diversos dominios. Sin embargo, el modelo actual de trabajo de las grandes plataformas de IoT está generando dificultades de interoperabilidad debido a la creación de lo que se conocen como «silos verticales» y sistemas aislados [108]. Estos silos impiden la creación de aplicaciones multiplataforma capaces de operar entre diferentes dominios compartiendo información. Esta limitación se puede explicar mejor con un ejemplo, suponiendo el caso de una producción

agrícola que disponga de sensores para el control del estado de su cultivo, se detecte la falta de nitratos en el suelo y seguidamente la necesidad de avisar al almacén. En este caso entran en juego diferentes dominios como son la agricultura, el almacén de suministros y el transporte hasta el invernadero. Con una interoperabilidad adecuada entre plataformas y dominios, se podría informar sobre esta necesidad a través de una sola plataforma, pero actualmente este sistema es inviable debido a la falta de interoperabilidad. Estos problemas de interoperabilidad también son comunes dentro de un mismo dominio, ya que es necesario consultar diferentes aplicaciones y servicios para gestionar un mismo sector industrial, lo que dificulta la gestión de las instalaciones y genera insatisfacción entre los usuarios [109].

La interoperabilidad entre plataformas se encuentra ubicada en el nivel más alto y ligado de forma directa con la semántica. Esta es la clave para el «intercambio de datos y la creación de servicios entre grandes aplicaciones verticales» [110]. No solo es necesario conseguir ese intercambio de datos a través de servicios expuestos en la nube, sino que deben de tener un entendimiento del significado de estos datos. Por este motivo, el uso de estándares y ontologías pueden ayudar a la creación de plataformas multidominio e interoperables horizontalmente [59].

En la literatura, diferentes comunidades investigadoras y proyectos de investigación surgen como iniciativas para tratar de acabar con el monopolio y los problemas de interoperabilidad de las plataformas verticales. El caso más destacado es el proyecto INTER-IoT desarrollado dentro del marco H2020 finalizado por la Unión Europea tratando de abordar la interoperabilidad en cualquier dominio de aplicación IoT tratando de garantizar la heterogeneidad de los ecosistemas IoT.

Como se mencionó anteriormente, existen plataformas *open source* y arquitecturas de referencia impulsadas por proyectos europeos como es el caso de FIWARE, OneM2M [111] y RAMI. A continuación, se detalla cada una de estas:

- **FIWARE:** es una plataforma de código abierto financiado por medio de un proyecto europeo del tipo Asociación Público-Privada (PPP, del inglés *Public Private Partnership*) en el cual colaboró el sector público y privado para la creación del Internet de futuro [112]. Esta plataforma trata de impulsar el uso de nuevas tecnologías por medio de una estructura colectiva, la cual contribuirá el crecimiento y desarrollo tecnológico en Europa.

FIWARE se basa en una arquitectura modular (véase la figura 1.10), que está respaldada por un conjunto de Habilitadores Genéricos (GEs, del inglés *Generic Enablers*) que proporcionan una serie de funcionalidades y estándares que facilitan el desarrollo de aplicaciones inteligentes. Cada uno de estos componentes es libre de ser ensamblado con otros componentes desarrollados por terceros, permitiendo así acelerar el uso de soluciones inteligentes. Los GEs son un conjunto de APIs libres y públicas basadas en las especificaciones formales de la Alianza Móvil Abierta (OMA, del inglés *Open Mobile Alliance*) y la Interfaz de Servicios de Nueva Generación (NGSI, del inglés *Next Generation Services Interface*) con capacidades Restfull accesibles a través de HTTP. Estos GEs están separados por capítulos dependiendo de la funcionalidad: gestión de la información de contexto, interpretación del lenguaje, análisis de datos, capas de seguridad e incluso interfaces Web.

FIWARE es una plataforma tecnológica que pretende convertirse en el estándar para el IoT. Su núcleo es el GE conocido como Agente de Contexto Orion (OCB, del inglés *Orion Context Broker*) [113], que se encarga de gestionar toda la información de contexto producida por el sistema. El término «contexto» hace referencia a toda la información que rodea a un ecosistema y puede provenir de redes de sensores, aplicaciones de terceros, fuentes de

datos públicas, actuadores y otros sistemas. En esta tesis se han realizado aportaciones para profundizar en el uso de los GEs en función de sus funcionalidades y características, se recomienda consultar los siguientes artículos [114-116] descritos en el capítulo 2.

En lo que respecta a la interoperabilidad, FIWARE se centra en la estandarización de un modelo de datos común y la aportación de servicios API REST para la búsqueda, filtrado y provisionamiento de datos. Actualmente, está expandiendo su soporte para modelos semánticos. Los tipos de entidades, los tipos de atributos y los tipos de metadatos de NGSI están definidos por ontologías gestionadas por un servidor de conocimiento IoT independiente. Esta base semántica permite utilizar las relaciones incluidas en las ontologías durante el funcionamiento del sistema FIWARE. Un ejemplo de la exploración de las relaciones semánticas es el uso de una jerarquía de subtipos entre los tipos de entidades cuando se buscan entidades IoT.

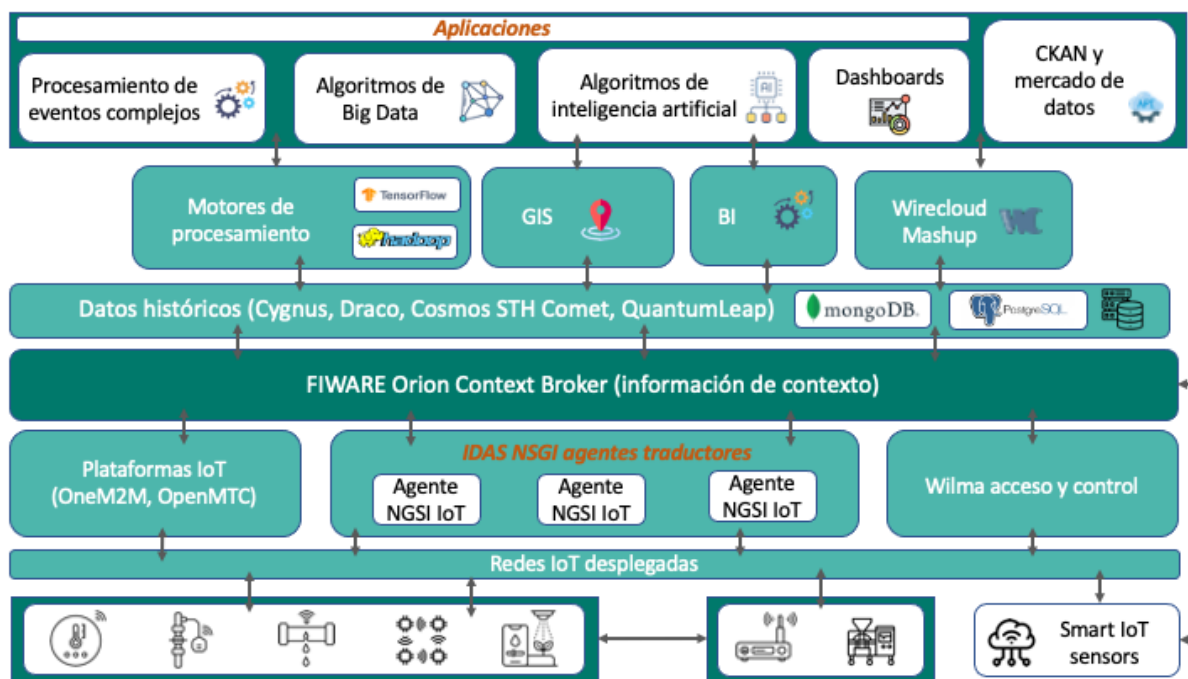


Figura 1.10. Arquitectura de referencia FIWARE

- **OneM2M:** la arquitectura OneM2M fue creada para integrar soluciones de comunicación M2M y IoT [117, 118]. Se basa en estándares que cubren requisitos, arquitectura y protocolos de interoperabilidad. Esta capa de servicio común es compatible con diferentes componentes de *hardware* y *software* y permite la comunicación entre dispositivos M2M a nivel global [119].

OneM2M fue iniciado por siete organizaciones de definición de estándares de telecomunicaciones: Asociación de Industrias y Empresas de Radio (ARIB, del inglés *Association of Radio Industries and Businesses*) y el Comité de Tecnología de las Telecomunicaciones (TTC, del inglés *Telecommunication Technology Committee*), Alianza para las Soluciones del Sector de las Telecomunicaciones (ATIS, del inglés *Alliance for Telecommunications Industry Solutions*) y Asociación de la Industria de Telecomunicaciones (TIA, del inglés *Telecommunications Industry Association*), Asociación China de Normas de Comunicación (CCSA, del inglés *China Communications Standards Association*), el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación (ETSI, del inglés *European Telecommunications Standards Institute*) y la Asociación de Tecnología de las Telecomunicaciones (TTA, del inglés *Telecommunications*



*Technology Association*) y actualmente cuenta con más de 270 empresas. OneM2M propone el uso de APIs uniformes para una arquitectura horizontal de múltiples dominios.

La arquitectura OneM2M se basa en la idea de que todos los dispositivos y sistemas IoT deben poder conectarse y compartir datos de manera eficiente. Para lograr esto, OneM2M utiliza una serie de componentes y tecnologías clave, como:

- **Una red de nodos:** los nodos son dispositivos o sistemas que están conectados a la red y que pueden enviar y recibir datos. Los nodos se pueden dividir en diferentes tipos, como los nodos de sensores y actuadores, los nodos de *gateways* y los nodos de aplicaciones.
- **Una plataforma de integración:** la plataforma de integración es un componente central de la arquitectura OneM2M que se encarga de la gestión y el control de la red. Se encarga de recopilar y procesar los datos recibidos de los nodos y de proporcionar acceso a ellos a las aplicaciones que los necesiten.
- **Un conjunto de servicios:** OneM2M proporciona un conjunto de servicios que permiten a los nodos y a las aplicaciones intercambiar datos y realizar tareas específicas. Estos servicios incluyen la gestión de dispositivos, la gestión de contenido, el enrutamiento y la seguridad.

La interoperabilidad de OneM2M se basa en el uso de estándares abiertos para facilitar la interoperabilidad de los sistemas IoT a nivel mundial. Disponer de un contenedor de datos «caja negra» no era suficiente y se amplió para permitir las anotaciones semánticas. Esto introduce la posibilidad de una descripción de los datos con relación al contexto, verificación y pruebas. Sin embargo, no dispone de operaciones de consulta, filtrado y suscripción sobre los datos, únicamente se pueden realizar sobre los metadatos, lo que limita la eficiencia.

- **RAMI:** fue desarrollado por la Asociación Alemana de Fabricantes Eléctricos y Electrónicos (ZVEI, del inglés *German Electrical and Electronic Manufacturer Association*) en 2015 con el objetivo de abordar el problema de la estandarización de la industria [120]. La arquitectura de Realización Adquisición Modificación e Integración (RAMI, del inglés *Reference Architectural Model Industry 4.0*) es un marco conceptual utilizado para diseñar y gestionar sistemas industriales en la Industria 4.0 que aglutina los procesos, el ciclo de vida del producto y la cadena de valor en un mapa de tres dimensiones. Esta arquitectura se basa en cuatro elementos clave:
  1. **Realización:** se refiere a la fabricación de productos y servicios utilizando tecnologías avanzadas como la robótica, la impresión 3D y la automatización.
  2. **Adquisición:** se refiere a la recopilación de datos y la generación de información a través de la conexión de dispositivos y sistemas IoT.
  3. **Modificación:** se refiere a la capacidad de cambiar y adaptar la producción y los procesos de manera rápida y flexible para satisfacer las necesidades cambiantes del mercado.
  4. **Integración:** se refiere a la conexión y la interacción entre diferentes sistemas y procesos a lo largo de la cadena de valor, desde la ingeniería y la planificación hasta la distribución y el servicio al cliente.

La arquitectura RAMI se considera un componente clave de la Industria 4.0 porque permite la creación de sistemas industriales más eficientes, adaptables y sostenibles. Además, la arquitectura RAMI también se puede utilizar para mejorar la eficiencia energética y reducir el impacto ambiental de la producción industrial.

La clave de la arquitectura RAMI 4.0 es disponer de toda la información en tiempo real por medio de redes de comunicación entre todos los interesados en el proceso de la creación del valor. Se cuenta con dos ejes, el horizontal y el vertical. El primero eje se encarga de la integración de recursos, interconexión de sistemas y modelos de negocio. El segundo eje está centrado en la integración mediante la jerarquía de equipos, control, taller, fábricas.

En esta tesis, se propone una solución IoT que busca resolver los problemas de interoperabilidad en la industria. Para abordar la interoperabilidad sintáctica, se utiliza el formato de datos JSON en todos los servicios desarrollados, como las peticiones entre la plataforma y la API. En cuanto a la interoperabilidad semántica, se aplica un modelo de datos basado en OMA NGSI de FIWARE para estandarizar los datos de los sensores y actuadores a nivel de aplicación. Esto también permite la interoperabilidad entre plataformas que soporten el estándar OMA NGSI.

### 1.4 Tecnología habilitadora para el IoT Cloud Computing

El *cloud computing* se ha convertido en un aliado importante para la tecnología IoT debido a su gran capacidad de almacenamiento, análisis y procesamiento de datos. La generación masiva de datos por parte de los dispositivos IoT requiere una mayor cantidad de computación para su procesamiento y almacenamiento [121]. Los desarrolladores de aplicaciones IoT se enfrentan al desafío de ubicar adecuadamente estos dispositivos, ya que suelen actuar como nodos finales con limitaciones en cuanto a almacenamiento y procesamiento. Por lo tanto, es necesario contar con medios externos para realizar tareas de computación más complejas [73]. Además, el entorno en el que se desarrollan las actividades IoT suele estar sujeto a restricciones como comunicaciones limitadas, perturbaciones en las señales y baja potencia, lo que puede afectar a características clave como la latencia, la precisión y la velocidad del muestreo y el análisis en tiempo real.

La evolución de las TICs y la aparición del IoT [122] han puesto de manifiesto algunas de las limitaciones del paradigma centralizado del *cloud computing*. La generación rápida de datos por parte de los dispositivos IoT requiere un procesamiento más rápido y eficiente de los mismos, lo que supera las capacidades del *cloud computing* tradicional. Como resultado, ante las limitaciones del *cloud computing* en cuanto a conectividad a Internet, seguridad, control y flexibilidad, esta ha comenzado a descentralizarse para satisfacer las necesidades del IoT en términos de escalabilidad, interoperabilidad, flexibilidad, confiabilidad, eficiencia, disponibilidad y seguridad [74]. Esto ha llevado a la aparición de nuevas soluciones más cercanas a los dispositivos IoT, como el *fog computing* y el *edge computing* [123-125], que tienen como objetivo acercar el procesamiento y el almacenamiento a los dispositivos que generan los datos. Estos paradigmas se presentarán en subsecciones posteriores.

#### 1.4.1 Edge Computing

El IoT ha introducido infinidad de dispositivos finales, lo que implica acercar las tareas de computación y almacenamiento en la nube al borde de la red IoT [126]. Esto permite que los datos sean procesados más cerca de la fuente donde fueron generados, evitando así ser enviados a una nube alejada, solucionando problemas de latencia, pérdida de paquetes, cuellos de botella y fallos del sistema [127, 128]. Esta tecnología es imprescindible en el sector de la automoción, industrias y sanidad. En estos tres sectores es importante realizar

un procesamiento de los datos en tiempo real, un error de milisegundos puede provocar un accidente de tráfico, pérdidas en la producción o problemas graves en un paciente.

El paradigma del *edge computing* tiene como objetivo extender el *cloud computing* al borde de la red (véase la figura 1.11), tratando de acercar la potencia de cálculo y el almacenamiento de datos a la fuente de generación de datos [129], en lugar de depender de una arquitectura centralizada basada en la nube. En la literatura se encuentra la definición de *edge computing* de la siguiente forma «*edge computing se refiere a las tecnologías que permiten realizar cálculos en el borde de la red, sobre los datos descendentes en nombre de los servicios en la nube y sobre los datos ascendentes en nombre de los servicios IoT*» [130].

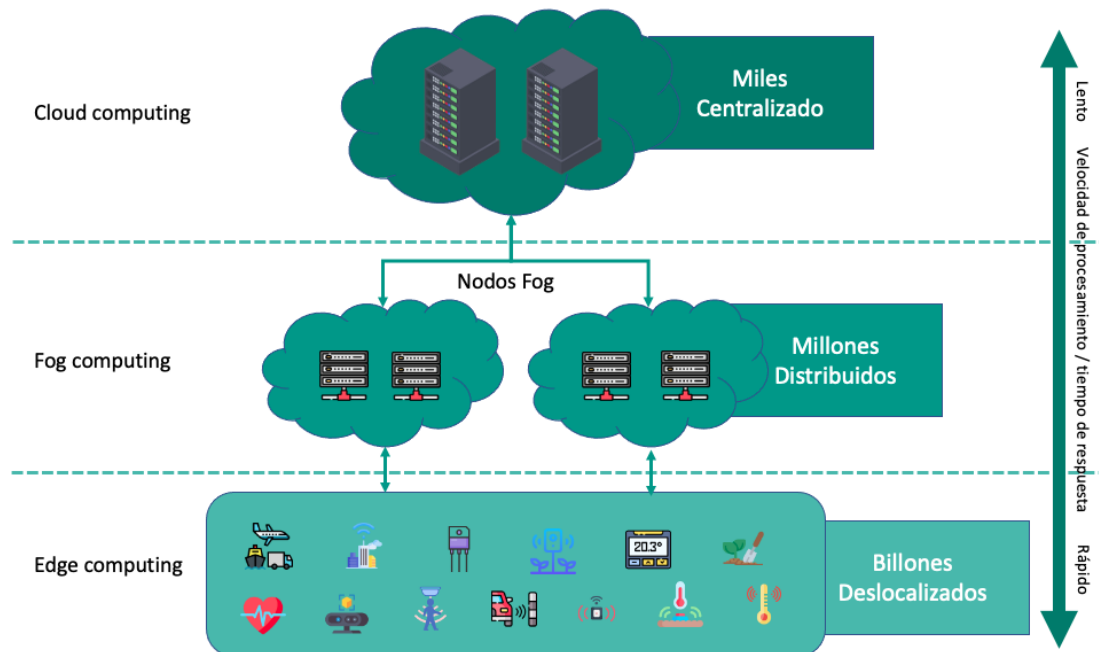


Figura 1.11. Ubicación de los dispositivos IoT en la computación por capas. Adaptación de [131]

El origen del término *edge computing* viene de la Computación Perimetral de Acceso Múltiple (MEC, del inglés *Multi-access Edge Computing*) [128] término normalizado por el ETSI que lo define como «*mobile edge computing proporciona un entorno de servicios de TI y capacidades de computación en la nube en el borde de la red móvil, dentro de la Red de Acceso de Radio (RAN, del inglés Radio Access Network) y muy cerca de los abonados móviles*» [132, 133] por lo que su origen se encuentra en las tecnologías móviles.

En lo que respecta a la integración del *edge computing* y el IoT, los dispositivos que se encuentran en el borde de la red deben de ser inteligentes y poseer capacidades de procesamiento. Por lo general son dispositivos embebidos como Controladores Lógicos Programables (PLCs, del inglés *Programmable Logic Controllers*) o *gateways* IoT. Algunas características clave del *edge computing* son:

- **Baja latencia:** el *edge computing* puede reducir la latencia acercando los recursos informáticos y de almacenamiento de datos a los dispositivos que generan los datos.
- **Alta disponibilidad:** los sistemas *edge computing* están diseñados para ser resistentes y fiables, con múltiples componentes redundantes y sistemas de copia de seguridad para garantizar que el sistema siga estando disponible incluso si fallan componentes individuales.

- **Escalabilidad:** los sistemas *edge computing* pueden ampliarse o reducirse en función de las necesidades de la aplicación, añadiendo recursos adicionales según sea necesario.
- **Flexibilidad:** los sistemas *edge computing* se pueden personalizar para satisfacer los requisitos específicos de la aplicación o caso de uso, con una gama de opciones de *hardware* y *software* disponibles para soportar diferentes tipos de dispositivos y cargas de trabajo.
- **Seguridad:** los sistemas *edge computing* suelen incluir funciones de seguridad avanzadas para proteger frente a las ciberamenazas y garantizar la privacidad de los datos.

En general, la tecnología *edge computing* está diseñada para proporcionar una plataforma flexible y escalable para construir, desplegar y gestionar sistemas informáticos distribuidos en el borde de la red. Es especialmente útil para aplicaciones que requieren procesamiento o toma de decisiones en tiempo real, o que necesitan operar en entornos con conectividad limitada a la nube.

### 1.4.2 Fog Computing

El paradigma del *fog computing* fue creado para satisfacer las necesidades de almacenamiento y computación de los dispositivos IoT. Tradicionalmente, se ha considerado que el *fog computing* es una implementación del *edge computing* [130, 132, 134-136] y ejerce funciones de computación, almacenamiento, control y redes más cercanas al usuario. Esto se debe a que el *fog computing* se encuentra más cerca de los usuarios [137] que el *edge computing* y es capaz de realizar funciones similares.

La primera definición de *fog computing* se remonta a 2012, cuando la empresa CISCO la definió como «una plataforma altamente virtualizada que proporciona servicios de computación, almacenamiento y red entre los dispositivos finales y los centros de datos tradicionales de computación en la nube, típicamente, pero no exclusivamente ubicados en el borde de la red» [125]. Posteriormente, en la literatura se han encontrado trabajos que han ido definiendo el *fog computing* según su evolución [138-142].

El *fog computing* es una arquitectura informática distribuida que se basa en nodos llamados Nodos Fog de Computación (FCN, del inglés *Fog Computing Nodes*). Estos nodos se pueden colocar en cualquier lugar entre el dispositivo final y la nube [125]. Esta flexibilidad de ubicación es una de las principales ventajas de las diferentes implementaciones del *fog computing* en comparación con el *edge computing* (véase la figura 1.11). Los nodos *fog* son heterogéneos y pueden incluir elementos como enrutadores, *gateways* IoT, servidores y decodificadores [134], y ofrecen almacenamiento, computación y servicios de red. El *fog computing* se basa en un enfoque distribuido y surge de la necesidad de superar las limitaciones del paradigma centralizado del *cloud computing*. Como resultado, se han utilizado diferentes términos para referirse a esto, como *Cloud Continuum* [143] o *IoT Fog Cloud Continuum* [144]. El *fog computing* intenta proporcionar una arquitectura global con recursos distribuidos horizontal y verticalmente a lo largo del *Cloud to Things continuum* [143].

En la literatura se suele generalizar cuando se habla del paradigma del *fog computing* incluyendo dentro del mismo la tecnología *edge computing* dada la cercanía de los dos al lugar donde se generan los datos. La diferencia entre estas dos tecnologías es la ubicación donde se realiza el procesamiento y tratamiento de los datos. El *fog computing* es localizado en la Red de Área Local (LAN, del inglés *Local Area Network*), mientras que en el *edge computing* se efectúa el procesamiento y tratamiento de los datos en los dispositivos inteligentes como PLCs.

La tecnología *fog computing* ofrece grandes beneficios para el IoT. Al poder realizar el procesamiento de datos en el borde de la red, se reduce la redundancia de datos generada por el ecosistema IoT. Como sugiere Mahadev Satyanarayanan [145], el uso del preprocesamiento en el borde permite ejecutar tareas de filtrado, compresión, conversión y extracción de datos, evitando la sobrecarga de datos enviados a la nube y aliviando la necesidad de procesamiento en la misma. Además, el *fog computing* también puede ayudar a solucionar los problemas de interoperabilidad (descritos en la sección anterior 1.3) en los nodos *fog*, lo que da como resultado una disminución de la heterogeneidad y una mejora en la latencia, el almacenamiento y la interoperabilidad en el IoT [125]. El *fog computing* es más escalable que el *edge computing*, ya que puede aprovechar los recursos disponibles tanto en la nube como en el borde de la red, mientras que el *edge computing* está limitado por los recursos disponibles en el propio borde.

En resumen, la elección entre *fog computing* y *edge computing* dependerá de los requisitos específicos de la aplicación o caso de uso. Ambos enfoques pueden ser útiles en diferentes situaciones, y es posible utilizar ambos en un único sistema IoT, en el que el *fog computing* se encargue de algunas tareas y el *edge computing* de otras.

### 1.4.3 Cloud Computing

Actualmente, el paradigma del *cloud computing* no es nada nuevo. Esta tecnología se encuentra en fase de integración y de rápido crecimiento en industrias y empresas. Con la llegada del *cloud computing* surge la posibilidad de utilizar la «computación como utilidad» [146]. Esta tecnología proporciona nuevas capacidades confiables de computación, almacenamiento, *software*, *hardware* e Infraestructura como Servicio (IaaS, del inglés *Infrastructure as a Service*), entregadas a través de Internet y en centros de datos remotos [146, 147], y bajo demanda [148] en un conveniente «pago por servicio». En este paradigma, los usuarios pueden acceder a sus cuentas asociadas para utilizar los datos y servicios disponibles en la nube, y los proveedores de servicios utilizan cifrado de extremo a extremo para garantizar la privacidad de los datos.

En la literatura se han encontrado definiciones del *cloud computing*, como la que propone el NIST [149] que lo define como «*un modelo que permite un acceso a la red ubicuo, cómodo y bajo demanda a un conjunto compartido de recursos informáticos configurables (p. ej. redes, servidores, almacenamiento, aplicaciones y servicios) que pueden ser rápidamente aprovisionados y liberados con un mínimo esfuerzo de gestión o interacción del proveedor de servicios*».

Este paradigma proporciona ventajas técnicas como la eficiencia energética, la optimización de recursos, la escalabilidad de recursos y aplicaciones y el aislamiento del entorno de ejecución. Estos servicios son altamente accesibles, por lo que se sugiere que la fusión del *cloud computing* y el IoT presenta grandes oportunidades para ambas tecnologías [150]. IoT podrá disponer de almacenamiento y gestión de datos *ilimitados* de forma segura. Además, de controlar de forma remota innumerables dispositivos en cualquier momento y en cualquier lugar. Estas ventajas se encuentran disponibles gracias a los pilares del *cloud computing*, como son la virtualización y la computación distribuida.

#### Virtualización

La virtualización es una tecnología que comenzó a desarrollarse en 1970 con el proyecto *system/360* por parte de IBM. Su objetivo es mejorar el rendimiento de un servidor al proporcionar a los usuarios Máquinas Virtuales (VM, del inglés *Virtual Machines*) dentro de un sistema operativo [151]. Esta tecnología ha sido una gran impulsora del crecimiento de la informática en la nube [152], ya que permite separar el sistema operativo del *hardware* en el que se está trabajando. Esto significa que un solo recurso físico puede actuar como múltiples recursos

virtuales [147], o incluso qué múltiples recursos físicos pueden funcionar como un solo recurso virtual. Esto hace que las infraestructuras sean más eficientes y escalables. Las técnicas más comunes de virtualización son las VM y los contenedores:

- **Máquinas Virtuales:** la virtualización de recursos es una técnica que permite crear múltiples recursos virtuales a partir de un sistema subyacente utilizando una capa de *middleware* (véase la figura 1.12a). Estos recursos virtuales se conocen como VM y son contextos de ejecución independientes [153]. Una forma común de virtualización es la virtualización basada en hipervisor, que utiliza un Monitor de Máquina Virtual (VMM, del inglés *Virtual Machine Manager*) para proporcionar una abstracción completa de la VM. Esto permite ejecutar múltiples sistemas operativos en un solo *host* [154], ya que cada VM tiene su propio sistema operativo que se ejecuta de forma aislada. Algunos ejemplos de sistemas de virtualización basados en hipervisor son Xen, VMware, VirtualBox y Máquina Virtual Basada en el Núcleo (KVM, del inglés *Kernel-based Virtual Machine*) [155].
- **Contenedores:** como alternativa a los hipervisores surge una tecnología más ligera denominada virtualización basada en contenedores o virtualización a nivel de sistema operativo [153]. En esta virtualización se crean múltiples instancias aisladas del espacio de usuario particionando los recursos de la máquina física. Al ser una virtualización basada en sistema operativo, las instancias virtuales comparten un único *kernel* del sistema operativo (véase la figura 1.12b). La virtualización en contenedores tiene un aislamiento débil en comparación con la virtualización basada en hipervisor. Sin embargo, para el usuario cada contenedor se ejecuta como un sistema operativo independiente.

En la figura 1.12 se comparan la virtualización basada en hipervisores y en contenedores. La virtualización basada en hipervisores se centra en la abstracción para sistemas operativos «uno por máquina virtual» mientras que la virtualización basada en contenedores funciona a nivel de sistema operativo [153]. Algunos ejemplos de sistemas de virtualización basados en contenedores son Docker, Contenedores de Linux (LXC, del inglés *Linux Container*) y OpenVZ [156].

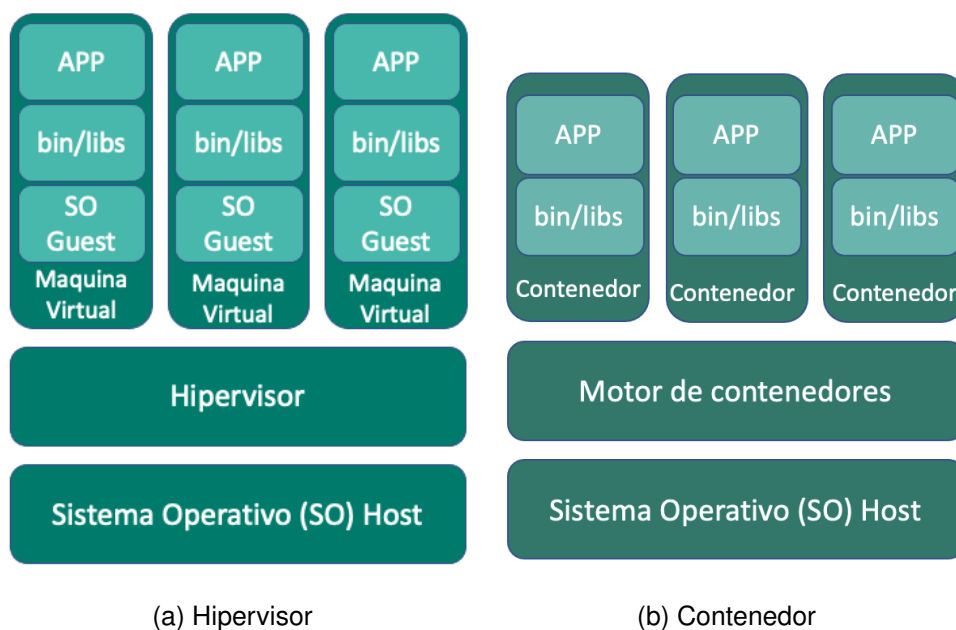


Figura 1.12. Virtualización basada en contenedores y en hipervisores



### Modelos de servicio en el Cloud Computing

Actualmente, existen tres tipos de modelos de servicio en la nube: *Software* como Servicio (SaaS, del inglés *Software as a Service*), Plataforma como Servicio (PaaS, del inglés *Platform as a Service*) y IaaS [157, 158]. Estos servicios se ofrecen a los usuarios de acuerdo a sus necesidades. En la figura 1.13 se muestra una comparación entre los diferentes modelos de servicios disponibles en la nube, desde el más elaborado al más básico y desde el punto de vista del consumidor:

- **SaaS:** por lo general, el SaaS es un tipo de servicio en la nube que ofrece una o varias aplicaciones a través de las infraestructuras del proveedor del servicio [159]. Estas aplicaciones son accesibles por los usuarios de manera simultánea [160] y mediante aplicaciones web o móviles, y el proveedor se encarga de la integración con otras aplicaciones y del mantenimiento de la plataforma y de la infraestructura. Este servicio permite a los usuarios evitar la instalación de *software* de forma local, como por ejemplo aplicaciones de correo como Gmail o paquetes de ofimática online.
- **PaaS:** es un tipo de servicio en la nube que ofrece una plataforma para el desarrollo de aplicaciones durante todo su ciclo de vida [159]. Este servicio se utiliza principalmente por desarrolladores para crear y desplegar aplicaciones en la nube sin tener que preocuparse por el mantenimiento de la infraestructura, los entornos de ejecución y las librerías que son gestionadas por el proveedor de la PaaS. Al utilizar PaaS, los desarrolladores pueden centrarse en el código de sus aplicaciones y dejar que el proveedor se encargue de todo lo necesario para su ejecución.
- **IaaS:** es un tipo de servicio en la nube que ofrece servicios virtuales de infraestructura a través de Internet como servidores, redes, discos duros, etc. Al utilizar IaaS, los usuarios pueden escalar fácilmente sus recursos informáticos sin tener que adquirir y mantener *hardware* físico. Los usuarios pueden alquilar el servicio por uso y son responsables del mantenimiento de la máquina virtual (VM) como sistema operativo, aplicaciones y algunas configuraciones de red y seguridad [161]. Los proveedores de IaaS se encargan de gestionar y mantener la infraestructura.

### Modelos de implementación del Cloud Computing

Los modelos de implementación de servicios en la nube varían según las necesidades del usuario y los requisitos de los servicios disponibles, que pueden variar dependiendo de la ubicación en la nube. A continuación se describen los modelos disponibles (véase la figura 1.13):

- **Nube pública:** el proveedor de servicios en la nube es el encargado de realizar el mantenimiento de la infraestructura (p. ej. seguridad, servidores, almacenamiento, etc.). Este modelo de nube ofrece al usuario recursos de computación, *hardware*, aplicaciones, bases de datos y servicios a través de Internet y bajo demanda, lo que permite a usuarios y empresas centrarse en su negocio. Algunas de las nubes públicas más conocidas son Amazon Web Services, Microsoft Azure y Google Cloud Platform.
- **Nube privada:** en el modelo de las nubes públicas, las empresas y usuarios deben de confiar en la seguridad del proveedor de servicio y asumir sus políticas de precios. Como resultado de este conflicto surgió la creación de las nubes privadas, donde las empresas y usuarios son encargadas de las infraestructuras que soportan esta modalidad de *cloud computing*. Las más conocidas son OpenStack, OpenNebula y CloudStack.

- **Nube híbrida:** esta surge de la unión de dos o más nubes (p. ej. pública y privada), cada una de ellas es independiente, pero están vinculadas por una tecnología estándar. Esto permite que los datos sensibles para la empresa estén únicamente disponibles en su nube privada, pero puedan escalar sus aplicaciones en una nube pública si necesitan de más capacidad en sus sistemas.
- **Nube comunitaria:** esta es utilizada por expertos y de forma exclusiva por la comunidad. Esta comparte una misión en común como son las políticas de seguridad, regulaciones y cumplimiento. Es empleada por organismos estatales o integrantes de *holdings*.

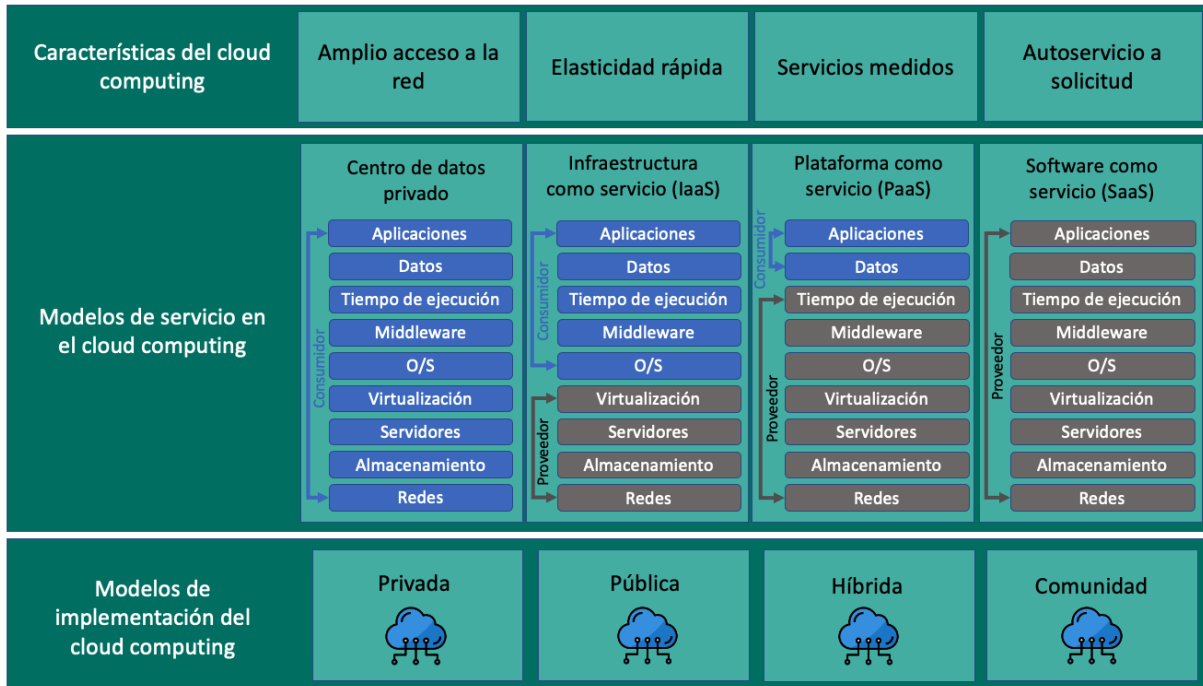


Figura 1.13. Modelos disponibles en el *cloud computing*

### 1.4.4 Cloud of Things

La integración del *cloud computing* y el IoT ha generado un nuevo paradigma denominado Nube de los Objetos (CoT, del inglés *Cloud of Things*) [162]. CoT se basa en una infraestructura en la nube que permite a las empresas conectar y gestionar un gran número de dispositivos y sensores IoT, y procesar los datos que generan en tiempo real. Proporciona una serie de herramientas y servicios que facilitan la creación de aplicaciones IoT, entre los que se incluyen:

- **Gestión de dispositivos:** CoT proporciona herramientas para supervisar y gestionar de forma remota los dispositivos IoT, incluida la capacidad de actualizar el *firmware* de los dispositivos, configurarlos y realizar un seguimiento de su uso.
- **Almacenamiento y gestión de datos:** CoT proporciona una gama de opciones de almacenamiento y gestión de datos, incluyendo un lago de datos (*data lake*) y un almacén de datos (*data warehouse*), para ayudar a las empresas a almacenar, procesar y analizar grandes volúmenes de datos generados por dispositivos IoT.
- **Visualización y análisis de datos:** CoT incluye herramientas de visualización y análisis de



datos, como cuadros de mando e informes, para ayudar a las empresas a comprender y dar sentido a los datos generados por sus dispositivos IoT.

- **Integración e interoperabilidad:** CoT proporciona APIs y otras herramientas de integración para ayudar a las empresas a conectar sus dispositivos y sistemas IoT con otros sistemas y aplicaciones empresariales.

En general, CoT está diseñado para proporcionar una plataforma flexible y escalable para construir, desplegar y gestionar soluciones IoT en una variedad de industrias y aplicaciones. Para tratar de aportar soluciones a este nuevo paradigma, empresas tecnológicas especializadas en *cloud computing*, proyectos de investigación financiados por la Comisión Europea «H2020» y proyectos *open source* surgieron con la idea de impulsar esta integración.

Las empresas pioneras del sector (p. ej. Amazon, Microsoft, Google) ya disponían de sus propias infraestructuras en la nube. Su objetivo es proporcionar servicios de integración de dispositivos IoT utilizando aplicaciones y plataformas intermediarias a través de servicios API REST y obtener un valor añadido a esos datos con herramientas propias de estas infraestructuras.

En el caso de *Google*, su aplicación para la integración de dispositivos IoT se llama *Google IoT Core* desde la cual se pueden gestionar y enrutar mensajes a la nube. En primer lugar, dispone de funciones de configuración y gestión segura aprovechando la conversión de mensaje MQTT a HTTP. Estos mensajes son publicados en la plataforma «*Google Cloud Pub/Sub*» para ser integrados con otros servicios propios de Google [163]. De la misma forma, la empresa Amazon ofrece una integración para dispositivos IoT a través de aplicaciones y servicios, en este caso denominada «*Amazon Web Services IoT Core*». Esta ofrece servicios de enrutamiento y procesamiento de dispositivos IoT, de la misma forma que Google, ofrece servicios complementarios en la infraestructura para el procesamiento de los datos [164].

En esta tesis doctoral se ha utilizado la virtualización basada en contenedores para desarrollar microservicios escalables basados en Docker. Estos contenedores se distribuyen entre las diferentes capas de la solución IoT propuesta y se encuentran alojados en un grupo de servidores ubicados en el centro de procesamiento de datos de la Universidad de Almería. Entre los servicios que ofrecen destacan la Extracción, Transformación y Carga (ETL, del inglés *Extract, Transform and Load*) de datos, un conjunto de GEs centrados en diferentes funcionalidades como la traducción de protocolos de comunicación, un modelo de datos OMA NGSI de OCB y el almacenamiento de datos históricos. Además, se ofrecen servicios de APIs REST para registrar nuevos dispositivos o estaciones, consultar y extraer los datos, así como sistemas de visualización gráfica en formato web. En el capítulo 2 se pueden encontrar más detalles sobre cada uno de los servicios y en la sección 1.6.2 se ilustra la ubicación y división por capas de los servicios desarrollados.

### 1.5 Modelos como servicio para la optimización de recursos

Antes de nada es importante poner en contexto qué son los modelos y para qué son empleados. Un modelo es una herramienta empleada para realizar simulaciones y análisis en profundidad de los datos con el fin de reducir los costes y el tiempo, así como adelantarse a situaciones complejas para el sector que se aplique. Los modelos permiten a los usuarios parametrizar las entradas viendo reflejado en el resultado final cómo un cambio en uno o varios elementos de entrada puede afectar al sistema sin necesidad de probarlos en entornos reales. En resumen, estos modelos son utilizados por empresas y usuarios como una simulación

variando los parámetros de entrada, permitiendo comprobar como se comportaría el sistema bajo ciertas condiciones o restricciones. Así, un modelo se define como una representación simplificada de un sistema, proceso o teoría real diseñado con el fin mejorar la comprensión, haciendo uso de las predicciones y operaciones de control para mejorar la eficiencia del sistema.

En la actualidad, el sector industrial se encuentra sometido a un gran proceso de modificación y adaptación debido a la revolución de las nuevas tecnologías. Nuevos conceptos como IoT, *cloud computing*, big data o Industria 4.0 están cambiando el modo de funcionamiento, el acceso a los datos, la gestión de los mismos y las metodologías de apoyo a la toma de decisiones en las empresas. En el contexto de esta tesis doctoral, la inclusión de la tecnología IoT en los diferentes sectores industriales da como resultado un gran volumen de datos con el que trabajar. Estos datos combinados con los servicios disponibles en *cloud computing* han abierto la puerta a nuevos modelos de servicio, entre ellos surge una tendencia reciente conocida como *Todo como Servicio* (XaaS, del inglés *Everything as a Service*) [165] en la que las aplicaciones o productos se entregan a través de Internet en lugar de ser accedidos localmente con herramientas autónomas.

Tomando como ejemplo los procesos de agricultura intensiva, el objetivo principal del uso de los modelos en los invernaderos es aumentar los beneficios económicos del agricultor, buscando un equilibrio entre los ingresos, el coste de obtener las condiciones climáticas óptimas para el crecimiento del cultivo, y el cumplimiento de la normativa sobre agricultura y medioambiente. El agroecosistema de producción en invernadero es complejo y está formado por procesos físicos, químicos y biológicos, que tienen lugar simultáneamente, reaccionan con diferentes tiempos y patrones de respuesta a los factores ambientales, y se caracterizan por sus numerosas interacciones. Por lo tanto, se requiere un conocimiento profundo de todas estas diferentes dinámicas de proceso. La dinámica existente en los invernaderos ha sido ampliamente estudiada en la literatura, donde existen modelos climáticos de invernadero [166, 167], modelos de crecimiento de tomate [168], modelos de crecimiento de pimiento [169], y modelos de riego [170]. Sin embargo, la mayoría de estos modelos se implementan con fines de investigación o se incluyen como parte de sistemas de Ayuda a la Toma de Decisiones (DSS, del inglés *Decision Support System*) específicos en *software* cerrados y dependientes. Así, el uso de los modelos por parte de otros usuarios (p. ej. empresas o agricultores) suele ser limitados y complicados.

Durante esta tesis doctora se ha desarrollado un novedoso sistema denominado Modelos de Invernadero como Servicio (GMaaS, del inglés *Greenhouse Models as a Service*), donde se puede acceder a los modelos climáticos, de crecimiento de cultivos y de riego a través de un servicio API REST [165]. Los modelos pueden solicitarse para diferentes objetivos: como herramienta de simulación, donde las entradas del modelo pueden obtenerse a partir de datos históricos o de un servicio de previsión meteorológica; como sensor virtual en tiempo real para fines de control/retroalimentación, donde el modelo se invocan solo un paso por delante; y como servicio DSS gráfico desde una aplicación basada en la web. Actualmente, los modelos disponibles en el sistema propuesto son: modelos climáticos de invernadero [166, 167], modelo de crecimiento de tomate [168] y modelos de riego [170], todos ellos implementados en el entorno «*MATLAB Production Server*» [171]. El desarrollo e integración de los modelos son descritos en el capítulo 2 en la sección 2.1 y en los artículos de una forma más detallada [114, 172].

La idea central de GMaaS se resumen en la figura 1.14, donde el sistema proporciona un conjunto de modelos encapsulados (clima, crecimiento, riego) y ofrece una API REST para acceder a través de peticiones HTTP. Esto permite que los modelos pueden ser solicitados mediante de un servicio obteniendo una respuesta en formato JSON [114, 172].

A continuación se presentan las principales ventajas de GMaaS son:

- Versatilidad mediante peticiones parametrizadas.
- No se requiere un *software* o implementación específica para interactuar con el sistema.
- Los modelos están disponibles como un servicio en la nube.
- Los coeficientes de los modelos pueden ser actualizados de forma sencilla según los requerimientos del usuario.

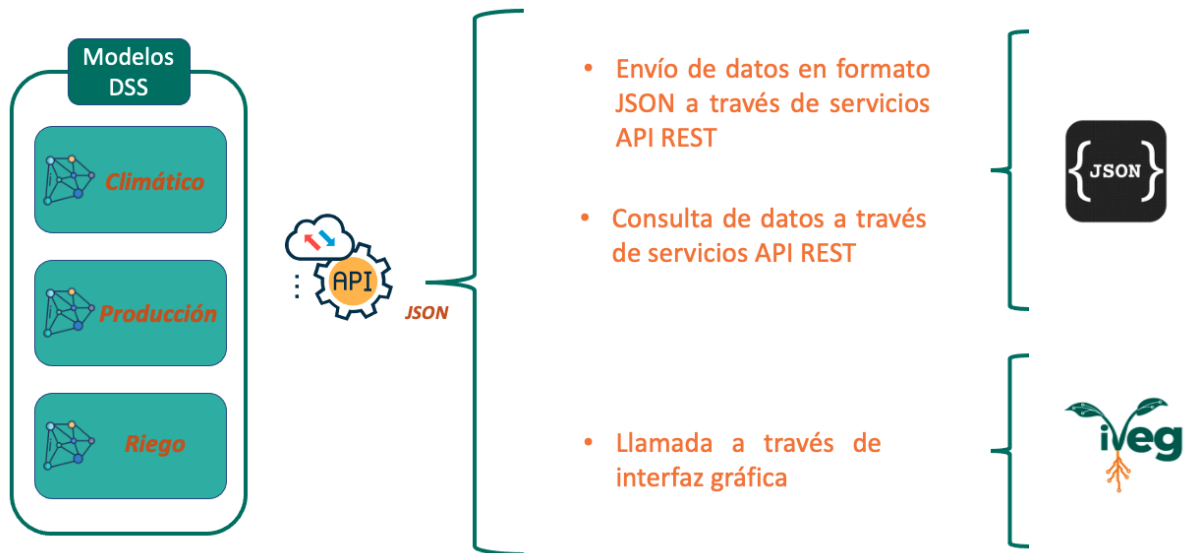


Figura 1.14. Modalidad de uso de GMaaS

## 1.6 Investigación realizada

Como se ha descrito anteriormente, el IoT es una tecnología con un gran potencial para ser empleada en diferentes dominios industriales con el objetivo de tratar de optimizar los recursos. La uso de la tecnología IoT se enfrenta a una serie de retos por la naturaleza de sus ecosistemas generando datos heterogéneos de diferentes proveedores y servicios. Esto dificulta la interoperabilidad entre sensores y plataformas, lo que dificulta el uso herramientas centradas en el tratamiento de los datos. El estado actual de esta tecnología requiere de la utilización de estándares y modelos de datos para una correcta integración. Por ello, en esta tesis doctoral se presenta una plataforma IoT basada en la nube, apostando por la utilización del estándar OMA NGSI de la plataforma FIWARE como núcleo semántico para la integración de datos, facilitando la alimentación de los modelos GMaaS como herramientas optimizadoras de recursos. Para ello, se ha desarrollado una arquitectura IoT central en la nube, la cual comparte una base central para la integración de los datos en diferentes dominios de aplicación, pero añadiendo diferentes servicios para escalar el sistema a los diferentes sectores industriales propuesto en esta tesis.

En las siguientes subsecciones se presentan las instalaciones utilizadas como referencia para el desarrollo de esta tesis doctoral. Posteriormente se aporta una descripción conceptual de la arquitectura propuesta. Seguidamente se presenta la primera contribución a la ciencia que trata de ayudar a la digitalización del sector agrícola especializada en el cultivo en invernadero con la integración de diferentes sensores y actuadores utilizando la plataforma IoT desarrollada para solucionar los problemas de interoperabilidad. Asimismo, en esta contribución se desarrollaron todos los componentes necesarios de la arquitectura IoT, así como el desarrollo e

implementación de los servicios GMaaS accesibles a través de peticiones HTTP. La segunda contribución propone una solución IoT basada en la nube para la gestión de datos a gran escala de un sistema de producción de biomasa a escala industrial a través del cultivo de microalgas como respuesta a la falta de digitalización del sector y los problemas de accesibilidad a los datos, permitiendo una monitorización de los parámetros más críticos en el proceso de producción. Asimismo, esta solución aporta servicios a investigadores y empresas para la extracción de datos a través de servicios API REST. En último lugar, se presenta la tercera contribución que aborda el desarrollo de una arquitectura de gestión del agua basada en IoT para la aplicación en distritos agroindustriales con el objetivo de facilitar la integración de datos y el uso de algoritmos de optimización y control en la nube. Los servicios expuestos a Internet a través de una API REST permiten realizar técnicas de control en la nube.

### 1.6.1 Breve descripción de las instalaciones usadas como referencia

A fin de plasmar la utilidad práctica de la plataforma IoT objeto de desarrollo en esta tesis doctoral, se tomaron como base experimental un conjunto de invernaderos, una biorrefinería de microalgas y un distrito agroindustrial de pequeña escala (este último en fase de simulación, pero utilizando como referencia entornos reales).

Cada una de ellas viene caracterizada por la pertenencia a un sector industrial diferenciado; la primera, al sector agrícola; la segunda, al sector de las microalgas; y la tercera, a un sector agroindustrial. La diversidad de los centros de trabajo viene justificada por la escalabilidad a dominios de la solución IoT propuesta en esta tesis doctoral.

#### Sector agrícola

En este primer subapartado se describen las instalaciones utilizadas en la primera contribución de la tesis doctoral relacionadas con el proyecto IoF2020. La primera de estas instalaciones es un invernadero piloto (véase la figura 1.15) situado en la Estación Experimental de la Fundación Cajamar en El Ejido, España, empleado en la fase 1 de creación de una plataforma IoT global, integración de datos e implementación de GMaaS. Este invernadero es de tipo "parral", tiene una superficie de 877 m<sup>2</sup>. Cuenta con ventilación automatizada, ventanas en el norte y sur y una ventana de solapa en el techo. Se cultiva tomate bajo condiciones similares a las de los invernaderos comerciales de tomate. Los parámetros climáticos del interior del invernadero se controlan y registran cada 30 segundos, y se miden variables exteriores como la temperatura del aire y la humedad relativa, la radiación solar, la radiación activa fotosintética, la detección de lluvia, la concentración de CO<sub>2</sub> y la dirección y velocidad del viento con una estación meteorológica. Además, se toman en cuenta variables climáticas interiores, como la temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación solar, la radiación activa fotosintética, la temperatura del suelo y de la cubierta, el consumo de agua, la conductividad eléctrica, la temperatura del sustrato y la concentración de CO<sub>2</sub>. Se utilizan actuadores como un calentador de biomasa, cuatro luces LED, enriquecimiento de CO<sub>2</sub>, humidificación de alta presión, deshumidificación y un calentador de aire caliente. Los datos se adquieren mediante tres Compact Fieldpoint y un CompactRIO de National Instruments, conectados por *Ethernet* a un *router* inalámbrico y enviados a un ordenador de adquisición de datos con un sistema de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA, del inglés *Supervisory Control and Data Acquisition*). También se tienen en cuenta los datos del cuaderno de campo de los técnicos, así como la predicción meteorológica y servicios en la nube de terceros.

En la segunda fase del proyecto piloto, se evalúa la escalabilidad del sistema, pasando de un invernadero experimental a ocho invernaderos en producción real especializados en el cultivo de tomate orgánico. Los invernaderos se encuentran en tres áreas geográficas diferentes de

la provincia de Almería: Poniente almeriense, Levante almeriense y Almería central. En el Poniente almeriense hay dos invernaderos del tipo «raspa y amagado» con una superficie de 877 m<sup>2</sup> y 20.000 m<sup>2</sup>. En el Levante almeriense hay tres invernaderos, dos de ellos del tipo multitúnel con una superficie de 20.000 m<sup>2</sup> y uno del tipo richel con una superficie de 20.000 m<sup>2</sup>. En Almería central hay cuatro invernaderos, dos de ellos del tipo multitúnel con una superficie de 30.000 m<sup>2</sup> y 7400 m<sup>2</sup> respectivamente y dos del tipo parral con una superficie de 24.000 m<sup>2</sup> y 7400 m<sup>2</sup> cada uno.



Figura 1.15. Invernadero piloto empleado, a la derecha, los cultivos más representativos de la zona: tomate y pimiento

Para la adquisición de datos se han utilizado tres tipos de estaciones. Las estaciones son de la marca Hortisys, iMetos y Hops. La estación de Hortisys dispone de sensores de CO<sub>2</sub>, radiación solar y global, temperatura ambiente, humedad ambiente, def. vapor de presión, conductividad eléctrica del medio, conductividad eléctrica del suelo, humedad del suelo y temperatura de suelo. Utiliza GPRS a través de una tarjeta SIM para enviar los datos al servicio API REST del fabricante. La estación de iMetos dispone de sensores de radiación solar, CO<sub>2</sub> y una pica posicionada vertical introducida en el suelo a 30 cm, permitiendo tomar medidas de temperatura, humedad y conductividad a diferentes alturas. También utiliza GPRS a través de una tarjeta SIM para enviar los datos al servicio API REST del fabricante. La estación de Hops dispone de sensores de CO<sub>2</sub>, radiación solar, temperatura ambiente, humedad ambiente, consumo de agua, temperatura del suelo y humedad de suelo. Utiliza la comunicación Wi-Fi o GPRS a través de una tarjeta SIM para enviar los datos al servicio API REST del fabricante.

Los invernaderos comerciales cuentan con dos estaciones de la marca Hortisys e iMetos con el número de sensores detallados anteriormente necesarios para controlar el crecimiento del cultivo. El invernadero piloto cuenta con dos estaciones comerciales, Hortisys y Hops, así como con una red de sensores y actuadores descritos en la primera fase del proyecto. Para obtener más información acerca del envío de datos y la gestión de ellos en plataforma IoT desarrollada, se recomienda consultar el capítulo 2 sección 2.1.

### **Sector de las microalgas**

En este subapartado se describen las instalaciones empleadas para el desarrollo de la segunda contribución de la tesis doctoral relacionadas con el proyecto SABANA, anteriormente referenciado. Las instalaciones utilizadas en este proyecto se encuentra en el Instituto de



Investigación y Formación Agraria y Pesquera Andaluz (IFAPA) situado en La Cañada, Almería, España. Cuenta con aproximadamente 5000 m<sup>2</sup> donde se encuentra el cultivo de microalgas, el almacenamiento de nutrientes y los servicios de suministro de agua.

La planta cuenta con dos invernaderos: uno con una superficie aproximada de 700 m<sup>2</sup> que alberga los reactores tubulares, los sistemas de ozonización y las columnas de inóculo, y otro con una superficie aproximada de 1200 m<sup>2</sup> que incluye los fotobiorreactores *Thinlayers* y *Raceways*. Además, hay otros dos fotobiorreactores *Thinlayers* y *Raceways* de gran tamaño situados en una parcela exterior de 2100 m<sup>2</sup>. En total, la planta tiene trece fotobiorreactores: tres *Thinlayers*, cuatro *Raceways*, tres Tubulares y tres grupos de tres columnas de inóculo (véanse las figuras 1.16a, 1.16b).



(a) Fotobiorreactor Raceway



(b) Fotobiorreactor Tubular

Figura 1.16. Instalaciones SABANA

Los fotobiorreactores son el espacio en el que se lleva a cabo el proceso de cultivo de microalgas y permiten regular los diferentes parámetros necesarios para su crecimiento. Según la etapa del cultivo, se utiliza un tipo u otro de fotobiorreactor. Para cultivar microalgas, es importante controlar los niveles de pH, oxígeno disuelto y temperatura del medio, por lo que es necesario contar con sensores para medirlos en cada uno de los fotobiorreactores [173, 174].

Los lazos de control tanto para los sistemas de inyección como para los sistemas de flujo forzado considerarán las condiciones atmosféricas que tienen un impacto significativo en el crecimiento del cultivo. Por lo tanto, la planta contará con una estación meteorológica que proporcionará datos sobre la radiación, la temperatura, la humedad, las precipitaciones, la velocidad y la dirección del viento [175].

El operador controla la planta desde un ordenador personal con el *software* SCADA, que es un cliente OPC UA. Este ordenador se comunica con las siete tarjetas de adquisición de datos LabJack UE9 instaladas en la planta a través del protocolo Modbus TCP/IP. Para obtener más información acerca del tratamiento de los datos y la plataforma empleada, se recomienda consultar el capítulo 2 sección 2.2.

### Sector agroindustrial

Para evidenciar los resultados que se pueden obtener con la aplicación de la plataforma IoT propuesta, se ha utilizado un caso de estudio basado en tres instalaciones reales situadas en Almería. El diagrama esquemático se muestra en la figura 1.17, y se utiliza para representar un distrito agroindustrial compuesto por varios agentes consumidores (es decir, tres invernaderos y un edificio de oficinas) y dos fuentes de agua (es decir, una planta desalinizadora solar y la red de servicios públicos de agua). Se eligió este distrito agroindustrial a pequeña escala por ser representativo de uno a escala industrial. A continuación se describen las plantas incluidas en el distrito industrial:

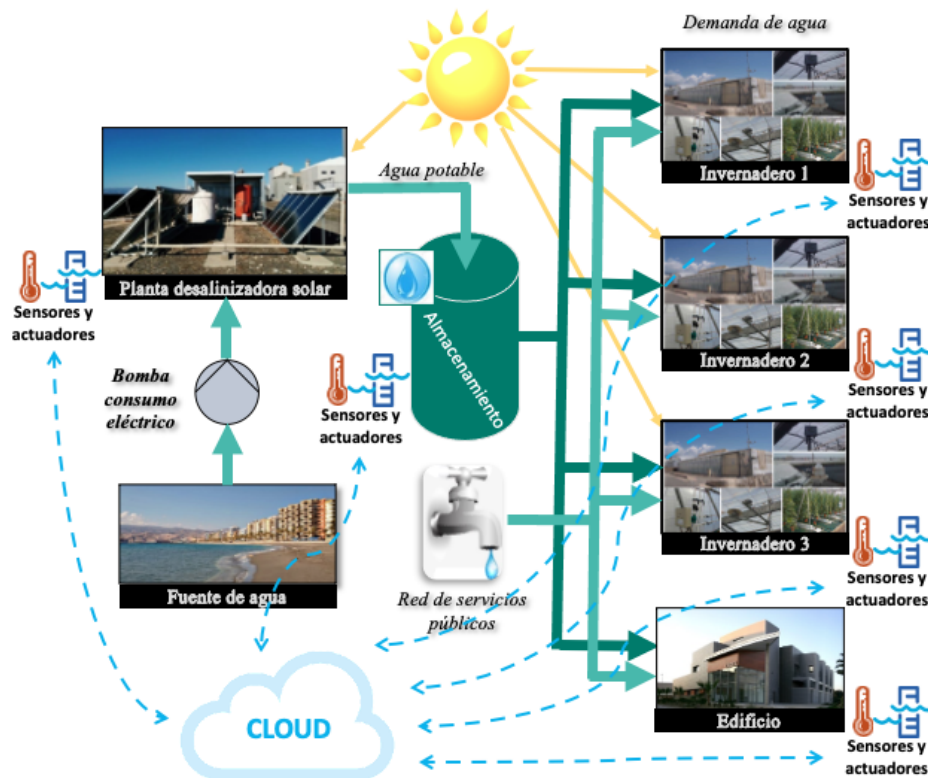


Figura 1.17. Representación del distrito agroindustrial

- **Desaladora:** la planta de desalinización solar empleada como referencia en el caso de estudio se basa en la instalación de Destilación Solar de Membrana (SMD, del inglés *Solar Membrane Distillation*) de la Plataforma Solar de Almería (PSA), en el sureste de España. En la figura 1.17 se muestra una imagen real de la planta. Esta instalación fue descrita en su totalidad en [176] y está formada por un campo solar, que proporciona la energía térmica necesaria para el proceso de Destilación por Membranas (MD, del inglés *Membrane Distillation*), varios módulos de MD y un intercambiador de calor que conecta ambos sistemas. La planta está completamente controlada y monitorizada, midiendo las variables principales del proceso de destilación como la presión, la temperatura y el caudal.
- **Invernaderos:** los invernaderos que se incluyen en este caso de estudio se basan en el invernadero piloto previamente descrito en la sección 1.6.1.
- **Edificio de oficinas:** el edificio de oficinas incorporado en el caso de estudio toma como referencia el edificio CIESOL situado en el campus de la Universidad de Almería, en el sureste de España, a 20 km de la PSA. Este edificio tiene una superficie total de 1071,91 m<sup>2</sup> distribuida en dos plantas. Además, como en el resto de instalaciones que componen el

caso de estudio, CIESOL cuenta con una red de sensores para monitorizar las principales variables que afectan al edificio como la temperatura y el consumo de electricidad y agua. En el artículo [177] se presenta una información más precisa sobre este entorno de simulación. Para obtener más información acerca del tratamiento de los datos y el control en la nube, se recomienda consultar el capítulo 2 sección 2.3.

### 1.6.2 Arquitectura conceptual empleada en la investigación realizada

Una de las principales contribuciones de esta tesis doctoral es la creación de una arquitectura IoT tal y como se venía desarrollando a lo largo de las diferentes secciones. El objetivo principal de esta es ser escalable a otros sectores industriales y dominios, integrando datos heterogéneos de diferentes proveedores e implementando el uso de GMaaS. La figura 1.18 muestra lo que podría conceptualizarse como un modelo estándar de la arquitectura planteada que trata de plasmar los caracteres fundamentales o básicos en cada una de las arquitecturas IoT propias de cada sector industrial. Con el objetivo de solucionar los problemas de interoperabilidad que se han experimentado en diferentes sectores, se han creado servicios ETL para la extracción de datos, un modelo de datos basado en estándares y se han proporcionado herramientas para una correcta gestión de las diferentes plantas. Aunque la arquitectura propuesta es escalable a cada uno de los sectores industriales, cada uno de ellos tiene rasgos característicos o notas definitorias que se estudian en el capítulo 2, en los trabajos [114-116].

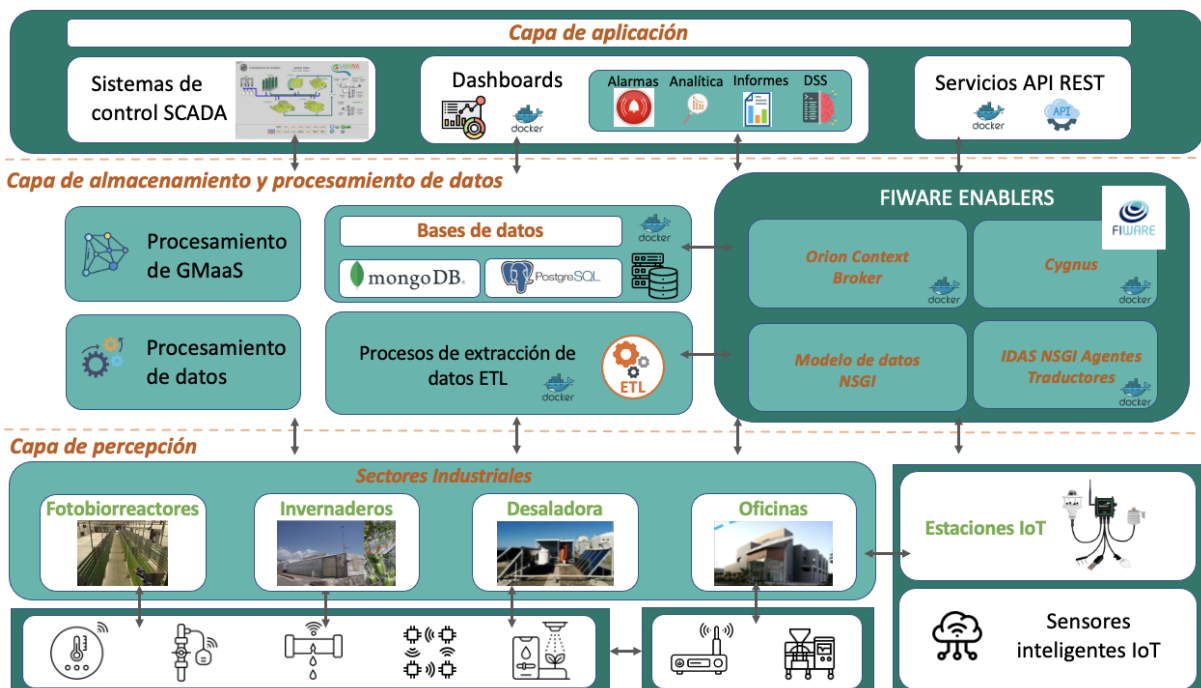


Figura 1.18. Diseño de la arquitectura conceptual utilizada

La arquitectura conceptual se divide en tres capas: la capa de percepción, la capa de almacenamiento y procesamiento de datos y la capa de aplicación. Esta estructuración en capas permite trabajar de manera aislada en el desarrollo de nuevos servicios y funcionalidades, lo que evita que el funcionamiento de los servicios de otras capas se vea afectado. Además, esta arquitectura simplifica los problemas de integración y escalabilidad del sistema cuando se añaden nuevos sectores industriales y sensores. Las capas están conectadas a través de redes virtuales o Internet y tienen el objetivo de tener servicios o microservicios independientes en cada una de ellas, que luego se pueden utilizar en contenedores para desplegar los servicios.



De esta forma, el sistema puede escalar bajo demanda. A continuación se presentan las capas y sus componentes:

- **Capa de percepción:** se encuentra ubicada en la parte inferior de la figura 1.18. Es la capa sensorial del IoT donde los objetos identifican su entorno, recogen datos del mundo físico e interactúan con él. En esta capa se genera la información de contexto necesaria para el modelo de datos estándar. Este término se refiere a todos los datos generados por los sensores/actuadores del entorno pertenecientes al ecosistema IoT. Esta capa está compuesta por todo tipo de sensores y actuadores que convierten la información en señales eléctricas más fáciles de transmitir para su posterior análisis. En ella se pueden ver los 4 sectores industriales utilizados durante el desarrollo de esta tesis doctoral. Existen diversos tipos de sensores y actuadores, tales como sensores que están conectados a sistemas SCADA o PLCs mediante una red cableada, y sensores que están conectados a estaciones IoT o dispositivos inteligentes, los cuales son capaces de enviar información a una API REST del fabricante o a la capa superior de forma autónoma.

Esta capa permite extender el número de sectores industriales y sensores de una manera horizontal. En otras palabras, el sistema está diseñado para ser escalable, lo que permite añadir nuevos invernaderos, fotobiorreactores, oficinas y plantas desaladoras, junto con sus respectivos sensores y actuadores.

- **Capa de almacenamiento y procesamiento de datos:** se encuentra en el centro de la arquitectura conceptual (como se muestra en la figura 1.18). También se conoce como la parte lógica de cualquier aplicación. Esta es la encargada de realizar las tareas que requieren de altas necesidades de computación. Los servicios que ofrece incluyen la extracción, el tratamiento y la carga de datos de los sensores de la capa de percepción, las bases de datos y un conjunto de GEs de FIWARE (que incluye traductores de diversos protocolos de comunicación, como MQTT y OPC UA, al estándar OMA NSGI). También se proponen modelos de datos para la interoperabilidad y el almacenamiento de datos históricos en series temporales. Además, se ofrecen servicios de procesamiento DSS para brindar asistencia en la toma de decisiones basada en modelos GMaaS.
- **Capa de aplicación:** situada en la parte superior de la figura 1.18, esta capa expone aplicaciones, interfaces y servicios a los usuarios finales. Esta es utilizada por los usuarios o empresas para interactuar con los servicios y sensores de las capas inferiores. En ella se ofrecen diversos servicios API REST tales como información de los datos de los sensores en tiempo real, datos históricos, predicciones meteorológicas futuras, uso de los modelos GMaaS, entre otros. Además, se proporcionan interfaces gráficas que usan los servicios API REST mencionados anteriormente y permiten al usuario realizar una monitorización y gestión de los datos en la nube.

La seguridad de esta arquitectura se basa en *tokens* privados (JWT, del inglés JSON Web Token), que es un estándar abierto que define un método compacto y autocontenido para encapsular y compartir de forma segura las reclamaciones a una entidad (sujeto) mediante el uso de objetos JSON [178]. El contenido del *token* puede ser confiable y verificado cuando está firmado digitalmente. La firma puede generarse empleando claves simétricas o asimétricas.

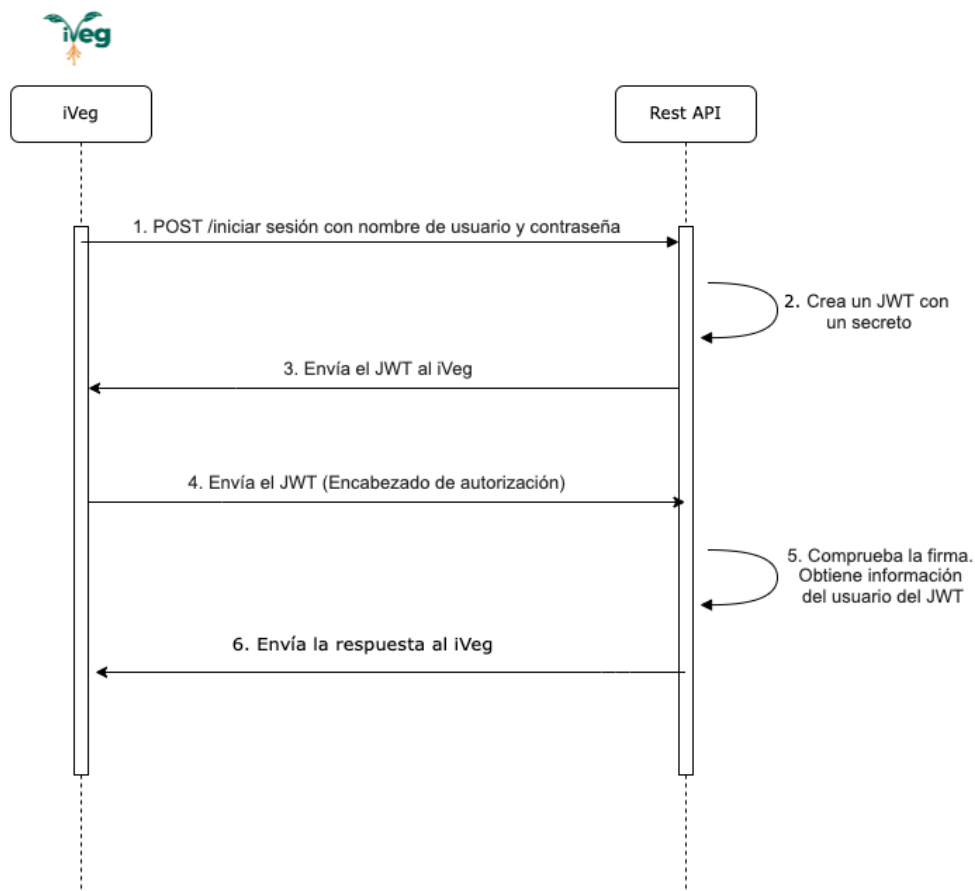
Se decidió utilizar JWT en lugar de cookies debido a sus beneficios. JWT no mantiene un estado, lo que significa que el *backend* no necesita realizar un seguimiento de los *tokens*. Cada *token* es compacto y contiene toda la información necesaria para verificar su validez y la información del usuario para las diferentes solicitudes. Además, al no tener estado, no es

necesario almacenar ninguna información en el servidor, lo que hace que sea más fácil de escalar y más seguro.

La única tarea del servidor es firmar el *token* al iniciar sesión y verificar la validez del *token* intercambiado. Esto permite un escalado rápido, ya que las solicitudes no son interdependientes y pueden ser procesadas de forma independiente en diferentes servidores. Un JWT se compone de una cadena de texto que tiene tres partes codificadas en Base64 (véase la tabla 1.3), separadas por puntos (*header.payload.signature*), que son generadas y entregadas al cliente API REST. La figura 1.19 muestra un ejemplo del flujo de trabajo de una solicitud a través de la plataforma *iVeg* durante un inicio de sesión.

Tabla 1.3. Estructura de JWT

JSON WEB TOKEN
eyJhbGciOiJIUzI1NiIsInR5cCI6IkpXVCJ9 .eyJzdWIiOiIxMjM0NTY3ODkwIiwibmFtZSI6IkpvaG4gRG9lIiwiaWF0IjoiOnRydWV9 .TJVA95OrM7E2cBab30RMhRHDcEfxjoYZgeFONFh7HgQ

Figura 1.19. Flujo de trabajo JWT en *iVeg*

### 1.6.3 Plataforma IoT para la integración de datos y modelos como servicio en el sector agrícola

#### Antecedentes

La primera contribución de la tesis doctoral se centra en abordar dos de sus principales objetivos, el desarrollo de una plataforma IoT global y unificada que integre diferentes fuentes de datos heterogéneos y la integración de modelos como servicio GMaaS en sistemas de producción agroindustriales, específicamente en el cultivo bajo invernadero. La motivación para el desarrollo de este trabajo se debe a la necesidad de optimizar el uso de los recursos y la falta de interoperabilidad entre sistemas IoT, como se describió anteriormente en las secciones 1.1 y 1.3. La agricultura inteligente, también denominada «tercera revolución verde», se presenta como la inclusión de servicios y tecnologías como el IoT [19-21], el procesamiento de datos en big data [22], el *cloud computing* [179] y la inteligencia artificial o el *deep learning* [24]. Los autores Jan Bauer [180] y Carlos Cambra [181], han tratado este contexto, respectivamente, mediante el desarrollo de un sistema agrícola de monitorización y una plataforma multimedia para la agricultura de precisión basada en una red de malla inalámbrica. Otro ejemplo es el artículo de Sushanth [182], en el que se presenta un sistema de monitorización del cultivo basado en sensores y microcontroladores de bajo coste como Arduino. Los artículos mencionados previamente comparten la carencia de ser aplicados a sistemas de producción reales y estar enfocados exclusivamente a la investigación. Asimismo, en la literatura no se han hallado artículos relevantes que se centren en el desarrollo de una solución IoT global y unificada que trate de solventar los problemas de interoperabilidad de sistemas reales de producción empleando estaciones IoT comerciales y sistemas SCADA basándose en estándares y plataformas de código libre. En consecuencia, se presenta una plataforma y arquitectura IoT global y escalable que propone una solución a la falta de interoperabilidad entre estaciones comerciales IoT y servicios externos mediante un modelo de datos estándar simplificando la gestión de los datos.

Con relación al segundo objetivo, que se centra en el desarrollo e integración de los modelos como servicio en invernaderos GMaaS. En el proceso de digitalización se están utilizando sistemas de apoyo a la toma de decisiones asistidos por ordenador como asistentes para la gestión de las explotaciones agrícolas. Una tendencia actual es emplear el concepto de XaaS, que consiste en proporcionar toda la información generada por la integración de tecnologías, aplicaciones o productos a través de un acceso basado en Internet [165]. En la literatura se han encontrado ejemplos de herramientas de apoyo a la toma de decisiones en la nube. AgroDSS es un DSS en la nube que combina Sistema de Gestión Agrícola (FMI, del inglés *Farm Management System*) existentes, permite a los agricultores cargar datos y utilizar herramientas y técnicas de análisis para tomar futuras decisiones en el sistema [183]. Otro ejemplo se presenta en [184], donde se ha desarrollado y evaluado un FMI basado en la nube en un invernadero real. En la literatura, hay algunos obstáculos a considerar en el desarrollo de sistemas de monitorización de invernaderos. Estos incluyen la gestión y acceso a los datos recogidos por los sensores, la creación de una solución en la nube que pueda adaptarse a las necesidades del sistema, la implementación de un modelo de datos abierto que permita la fácil integración de nuevos y diferentes dispositivos y sensores, y la posibilidad de ofrecer modelos de invernadero como servicio a través de API REST o de una forma sencilla a través de una plataforma IoT.

#### Contribuciones

Este trabajo busca solucionar los desafíos presentados en la literatura relacionados con la digitalización del sector agrícola y aportar valor a este sector. Para ello, se ha implementado una solución IoT en la nube para la producción de cultivos en invernaderos. La primera fase de la investigación se enfocó en el desarrollo de la plataforma IoT y la creación de servicios ETL que se encargan de extraer, procesar y cargar datos de diferentes dispositivos, bases de datos e infraestructuras. Esta fase se validó en la Estación Experimental de la Fundación

Cajamar en un invernadero piloto (descrito en la sección 1.6.1) seleccionado debido a su gran cantidad de sensores, estaciones comerciales y nivel de automatización, lo que proporcionó una gran cantidad de datos heterogéneos. Como resultado, se creó la plataforma *iVeg*, que cuenta con un número de registro de propiedad intelectual 04/2022/956, permitiendo que los datos generados por el invernadero piloto estén completamente integrados. Dado que los resultados de esta fase fueron exitosos, se ha procedido a escalar la plataforma IoT e integrar un total de ocho invernaderos comerciales ubicados en diferentes localizaciones geográficas de la provincia de Almería, cumpliendo así con otro objetivo de la tesis: crear una plataforma generalista, escalable y que unifique diferentes fuentes de datos en un mismo lugar, facilitando la gestión para los usuarios.

Seguidamente, en este trabajo se presenta una solución para hacer uso de los servicios GMaaS. Esta solución permite acceder a modelos climáticos, de crecimiento de cultivos y de riego a través de una API REST, lo que significa que estos modelos están disponibles en línea y no requieren ningún *software* o dispositivo específico. Estos modelos pueden usarse para diferentes propósitos, como herramienta de simulación, sensor virtual en tiempo real para el control y retroalimentación, y servicio de apoyo para la toma de decisiones integrado en la aplicación *iVeg*. La plataforma es fácil de usar para usuarios con perfil menos técnico, ya que presenta la utilización de los modelos en formato gráfico y en tablas con predicciones climáticas a 72 horas y necesidades de riego futuras. Este trabajo fue publicado con éxito en la revista IEEE Internet of Things Journal [115] como una extensión de trabajos presentados en conferencias internacionales y nacionales [172, 185-189]. Para obtener más información sobre este trabajo, se recomienda consultar el capítulo 2 sección 2.1.

### **1.6.4 Plataforma IoT para la gestión de datos en una planta de cultivo de microalgas a escala industrial**

#### **Antecedentes**

La segunda contribución de la tesis doctoral se centra en proponer una solución IoT basada en la nube para la gestión de datos a gran escala de un sistema de producción de biomasa a través del cultivo de microalgas. En este caso, las tareas se centran en mejorar el acceso de los datos a los técnicos de la planta, investigadores y empresas, permitiendo que los reactores sean interoperables, unificando la información en una plataforma IoT y facilitando la integración y creación de nuevos sensores, actuadores y fotobiorreactores. Este trabajo se motivó por la falta de tecnificación del sector, lo que representa un desafío para mejorar la producción de microalgas debido a la complejidad de la distribución y producción. Los sistemas tradicionales heredados se basan en sensores cableados M2M y en hojas de cálculo, lo que dificulta obtener las necesidades de monitorización óptimas de las plantas reales. Para un crecimiento óptimo de las microalgas, es necesario controlar un conjunto de variables como la temperatura, el pH y el oxígeno disuelto [173, 190, 191], por lo que se requieren sistemas de monitorización y bases de datos robustas y precisas para este fin.

Existen solo unos pocos estudios en la literatura sobre la producción de microalgas y su integración con IoT. El estudio presentado por [192] hace un repaso describiendo el estado del arte de las tecnologías IoT y sus avances en el cultivo de microalgas. Los resultados de este estudio se enfocan en los beneficios que aporta al sector, tales como un método técnico más ecológico, inteligente, automático y de bajo coste para alcanzar los objetivos productivos correspondientes. En [193], se presenta la construcción de un fotobiorreactor en un simulador y la aplicación de IoT con sensores de bajo coste basados en Arduino. En [194] se presenta un estudio que tiene como objetivo evaluar cada fase de la implementación de IoT y el aprendizaje automático en el cultivo inteligente de microalgas, dado que existen pocos estudios sobre el uso de IoT en este sector. Sin embargo, no se han encontrado investigaciones relevantes sobre

la aplicación de soluciones IoT y arquitecturas basadas en la nube en plantas de producción de microalgas a gran escala, como es el caso de la solución aquí propuesta.

### **Contribuciones**

El problema planteado en este estudio presenta una serie de desafíos, tales como la interconexión de sensores y actuadores, el procesamiento de datos, el desarrollo de una plataforma IoT en la nube que permita la escalabilidad de los sensores y la integración de datos heterogéneos de otros servicios comerciales, o el uso de servicios API REST de manera simple. Asimismo, se requiere un modelo de datos estándar para publicar los datos en acceso abierto para investigadores y empresas, así como el soporte de diversos protocolos de comunicación.

Esta contribución tiene como objetivo contribuir a la digitalización del sector industrial mediante el desarrollo de una solución IoT basada en la nube para la monitorización y gestión de datos de una planta de producción de microalgas. La solución busca mejorar el acceso a los datos generados por el sistema a través de los servicios ofrecidos por la plataforma SABANA Data Services.

La solución IoT propuesta está formada por una arquitectura IoT y sus módulos correspondientes y pretende cubrir el ciclo completo de producción del sector, incluyendo la obtención de medidas de los sensores y el envío de datos, el registro de nuevos dispositivos, el procesamiento de datos, los servicios de consulta de datos y la monitorización de los diferentes dominios.

Se ha creado una arquitectura en la nube, dividida en capas según la funcionalidad de cada servicio, que utiliza un modelo de datos basado en el estándar OMA NGSI para facilitar la integración de nuevos sensores y actuadores. Además, se ha integrado un protocolo de comunicación estándar basado en OPC UA.

La plataforma IoT y la arquitectura en la nube se han evaluado en una planta real de producción de biomasa llamada SABANA descrita en la sección 1.6.1. Los servicios están disponibles para empresas e investigadores a través de una API REST que permite obtener cualquier tipo de dato generado en el sistema y desarrollar cuadros de mando personalizados a través de diferentes interfaces web. La plataforma propuesta también incluye una interfaz gráfica en la web basada en la API REST para la extracción de los datos. Este trabajo fue publicado en la revista IEEE Access [114] como una extensión del trabajo [195]. Para obtener más información sobre este trabajo, se recomienda consultar el capítulo 2 sección 2.2.

### **1.6.5 Arquitectura IoT para la gestión de los recursos hídricos en entornos agroindustriales**

#### **Antecedentes**

Este trabajo aborda el desarrollo de una arquitectura de gestión del agua basada en IoT para su aplicación en distritos agroindustriales que incluye una planta desalinizadora, conexión a la red de servicios públicos y varios agentes consumidores. En este caso las tareas se centran en aportar de manera teórica cómo se realiza la integración a través de un modelo de datos estándar y un método de gestión eficiente basado en la nube. De esta forma se valida nuevamente la escalabilidad de la arquitectura IoT desarrollada a un dominio distinto. La motivación para el desarrollo de este trabajo se debe a la necesidad de optimizar los recursos como es el uso de agua dulce empleada en el cultivo bajo invernadero en la provincia de Almería a través de la integración de diferentes fuentes de datos. Esta provincia es una de las regiones más secas de Europa, pero, paradigmáticamente, cuenta con uno de los mayores sistemas de producción agraria del continente. Un ingrediente básico de este sistema es el agua dulce, por lo que el desarrollo de la agricultura almeriense ha estado asociado durante

muchos años a la disminución de los embalses de agua dulce, a pesar de ser la zona agrícola donde se realiza la gestión más eficiente de este recurso [196]. Esto impulsó la instalación de desaladoras como herramienta para mantener la disponibilidad de agua dulce en la comarca y, por tanto, la sostenibilidad del sistema agrario [197].

De este modo, se están desarrollando diferentes plataformas de gestión de datos agronómicos que utilizan tecnologías IoT. Estas plataformas son una evolución natural de los FMI para hacerlos compatibles con el *cloud computing* [198-200]. Los trabajos relacionados con tecnologías habilitadoras como IoT en el ámbito agrícola se centran en mejorar el rendimiento de los cultivos, abordando aspectos como la optimización del sistema de riego, o el desarrollo de plataformas para mejorar la toma de decisiones. Hasta el momento no se han encontrado estudios que aborden el uso de tecnologías que integran datos de diferentes dominios y utilizan servicios API REST para publicar y suscribir los datos generados, así como para realizar operaciones de control en la nube para la gestión eficiente de distritos agroindustriales en cuestiones de agua. Esto podría ser crucial para optimizar el rendimiento en el nuevo escenario planteado por la introducción de nuevas fuentes de agua en los sistemas agrícolas.

### **Contribuciones**

Este trabajo presenta una arquitectura IoT para la gestión óptima de la red de agua distribuida en entornos agroindustriales. La arquitectura propuesta es escalable y dividida en capas o servicios y utiliza un modelo de datos basado en OMA NGSI para centralizar y estandarizar los datos del sector industrial. Además, la arquitectura incluye una estrategia de Control Predictivo por Modelo (MPC, del inglés *Model Predictive Control*) que optimiza los costos operativos de la red de agua, teniendo en cuenta los costos de la bomba de alimentación de la planta desaladora y los costos del agua de la red de suministro público, garantizando al mismo tiempo las necesidades de agua.

Para demostrar los resultados que se pueden lograr con la aplicación de esta arquitectura, se utiliza un caso de estudio inspirado en tres instalaciones reales ubicadas en Almería. El diagrama esquemático del caso de estudio se muestra en la figura 1.17 y representa un distrito agroindustrial compuesto por varios consumidores (tres invernaderos y un edificio de oficinas) y dos fuentes de agua (una planta desalinizadora solar y la red de servicios públicos de agua) descrito en la sección 1.6.1. Este distrito agroindustrial a pequeña escala fue elegido por ser representativo de uno a escala industrial y permitir visualizar los resultados de forma sencilla.

Es importante mencionar que la arquitectura propuesta permite que el controlador MPC realice estrategias operativas en tiempo real y en la nube gracias a la integración de datos y al uso de un modelo estándar. Esta contribución fue publicada en la revista *Sensors* [116] como una extensión del trabajo [201]. Para obtener más información sobre este trabajo, se recomienda consultar el capítulo 2 sección 2.3.





## 2. Contribuciones a revistas científicas

La normativa de la Universidad de Almería exige que toda tesis doctoral presentada en la modalidad A (tesis por compendio) esté respaldada por tres contribuciones científicas. Dos de ellas deben ser incluidas en la categoría A de la escala de valoración de resultados de investigación del Plan Propio de Investigación y Transferencia de la Universidad de Almería aprobado ese año, que corresponde a revistas clasificadas en la posición más alta de su categoría temática (Q1 en el JCR (Journal Citation Report)). La tercera contribución debe ser clasificada en la categoría B, que corresponde a revistas en la segunda posición más alta (Q2 o Q3 en el JCR), y no puede ser una comunicación a congreso ni tener relación con las otras dos contribuciones. Todas las contribuciones científicas deben de haber sido publicadas o aceptadas. Esto se establece en el artículo 24 de la normativa de la Universidad de Almería.

Esta tesis doctoral se basa en 3 artículos científicos publicados en revistas clasificadas en el JCR, que se clasifican de la siguiente manera:

- **Artículos Q1:** 2.
- **Artículos Q2:** 1.

Conforme a la normativa citada con anterioridad, es necesario incluir los artículos anteriores en este capítulo para la modalidad de tesis por compendio. Para facilitar la comprensión al lector, se han ordenado y clasificado de la forma en que se describen al final de la sección 1.6. En concreto, la sección 2.1 muestra el trabajo centrado en el desarrollo de la plataforma *iVeg*, que tiene como objetivo unificar la información en un único sistema de integración de datos heterogéneos de diferentes proveedores de servicios y sensores. Del mismo modo, se presenta el desarrollo e implementación de los modelos en invernadero GMaaS que hacen uso de los servicios y arquitectura desarrollados en *iVeg*.

La sección 2.2 presenta el trabajo enfocado en las pruebas de integración de la arquitectura IoT desarrollada, que tiene como objetivo la gestión de datos en una planta de cultivo de microalgas a escala industrial. Se pretende mejorar el acceso a los datos, la interoperabilidad entre reactores, unificar la información de una plataforma IoT y facilitar la creación de nuevos sensores, actuadores y fotobiorreactores mediante un modelo de datos estándar.



Finalmente, en la sección 2.3 se presenta de manera teórica la integración de datos a través de una arquitectura IoT en la nube y el uso de algoritmos de optimización y control en un distrito agroindustrial compuesto por tres invernaderos, un edificio de oficinas, una planta desalinizadora solar y la red de servicios públicos de agua. Esta integración entre las plantas y el control en la nube permiten una mayor eficiencia y gestión del distrito agroindustrial. Proporciona una visión teórica de cómo se pueden utilizarse las TICs y la comunicación IoT para mejorar la gestión y optimización de un distrito agroindustrial.

Es importante señalar que cada artículo descrito en esta sección contiene su propia bibliografía, la cual no está relacionada con la sección de bibliografía del documento principal de la tesis doctoral. Asimismo, el trabajo de investigación realizado durante el desarrollo de la tesis doctoral, además de las contribuciones a revistas mencionadas con anterioridad, dio lugar a las siguientes contribuciones:

- **Contribuciones a conferencias internacionales:** 7.
- **Contribuciones a conferencias nacionales:** 1.

Las contribuciones citadas anteriormente son referenciadas en cada uno de los apartados correspondientes dentro de su sección. Además, el doctorando ha obtenido dos premios, el primero de ellos otorgado por la prestigiosa Sociedad Española de Agroingeniería y el segundo por los editores de la revista Sensors. Adicionalmente, la plataforma IoT desarrollada cuenta con un registro de propiedad intelectual n.º 04/2022/956 y una contribución especial en una revista de divulgación científica.

- **Registro de propiedad intelectual:** 1.
- **Premios:** 2.
- **Revista de divulgación científica:** 1.

Además de los resultados presentados en este capítulo, el doctorando ha participado en proyectos de investigación enfocados en la difusión científica. Según las normativas, estas contribuciones pueden consultarse en el capítulo 4 para obtener más detalles.

## 2.1 Plataforma IoT para la integración de datos y modelos como servicio en el sector agrícola

El trabajo de investigación de esta tesis se sustenta en las publicaciones que se relacionan a continuación, en las que se ha resaltado en negrita el nombre del doctorando y autor de esta tesis (véase la tabla 2.1).

Tabla 2.1. Información de la contribución 1

<b>Título</b>	A New IoT-Based Platform for Greenhouse Crop Production		
<b>Autores</b>	<b>M. Muñoz</b> , J. L. Guzmán, J. A. Sánchez-Molina, F. Rodríguez, M. Torres, M. Berenguel		
<b>Revista</b>	IEEE Internet of Things Journal		
<b>Año</b>	2022		
<b>Volumen</b>	9		
<b>Páginas</b>	6325 – 6334		
<b>DOI</b>	<a href="https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2996081">https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2996081</a>		
<b>FI (JCR 2021)</b>	10.238		
<b>Categorías</b>	Telecomunicaciones	(6/93)	<b>Q1</b>
	Informática, sistema de información	(9/164)	Q1
	Ingeniería, eléctrica y electrónica	(18/276)	Q1

### Contribución del doctorando

El candidato al doctorado, M. Muñoz, es el primer autor de este trabajo.

Hasta la fecha (30/01/2023), el artículo ha recibido 9 citas según Scopus, 9 según Web of Science y 20 según Google Scholar, encontrándose en el 10% de los artículos más citados en la categoría *Computer Science* según *InCites Essential Science Indicators* de *Clarivate Analytics*, descontadas las autocitas. Cabe señalar que otra métrica que proporciona la editorial IEEE es que el artículo ha tenido 565 visitas, incluidas la descarga del archivo y las visitas a la web.

Esta publicación dio lugar a las siguientes contribuciones en congresos internacionales:

- **M. Muñoz Rodríguez**, J. A. Sánchez-Molina, F. Rodríguez, M. Berenguel y C. Giagnocavo, «Farms, fogs and clouds: Data open-architecture for optimal crop growth control for loF2020 project,» *Proceedings of the European Conference on Agricultural Engineering*, Wageningen, Países Bajos, 2018, págs. 8-12. Referencia: [187].
- **M. Muñoz-Rodríguez**, J. A. Sánchez-Molina, C. Giagnocavo y M. Berenguel, «IoT aplicado a la trazabilidad y a la toma de decisiones para cultivo de tomate en invernadero,» en *I Simposio Ibérico de Ingeniería Hortícola*, Lugo, España, 2018. Referencia: [186].
- **M. Muñoz Rodríguez**, J. L. Guzmán, J. A. Sánchez-Molina, F. Rodríguez, y M. Torres, «Greenhouse Models as a Service (GMaaS) for simulation and control,» en *6th IFAC Conference on Sensing, Control and Automation Technologies for Agriculture*, Sídney, Australia, 2019. Referencia: [172].

- **M. Muñoz Rodríguez**, J. A. Sánchez-Molina, M. Torres, y M. Berenguel, «IoT-Based APP architecture for greenhouse ganagement,» en *EFITA-HAICTA-WCCA Congress*, Rodas, Grecia, 2019. Referencia: [185].
- **M. Muñoz-Rodríguez**, J. A. Sánchez-Molina, M. Torres, M. Berenguel, y C. Giagnocavo, «Experiencias en el uso de internet de las cosas en las tareas de producción en invernaderos mediterráneos,» en *II Simposio Ibérico de Ingeniería Hortícola*, Ponte de Lima, Portugal, 2020. Referencia: [188].

Asimismo, se presentó la siguiente contribución en un congreso nacional:

- **M. Muñoz-Rodríguez**, J. A. Sánchez-Molina, M. Berenguel, y C. Giagnocavo, «La importancia del IoT en la agricultura: herramienta para la ayuda a la toma de decisiones,» en *I Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Agroalimentarias*, Almería, España, 2018. Referencia: [189].

Otra de las aportaciones se realizó en una revista de divulgación científica:

- **M. Muñoz-Rodríguez**, J. A. Sánchez-Molina, M. Berenguel, y C. Giagnocavo, «Experiências do uso da Internet das Coisas (IoT) em tarefas de produção em estufas mediterrânicas,» en *Associação Portuguesa de Horticultura (APH)*, vol. 136, 2020, págs. 27–29. Referencia: [202].

Esta línea de investigación cuenta con un premio y registro de propiedad intelectual:

- Los investigadores han recibido el premio de la Sociedad Española de Agroingeniería a la mejor aportación: «IoT aplicado a la trazabilidad y a la toma de decisiones para cultivo de tomate en invernadero,» en *I Simposio Ibérico de Ingeniería Hortícola*, Lugo, España, 2018. Referencia: [186].
- La aplicación resultante de esta investigación «iVeg», cuenta con un registro de propiedad intelectual n.º 04/2022/956.

# A New IoT-Based Platform for Greenhouse Crop Production

M. Muñoz, J. L. Guzmán<sup>1</sup>, J. A. Sánchez-Molina<sup>1</sup>, F. Rodríguez<sup>1</sup>, M. Torres,  
and M. Berenguel<sup>1</sup>, *Senior Member, IEEE*

**Abstract**—This article proposes a cloud solution to build an Internet of Things (IoT) platform applied in a greenhouse crop production context. Real-time and historical data, as well as prediction models, can be accessed by means of representational state transfer (RESTful) Web services developed for such a purpose. Forecasting is also provided following a Greenhouse Models as a Service (GMaaS) approach. Currently, our GMaaS tool provides forecasting based on computational models developed for inside climate, crop production, and irrigation processes. Traditionally, such models are hardcoded in applications or embedded in software tools to be used as decision support systems (DSSs). However, using a GMaaS approach, models are available as RESTful services to be used as needed. In addition, the proposed platform allows users to register new IoT devices and their greenhouse data in the FIWARE platform, providing a cloud-scale solution for the case study. RESTful services of the proposed platform are also used by a Web application, allowing users to interact easily with the system.

**Index Terms**—Cloud, decision support system (DSS), greenhouse models, Internet of Things (IoT).

## I. INTRODUCTION

IN THE last years, the European Union is boosting the digitalization process in different areas, introducing topics, such as the Internet of Things (IoT), big data, or artificial intelligence in many different contexts (e.g., agriculture, smart cities, smart agrifood, and so on). One example is the IoF2020 project, which introduces and enhances digitalization in several sectors, such as agriculture, livestock, and food in Europe with the aim of significantly improving productivity and sustainability of the system. Within this project, the user case 4.2 deals with the digitalization of the protected agriculture based on the integration and the use of the data generated by physical and virtual sensors, control loops, networks, models, and optimization techniques. FIWARE is another example of the firm commitment of the European Union in the digitalization process.

So, many works are being developed in this context. Smart agriculture, also called the “third green revolution,” is

presented as the inclusion of services and technologies, such as IoT [1]–[3], data processing in big data [4], cloud computing [5], farm management information systems (FMIs), and artificial intelligence or deep learning [6]. In such a context, everything as a service (XaaS) has emerged as a trend, proposing delivering, using the Internet-based access, all the information generated by the integration of technologies, applications, or products [7]. Moreover, in this digitalization process, embedded computer-assisted decision support systems (DSSs) are being used as an assistant for farm management. There are many examples of cloud-based decision support toolboxes. For instance, AgroDSS is a cloud-based DSS to combine the existing FMIs. This cloud-based toolbox allows farmers to upload data and to use analysis tools and techniques to make future decisions on the system. [8]. Another example is presented in [9], where a cloud-based FMI has been developed and evaluated in a real greenhouse. Recently, solutions proposed by Alonso *et al.* [10] and Ahmed [11] changed the vision of these cloud-based technologies proposing an edge-computing and fog-computing platform for traceability and sustainability of the daily farms production to process the data generated at the network edge.

In our context, some challenges are present, such as processing and accessing sensor data, building a cloud solution that can scale up depending on the data requirements, providing an open system so that new and heterogeneous sensors and devices can be easily added, and the possibility to provide Greenhouse Models as a Service (GMaaS).

The aim of this article is to contribute to this digitalization of the agricultural sector, where the implementation of a cloud-based solution for greenhouse crop production is presented. The proposed approach provides different services for economical and environmental benefits of the agricultural activity, and improving the system efficiency by providing suggestions for the use of water, pesticides, fertigation, or energy. In this sense, historical and real-time data are available for each of the greenhouses registered in the platform. An open model to allow adding new devices spread over the world has been defined. Weather forecast options are also offered as a service for a 48-h period. Also, a novel service called GMaaS is integrated into the platform, where greenhouse models are available to estimate indoor climate, crop production, and irrigation values. Another advantage is that all these services are available as a REST application programming interface (API) for different user needs. In fact, the proposed platform provides a graphical Web-based application that is built over this REST API.

Manuscript received December 18, 2019; revised March 23, 2020; accepted May 17, 2020. Date of publication May 20, 2020; date of current version April 25, 2022. This work was supported in part by the Spanish Ministry of Science and Innovation and EU-ERDF Funds under Project DPI2017-84259-C2-1-R, and in part by the European Union’s Horizon 2020 Research and Innovation Program through the Project IoF2020—Internet of Food and Farm 2020 under Grant 731884. (*Corresponding author: J. L. Guzmán.*)

The authors are with the Department of Informatics, University of Almería, 04120 Almería, Spain (e-mail: mmm411@ual.es; joguzman@ual.es; jorgesanchez@ual.es; firodrig@ual.es; mtorres@ual.es; beren@ual.es).

Digital Object Identifier 10.1109/JIOT.2020.2996081

2327-4662 © 2020 IEEE. Personal use is permitted, but republication/redistribution requires IEEE permission.  
See <https://www.ieee.org/publications/rights/index.html> for more information.

Notice that the greenhouse production agrosystem is a very complex process, where physical, chemical, and biological processes take place at the same time with different patterns and time scales. For that reason, model-based tools are required as support to understand the dynamics of these systems. Greenhouse climate models, crop growth models, and irrigation models have been widely studied in [12]. However, most of these models are implemented for research purposes or included as part of specific DSS systems. So, the use of the models by other users (researchers or farmers) is usually limited and complicated.

Thus, the GMaaS option presented in this article provides cloud-based models without any software/device dependence [13]. GMaaS services work through a REST API service implemented in the MATLAB production server environment [14]. Implemented models can be used for different targets: as simulation tool where the model inputs can be obtained from historical data or from a weather forecast service; as a real-time virtual sensor for control/feedback purposes where the model is invoked only one step ahead; and as a graphical DSS service from a Web-based application. The models implemented in the proposed platform are: inside climate models [12], [15], tomato crop models [16], and water and nitrogen balance model [17].

The remainder of this article is organized as follows. Section II is devoted to describe the proposed IoT system architecture. The different system API services are described in Section III. Then, the different available greenhouse models are described in Section IV. Afterward, examples of the different services are presented in Section V, especially for those based on the GMaaS option. Finally, Section VI is devoted to give some conclusions.

## II. IOT-BASED PLATFORM ARCHITECTURE

This section describes the architecture of the proposed IoT-based system that is based on FIWARE. FIWARE is an open-source platform funded through a European public-private partnership (PPP) project, in which the public and private sectors are collaborated to create the Internet of the future. This platform tries to promote the use of new technologies through a collective structure that will contribute to the growth and technological development in Europe. FIWARE is based on a modular architecture, which is supported by a set of generic enablers (GEs) that provide a series of functionalities and standards that facilitate the development of intelligent applications. Each of these components may be assembled with other components developed by third parties, thus allowing to accelerate the use of intelligent solutions. These GEs are a set of free and public APIs based on the formal open mobile alliance (OMA) next-generation services interface (NGSI) [18], [19] specifications with RESTful capabilities, accessible via HTTP. These GEs are separated by chapters depending on the functionality, named context information management, language interpretation, data analysis, security layers, and even Web interfaces. FIWARE seeks to become the technological standard that the IoT needs. The core of FIWARE is the GE known as Orion Context Broker (OCB), which manages all

the context information produced by the system. It is essential to know the term context because it is the basis of this FIWARE architecture. Context is the name given to all the information that surrounds an ecosystem, which can come from sensor networks, third-party applications, public data sources, actuators, among other systems.

Fig. 1 shows the cloud architecture of the proposed IoT platform, which is divided into three layers: 1) context producers; 2) backend; and 3) frontend. This architecture allows working in a decoupled way. The main advantage of this approach is to allow changes in each layer without affecting the operation in other layers. The aim is to have independent services, even microservices, in each layer. This solution allows to continue developing integration solutions and new improvements to the system. The different layers are described in the following.

1) *Layer 0 (Context Producers)*: This is the first layer of the system. It generates all the context information. To generate this information, physical devices must be able to collect information from the environment. These devices consist of a set of microcontrollers and software for updating devices (sensors, actuators, and so on). Sensors only deal with collecting information. Actuators perform an action on their environment. Because of the similarity with the related term in FIWARE, layer names match with context producer. Notice that context producer in FIWARE is related to all information available in the IoT ecosystem from third-party systems, sensors, actuators, SCADA systems, and so on.

In our case study, eight greenhouses distributed among the different geographical locations in the province of Almería, Spain, dedicated to tomato crops are used. On the one hand, greenhouses are equipped with heterogeneous meteorological stations. Stations contain many sensors (e.g., CO<sub>2</sub>, solar and global radiation, air and soil humidity, electric conductivity, water consumption, air and soil temperature, etc.). The set of sensors provided by a station depends on its model and its manufacturer. On the other hand, greenhouses may also be equipped with other sensors and actuators connected to data acquisition systems. Fig. 1 illustrates how systems and devices installed on greenhouses are connected to the Internet sending data to the next layer, the backend. Meteorological stations, data acquisition systems, and SCADA computers provide their data through RESTful services. However, data provided are heterogeneous following no standards.

2) *Layer 1 (Backend)*: It is located in the center of Fig. 1, which deals with data extraction from layer 0, data processing, databases, and REST services. Frontend clients may be created over this layer. Below, the main components are described.

1) *IoT Agent and Cron Process*: This service deals with extracting context information, transforming, and sending it to the IoT system. There are two services, namely, IoT Agent and Cron process. The IoT Agent transforms sensor values to the NGSI standard of FIWARE in order to solve the problem of interoperability between sensors. The service gets sensor data from different data sources (layer 0), such as REST services, IoT stations, intelligent sensors, and SCADA systems. The IoT Agent service is a developer-enabler for FIWARE which translates different communication protocols to the FIWARE standard.

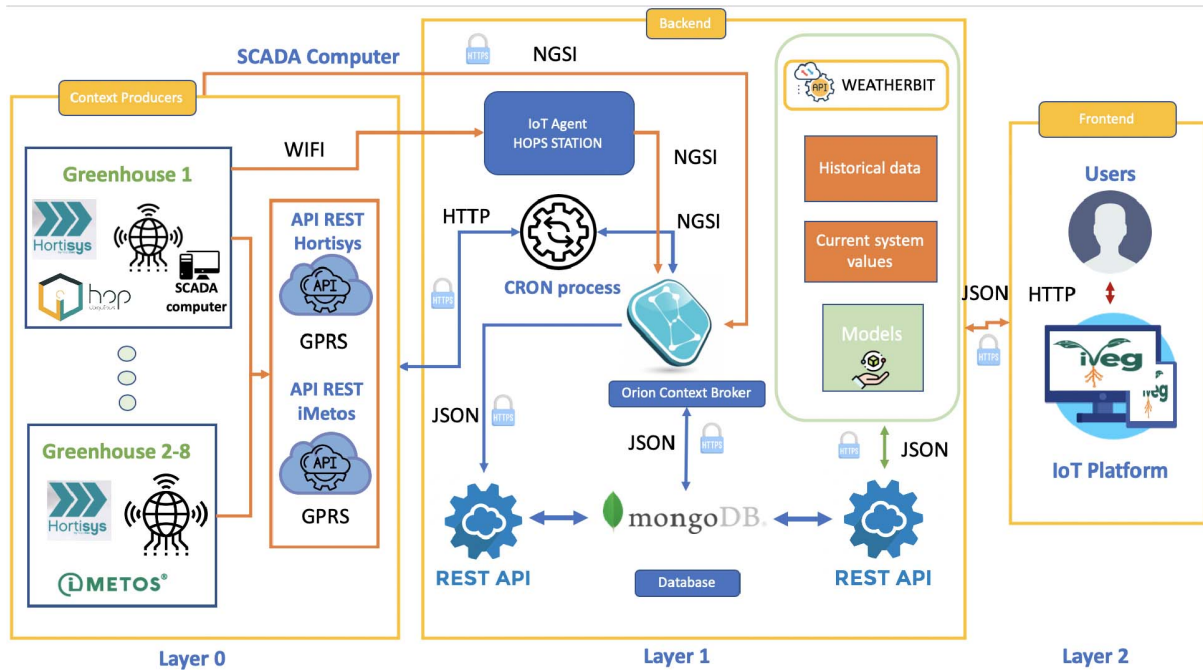


Fig. 1. IoT-based system architecture. Different system layers are depicted, with information about the data flow, communication protocols, data sources, and users.

In the figure, it translates data from the meteorological stations to the NGSI standard in order to be sent to the OCB. Another service is a Linux Cron process that periodically obtains data from REST services of the meteorological and SCADA systems, and transforms and sends them to OCB.

- 2) *OCB*: It manages context information generated by IoT stations [20]. The OCB data model is based on entities, attributes, and metadata. In our context, there is an entity type for each greenhouse station. FIWARE-service and FIWARE-service-path headers are used to identify greenhouse and station names. Each entity is subscribed to the REST API service (see Fig. 2), which stores the data in a database. So, whenever an attribute value changes, the new values are notified to the system, proceeding to store them in the database. Additional technical information about the data architecture can be found in [21].
- 3) *REST API*: The backend layer is accessed using a REST API. Two REST APIs are available. The first one takes care of data persistence, collecting incoming notifications from OCB. The other one deals with the rest of the requested operations by the client. Both APIs are based on Node.js. Node.js uses an event-driven, nonblocking I/O model that makes it lightweight and efficient, perfect for data-intensive real-time applications that run across the distributed device. Considering that the backend must be scalable, a horizontally scalable database is needed. Aggregation and sharding features are also needed. So, MongoDB was selected attending to those requirements. The backend requests are secured using the JSON Web Token (JWT). JWT security is based

on a token. When users try to sign in, they send login data to the server (backend), which generates a JWT and sends it to the client. Every client request will need this JWT. Otherwise, requests are not attended. In addition, custom frontends may be developed over it, considering that backend is based on a set of REST APIs.

- 4) *DSS*: This component is responsible for performing system control operations. It is based on the MATLAB production server. It provides a REST API that gets parameters and methods needed to perform control operations. After processing requests, results are returned to the client in a JSON format. This new approach of models as a service was proposed in [13].
- 5) *Database*: The proposed architecture is supported by MongoDB. It is a nonrelational document-oriented database. Documents are stored in BSON, a binary representation of JSON. Highlight features are related to performance, replicaset to provide high availability, and sharding to allow horizontal scaling.
- 3) *Layer 2 (Frontend)*: A single-page application (SPA), iVeg, has been developed. iVeg has been developed under the project IoF2020 on digitalization in agriculture [21], [22]. The original iVeg application integrated heterogeneous data sources from different service providers at different time scales from sensors and actuators. The current version has been connected to the proposed platform, using backend and context producers provided by layer 1 and layer 0, respectively. End users use the application to make requests querying the services provided by layer 1 in a transparent way. Section V shows an example illustrating this layer.

Thus, users/farmers may register their greenhouse devices in the proposed platform. Sensors' and actuators' data are



TABLE I  
IOT-BASED PLATFORM SERVICES

Service	HTTP Method	Operation Name	User parameters
Register new IoT station	POST	/v2/entities/	station id, station type, attributes, type, value, metadata (...)
Historical data	GET	/getDataSensorGreenhouseAnalyticsFechasV2	sensor id, station id, start date, end date
Current system values	GET	/getDataSensorGreenhouseLastDataV2	sensor id, station id
Weather forecasts	GET	/forecast/hourly?	lat, lon, lang, key, hours [[indoor temp, indoor rel. hum., floor temp, lay], [outside temp forecast], [outside wind speed forecast], [outside rad forecast], [outside humidity forecast]]
Climate model	POST	/f_climate/f_climate	[sensor id, station id, start date, present date]
Production model	POST	/f_tomgro/f_tomgro	[sensor id, station id, start date, present date, lat, long]
Irrigation model	POST	/f_irrigation/f_irrigation	[sensor id, station id, start date, present date, lat, long]

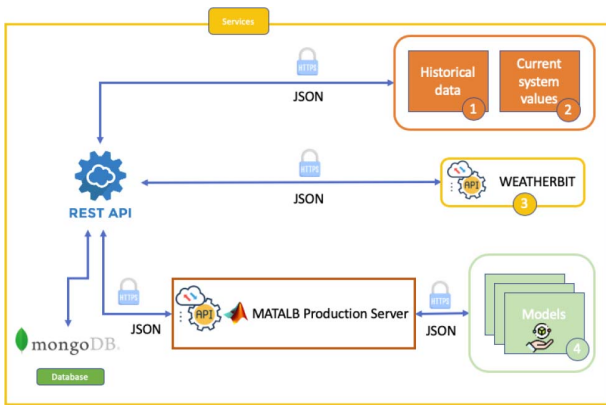


Fig. 2. System services. Different data sources, users, and services are represented.

stored in the database by means of a request to the REST API. Measures provided by the different devices are stored using a variable sampling time within 1–10 min, depending on the variable to be saved. Stored data are used to calibrate and to integrate specific models for inside climate, crop production, and irrigation into the platform, which are available as API services.

### III. SYSTEM SERVICES

In this section, the available services are described. The services are classified into two groups: 1) data services and 2) GMaaS. Fig. 2 depicts available data sources, interfaces, and services. The different available services are numbered: historical data (1), real-time data (2), weather forecast (3), and models (4). These services may be used by means of a REST API. JSON is used for information exchange. End users can use these services using the iVeg frontend described at the end of the previous section, or using the REST API directly.

#### A. Data Services

The proposed architecture (Fig. 2) provides three sorts of data services. The first data service (1) deals with historical data. It allows users and services to request data stored in the database. Request parameters include *sensor id*, *station id*, *start date*, and *end date*. The rest of the parameters is available in Table I.

The second data service (2) allows to recover the last sensor data as a real-time measure. Request parameters are *sensor id* and *station id*. Services (1) and (2) have been developed using the Node.js framework and use JWTs. Tokens are sent in the request header. The system will check the validity and the expiration date of the tokens. Additional details of the services can be found in [21] and [22].

The third data service is an outdoor weather forecast service (3). This service is based on the REST API service provided by Weatherbit [23], which allows to obtain weather forecasts and historical data in different geographical locations. For this project, the free license option is used, that allows to request weather forecasts 48 h ahead with an hourly sampling period. Temperature, humidity, wind speed, and solar radiation forecasts are used by the proposed IoT platform. Request parameters are *latitude*, *longitude*, *language*, *key*, and *number of hours*, as shown in Table I. The service is useful for farmers since it helps them to make future decisions on the greenhouses according to weather estimations for the next 48 h. Moreover, it is an essential element for the GMaaS service, which is described in the following section.

#### B. Greenhouse Models as Service

This is a core service of the proposed IoT platform and can be considered as the main service contribution of this article (service number (4) in Fig. 2). As commented above, when a greenhouse is registered in the system, specific models for inside climate, crop production, and irrigation are implemented in the platform as particular services. These model-based services provide the user a DSS tool to obtain forecast about indoor climate conditions, crop production, or irrigation needs, among others. The models are implemented in *M* code using MATLAB and are embedded as services in the MATLAB production server environment. So, the models can be requested through a service obtaining a response in a JSON format [7]. The main advantages of this architecture are as follows.

- 1) Versatility by means of parametrized requests.
- 2) Specific software or implementation is not required to interact with the system.
- 3) Models are available as a cloud service.
- 4) Model coefficients can be updated in a straightforward way according to the user requirements.

The models can be requested for different purposes that are summarized in the following.

1) *GMaaS as Graphical DSS*: As discussed previously, users can access the system by using iVeg as a graphical front-end. In this case, users/farmers request this service through a Web-based application, which is responsible to make all requests to the system automatically. Once the model outputs are obtained, the information is visualized in a graphic form in the aforementioned application. This option is really powerful for farmers since they can use the proposed model-based services to make predictions and estimations about climate, production, and irrigation of their greenhouses to be used as DSS. In fact, when the models for climate and irrigation are requested, the system provides suggestions for the control system inputs, such as set-point temperature, irrigation volume, irrigation time, or irrigation nitrogen for the next 48 h.

2) *GMaaS for Research Purposes*: A second way to request the GMaaS is by directly using the REST API of the system. This option allows the user to invoke the model for simulation purposes or model predictions from any programming environment or software tool, in which it is very useful for research purposes. The user must provide the model inputs (control signals and disturbances) for a certain prediction/simulation horizon. Then, the model is run using these inputs and the model outputs are sent to the user in a JSON format (that the user should manage from any REST client).

This request is made by using the HTTP protocol and using the parameters and methods described in Table I for each model. Once the request reaches the models, the MATLAB production server performs the necessary calculations included in the models and a collection of data vectors with the simulation results are returned to the user in a JSON format. When the user requests to use the Weatherbit REST API, geographical information about the greenhouse location is required. Then, this query provides a 48-h prediction for the climate model inputs, and these data are parsed in a vector form and sent as a request to the REST API into the GMaaS option. Next, the model is simulated using these weather forecast data and the simulation results for the next two days are returned to the user in a JSON format. Therefore, short-term or long-term simulations can be done with this service for any of the available models.

#### IV. MODELS FOR THE GMAAS OPTION

As described above, the GMaaS option is the most relevant service of the proposed IoT-based platform. Thus, this section briefly describes the main features of the implemented models for greenhouse inside climate [12], crop production [16], and irrigation [17]. All these models can be requested as services, where the different service options available through the REST API are summarized in Table I.

##### A. Climate Model

The greenhouse climate model implemented in the platform is developed as a combination of individual models to estimate the inside climate conditions for temperature, global radiation, CO<sub>2</sub>, and relative humidity [12]. These models use external predictions to estimate the different variables as a complex process that depends on the particular characteristics

of these systems, with different climatic actuators, cover materials, structures, and crops, and the mass and energy balances produced among the different elements (cover, soil, internal and external air, and crops). The number of equations to be solved depends on the facilities installed and the exchange with the different components.

The temperature model is based on the energy balance produced between the inside air and the different elements that take part in the crop production processes in protected agriculture. The temperature general model is divided into seven differential equations for a greenhouse with ventilation, shadow net, and arothermal heating as those used for this article. This subsystem includes: the convective flux of the internal air with the plastic cover, shortwave radiation absorption, the convective flux with the soil surface, the latent heat effect from crop transpiration, the convective flux lost when the greenhouse is closed, heat fluxes of the different layers inside the soil, and the latent heat effect from the soil evaporation. Furthermore, depending on the systems installed, the general equation of the air temperature can include others such as: the heat lost by natural ventilation, the heat lost by infiltration losses, the heat fluxes with the pipe-based heating systems, the heat fluxes with the arothermal heating system, and the attenuation of the low wave radiation absorbed due to the shadow net (from the radiation model).

On the other hand, the air relative humidity model is based on the mass exchange (absolute humidity) among the different elements of the system. In this case, the general model is composed of only three differential equations: 1) water condensation on the plastic cover; 2) water released by crop transpiration; and 3) crop released by soil evaporation. For this model, only water losses by natural ventilation, water released by humidification, and water condensed by the dehumidification system has an influence on the relative humidity.

Moreover, CO<sub>2</sub> dynamic prediction is also included and depends on the carbon released by different methods of enrichment (pure CO<sub>2</sub> and different inputs combustion), soil degradation, and the crop respiration. CO<sub>2</sub> losses are due to photosynthesis consumption for biomass growth and by natural ventilation.

Finally, inside global radiation is estimated through the characteristics of the plastic cover and modifications of the plastic transmissibility with the shadow net or the whitening process.

Thus, the climate model is described by the following general differential equation:

$$\frac{dX_{cl}}{dt} = f_{cl}(X_{cl}, U_{cl}, D_{cl}, V_{cl}, C_{cl}, t) \quad (1)$$

where  $X_{cl} = X_{cl}(t)$  is a vector of greenhouse climate state variables (inside global and photosynthetically active radiation (PAR) radiation, air temperature, humidity, and CO<sub>2</sub> concentration),  $U_{cl} = U_{cl}(t)$  describes the control variables (natural vents, heating system, humidification, dehumidification, screens, and CO<sub>2</sub> enrichment),  $D_{cl} = D_{cl}(t)$  is a vector of disturbances (leaf area index (LAI) of the crop, soil surface temperature, outside radiation, air temperature, humidity and CO<sub>2</sub> concentration, rain, and wind speed and direction),  $V_{cl} = V_{cl}(t)$  represents the system variables related to physical



processes of the heat and mass balances (convective, conduction, thermal radiation, and latent heat),  $C_{cl}$  is a vector of system constants related to the climate processes,  $t$  is the time, and  $f_{cl} = f_{cl}(t)$  is a nonlinear set of functions based on mass and heat transfer balances. More details about the model can be found in [12].

### B. Production Model

Currently, the production model implemented in the IoT-based platform is based on tomato crop, although extensions to other crop models can be easily included. Therefore, the *Tomgro* crop model is the one available through the GMaaS system. The main state variables in this model are total dry weight, LAI, dry matter of fruits, dry matter of mature fruits, and the number of nodes. More information about the equations and the model can be found in [16] and [24].

The main features of this model are the following. The number of nodes is a function of the speed of nodes formation, which depends on the greenhouse temperature. The LAI calculation includes daily average temperature, empirical coefficients, and plant density. The total dry matter depends on the crop growth rate. The growth is mainly calculated as a function of the photosynthesis rate minus the crop respiration and modulated by a function of the dry matter distribution to the roots, which depends on the number of nodes. The photosynthesis rate calculation is based on the greenhouse temperature, PAR radiation, CO<sub>2</sub>, and LAI. On the other hand, the respiration term is obtained based on the greenhouse temperature and the total dry matter. The dry matter of fruits includes the phenomena of fruit allocation and transition from vegetative to reproductive growth stages. Moreover, it considers the effect of the average greenhouse temperature on the distribution between vegetative and reproductive growth.

Finally, the dry matter of mature fruits is based on the assumption that mature fruits are immediately harvested. So, it is calculated using a function on the temperature effect over the fruit ripening. This calculation is activated when a specific number of nodes is reached.

As a summary, the tomato crop growth model can be described by the following differential equation:

$$\frac{dX_{gr}}{dt} = f_{gr}(X_{gr}, U_{gr}, D_{gr}, V_{gr}, C_{gr}, t) \quad (2)$$

where  $X_{gr} = X_{gr}(t)$  is a vector of crop growth state variables (total dry weight, LAI, dry matter of fruits, dry matter of mature fruits, and the number of nodes),  $U_{gr} = U_{gr}(t)$  is the control variables of crop growth (air temperature, CO<sub>2</sub> concentration, and PAR radiation),  $D_{gr} = D_{gr}(t)$  is the vector of disturbances (cultural labors, electrical conductivity, diseases, and air humidity),  $V_{gr} = V_{gr}(t)$  represents the system variables related with physiological processes (photosynthesis and respiration),  $C_{gr}$  is a vector of constants,  $t$  is the time, and  $f_{gr} = f_{gr}(t)$  is a nonlinear set of functions based on the basic physiological processes of the plants. More details about the model can be found in [12] and [16].

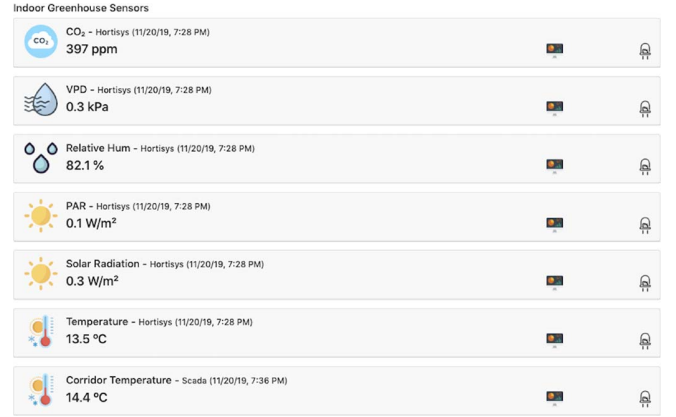


Fig. 3. Example of service current value using the iVeg application.

### C. Irrigation Model

The fertigation model uses the temperature, humidity, and growth predictions from the rest of the models in the GMaaS to estimate the crop irrigation and nitrogen necessities [17]. The system allows estimating the daily needs of nitrogen as a nutrient of the plant and the water needs for the nutrient solution applied through fertigation and drip irrigation in greenhouse crops. The solution can be used in soil or substrate crops. The nitrogen necessities are estimated from the crop nitrogen extraction, nitrogen introduced by irrigation, the mineral present in the soil at the beginning of the season, and the mineralized nitrogen from manure and organic matter from the soil. Irrigation needs are calculated from crop evapotranspiration using the LAI from the crop growth model and the inside climate model available as described above. Thus, the main differential equation for the irrigation model can be expressed as follows:

$$\frac{dX_{ir}}{dt} = f_{ir}(X_{ir}, U_{ir}, D_{ir}, V_{ir}, C_{ir}, t) \quad (3)$$

where  $X_{ir} = X_{ir}(t)$  is a double state variable vector (crop evapotranspiration and nitrogen extraction),  $U_{ir} = U_{ir}(t)$  is the vector of control variables (irrigation duration and crop nitrogen necessities),  $D_{ir} = D_{ir}(t)$  is the vector of disturbances composed by the inside climate variables (air temperature, humidity, and PAR radiation), crop state (total dry matter and LAI), and cultural labors (manure),  $V_{ir} = V_{ir}(t)$  are system variables related with physical, chemical, and physiological processes (nitrogen available in soil, nitrogen demand, and sensible and latent heat),  $C_{ir}$  is a vector of constants,  $t$  is the time, and  $f_{ir} = f_{ir}(t)$  is a nonlinear function based on water and nitrogen balances on the soil–plant atmosphere. More details about the model can be found in [17].

## V. EXAMPLES OF THE PROPOSED SERVICES

This section shows several examples of different IoT-based services, especially for the GMaaS option. The Web-based application iVeg, described in Section II, is used to show the main capabilities of the system. Services are available and integrated into the application as icons at the top, as shown in Figs. 3–6. Examples are shown in the following sections.

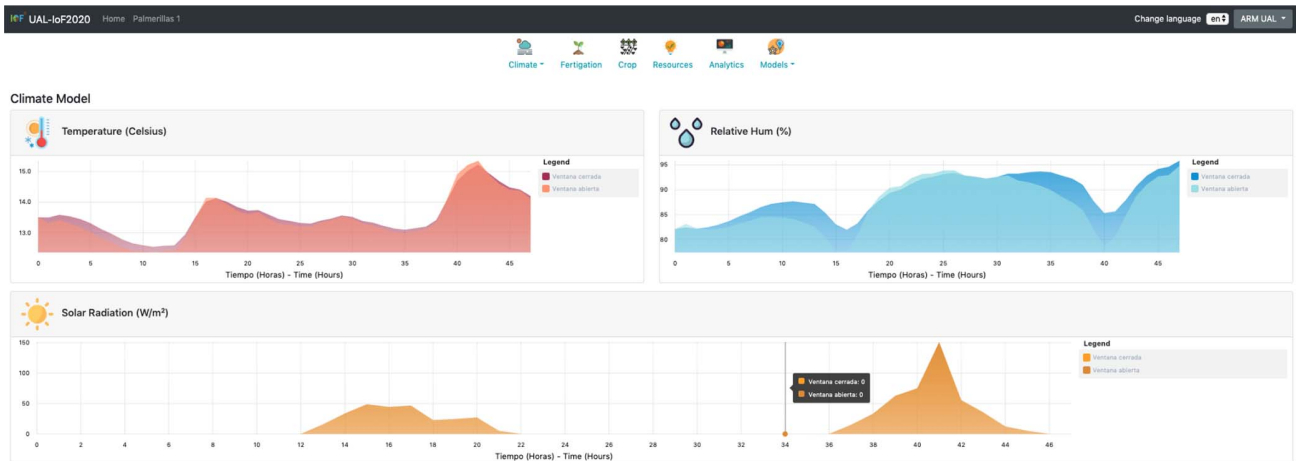


Fig. 4. Example of the climate service using the iVeg application.

### A. Register New IoT Station

This section describes how a new IoT station can be registered in the system. A short code description of the request body is shown in the following.

```

{
  "id": "Station_greenhouse2",
  "type": "Station_x",
  "Temperature": {
    "type": "float",
    "value": "24",
    "metadata": {
      "id": {
        "type": "String",
        "value": "id_1"
      },
      "timestamp": {
        "type": "Date",
        "value": "06/11/2019
                    21:44:20"
      }
    }
  },
  "Humidity": {
    ...
  }
}
    
```

For such a purpose, the service “register new IoT station” (see Table I) must be called. A POST request is sent using the variables described in the table. The NGSI structure defined by FIWARE in OCB must be used. In addition, different types of attributes, such as sensor name, manufacturer and model, location, sensor type, and so on, maybe added as metadata.

### B. Historical Data and Current System Values

When using the historical data service, the user selects several sensors from a list and a range of dates to consult. The answer is visualized in a single graph combined with the values of the selected greenhouse sensors. On the other hand, the services for the current values of each sensor are represented in the application in the form of a card with the real-time values of the system. An example is shown in Fig. 3.

The detailed information for the request of these services was described in Section II-A and is accessible by using the second/third option in Table I, respectively.

### C. GMaaS Examples

This section is devoted to show how the different greenhouse models are requested and how the obtained information is visualized.

1) *Climate Model*: This section describes the use of the internal climate model of the greenhouse described in Section III, which is one of the services available through the GMaaS option. In this case, the GMaaS has a REST API service that allows the user to know the future climatic conditions inside the greenhouse at 48 h in an hourly range of 1 h. The main state variables (see Table I) in this model are the current sensor values and future variable values. This request makes use of the services detailed above: current system values and weather forecasts. These types of variables are included in the array of arrays as shown in Table I. The first array includes five arrays with each of the parameters necessary for the model operation (see Table I). The parameters of the first position in the array are the inside greenhouse variables that are obtained using the current system values services, such as indoor temperature, indoor humidity, soil temperature, and LAI. The rest of the arrays are formed by 48 future values that are obtained by using the weather forecast service: outside temperature, outside wind speed, outside radiation, and humidity. Once the request has been sent to the GMaaS service, two different simulations are carried out 48 h ahead, one considering the ventilation totally open and the other one with the ventilation totally closed. These calculations allow to know the internal conditions of the greenhouse climate according to the weather forecast and for the two extreme cases of the actuator states. Then, the system returns the response to the user in the JSON format structured in seven arrays with the following information: time in hours, open ventilation temperature, open ventilation humidity, closed ventilation temperature, closed ventilation humidity, and inside radiation.

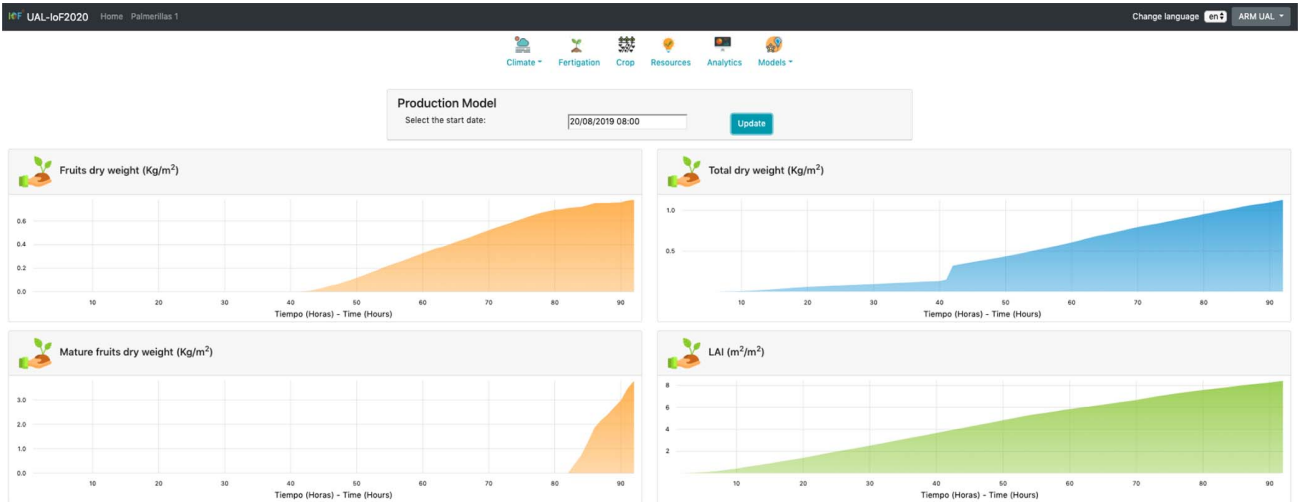


Fig. 5. Example of the production service using the iVeg application.

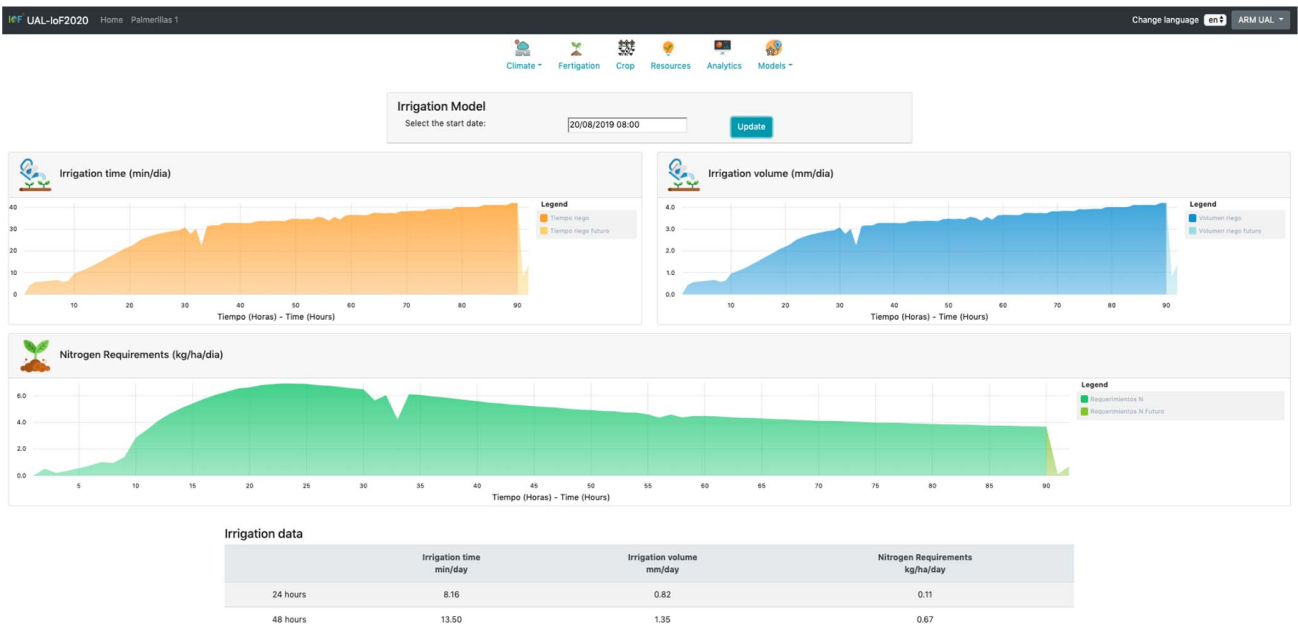


Fig. 6. Example of the irrigation service using the iVeg application.

When the request is done using iVeg, the user does not need to perform any operation since the application is responsible for recovering all the necessary information from the database and calling each of the necessary services. The resulting answer is drawn in three graphs combining the closed and open ventilation values with temperature, humidity, and radiation. Fig. 4 shows an example of this service, where the bands for minimum and maximum apertures in ventilation can be observed for the two simulated days. Notice that this information is really useful to help the farmers in the day-to-day climate control decisions, especially to provide advice about the control system set points.

2) *Production Model*: This model as a service allows the user to know the production of the greenhouse from the beginning of the campaign until the moment the service is

requested. The GMaaS-encapsulated production model has a REST API service invoked through the HTTP protocol. The input variables required to run this service are represented in Table I. This model is fed from the services and models described above for the data history information and current sensor values. The response of this model returns five variables in a JSON format to the user: 1) time; 2) fruits dry weight; 3) total dry weight; 4) mature fruits dry weight; and 5) LAI.

When the Web application is used, the user accesses the model's tab and selects the *Production Model* option. Then, only the start date of the campaign must be selected, and the platform is in charge of recovering all sensor information and the end date. The answer is visualized in the form of four graphs with the values of fruits dry weight, total dry weight, mature fruits dry weight, and LAI (see Fig. 5 for an example).

3) *Irrigation Model*: This section shows how the indoor greenhouse irrigation model works, which is one of the services available through the GMaaS system. It allows the user to know the future water needs inside the greenhouse, recommending irrigation instructions for the next 48 h. The model is called by using the input data shown in Table I. The main state variables needed in this model are id sensor, id station, campaign start date, current date, latitude, and longitude. This service makes use of all the services already described and as a result, the model provides estimations and suggestions in the JSON format for irrigation time, irrigation volume, and nitrogen requirements since the beginning of the campaign to 48 h from the consultation time. This service can be used in the Web application through the model tab by choosing the *Irrigation Model* option. Then, the campaign start date is selected, and in this way, the system responds to the request by drawing three graphs with the information about irrigation time, the volume of irrigation, and nitrogen requirements. Moreover, a table with future irrigation instructions at 24 and 48 h is generated. Fig. 6 shows an example where all this information is shown.

## VI. CONCLUSION

A cloud-based solution to provide services for the greenhouse crop production problem has been presented in this article. The services available in the proposed IoT-based system are historical data, current values, weather forecasts, climate model, tomato production model, and irrigation model; which are available through the resulting REST API service. This API allows the versatility to access the services through two modalities: the iVeg Web-based application developed under the framework of the IoF2020 project (use case 4.2 vegetables) or by directly using the REST API. Notice that this last option is really useful for research purposes since any user can request data or models from any REST client. Therefore, the data and model-based services can be used for simulation/study purposes or for industrial purposes as a DSS by farmers/companies.

## REFERENCES

- [1] J. Liu and J. P. Tao, "Research and application of agricultural greenhouse intelligence platform based on IoT (Internet of Things) and cloud computing," *Int. J. Simulat. Syst. Sci. Technol.*, vol. 17, no. 5, pp. 1–5, 2016.
- [2] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Gener. Comput. Syst.*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, Sep. 2013.
- [3] O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikumhi, C. Y. Leow, and M. N. Hindia, "An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 5, pp. 3758–3773, Oct. 2018.
- [4] A. Kamilaris, A. Kartakoullis, and F. X. Prenafeta-Boldú, "A review on the practice of big data analysis in agriculture," *Comput. Electron. Agricult.*, vol. 143, pp. 23–37, Dec. 2017.
- [5] R. Shamshiri *et al.*, "Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture," *Int. J. Agricult. Biol. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–22, Jan. 2018.
- [6] A. Kamilaris and F. X. Prenafeta-Boldú, "Deep learning in agriculture: A survey," *Comput. Electron. Agricult.*, vol. 147, pp. 70–90, Apr. 2018.
- [7] Y. Duan, G. Fu, N. Zhou, X. Sun, N. C. Narendra, and B. Hu, "Everything as a service (XaaS) on the cloud: Origins, current and future trends," in *Proc. IEEE 8th Int. Conf. Cloud Comput.*, Noida, India, 2015, pp. 621–628.
- [8] R. Rupnik, M. Kukar, P. Vračar, D. Košir, D. Pevec, and Z. Bosnić, "AgroDSS: A decision support system for agriculture and farming," *Comput. Electron. Agricult.*, vol. 161, pp. 260–271, Jun. 2019.
- [9] A. Kaloxylas *et al.*, "A cloud-based farm management system: Architecture and implementation," *Comput. Electron. Agricult.*, vol. 100, pp. 168–179, Jan. 2014.
- [10] R. S. Alonso, I. Sittón-Candanedo, Ó. García, J. Prieto, and S. Rodríguez-González, "An intelligent edge-IoT platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario," *Ad Hoc Netw.*, vol. 98, Mar. 2020, Art. no. 102047.
- [11] N. Ahmed, D. De, and I. Hussain, "Internet of Things (IoT) for smart precision agriculture and farming in rural areas," *IEEE Internet Things J.*, vol. 5, no. 6, pp. 4890–4899, Dec. 2018.
- [12] F. Rodríguez, M. Berenguel, J. L. Guzmán, and A. Ramírez-Arias, *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth*. Cham, Switzerland: Springer, 2015.
- [13] M. M. Rodríguez, J. L. Guzmán, J. A. Sánchez-Molina, F. Rodríguez, and M. Torres, "Greenhouse models as a service (GMaaS) for simulation and control," in *Proc. 6th IFAC Conf. Sens. Control Autom. Technol. Agricult.*, Dec. 2019, pp. 190–195.
- [14] *MATLAB User Guide*, MathWorks, Inc., Natick, MA, USA, 2019. [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/help/>
- [15] J. A. Sánchez-Molina, M. Li, F. Rodríguez, J. L. Guzmán, H. Wang, and X. T. Yang, "Development and test verification of air temperature model for Chinese solar and Spanish Almeria-type greenhouses," *Int. J. Agricult. Biol. Eng.*, vol. 10, no. 4, pp. 66–76, 2017.
- [16] J. A. Sánchez-Molina, F. Rodríguez, J. L. Guzmán, and J. A. Ramírez-Arias, "Water content virtual sensor for tomatoes in coconut coir substrate for irrigation control design," *Agricult. Water Manag.*, vol. 151, pp. 114–125, Mar. 2015.
- [17] M. Gallardo, F. Arrabal, F. M. Padilla, M. Peña-Fleitas, and R. B. Thompson, "VEG SYST-DSS software to calculate n and irrigation requirements for seven vegetable species grown with fertigation in greenhouses in Se Spain," *Acta Horticulturae*, vol. 1182, pp. 65–72, Nov. 2017.
- [18] M. A. Rodriguez, L. Cuenca, and A. Ortiz, "Fiware open source standard platform in smart farming—A review," in *Proc. IFIP Adv. Inf. Commun. Technol.*, vol. 534, 2018, pp. 581–589. [Online]. Available: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-99127-6\\_50](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-99127-6_50)
- [19] OMA SpecWorks. *Home—OMA SpecWorks*. Accessed: Dec. 2019. [Online]. Available: <https://www.omaspecworks.org/>
- [20] D. Ferreira, P. Corista, J. Gao, S. Ghimire, J. Sarraipa, and R. Jardim-Goncalves, "Towards smart agriculture using FIWARE enablers," in *Proc. IEEE Int. Conf. Eng. Technol. Innov. Eng. Technol. Innov. Manag. Beyond New Approaches (ICE/ITMC)*, Jun. 2018, pp. 1544–1551. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8280066/>
- [21] M. M. Rodríguez, J. A. Sánchez-Molina, M. Torres, and M. Berenguel, "IoT-based APP architecture for greenhouse management," in *Proc. EFITA-HAICTA-WCCA Congr.*, Rodas, Greece, 2019, pp. 101–105.
- [22] F. Rodríguez, M. Berenguel, J. Sánchez-Molina, and M. M. Rodríguez, "Farms, fogs and clouds: Data open-architecture for optimal crop growth control for IoF2020 project," in *Proc. Eur. Conf. Agricult. Eng.*, Wageningen, The Netherlands, Jul. 2018, pp. 101–106.
- [23] OpenWeatherMap, Inc. (2019). *OpenWeather API Guide*. [Online]. Available: <https://openweathermap.co.uk>
- [24] J. Jones, A. Kening, and C. Vallejos, "Reduced state-variable tomato growth model," *Trans. ASAE*, vol. 42, no. 1, pp. 255–265, 1999.



**M. Muñoz** received the computer science degree from the University of Almería, Almería, Spain, in 2016.

He is a Researcher with the University of Almería, where he graduated as a Technical Engineer of computer systems, as well as a Computer Engineer, and where he is currently writing his Ph.D. thesis "New Paradigms for the Integration of IoT Systems in Protected Agriculture." He has been developing his research work as a member of the Group of Automatic Control, Robotics and Mechatronics (TEP-197) since 2017, specializing in IOT (Internet of Objects), big data, robotics, data acquisition systems, cloud systems, and backend and frontend development. So far, he has six publications in international and national conferences, having been awarded for the publication "IOT Applied to Traceability and Decision-Making for Tomato Cultivation in Greenhouses." He is currently participating in a European Project for the digitalization of agriculture "IoF2020."



**J. L. Guzmán** received the computer science engineering degree and the European Ph.D. degree (Extraordinary Doctorate Award) from the University of Almería, Almería, Spain, in 2002 and 2006, respectively.

He is a Full Professor of automatic control and systems engineering with the University of Almería. His research interests focus on the fields of control education, model-predictive control techniques, PID control, and robust control, with applications to agricultural processes, solar plants, and biotechnology.

Prof. Guzmán has been a member of the Spanish Association in Automatic Control CEA-IFAC since 2003, the IEEE Control System Society since 2006, and the IFAC Technical Committee on Control Education and the IEEE Technical Committee on System Identification.



**F. Rodríguez** received the M.Sc. degree in telecommunication engineering from the Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain, in 1991, and the Ph.D. degree from the University of Almería, Almería, Spain, in 2002.

He is currently a Full Professor of systems engineering and automatic control with the University of Almería, where he is also a Researcher and a Member of the Automatic Control, Mechatronics and Robotics Research Group. He has participated in several Spanish and European research projects, and

research and development tasks with many companies. His current research interests include the application of modeling, automatic control, and robotics techniques to dynamic systems and education, concretely energy management and agriculture.

Prof. Rodríguez has been a member of the IFAC Technical Committee TC 8.1, Control in Agriculture, since 2005.



**M. Torres** received the computer science engineering degree from the University of Granada, Granada, Spain, in 1994, and the Ph.D. degree from the University of Almería, Almería, Spain, in 2002.

He is currently an Associate Professor with the Informatics Department, University of Almería. His research interests are focused on the fields of databases and cloud computing.



**J. A. Sánchez-Molina** received the master's degree in industrial computer science, in 2009, the master's degree in industrial and agri-food biotechnology, in 2013, and the Ph.D. degree in computer science (Extraordinary Doctorate Award) in 2015.

He is an Associate Professor of systems engineering and automatic control with the Informatics Department, University of Almería, Almería, Spain, working with the Group of Automatic Control, Robotics, and Mechatronics since 2005. His work focuses on the climate, crop growth and irrigation

modeling and control in greenhouses, IoT and big data applications in agriculture and renewable energies, and mobile and grasping robotics. He is currently supervising two Ph.D. thesis. He is enrolled in the Focus Group of Digitalization and Big Data in the agri-food, forestry, and rural areas of the Spanish Minister of Agriculture, Spanish Society of Agroengineering, the International Society for Horticultural Science, and the Spanish Association in Automatic Control.



**M. Berenguel** (Senior Member, IEEE) received the industrial engineering and the Ph.D. (Extraordinary Doctorate Award) degrees from the University of Seville, Seville, Spain, in 1992 and 1996, respectively.

He is a Full Professor of automatic control and systems engineering and the Head of the Research Group Automatic Control, Robotics and Mechatronics (arm.ual.es) with the University of Almería, Almería, Spain. In 2019, he became an Honorary Visiting Professor with the University of

Brescia, Brescia, Italy. His research interests include control education, predictive and hierarchical control, and IoT, with applications to solar energy systems, agriculture, and biotechnology.

Prof. Berenguel is the Technology Chair of Vegetables Trial in Internet of Food and Farm IoF2020 EU Project and also participates in SmartAgriHubs.

## 2.2 Plataforma IoT para la gestión de datos en una planta de cultivo de microalgas a escala industrial

El trabajo de investigación de esta tesis se sustenta en las publicaciones que se relacionan a continuación, en las que se ha resaltado en negrita el nombre del doctorando y autor de esta tesis (véase la tabla 2.2).

Tabla 2.2. Información de la contribución 2

<b>Título</b>	An IoT Platform for Data Management in an Industrial-Scale Microalgae Cultivation Plant		
<b>Autores</b>	<b>M. Muñoz</b> , J. L. Guzmán, M. Torres, F. G. Acién		
<b>Revista</b>	IEEE Access		
<b>Año</b>	2022		
<b>Volumen</b>	10		
<b>Páginas</b>	127128 – 127139		
<b>DOI</b>	<a href="https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3226334">https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3226334</a>		
<b>FI (JCR 2021)</b>	3.476		
<b>Categorías</b>	Telecomunicaciones	(43/93)	<b>Q2</b>
	Informática, sistema de información	(79/164)	Q2
	Ingeniería, eléctrica y electrónica	(105/276)	Q2

### Contribución del doctorando

El candidato al doctorado, M. Muñoz, es el primer autor de este trabajo.

Hasta la fecha (30/01/2023), el artículo ha tenido 75 visitas, incluidas la descarga del archivo y las visitas a la web. Cabe destacar que el artículo fue publicado el 1 de diciembre de 2022 y, en un corto periodo de tiempo, ha obtenido un elevado número de visitas.

Aparte de la contribución mencionada anteriormente, este trabajo también dio como resultado una contribución en un congreso internacional:

- **M. Muñoz Rodríguez**, J. L. Guzmán, M. Torres, J. A. Sánchez-Molina, y F. Acién, «Arquitectura cloud y tratamiento de datos en un sistema de producción basado en las microalgas,» en *III Simposio Ibérico de Ingeniería Hortícola*, Cartagena, España, 2018. Referencia: [195].



Received 9 November 2022, accepted 27 November 2022, date of publication 1 December 2022,  
date of current version 8 December 2022.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2022.3226334

## RESEARCH ARTICLE

# An IoT Platform for Data Management in an Industrial-Scale Microalgae Cultivation Plant

M. MUÑOZ<sup>1</sup>, J. L. GUZMÁN<sup>1</sup>, M. TORRES<sup>1</sup>, AND F. G. ACIÉN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CIESOL-ceiA3, Department of Computer Science, University of Almería, 04120 Almería, Spain

<sup>2</sup>CIESOL-ceiA3, Department of Chemical Engineering, University of Almería, 04120 Almería, Spain

Corresponding author: J. L. Guzmán (joseluis.guzman@ual.es)


This work was supported in part by the Spanish Ministry of Science under Grant PID2020-112709RB-C21, and in part by the Horizon Europe—the Framework Program for Research and Innovation (2021–2027) under Grant 101060991 REALM.

**ABSTRACT** Microalgae biomass production technology is in continuous progress. One of the challenges deals with scaling up existing medium-scale facilities to industrial-scale production systems. This new expanding infrastructure requires adequate data management and data accessibility tools for all the process variables. In this sense, this work presents a novel solution for microalgae production systems based on Internet of Things (IoT) technology as an important ally in the digitalization of these industrial processes. The paper summarizes the development of an IoT-based platform for data management in a large-scale microalgae cultivation plant with more than 12 industrial photobioreactors. A cloud-based architecture is provided for a solution for data management and a graphical front-end for data access (real-time and historical data). Different profiles can be managed for technicians and researchers depending on their skills and needs.

**INDEX TERMS** Cloud, data management, IoT, microalgae, photobioreactor.

## I. INTRODUCTION

IN last years, the biomass production from microalgae cultivation has been in continuous expansion. Many benefits and products can be obtained from this crop, such as food manufacturing with a high nutritional value for humans [1], [2], or animal feed manufacturing [3], [4]. Microalgae cultivation and biomass generation is opening the doors to researchers and companies to new research and business topics, such as energy generation using biofuels [5], [6], the use of pigments used for cosmetics in pharmaceutical industry and biomedicine [7], [8], or fertilizer manufacturing for agricultural industry [9], [10]. Besides, during the growth of microalgae cultivation, carbon dioxide is absorbed, which contributes to the reduction of the carbon footprint, and also allows the filtration and purification of wastewater [11], [12]. This issue is very interesting and in continuous evolution given the current problems related with climate change and the scarcity of resources around the world.

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Yiqi Liu .

However, despite these advantages, the sector is not very technologically advanced, which entails a challenge in the improvement of microalgae production. Due to distribution and production complexity, legacy traditional systems are based on Machine to Machine (M2M) wired sensors and spreadsheets, making harder to obtain the optimal monitoring needs of real plants. For optimal microalgae growth, it is necessary to control a set of variables such as temperature, pH, and dissolved oxygen [13], [14], [15], and thus, robust and accurate monitoring and database systems are required for that purpose.

Therefore, the use of emerging technologies such as cloud computing [16], [17], fog computing [18], [19], Mobile-Edge Computing [20], big data [21], [22] and especially the IoT [23] can contribute to improve technology of this sector [24]. In existing proposals, examples about the application of these technologies to other sectors can be found, such as in greenhouse crop production systems [25], [26], water resources management [27], [28], the environmental impact in the production of vehicles [29], [30], monitor the generation of food waste and the use of energy and water in the food sector [31], [32] or intelligent healthcare [33], [34]. Another

works are focused on monitoring and data management processes, ranging from deep learning-assisted intelligent process planning to real-time production logistics based on the Internet of Things [35], [36], [37]. These works highlight the need for network connectivity for all plant floor devices, how real-time monitoring and process planning facilitate continuous monitoring, how smart sensors aid production planning and scheduling, and how autonomous data collection and integrated patterns can decrease procrastination in decision-making and the implementation of sustainable wireless Industry 4.0. Another example can be found in the security field, with the Trust2Vec [38] system. It is a system which proposes a Transport Management System (TMS) for large-scale IoT systems, which is able to manage trust relationships in IoT systems and can mitigate trust attacks that are performed by hundreds of malicious devices.

In those works, IoT and cloud computing solutions are developed for data integration and optimization of the industrial sector. However, in this context, only a few works related with microalgae production are available. The study presented by [39] makes a survey describing the state-of-the-art of IoT technologies and their advances in microalgae cultivation. Conclusions of this study are focused on the benefits it brings to the sector, such as: a more ecological, intelligent, automatic and low-cost technical method to achieve the corresponding production purposes. In [40], the construction of a photobioreactor in a simulator and the application of IoT with low-cost Arduino-based sensors are presented. A survey is presented in [41], which aims to evaluate each phase of IoT and machine learning implementation in microalgae smart farming given the limited studies of IoT use in this sector. However, no relevant research has been found on the application of IoT solutions and cloud-based architectures to large-scale microalgae production systems, as it is the case of the solution proposed in this work.

In the problem presented in this paper, a number of challenges arise, such as the interconnection of sensors and actuators, data processing, the development of an IoT platform in the cloud that allows the scalability of sensors and the integration of heterogeneous data from other commercial services, or the use of REST services in an easy way. Moreover, a standard data model is needed to publish the data in open access for researchers and companies, as well as the support for different communication protocols.

Then, the main objective of this work is to contribute to the digitalization of the industrial sector by developing a cloud-based IoT solution for monitoring and data management of a microalgae-based production plant. This solution tries to improve the accessibility to the data generated by the system through the services available in the platform described in this work. The following are the key points of the contribution:

- A cloud architecture has been developed (divided on layers based on the functionality of each service), a standard data model based on FIWARE [42] has been used that allows the integration of new sensors and actuators in a simple way, and a standard communication protocol

based on OPC UA integrated. Real-time weather forecasts are also provided. In addition, real-time and historical data is available for each photobioreactor in the system.

- Services are exposed to users through a REST API allowing companies and researchers to get any kind of data generated on the system and develop customized dashboards through different web interfaces. It is important to highlight that the proposed platform offers a default web graphical user interface based on the REST API.
- The IoT platform and cloud architecture developed in this work has been tested in a real biomass production plant located in Almería called SABANA.

Notice that most of the current agro-industrial production systems do not have smart sensors capable of sending data to the cloud. Typically, traditional wired sensors are used, introducing a cost of plant transformation to use IoT. For this reason, this proposal allows the integration of both IoT smart sensors and traditional wired sensors, making easier any plant can be integrated to the proposed system architecture. It is important to remark that the current proposal of this work is focused on the integration of heterogeneous data from different sources, not on the comparison and production performance with traditional microalgae cultivation systems.

This paper is organized as follows. Section 2 details the relevance of FIWARE and the SABANA plant used for the development of the work. The proposed architecture is introduced in Section 3. Section 4 describes the services available within the cloud-based architecture. Section 5 shows examples of how services work either in graphical or in JSON format. Finally, section 6 discusses the conclusions.

## II. MATERIALS AND METHODS

This section presents the FIWARE platform and the facilities where this work has been developed.

### A. FIWARE

The European Union is promoting the use of IoT platforms that can help to improve efficiency and sustainability. In this context, FIWARE [42] is an open source framework funded through a European PPP (Public Private Partnership) project in which the public and private sectors collaborate to create the Internet of the future. FIWARE is based on a modular architecture, which is supported by a set of GEs (Generic Enablers) that provide a series of functionalities and standards that make easier the development of smart applications. FIWARE components may be integrated with other components developed by third parties, thus allowing to accelerate the use of smart solutions. These GEs makes easier to interface with IoT systems, context data, API management, as well as information processing and analysis. The core of FIWARE is the GE known as Orion Context Broker (OCB), which deals with managing all the context information produced by the system. In FIWARE, the term context is the name given to all



the information about an ecosystem. Context is about entities and their attributes and can be found in sensor networks, third party applications, public data sources, actuators, and so on. Below, the most relevant GEs in the FIWARE ecosystem are introduced:

- OCB (Orion Context Broker): It is the core and a required component to be used on any FIWARE based solution. It deals with the management of context information generated by the system in a decentralized and scalable way. A special feature of OCB to be considered is that historical data is not stored. Such a functionality is carried out by other enablers.
- Cygnus: This component deals with the storage of historic data.
- STH Comet: This GE stores historic data in short periods of time, usually in months.
- IoT Agents: This component plays a key role translating the context information into the FIWARE NGSI standard [43]. It is an element that lies between the information generator layer and OCB. It allows the following protocols: LWM2M over CoaP, JSON or UltraLight over HTTP / MQTT or OPC UA. In addition, it offers the possibility of designing your own agent, thus adapting it to the needs of each user.
- Cosmos: This GE allows to process a large volume of data by integrating with current Big data platforms.
- Wilma: It acts as a security layer offering proxy functionality based on OAuth2 schemes.
- Perseus: This GE allows to generate a series of alarms, making subscriptions to the OCB entities notifying changes using SMS, Email, or HTTP notifications.

## B. SABANA FACILITIES

This subsection describes the facilities related to the “Sustainable Algae Biorefinery for Agriculture and Aquaculture” (SABANA) project and the processes carried out in the plant, as well as the main elements involved in these processes. The SABANA project has been developed within the framework of the research and innovation program of the European Union “Horizon 2020” and under the “Blue Growth” call, which aims to recognize the importance of the seas and oceans to boost the European economy for its great potential for innovation and growth [44]. This project is led by the University of Almeria (UAL) within the Marine Microalgae Biotechnology Group (BIO-173). The Automation, Robotics and Mechatronics Group (TEP-197) is collaborating in the automation and data integration tasks. This project aims to produce biostimulants, biopesticides, feed additives and biofertilizers, mainly using seawater and nutrients from wastewater in a microalgae biorefinery plant. Another objective is to create an online data center available to different research groups to get access to the data generated on the plant for research purposes (such as validation of techniques, modelling and simulation, and so on). Thus, after the development of this project, current facilities are known

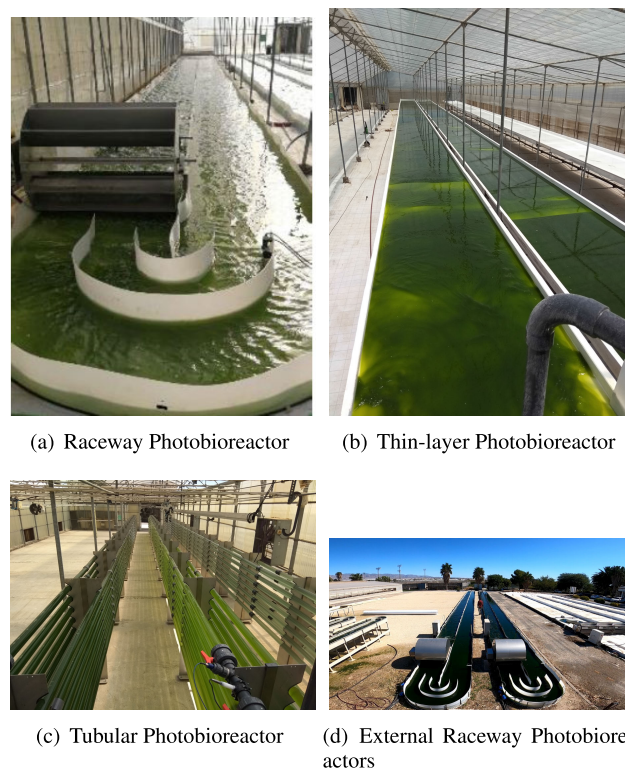


FIGURE 1. SABANA Facilities.

under the name of SABANA, and this is also the name used through this manuscript to make reference to the platform and data services presented in this work.

The facility used in this project is located in the agricultural research and training center IFAPA (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera Andaluz) located in La Cañada, Almería, Spain. It has approximately 5000 m<sup>2</sup> where the microalgae cultivation, nutrient storage and water supply services are located.

A SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) system is available to monitor and control the plant. The plant consists of 13 photobioreactors distributed in two greenhouses and a plot. Photobioreactors are the place where the cultivation of microalgae process is carried out. They allow the control of parameters related with the microalgae growth. Depending on the cultivation stage, different kinds of photobioreactors are used (see Figures 1(a), 1(b), 1(c), and 1(d)). For the cultivation of microalgae a control process manages the pH, dissolved oxygen and temperature levels of the medium. So, sensors are required to measure them in each photobioreactor [13], [45]. The control of the above parameters is performed by injecting air and carbon dioxide through all-or-none valves. In addition, a forced flow during cultivation by means of pumps and agitators with impellers is carried out, whose movements are controlled by frequency converters. The control loops of the sprinkler system and forced flow system will take into account the atmospheric conditions that have a significant effect on the growth of the crop. So, there is also a weather station available to obtain data on solar radiation, outside temperature, outside humidity, wind direction and wind speed [46].

The SCADA software includes an OPC UA client [47]. The system communicates with the data acquisition cards installed in the plant via Modbus TCP/IP protocol. In addition, this system is remotely supervised by a group of technicians through a customizable dashboard.

### III. CLOUD ARCHITECTURE

This section describes the architecture proposed in the work. This architecture tries to solve the problems of interoperability between devices, services for data extraction, and to provide a correct management of the life cycle of a plant for microalgae cultivation. Figure 2 shows the different layers of the proposed architecture: Perception layer, Storage and Data Processing layer, and Services and Applications layer. In addition to the different functionalities available to the user, layered architecture makes easier integration issues and system scalability when new photobioreactors and sensors are added.

The proposed architecture consists of a set of services and microservices depending on their functionality. Each of them is deployed as an independent Docker container. This allows to have an extra layer of security, since each service is isolated and segregated in an independent container. The advantage of having the services divided into containers is to have modularity in each of them, what allows the development of new functionalities reducing complexity, providing scalability, and without affecting the global functionality of the whole application. In addition, this solution contributes to the increase and distribution of replicas in case of an increasing demand of services. In this work, it was decided to have horizontal scalability based on Docker microservices. Therefore, each component can be scaled according to the bottleneck that arises, being this the key to scaling SABANA Data Services up. In the subsequent sections, the different architecture layers are described.

#### A. PERCEPTION LAYER

Located at the bottom of Figure 2, it is the sensory layer of the IoT where “things” identify their environment, collect data from the physical world and interact with it. In this layer, the context information corresponding to FIWARE is generated. This term refers to all the data generated by the sensors and actuators in the environment and surrounding the IoT system ecosystem.

Sensors and actuators are scattered throughout the plant. Some of these sensors are located inside the photobioreactors allowing a correct supervision and control of the plant. There are approximately 60 variables between sensors and actuators to monitor in the plant and an external weather station. In Figure 2, the different elements in this layer can be observed: photobioreactors, sensors, actuators, PLCs and data acquisition cards, and local SCADA systems:

- Sensors and actuators: Photobioreactors are equipped with sensors and actuators to allow monitoring the state of the crop. Sensor data such as temperature, dissolved

oxygen and pH are controlled for each of the photobioreactors. In addition, other sensors and actuators, such as paddle wheel, medium pumps, injection pumps, harvesting pumps, solenoid valves, CO<sub>2</sub> injected flow rate, air flow rate, medium inlet flow rate, medium outlet flow rate and frequency variators are also present. Moreover, there is a weather station located outside the plant that allows monitoring parameters such as temperature, global radiation, PAR radiation, relative humidity, rain detector, wind speed and direction. These sensors and actuators are connected to LabJack UE9 data acquisition cards. Labjack UE9 devices are remote units that allow communication between the different devices installed in the plant. It is a device designed to work in industrial environments due to its robust construction. It also allows communication based on the open Modbus TCP/IP protocol. These sensors and actuators are connected through this protocol to a computer located in the facilities. Finally, the plant also includes smart sensors, which communicate directly with the upper layer without using acquisition cards.

- SCADA System: The plant is controlled by an Azeotech DAQFactory industrial SCADA system. This SCADA acts as an OPC UA client, which allows a wide connection with a large amount of devices that support this standard. This system may provide to the technical user with real time information, alarm systems when variables are out of range, and control operations on the photobioreactors.

The Perception layer allows to scale up the number of photobioreactors and systems horizontally. That is, it allows to add as many photobioreactors or sensors as needed. Another advantage of using this architecture is the proximity to the devices where data is generated, access to local devices, reduced latency, improved speed when acquiring information from other devices and bandwidth savings.

#### B. STORAGE AND DATA PROCESSING LAYER

Layer 1, located in the middle area of the architecture (see Figure 2) deals with processing data generated in Layer 0 (Perception layer). In this layer, the tasks are related with the processes of Data extraction, Transformation/filtering and Load (ETL) processes, FIWARE components, protocol language translators, OPC UA server and the different databases:

- Orion Context Broker: This FIWARE GE is the core of the architecture. It is in charge of managing data generated by sensors in Layer 0 or Perception Layer. OCB uses the OMA NGSI standard [48]. The NGSI data model consists of entities, attributes and metadata. In our project, entities are photobioreactors, the weather station and some actuator assemblies such as injection pumps, medium pumps, irrigation headwater or wheel blades among others. Table 1 shows entities created in OCB. In addition, OCB also manages sensor and actuator attributes as data type, its value and metadata.

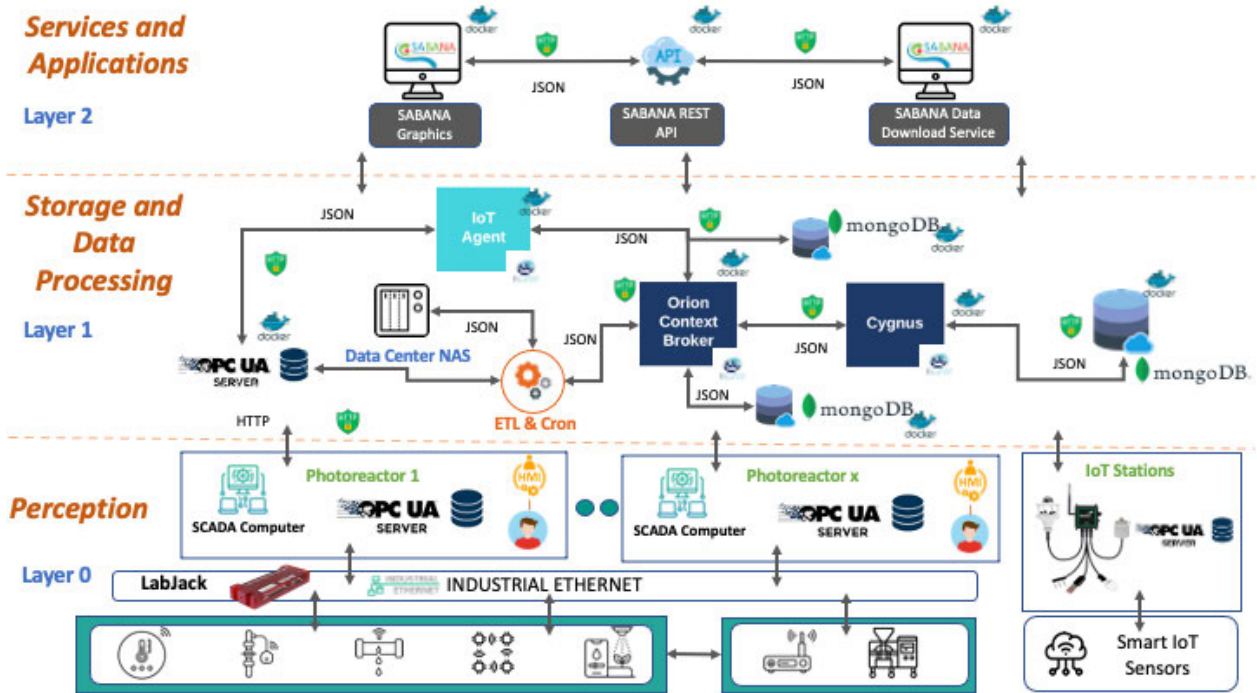


FIGURE 2. SABANA IoT cloud architecture. Division of system layers, workflow, communication protocols and services.

Entities and attributes are not generated from OCB because the OPC UA agent does this work. A special feature of OCB is that it does not store historical data. OCB only stores the last sensor status. Therefore, when a new value is sent, new value overwrites the old one. If historical data must be stored, another GE (Cygnus) must be used. OCB allows subscriptions to a REST API service. Notifications will be sent to subscribers when values are modified. Besides, subscription address must be provided to OCB. Once the subscribed attribute is modified, data will be sent to Cygnus endpoint automatically. OCB provides many sorts of subscriptions for each entity, making a complete mapping of all the data, which allows to add sensors later, and these will be automatically stored in the system. OCB has its own MongoDB database to store entities and their values.

- **Cygnus:** This GE of FIWARE is in charge of storing historical data of the plant. For storage, Cygnus allows different databases such as PostgreSQL, MongoDB [49], Hadoop [50], among others. In our proposal, Cygnus stores data in a MongoDB database. Cygnus uses the Orion subscription/notification functions. On behalf of Cygnus, a subscription is made to Orion with a detailed description of the attributes for which a notification is desired when any of the entity properties are updated. Cygnus allows to configure different parameters related to the storage format such as the data type or the data model. If row configuration is used, data is stored in the native OCB format. Regarding the data model, Cygnus allows to choose between creating tables by entity,

TABLE 1. Entities used in OCB.

Entities	Attributes	Metadata
RW1	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
RW2	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
RW3	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
RW4	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
TL1	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
TL2	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
TL3	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
COL1	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
COL2	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
COL3	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
TUB1	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
TUB1	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
TUB2	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
TUB2	pH, CO <sub>2</sub> , temp, dissox, solvalves,...	id, timestamp
MediumPumps	pump1, pump2	id, timestamp
InjectionPumps	pump1, pump2,...,pump8	id, timestamp
HarvestingPumps	pump1, pump2	id, timestamp
PaddleWheels	paddle1, paddle2, paddle3, paddle4	id, timestamp
IrrigationHeader	water, nutrients,...	id, timestamp
WeatgerStation	hum, temp, rad-par/global, CO <sub>2</sub> , wind	id, timestamp

by service-path and by entity type. It was decided to store it by service-path in a single table of the database, where sensor data is stored since in OCB they share the root service-path called SABANA.

- **OPC UA:** It is one of the main elements of this architecture. OPC UA is the evolution of the classic OPC, but supporting new technologies, such as IoT. In our proposal, OPC UA acts as a data server, where data generated by devices are stored. Each photobioreactor are attached to an OPC UA server and provides photobioreactor sensor data. The SCADA system acts as a client of OPC UA server to display information to users.



Having each photobioreactor in an independent node allows a better management when sensors have to be added. This server allows to have a standard data model for a bidirectional communication to perform control and query data by other external services.

- **IoTAgent:** This FIWARE GE translates the communication protocols of the different data sources to the OCB NGSI standard. In our proposal, the OPC UA agent is being used. Specifically, a complete mapping of all OPC UA server nodes and their variables is performed. This Enabler allows 3 types of monitoring: active, lazy and command sending. In our proposal, two of them are being used: active and lazy monitoring. Active monitoring of variables allows working in real time with values. In lazy monitoring, the agent sends the data to OCB when clients send a query. Given that the IoT agent acts as an intermediary translator between the OPC UA server and OCB, several tasks must be carried out. First, IoT agent must be configured with each node of the OPC UA server and the variables to be monitored. In this step, active or lazy monitoring for attributes is configured. Besides, OPC server, service and subservice IP addresses, the agent that communicates with OCB, and monitored variables must be configured. The agent has its own MongoDB database to save the configuration to avoid service reconfiguration. Finally, once all the configuration is completed, the agent can generate all the entities with their attributes already translated to the OCB NSGIV2 standard. This is an advantage because it is not necessary to configure OCB manually. So, when new photobioreactors or sensors must be added, simply modify the OPC UA agent and then, entities and attributes will be generated automatically. Using these IoT agents is an advantage since smart sensors using other communication protocols such as MQTT or LoRaWAN can be easily added to the system by generating a new intermediate IoT agent.
- **Databases:** In this layer, different databases are used to store the data generated in the plant. First, the OPC UA Agent uses a MongoDB database to store data related to the OPC UA communication standard that contains the measurement data of the sensors with the attributes of the OCB entities. Another MongoDB database is used by OCB to store the last sensor measurement in the NGSI standard, making it compatible with the remainder of FIWARE Enablers. On the other hand, data stored by Cygnus and further processed data are stored in another MongoDB database, where data is ready to be queried from the layer 2 or services and applications. These databases are independent and deployed as Docker containers in different volumes. MongoDB does not force a fixed data structure. By contrast, a flexible data model is used and unstructured data can be stored, so that photobioreactor sensors and actuators with different attributes can be added without modifying stored data. Besides, MongoDB allows horizontal scaling by means

of sharding and replicating techniques, distributing and replicating data to different nodes of the MongoDB cluster. This architecture is transparent to Layer 2 services and solves scaling limitations of relational databases, that provide a better performance on a single server.

- **ETL and Cron Processes:** ETL is responsible for obtaining the values from sensors connected to LabJack acquisition cards. Resulting data are sent to the OPC UA server. Cron processes preaggregate data by hour, day and month to speed up queries. Data is aggregated as unstructured data and it is stored on a MongoDB database. Furthermore, other cron processes make backup jobs on NAS periodically.

### C. SERVICES AND APPLICATIONS

Located at the top of the Figure 2, this layer exposes applications, interfaces and services to end users. It contains a REST API, data services and smart applications. The components are named as SABANA REST API, SABANA Data Download and SABANA Graphics:

- **SABANA REST API:** It offers a REST API to query data and to provide data to SABANA Graphics and SABANA Data Download.
- **SABANA Data Download:** It provides a service to download photobioreactor data in different formats, such as JSON or CSV.
- **SABANA Graphics:** It consists of a set of web applications that offer two frontend solutions. These services are SABANA Graphics for Researchers and SABANA Graphics for Technicians, respectively, depending on the end user role. The latter can also be consumed by means of SABANA Dashboard, a set of Grafana dashboards that allow users design and customize their own dashboards to visualize data.

SABANA Graphics and SABANA Data Download are based on SABANA REST API using HTTP requests and displaying the requested information to the user. Each service is packed in a Docker container and can be scaled up horizontally depending on demand. In addition, the other layers have not to be modified due to increasing requests on this layer, resulting in a scalable and dynamic architecture.

### IV. SABANA DATA COMPONENTS

This section describes the services available in SABANA Data Services (Figure 3). Figure represents an overview of platform options, showing the data sources, interfaces and services available. The system provides a set of services listed from 1 to 8 (see Figure 3) starting with the SABANA FIWARE sensor registering and query group, followed by the SABANA SCADA monitoring system, and ending with SABANA Graphics and SABANA REST API services. Services are based on SABANA REST API. End users can access to services using the graphical interfaces depending on their role (SABANA Graphics for Researchers, SABANA Graphics for Technicians) or using the SABANA REST API

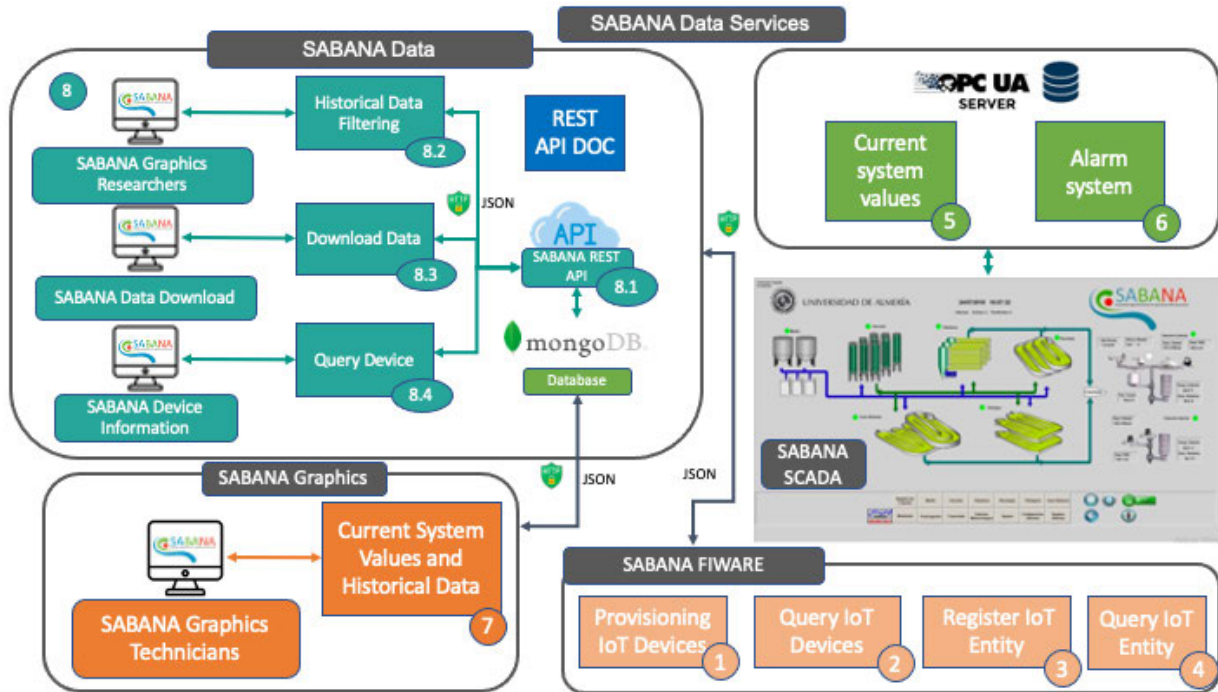


FIGURE 3. SABANA Data Services. Registering of IoT sensors, functionalities and services.

TABLE 2. SABANA Data Services.

Service	Method	End Point
Provisioning IoT Devices	POST	/iot/devices/
Query IoT Devices	GET	/iot/devices/
Register Entity IoT	POST	/v2/entities/
Query IoT Entity	GET	/v2/entities/
Historical Data/Query Device	GET	/api/v1/sensor/

directly. Table 2 shows the services available through http within SABANA Data Services.

The main services that make up SABANA Data Services are the following:

- *Provisioning IoT Devices* (1) allows provisioning new devices such as sensors, actuators or photoreactors in the system. This service is in the FIWARE provisioning group and translates data from the OPC UA standard to the NGSI OMA standard of OCB. New photobioreactor sensors must be registered in the service. Once sensors are registered, entities are generated by this service, and sensor data from OPC UA server are sent to OCB. Table 3 shows the endpoint, HTTP headers and request parameters to perform sensor provisioning. Headers allow to generate hierarchies between the first and second level entities respectively with fiware-service and fiware-servicepath.
- *Query IoT Devices* (2) get data from devices registered in Service 1. Table 4 shows the endpoint, HTTP headers and request parameters to get device IoT devices registered with the agent. Headers allow to generate

TABLE 3. Provisioning IoT Devices.

HTTP request	
POST	/iot/devices/
Parameters	
Headers	
Content-Type	application/json
fiware-service	First level of the hierarchy
fiware-servicepath	Second level of the hierarchy
Required parameters	
device_id	String Device identifier
entity_name	String Entity name OCB
entity_type	String Type of entity Photobioreactors
Interlude	Active attributes: real-time mapping Lazy attributes: At the request of the IoT agent Command: methods on the OPC UA server Array of objects from the fields below
object_id	String The node and device name in OPC UA
name	String The name to be displayed in OCB
type	String Acceptable values are: Text, Number, Boolean, StructuredValue

hierarchies between the first and second level entities respectively with fiware-service and fiware-servicepath.

- *Register Entity IoT* (3) of the FIWARE group registers new entities and IoT smart devices in OCB. This service is used only for IoT stations or smart sensors compliant with FIWARE NGSI standard for communications.

**TABLE 4. Query IoT Devices.**

HTTP request	
GET	/iot/devices/
Parameters	
Headers	
Content-Type	application/json
fiware-service	First level of the hierarchy
fiware-servicepath	Second level of the hierarchy
Required parameters	
device_id	String Device identifier

**TABLE 5. Register Entity IoT.**

HTTP request	
POST	/v2/entities/
Parameters	
Headers	
Content-Type	application/json
fiware-service	First level of the hierarchy
fiware-servicepath	Second level of the hierarchy
Request arguments	
id	String Id or name of the entity
type	String Type of entity Photobioreactors
Attributes	String Device name
value	Number, String Measure
type	String The data type
Optional	
metadata	Object: name, value, type

**TABLE 6. Query Entity IoT.**

HTTP request	
GET	/v2/entities/
Parameters	
Headers	
Content-Type	application/json
fiware-service	First level of the hierarchy
fiware-servicepath	Second level of the hierarchy
Required parameters	
id	String Device identifier
Filters	
attrs	String Entity name attributes
value	String Retrieves the measure

Table 5 shows the endpoint, HTTP headers and request parameters to perform IoT entity registration. Headers allow to generate hierarchies between the first and second level entities respectively with fiware-service and fiware-servicepath.

- *Query Entity IoT* (4) of the FIWARE group is the core of the architecture. This service gets real time data of plant sensors and actuators using the NGSI standard of OMA. Filters can also be used (e.g. time, entity ID, attribute name of the attributes, range of values). Headers allow to generate hierarchies between the first and second level entities respectively with fiware-service and fiware-servicepath. Details about the use of this service are available in Table 6.

- *Current System values* and *Alarm system* (5-6) belongs to SABANA SCADA services. The former gets sensor data in real time. An OPC UA client to establish the communication with the server must be created to access sensor data. A SCADA system is used to perform plant monitoring and control tasks. The latter provides a subscription mechanism to system variables so technicians can be noticed when subscribed variables are out of range.
- *Current System Values and Historical Data* (7) allows technical users to view real time and historical data on a web interface. This is connected to the real-time database generated by Cygnus. This service is linked to SABANA Graphics for Technicians using Grafana and new customized dashboards may be created.
- *SABANA Data* (8) consists of four subservices, named as SABANA REST API (8.1), Historical Data Filtering (8.2), Download Data (8.3) and Query Device (8.4). SABANA Rest API is a core component and it is used by the rest of the subservices and provide a query mechanism to historic data generated by the plant sensors in different formats. Table 7 shows the endpoint, HTTP headers and request parameters to use the service. Filters can also be used (e.g. time attributes, mode, output, and so on). This service provides information from the beginning of the campaign until the last 24 hours. It has a set of processes that are executed nightly accessing to the database and performing data cleaning and aggregation operations. Historical Data Filtering (8.2) is used to visualize historical data of the plant through a graphical interface named as SABANA Graphics for Researchers. Download Data Service (8.3) allows downloading historical data of the plant in JSON or CSV format through a graphical interface named as SABANA Data Download. Query Device subservice (8.4) provides a query mechanism to get technical information about devices installed in the plant, such as manufacturer, sensor errors, revisions, maintenance, among others through a graphical interface named as SABANA Device Information.

## V. USE OF THE PROPOSED SERVICES

This section shows some examples of the IoT services developed in this article. In addition, these services will be visualized through the different components available in SABANA Data Services and SABANA Graphics.

### A. SABANA FIWARE

This section makes use of SABANA Data Services through HTTP requests. This is formed by the Provisioning IoT Devices and Register Entity IoT services.

#### 1) PROVISIONING IoT DEVICES

This section shows an example of how to use the provisioning service to create a photobioreactor using the OPC UA agent. The following code shows the body of the request in JSON

TABLE 7. Historical Data.

HTTP request	
GET	/api/v1/sensor/
Required parameters	
id_sensor	String id_sensor comma separated list
Filters	
day	Integer The day parameter with format YYYYMMDD
time	Integer The time parameter with format YYYYMMDDHHMM
fromtime	Integer The fromtime parameter with format YYYYMMDDHHMM
totime	Integer The totime parameter with format YYYYMMDDHHMM
month	Integer Time in YYYYMM
mode	String Use aggregation type by default aggregations per day
by	String Use hour type to aggregate by hours
output	String Use CSV for this format

to create a raceway photobioreactor. Details about the use of this service are available in Table 3.

```

{
  "devices": [
    {
      "device_id": "RW1",
      "entity_name": "RW1",
      "entity_type": "device",
      "attributes": [
        {
          "object_id": "ns+1:s+temp_rw1",
          "name": "temp_rw1",
          "type": "Number"
        },
        .....
      ],
      "lazy": [],
      "commands": []
    }
  ]
}

```

2) REGISTER IoT ENTITY

Next, the request body to register a smart sensor that uses NGSi standard to communicate with FIWARE is listed. Details about the use of this service are available in Table 6.

```

{
  "id": "RW2",
  "type": "device1",
  "CO2_rw2": {
    "type": "Number",
    "value": "8.440798112015251",
    "metadata": {}
  },
  .....
}

```



FIGURE 4. SABANA Graphics for Technicians. Visualization of two photobioreactors RW1 and TL1.

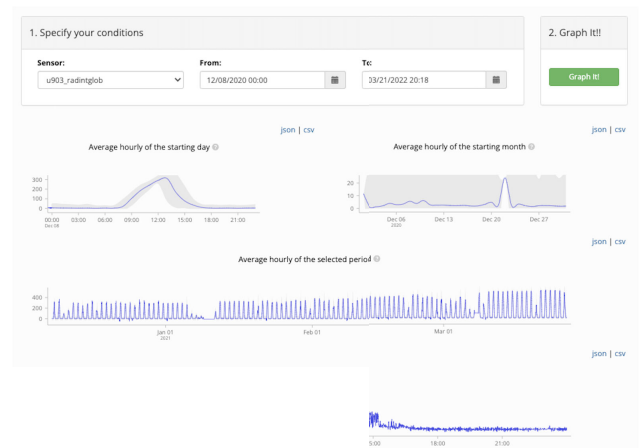


FIGURE 5. SABANA Graphics for Researchers.

B. SABANA GRAPHICS

In this section, the use of SABANA Data Services through the available graphic tools is illustrated.

1) SABANA GRAPHICS TECHNICIANS

This service is used by technical users of the plant. It consists of a set of Grafana dashboards showing real time and historical photobioreactor sensor data by using a graphical format. These dashboards may be modified to customize depicted data. Figure 4 shows the data for two photobioreactors of the raceway and tubular type and their different variables.

2) SABANA GRAPHICS RESEARCHERS

In SABANA Graphics for Researchers, users select sensors from a list and choose a date range. Then, the component



**FIGURE 6. SABANA Data Download. Graphic interface for data download in CSV and JSON format.**

displays data in form of four graphs (see Figure 5). Hourly average of selected date, hourly average of selected month, hourly average of the selected period, and raw data of selected date. This service is based on the SABANA REST API (see service 8 Section IV), which allows retrieving historical data in different formats using the filters of the Table 7. In addition, graphics data can be downloaded in JSON or CSV format. This feature is very useful for researchers and companies as they can analyze data offline.

### 3) SABANA DEVICE INFORMATION

This service gets technical information of plant IoT devices. Users select from a list of available sensors in the plant, and data is retrieved from the database. Data is returned in JSON with information about calibration, installation location, PDF with the manufacturer's datasheet, and so on.

### C. SABANA DATA DOWNLOAD

This service offers users the possibility to download the data generated by the sensors in different formats and modes graphically through a set of drop-downs. The Figure 6 shows the use of the graphical interface for data download and an example of the file in CSV and JSON format. The user can select multiple sensors, a start and end date, the format in which he wants the data (JSON or CSV), and then several possibilities within the aggregate menu (The starting date as a whole, The starting date hourly, The month of the starting date hourly) and in the non-aggregate menu (Data of the starting instant, Data of a period, Raw data of the starting date). This interface facilitates data access for all types of expert and inexperienced users.

## VI. CONCLUSION

This work is developed and tested in the real SABANA plant specialized in biomass production located in Almería, covering the complete production cycle of the system, from obtaining measurements from the sensors and sending data, registration of new devices, data processing, data

query services and plant monitoring. The IoT platform developed is a proprietary solution and relies on the use of the NGS standard of the FIWARE platform for data integration, making easier information exchange between different type of sensors. In addition, other enablers are used for the integration of different communication protocols.

This paper proposes a cloud-based IoT solution for large-scale data management of a biomass production system through microalgae cultivation as a solution for this sector to the lack of digitization and the issues to data access. SABANA Data Services are focused on monitoring, access, and extraction of the data generated by the photobioreactors associated to the SABANA plant. Services available to users are: real-time data, historical data, sensor information, additional sensor integration, IoT entity creation, and system monitoring. These services are exposed to users through a set of REST APIs, called SABANA Data Center, which allow the user to make use of them in two ways: through a set of web interfaces, or through HTTP requests. The former allows less advanced users to make use of SABANA graphical services. The latter allows advanced users or researchers to make use of the REST API to perform queries or extract data for simulation purposes and develop their own dashboard in their systems or companies. The results presented in the work allow us to reach the following conclusions:

- 1) The use of technologies, such as IoT, is presented as an effective tool to manage existing heterogeneous data in a large-scale microalgae production system. Moreover, cloud-based solutions and REST APIs are introduced as key elements to manage the large amount of data generated in these industrial systems.
- 2) The developed IoT platform allows the integration of ordinary sensors and new smart sensors in an easy and scalable way.
- 3) The set of REST APIs services developed allow the user to make use of them according to their



background, by using a graphical format or through HTTP requests. This makes the accessibility, management, and visualization of the plant data easier for all types of profiles.

In relation to future work, the services developed could be used to remotely perform control operations in the plant, allowing bidirectional communication from one of the graphic clients of SABANA Data Services. It would also be interesting to present a proposal for an economic feasibility analysis to determine the cost of migrating a traditional plant to the acquisition of IoT sensors, infrastructure and communication networks. This would allow to know the profitability of traditional systems versus IoT systems.

## REFERENCES

- [1] A. K. Koyande, K. W. Chew, K. Rambabu, Y. Tao, D.-T. Chu, and P.-L. Show, "Microalgae: A potential alternative to health supplementation for humans," *Food Sci. Hum. Wellness*, vol. 8, no. 1, pp. 16–24, Mar. 2019.
- [2] C. F. Martins, D. M. Ribeiro, M. Costa, D. Coelho, C. M. Alfaia, M. Lordelo, A. M. Almeida, J. P. B. Freire, and J. A. M. Prates, "Using microalgae as a sustainable feed resource to enhance quality and nutritional value of pork and poultry meat," *Foods*, vol. 10, no. 12, p. 2933, Nov. 2021.
- [3] D. Nagarajan, S. Varjani, D.-J. Lee, and J.-S. Chang, "Sustainable aquaculture and animal feed from microalgae—Nutritive value and techno-functional components," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 150, Oct. 2021, Art. no. 111549.
- [4] A. Kusmayadi, Y. K. Leong, H.-W. Yen, C.-Y. Huang, and J.-S. Chang, "Microalgae as sustainable food and feed sources for animals and humans—Biotechnological and environmental aspects," *Chemosphere*, vol. 271, May 2021, Art. no. 129800.
- [5] S. Thanigaivel, A. K. Priya, K. Dutta, S. Rajendran, and Y. Vasseghian, "Engineering strategies and opportunities of next generation biofuel from microalgae: A perspective review on the potential bioenergy feedstock," *Fuel*, vol. 312, Mar. 2022, Art. no. 122827.
- [6] A. T. Hoang, R. Sirohi, A. Pandey, S. Nižetić, S. S. Lam, W.-H. Chen, R. Luque, S. Thomas, M. Arıcı, and V. V. Pham, "Biofuel production from microalgae: Challenges and chances," *Phytochem. Rev.*, pp. 1–38, May 2022.
- [7] A. L. Morocho-Jácome, N. Ruscinc, R. M. Martinez, J. C. M. de Carvalho, T. S. de Almeida, C. Rosado, J. G. Costa, M. V. R. Velasco, and A. R. Baby, "(Bio)technological aspects of microalgae pigments for cosmetics," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 104, no. 22, pp. 9513–9522, Nov. 2020.
- [8] A. K. Patel, R. R. Singhanian, M. K. Awasthi, S. Varjani, S. K. Bhatia, M.-L. Tsai, S.-L. Hsieh, C.-W. Chen, and C.-D. Dong, "Emerging prospects of macro- and microalgae as prebiotic," *Microbial Cell Factories*, vol. 20, no. 1, p. 112, Dec. 2021.
- [9] A. L. Gonçalves, "The use of microalgae and cyanobacteria in the improvement of agricultural practices: A review on their biofertilising, biostimulating and biopesticide roles," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 2, p. 871, Jan. 2021.
- [10] H. C. Ong, Y. W. Tiong, B. H. H. Goh, Y. Y. Gan, M. Mofijur, I. M. R. Fattah, C. T. Chong, M. A. Alam, H. V. Lee, A. S. Silitonga, and T. M. I. Mahlia, "Recent advances in biodiesel production from agricultural products and microalgae using ionic liquids: Opportunities and challenges," *Energy Convers. Manag.*, vol. 228, Jan. 2021, Art. no. 113647.
- [11] A. Sánchez-Zurano, A. Morillas-España, C. Gómez-Serrano, M. Ciardi, G. Ación, and T. Lafarga, "Annual assessment of the wastewater treatment capacity of the microalga *scenedesmus almeriensis* and optimisation of operational conditions," *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, p. 21651, Dec. 2021.
- [12] A. Morillas-España, Á. Ruiz-Nieto, T. Lafarga, G. Ación, Z. Arbib, and C. V. González-López, "Biostimulant capacity of *chlorella* and *chlamydomonium* species produced using wastewater and centrate," *Biology*, vol. 11, no. 7, p. 1086, Jul. 2022.
- [13] J. L. Guzmán, F. G. Ación, and M. Berenguel, "Modelling and control of microalgae production in industrial photobioreactors," *Revista Iberoamericana Automática Informática Ind.*, vol. 18, no. 1, pp. 1–18, 12 2021.
- [14] A. Hoyo, J. L. Guzmán, J. C. Moreno, and A. Baños, "Robust control of the pH in raceway photobioreactor," *Revista Iberoamericana Automática Informática Ind.*, vol. 19, no. 3, pp. 274–283, 2022.
- [15] J. González-Hernández, E. Rodríguez-Miranda, J. L. Guzmán, F. G. Ación, and A. Visioli, "Temperature optimization in raceway reactors for the microalgae production based on culture depth regulation," *Revista Iberoamericana Automática Informática Ind.*, vol. 19, no. 2, pp. 164–173, Feb. 2022.
- [16] S. Liu, L. Guo, H. Webb, X. Ya, and X. Chang, "Internet of Things monitoring system of modern eco-agriculture based on cloud computing," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 37050–37058, 2019.
- [17] E.-T. Bouali, M. R. Abid, E.-M. Boufounas, T. A. Hamed, and D. Benhaddou, "Renewable energy integration into cloud & IoT-based smart agriculture," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 1175–1191, 2022.
- [18] M. Laroui, B. Nour, H. Mounqila, M. A. Cherif, H. Afifi, and M. Guizani, "Edge and fog computing for IoT: A survey on current research activities & future directions," *Comput. Commun.*, vol. 180, pp. 210–231, Dec. 2021.
- [19] P. Verma, R. Tiwari, W.-C. Hong, S. Upadhyay, and Y.-H. Yeh, "FETCH: A deep learning-based fog computing and IoT integrated environment for healthcare monitoring and diagnosis," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 12548–12563, 2022.
- [20] A. Naouri, H. Wu, N. A. Nouri, S. Dhelim, and H. Ning, "A novel framework for mobile-edge computing by optimizing task offloading," *IEEE Internet Things J.*, vol. 8, no. 16, pp. 13065–13076, Aug. 2021.
- [21] S. A. Bhat and N.-F. Huang, "Big data and AI revolution in precision agriculture: Survey and challenges," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 110209–110222, 2021.
- [22] K. L.-M. Ang and J. K. P. Seng, "Big data and machine learning with hyperspectral information in agriculture," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 36699–36718, 2021.
- [23] K. Shafique, B. A. Khawaja, F. Sabir, S. Qazi, and M. Mustaqim, "Internet of Things (IoT) for next-generation smart systems: A review of current challenges, future trends and prospects for emerging 5G-IoT scenarios," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 23022–23040, 2020.
- [24] G. Dragone, A. A. J. Kerssemakers, J. L. S. P. Driessen, C. K. Yamakawa, L. P. Brumano, and S. I. Mussatto, "Innovation and strategic orientations for the development of advanced biorefineries," *Bioresour. Technol.*, vol. 302, Apr. 2020, Art. no. 122847.
- [25] M. Muñoz, J. L. Guzmán, J. A. Sánchez-Molina, F. Rodríguez, M. Torres, and M. Berenguel, "A new IoT-based platform for greenhouse crop production," *IEEE Internet Things J.*, vol. 9, no. 9, pp. 6325–6334, May 2022.
- [26] C. Maraveas, D. Piromalis, K. G. Arvanitis, T. Bartzanas, and D. Loukatos, "Applications of IoT for optimized greenhouse environment and resources management," *Comput. Electron. Agricult.*, vol. 198, Jul. 2022, Art. no. 106993.
- [27] M. Muñoz, J. Gil, L. Roca, F. Rodríguez, and M. Berenguel, "An IoT architecture for water resource management in agroindustrial environments: A case study in Almería (Spain)," *Sensors*, vol. 20, no. 3, p. 596, Jan. 2020.
- [28] Y. Pourasad, S. Shami, and P. Ghorbanzadeh, "Use of open platform communications for water resources management in the Internet of Things platform," *Int. J. Agricult. Resour., Governance Ecol.*, vol. 17, nos. 2–4, pp. 114–130, 2021.
- [29] I. T. Christou, N. Kefalakis, J. K. Soldatos, and A.-M. Despotopoulou, "End-to-end industrial IoT platform for quality 4.0 applications," *Comput. Ind.*, vol. 137, May 2022, Art. no. 103591.
- [30] J. Zhang, O. A. Yarom, and X. Liu-Henke, "Decentralized self-optimized order-acceptance decision of autonomous guided vehicles in an IoT-based production facility," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–6, 2021.
- [31] S. Jagtap, G. Garcia-Garcia, and S. Rahimifard, "Optimisation of the resource efficiency of food manufacturing via the Internet of Things," *Comput. Ind.*, vol. 127, May 2021, Art. no. 103397.
- [32] S. M. Nagarajan, G. G. Deverajan, P. Chatterjee, W. Alnumay, and V. Muthukumar, "Integration of IoT based routing process for food supply chain management in sustainable smart cities," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 76, Jan. 2022, Art. no. 103448.
- [33] F. Alshehri and G. Muhammad, "A comprehensive survey of the Internet of Things (IoT) and AI-based smart healthcare," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 3660–3678, 2021.

- [34] P. Manickam, S. A. Mariappan, S. M. Murugesan, S. Hansda, A. Kaushik, R. Shinde, and S. P. Thipperudraswamy, "Artificial intelligence (AI) and internet of medical things (IoMT) assisted biomedical systems for intelligent healthcare," *Biosensors*, vol. 12, no. 8, p. 562, Jul. 2022.
- [35] M. Andronie, G. Lăzăroiu, M. Iatagan, C. Uță, R. Ștefănescu, and M. Coboșatu, "Artificial intelligence-based decision-making algorithms, Internet of Things sensing networks, and deep learning-assisted smart process management in cyber-physical production systems," *Electronics*, vol. 10, no. 20, p. 2497, Oct. 2021.
- [36] A. Gordon, "Internet of Things-based real-time production logistics, big data-driven decision-making processes, and industrial artificial intelligence in sustainable cyber-physical manufacturing systems," *J. Self-Governance Manag. Econ.*, vol. 9, no. 3, pp. 61–73, 2021.
- [37] G. Lăzăroiu, M. Andronie, M. Iatagan, M. Geamănu, R. Ștefănescu, and I. Dîjmărescu, "Deep learning-assisted smart process planning, robotic wireless sensor networks, and geospatial big data management algorithms in the internet of manufacturing things," *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, vol. 11, no. 5, p. 277, Apr. 2022.
- [38] S. Dhelim, N. Aung, T. Kechadi, H. Ning, L. Chen, and A. Lakas, "Trust2Vec: Large-scale IoT trust management system based on signed network embeddings," *IEEE Internet Things J.*, early access, Aug. 25, 2022, doi: [10.1109/JIOT.2022.3201772](https://doi.org/10.1109/JIOT.2022.3201772).
- [39] K. Wang, K. S. Khoo, H. Y. Leong, D. Nagarajan, K. W. Chew, H. Y. Ting, A. Selvarajoo, J.-S. Chang, and P. L. Show, "How does the Internet of Things (IoT) help in microalgae biorefinery?" *Biotechnol. Adv.*, vol. 54, Jan. 2022, Art. no. 107819.
- [40] P. E. Tham, Y. J. Ng, N. Vadivelu, H. R. Lim, K. S. Khoo, K. W. Chew, and P. L. Show, "Sustainable smart photobioreactor for continuous cultivation of microalgae embedded with Internet of Things," *Bioresour. Technol.*, vol. 346, Feb. 2022, Art. no. 126558.
- [41] H. R. Lim, K. S. Khoo, W. Y. Chia, K. W. Chew, S.-H. Ho, and P. L. Show, "Smart microalgae farming with Internet-of-Things for sustainable agriculture," *Biotechnol. Adv.*, vol. 57, Jul. 2022, Art. no. 107931.
- [42] F. Cirillo, G. Solmaz, E. L. Berz, M. Bauer, B. Cheng, and E. Kovacs, "A standard-based open source IoT platform: FIWARE," *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 2, no. 3, pp. 12–18, Sep. 2019.
- [43] M. Bauer, E. Kovacs, A. Schulke, N. Ito, C. Criminisi, L.-W. Goix, and M. Valla, "The context API in the OMA next generation service interface," in *Proc. 14th Int. Conf. Intell. Next Gener. Netw.*, Oct. 2010, pp. 1–5.
- [44] B. Growth. (2021). *Blue Growth Study—Scenarios and Drivers for Sustainable Growth From the Oceans, Seas and Coasts* | *Maritime Forum*. [Online]. Available: <https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/en/node/2946>
- [45] E. Rodríguez-Miranda, J. L. Guzmán, M. Berenguel, F. G. Ación, and A. Visioli, "Diurnal and nocturnal pH control in microalgae raceway reactors by combining classical and event-based control approaches," *Water Sci. Technol.*, vol. 82, no. 6, pp. 1155–1165, Sep. 2020.
- [46] E. Rodríguez-Miranda, J. L. Guzmán, F. G. Ación, M. Berenguel, and A. Visioli, "Indirect regulation of temperature in raceway reactors by optimal management of culture depth," *Biotechnol. Bioeng.*, vol. 118, no. 3, pp. 1186–1198, Mar. 2021.
- [47] H. Shi, L. Niu, and J. Sun, "Construction of industrial Internet of Things based on MQTT and OPC UA protocols," in *Proc. IEEE Int. Conf. Artif. Intell. Comput. Appl. (ICAICA)*, Jun. 2020, pp. 1263–1267.
- [48] OMA SpecWorks. (2019). *Home—OMA SpecWorks*. [Online]. Available: <https://www.omaspecworks.org/>
- [49] M. M. Eyada, W. Saber, M. M. E. Genidy, and F. Amer, "Performance evaluation of IoT data management using MongoDB versus MySQL databases in different cloud environments," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 110656–110668, 2020.
- [50] A. Mostafaeipour, A. J. Rafsanjani, M. Ahmadi, and J. A. Dhanraj, "Investigating the performance of Hadoop and spark platforms on machine learning algorithms," *J. Supercomput.*, vol. 77, no. 2, pp. 1273–1300, Feb. 2021.



**M. MUÑOZ** received the Technical Engineer and Computer Engineer degrees in computer systems from the University of Almería. He is currently writing his Ph.D. thesis "New paradigms for the integration of IoT systems in protected agriculture" with the University of Almería. He is also a Researcher with the University of Almería. He is developing his research work as a member of the Group of Automatic Control, Robotics and Mechatronics (TEP-197), since 2017, specializing in the Internet of Things (IoT), big data, robotics, data acquisition systems, cloud systems, and back-end and front-end development. So far, he has six publications in international and national congresses, having been awarded for the publication "IoT applied to traceability and decision-making for tomato cultivation in greenhouses." He is also participating in a European Project for the Digitalization of Agriculture "IoF 2020."



**J. L. GUZMÁN** received the degree in computer science engineering and the European Ph.D. degree from the University of Almería, Spain, in 2002 and 2006, respectively. He is currently a Full Professor of automatic control and systems engineering with the University of Almería. His research interests include control education, model-predictive control techniques, PID control, and robust control, with applications to agricultural processes, solar plants, and biotechnology. He is a member of the Spanish Association of Automatic Control CEA-IFAC and the IEEE Technical Committee on System Identification, and the Vice-Chair of the IFAC Technical Committee on Control Education. He received an Extraordinary Doctorate Award for his Ph.D. degree.



**M. TORRES** received the degree in computer science engineering from the University of Granada, Spain, and the Ph.D. degree from the University of Almería, Spain, in 2002. He is currently an Associate Professor with the Department of Informatics, University of Almería. His research interests include databases and cloud computing.



**F. G. ACIÓN** graduated from the University of Granada, in 1992. He received the Ph.D. degree from the University of Almería, Spain, in 1996. He has been a Professor with the Department of Chemical Engineering, University of Almería, since 2012. His major contributions on biotechnology of microalgae field are related with the improvement of photobioreactors design, scale-up of production systems, and economic analysis of production processes. He has participated in 12 European projects in addition to 40 national projects and contracts with companies. Regarding publications, he has published more than 100 articles in international journals and 12 book chapters, in addition to ten patents. He is a member of the International Society for Applied Phycology and the Latino American Society for Algal and Environmental Biotechnology, and an Editor of *Algal Research* and RELABIAA journals, in addition to reviewer of international journals.

...

### 2.3 Arquitectura IoT para la gestión de los recursos hídricos en entornos agro-industriales

El trabajo de investigación de esta tesis se sustenta en las publicaciones que se relacionan a continuación, en las que se ha resaltado en negrita el nombre del doctorando y autor de esta tesis (véase la tabla 2.3).

Tabla 2.3. Información de la contribución 3

<b>Título</b>	An IoT Architecture for Water Resource Management in Agroindustrial Environments: A Case Study in Almería (Spain)†		
<b>Autores</b>	<b>Manuel Muñoz</b> , Juan D. Gil, Lidia Roca, F. Rodríguez, M. Berenguel		
<b>Revista</b>	Sensors		
<b>Año</b>	2020		
<b>Volumen</b>	20		
<b>Páginas</b>	–		
<b>DOI</b>	<a href="https://doi.org/10.3390/s20030596">https://doi.org/10.3390/s20030596</a>		
<b>FI (JCR 2021)</b>	3.576		
<b>Categorías</b>	Instrumentos e instrumentación	(14/64)	<b>Q1</b>
	Ingeniería, eléctrica y electrónica	(82/273)	Q2
	Química analítica	(26/87)	Q2

#### Contribución del doctorando

El candidato al doctorado, M. Muñoz, es el primer autor de este trabajo.

Hasta la fecha (30/01/2023), el artículo ha recibido 20 citas según Scopus, 13 según Web of Science y 30 según Google Scholar. Cabe señalar que otra métrica que proporciona la editorial Sensors es que el artículo ha tenido 3721 visitas, incluidas la descarga del archivo y las visitas a la web.

Aparte de la contribución mencionada anteriormente, este trabajo también dio como resultado una contribución en un congreso internacional:

- J. D. Gil, **M. Muñoz**, L. Roca, F. Rodríguez, y M. Berenguel, «An IoT based control system for a solar membrane distillation plant used for greenhouse irrigation,» en *Global IoT Summit (GloTS)*, Utrecht, Dinamarca, 2019, págs. 1-6. Referencia: [201].

Esta línea de investigación cuenta con un premio por los editores de la revista Sensors:

- Los artículos *Editor's Choice* se basan en las recomendaciones de los editores científicos de las revistas MDPI de todo el mundo. Los editores seleccionan un pequeño número de artículos publicados recientemente en la revista que consideran especialmente interesantes para los lectores o importantes en el área de investigación correspondiente.

Article

# An IoT Architecture for Water Resource Management in Agroindustrial Environments: A Case Study in Almería (Spain)<sup>†</sup>

Manuel Muñoz <sup>1,\*</sup>, Juan D. Gil <sup>1</sup>, Lidia Roca <sup>2</sup>, Francisco Rodríguez <sup>1</sup>  
and Manuel Berenguel <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Informática, Escuela Superior de Ingeniería, Universidad de Almería, ceiA3, CIESOL, Ctra. Sacramento s/n, 04120 Almería, Spain; juandiego.gil@ual.es (J.D.G.); frrodrig@ual.es (F.R.); beren@ual.es (M.B.)

<sup>2</sup> Convenio Universidad de Almería, Plataforma Solar de Almería, Ctra. Senés s/n, 04200 Tabernas, Almería, Spain; lidia.roca@psa.es

\* Correspondence: mmr411@ual.es

† This paper is an extended version of our paper published in “An IoT based Control System for a Solar Membrane Distillation Plant used for Greenhouse Irrigation” presented at the 2019 Global Internet of Things Summit (GIoTS), Aarhus, Denmark, 17–21 June 2019.

Received: 13 December 2019; Accepted: 16 January 2020; Published: 21 January 2020



**Abstract:** The current agricultural water panorama in many Mediterranean countries is composed by desalination facilities, wells (frequently overexploited), the water public utility network, and several consumer agents with different water needs. This distributed water network requires centralized management methods for its proper use, which are difficult to implement as the different agents are usually geographically separated. In this sense, the use of enabling technologies such as the Internet of Things can be essential to the proper operation of these agroindustrial systems. In this paper, an Internet of Things cloud architecture based on the FIWARE standard is proposed for interconnecting the several agents that make up the agroindustrial system. In addition, this architecture includes an efficient management method based on a model predictive control technique, which is aimed at minimizing operating costs. A case study inspired by three real facilities located in Almería (southeast of Spain) is used as the simulation test bed. The obtained results show how around 75% of the total operating costs can be saved with the application of the proposed approach, which could be very significant to decrease the costs of desalinated water and, therefore, to maintain the sustainability of the agricultural system.

**Keywords:** FIWARE; cloud storage; model predictive control; smart water management; smart agriculture

## 1. Introduction

Almería (southeast of Spain) is one of the driest regions in Europe, but paradoxically, it has one of the continent's largest agricultural production systems. Such a system is composed of more than 30,000 ha of effective greenhouse production [1], and it has become the main driving force of the economy of this dry region. One basic ingredient of this system is fresh water, so that the development of agriculture in Almería has been associated for many years with the decline of fresh water reservoirs, despite being the agricultural area where the most efficient management of this resource is carried out [2]. This encouraged the installation of desalination plants as a tool to maintain the fresh water availability in the region and, therefore, the sustainability of the agricultural system [3]. Thus, Almería's current agricultural water panorama comprises consumer agents, as greenhouses and industries related to agriculture, and producer agents based on conventional (water public utility network and wells)



and non-conventional sources (desalination facilities). This agroindustrial environment constitutes a distributed water network that requires an integral smart management method for its optimal use [4].

Several management strategies have been formulated in the literature for distributed water networks, especially focused on the urban water cycle of Barcelona (Spain). In the work of Ocampo Martinez et al. [5], Model Predictive Control (MPC) paradigms were proposed aimed at reducing pumping costs. An operational MPC approach was proposed by Pascual et al. [6], tasked with reducing costs, as well as maintaining safety storage volumes in the buffer tanks. Another control based water management system was proposed by Lopez Farias et al. [7]. In this case, the forecasting accuracy of the control system was improved by means of a qualitative multi-model predictor. Although all these works proposed effective management methods, they did not describe the way in which all the information coming from the different devices of the distributed network is integrated and unified for the application of the methods in real cases. In addition, they are focused on optimizing the transport water network, without taking into account the optimal management of the water sources.

To manage the water sources optimally, it is essential to adapt the production to the demand. This fact is especially significant when considering desalination facilities in the water network (as happens in Almería) as the costs associated with the production of desalinated water are still relatively high [8], and they depend directly on production. The work presented by Roca et al. [9] demonstrated how a desalination facility can be efficiently coupled to a greenhouse by using MPC techniques. Moreover, the work in [10] showed how metrics related to the desalination process can be improved in these kinds of combinations by using advanced control strategies. However, these works were focused only on the management method, considering desalination as the only water source, and without taking into account costs in the management problem. As stated in [11], to minimize the operational costs of desalination facilities and to improve their efficiency, a bi-directional communication between them and the consumers must be established, which can be achieved by means of adequate Information and Communication Technologies (ICT) tools. This is especially relevant in Almería, where there are relatively small and geographically dispersed greenhouse cultivation areas that depend on the water coming from one or several desalination plants. These plants need to know the water demand of each greenhouse for their efficient use in terms of operating costs. One natural choice to solve the problem is the Internet of Things (IoT) framework, as it allows connecting all the devices in a unified platform regardless of their geographical location. In addition, IoT can be associated with data analytics and cloud computing, thus making powerful platforms that allow gathering the required information from different IoT devices, analyzing it in the cloud, and transmitting the corresponding control signals to the actuators of the distributed network. These features have made IoT a key component in the development of sustainable distributed environments [12,13].

In recent years, IoT has experienced a breakthrough, changing the way in which providers and consumers interact with each other. Agriculture is not alien to this transition, and it is experiencing a change of the business model in the technological field [14,15] according to which customers (farmers) are ceasing to acquire assets (monitoring computers, sensors, or control systems) while demanding services [16,17]. In this framework, the supplier companies are responsible for ensuring the proper functioning of their equipment and providing the data necessary for farmers to make their decisions, billing for such services. The devices, through the change of firmware, can dynamically change the activities they carry out, supplying information to the cloud (not only locally as is usually done) [18] and, through the adequate processing of this information, help to reduce service times and operation shutdowns. This paradigm shift requires the establishment of transversal protocols, interoperability, and collaboration between companies and services.

Nevertheless, the arrival of IoT to the agricultural field not only has influenced the relationships between costumers and companies, but also the way in which the agricultural activities are developed. Thus, the term Precision Agriculture (PA) has emerged [19,20], which involves the use of a series of sensors and actuators that allow gathering context information of the environment that surrounds

them. This paradigm enables the development of tools to assist in decision-making, monitoring activities in the crop, and applications to improve the quality; all of them aimed at obtaining a more efficient and sustainable agricultural system [21–24]. In this way, different agronomic data management platforms using IoT technologies are being developed, often driven by European Union initiatives. These platforms are a natural evolution of the so-called farm management systems to make them compatible with cloud computing [19,21,25]. FIWARE is an initiative of the European Union for the creation of a platform that helps the development of applications and solutions focused on the IoT [26]. FIWARE aims to create an open and sustainable ecosystem, based on public software standards.

Moreover, regarding water management in crops, which is the scope of this work, several approaches have been proposed in literature making a proper use of IoT technology for developing smart irrigation systems, some of them based on the use of FIWARE as well. In [27], an IoT system for smart energy consumption and irrigation was presented. The system decides the amount of water required by the crops according to the current moisture in soil and humidity (measured by mean of IoT sensors) and the time of the day. A similar approach was proposed in [28], but in this case, meteorological data were also considered to predict the water requirements based on a machine learning system. The most complete approach was the one proposed in [29], in which an IoT platform based on FIWARE was proposed for smart water management in agriculture taking into account water reserve, water distribution, and water consumption. However, all these works were mainly focused on the management of irrigation and on the distribution system considering only the public utility water network as the water source.

In this way, the main gaps observed in the literature according to the above review are the following ones:

- The management methods presented for distributed water networks so far only addressed the optimization of the transport water network, without taking into account water sources. Besides, they did not establish the way in which the different agents of the distributed network were interconnected.
- The works addressing the connection of non-conventional water sources as desalination facilities and consumer agents were focused on the optimal management of the desalination facilities, without considering other water sources in the problem. In addition, they were aimed at improving metrics related to the desalination process, but not to minimizing economic costs, which is very relevant for the correct implementation of this type of framework. Furthermore, they did not describe the way in which the agents are interconnected.
- The works related to enabling technologies such as IoT in the agricultural field were focused on improving the crops' performance, addressing aspects like the optimization of the irrigation system, or the development of platforms to improve the decision making. However, to the authors' knowledge, there are no works that discuss the use of these kinds of technologies for the effective management of agroindustrial districts in terms of water, which can be essential to optimize the performance of the new panorama that arises with the introduction of new water sources in the agricultural ecosystem.

To address the aforementioned issues, this work presents an IoT platform for the optimal management of the distributed water network of agroindustrial environments. The contributions of the work are three fold. First, a scalable IoT platform for the interconnection of the different agents composing the distributed water network is proposed. The IoT platform is based on FIWARE, and the architecture is fragmented into layers or services. Second, the IoT platform incorporates an MPC strategy tasked with optimizing the operational costs of the water network, taking into account the costs of the feed pump of the desalination facility and the costs of the water coming from the public utility network, while ensuring the water needs. Third, to demonstrate the effectiveness of the proposed approach, a case study based on three real plants located in Almería is used to carry out exhaustive simulation tests with non-optimal management methods.

The reminder of the document is organized as follows: Section 2 is dedicated to depicting the concept and problems of agroindustrial districts. Section 3 is aimed at presenting the basis of the proposed IoT platform, a general overview of it, and the description of the practical case study adopted. Section 4 presents and discusses the simulation results. Section 5 summarizes the conclusions obtained from the results and possible future work.

## 2. Agroindustrial District: Definition and Problems

Before presenting the IoT architecture, it is essential to define the agroindustrial district concept and the problems associated with this kind of system. The contemporary industrial district theory is owed to Giacomo Beccattini [30], who defined it as a territorial-partner entity characterized by the active presence of a community of people and a population of companies in a given geographical and historical space. Following this proposal, the term agroindustrial district was introduced as a district constituted by farms, processing companies, and supply companies located in a given territory. This environment is usually dominated by small and medium enterprises, specialized in one of the phases of the production chain. Among them, there are important relationships of the vertical type (between companies of different phases of the production process) and of the horizontal type (between companies of the same phase) or transversal (with supply and service companies).

In this synergy framework, there are systems with different objectives that depend on the needs of heterogeneous resources, both energy (electricity and heat/cold) and others (such as water and CO<sub>2</sub>). In addition, if renewable energy is included in this environment, it is necessary to manage conveniently the efficient use of all resources in each of the systems, as well as coordinate the flow between them. The research project Control and Optimal Management of Heterogeneous Resources in Agroindustrial production districts integrating renewable Energies (CHROMAE) ([www2.ual.es/chromae](http://www2.ual.es/chromae)), funded by the Spanish Ministry of Economy, Industry and Competitiveness and ERDF funds, is aimed at developing comprehensive, coordinated, and optimal management strategies for the heterogeneous resources required by the elements that make up an agroindustrial district. The different agents, resources, and interlinks considered in the CHROMAE project can be found at ([www2.ual.es/chromae](http://www2.ual.es/chromae)).

Although the present work is based on this project, it particularizes only the production phase of the agroindustrial sector, the most extended case in Almería. In this phase, the challenge was directly related to the optimal and efficient management of water, essential for crops. This resource must be managed, establishing as a main premise that the result of such optimal management produces an as small as possible environmental impact. Moreover, economic criteria must also be taken into account in the management problem. Another fact to consider and that should be added to the problem is that the different elements of the district are usually geographically separated. This requires the use of enabling technologies (such as IoT) to close the circle, interconnect different systems, and to manage all of them centrally.

## 3. The IoT Platform: Basis, Overview and Case Study Description

This section presents the main components of the IoT architecture developed for the optimal management of an agroindustrial district, as well as a general description of it and its application in a case study in Almería. In this way, the FIWARE platform and the MPC technique are firstly depicted. Then, an overview of the proposed platform is shown and described, and finally, the case study in Almería is developed.

### 3.1. FIWARE

FIWARE [26] is an IoT platform driven by the European Union. FIWARE presents a modular architecture based on open source components trying to form an open and sustainable ecosystem with the capacity to be adapted to different environments. This platform provides cloud capabilities based on OpenStack [31] including a series of libraries and tools known as Generic Enablers (GEs) [32],

which facilitate the creation of applications and services in IoT. These GEs offer Representational State Transfer (REST) and an Application Programming Interface (API) with public and free specifications, which allow the integration of third party software services, leading to an acceleration in the development of intelligent solutions, including data analysis and processing, persistence, and language interpreters, among others. The GEs are based on APIs that implement the Open Mobile Alliance (OMA) and Next-Generation Services Interface (NGSI) standards [33].

FIWARE is trying to promote a new standard for IoT. The main core of FIWARE, and mandatory for its use, is the enabler called the Orion Context Broker (OCB), which is responsible for managing context information. In this sense, context refers to the entire environment surrounding the IoT system, which is capable of producing relevant information for the development of the system. This context information is generated by different data sources such as a network of sensors, existing third party applications, actuators, and other devices. The following points describe some of the most important GEs of FIWARE [32]:

1. OCB: It is the intermediary between producers (publishers) and consumers (subscribers). The NGSI interface is a RESTful APIs service, which allows queries on the status of context information. This allows creating as many entities as sensors or set of sensors available in the system, allowing collecting information in real time.
2. Cygnus: It is the GE in charge of persisting context information, and it is based on Apache Flume. Cygnus allows making a copy of the data simultaneously in different databases that include: MySQL, MongoDB, PostgreSQL, or Big Data platforms such as Hadoop or Spark. In this way, subscriptions are made to OCB entities, which notify the system of a change to store the data.
3. Intelligence Data Advanced Solution (IDAS): This GE acts as a language interpreter between the different communication protocols used in IoT to the NGSI standard. The communication protocols available are LightweightM2M (LWM2M) over Constrained Application Protocol (CoAP), JavaScript Object Notation (JSON), or UltraLight over Hypertext Transfer Protocol (HTTP)/Message Queue Telemetry Transport protocol (MQTT), or Object Linking and Embedding for Process Control-Unified Architecture (OPC-UA).
4. Wilma: It is in charge of guaranteeing the security of the system since it provides functions to act as a proxy within Open authorization Authentication schemes (OAuth2).
5. Perseus: This GE defines a set of rules in OCB, which makes a notification to the system or end user by means of Short Message Service (SMS), emails, or HTTP requests.

### 3.2. MPC Technique

MPC is one of the most general ways of formulating a control problem. This methodology is not an explicit control technique, but rather, it involves a family of control methods based on the use of a model of the system to obtain the control signals by minimizing a given cost function [34]. The methodology can be explained according to Figure 1 and the points below:

1. The outputs of the process are predicted at each sampling time  $t$  along a given prediction horizon  $N$ , by using a model of the system. The predicted outputs, denoted by  $\hat{x}(t+j|t)$  for  $j = 1, \dots, N$ , depend on past outputs, inputs, and disturbances and on the value of future control actions  $u(t+j-1|t)$  for  $j = 1, \dots, N$ . Note that the notation  $(t+j|t)$  is related to the predicted value of a variable at the instant time  $t+j$ , calculated with the information available at instant  $t$ .
2. The set of future control actions is calculated by minimizing a determined cost function.
3. The control signal  $u(t|t)$  is sent to the process while the rest of the control actions are rejected because at the next sampling time,  $\hat{x}(t+1)$  will be known, allowing repeating the first step with the updated information. This methodology is known as the receding horizon concept.



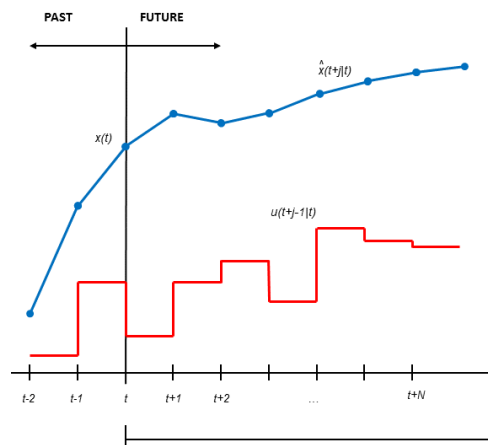


Figure 1. MPC strategy.

It should be noted that this methodology is especially suitable for being applied in the IoT platform as it allows developing an easy control law with very limited knowledge and information of the different agents composing the distributed water network. The MPC strategy only requires the model of the system at hand, which is intrinsic controller information, and the required information to execute it for the calculation of the optimal control signals [34].

### 3.3. IoT-Architecture

The proposed architecture for the IoT platform can be described as a pyramidal diagram as shown in Figure 2. As can be seen, this architecture is divided into three layers that are independent of each other, allowing adding or removing services without affecting the operation of the previous layer. It is based on a back end architecture, front end, and context generators.

This architecture is defined as a cloud architecture that encompasses storage functionalities, a platform as a service, and connectivity. This kind of architecture allows the user to detach specific software or custom developments to integrate it with the system. The objective is to be able to perform services and microservices between different components of the cloud architecture. It is divided into two large back end and front end sections, which are in turn interconnected through virtual networks or the Internet. There are other parts of cloud architectures that are used, such as middleware, among other resources. The architecture can be explained according to the following points:

- Layer 0, context producers in Figure 2: IoT systems need devices that provide the data needed for ecosystem management. The IoT consists of a physical device or a network of physical devices capable of exchanging data, informing the environment to which they belong. Each device consists of an integrated microcontroller and software that can act as a sensor or actuator. The sensors are in charge of sending information about the state of certain elements available in their environment, and the actuators are in charge of carrying out actions that are directly interconnected with the data provided by the sensors. Each device is uniquely identified through the built-in computer system, but can also be identified as belonging to an existing Internet infrastructure or device network. As already mentioned, FIWARE is a system based on managing context information. The term context, applied to an intelligent Internet solution of things, is associated with the set of related elements capable of reporting the state in which the system is. Each IoT element will be represented as a unique entity within the context. IoT devices can range from simple to complex devices such as temperature, humidity, or radiation sensors or relays as actuators to launch orders.
- Layer 1, back end in Figure 2: It is the data access layer also known as the logical part of an application. It is located facing the server and is responsible for managing all services related to the data. In the back end, all the system tasks are performed, such as numerical calculations,

security layer management, data access, REST services, and databases, among others. The main objective and benefit of having a back end decoupled from an application or simple architecture is the possibility of making different developments without affecting the functionality by improving the security of the system, the possibility of rescaling the service depending on the needs of the client, generating REST services allowing the back end information to interact with any client or service. In this work, the back end is formed by seven services, each independent of the others, but at the same time, forming a functional architecture. These services range from interpreters of communication protocols between sensors and the system itself, elements responsible for information management, databases, REST services, and processes responsible for process control.

- Layer 2, front end in Figure 2: This is the layer linked to the client, and therefore, it is in charge of the visualization of all the data. It is composed by a set of technologies that form the structure and design of the application. The most used programming languages for the development of this layer are JavaScript and PHP, as well as languages based on design and layout, such as HTML and CSS.

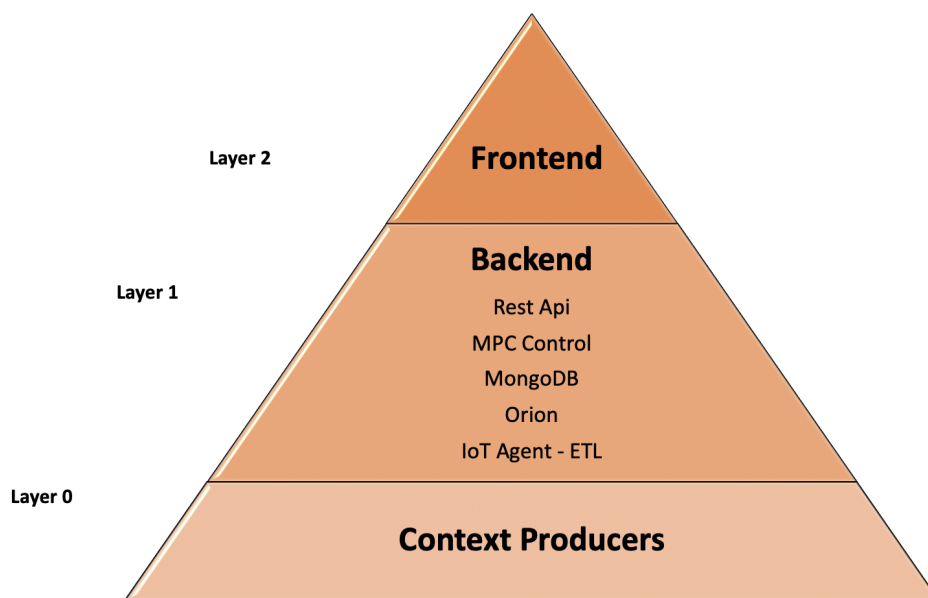


Figure 2. IoT platform as a pyramidal diagram.

### 3.4. Case Study in Almería

In order to evidence the results that can be achieved with the application of the proposed platform, a case study based on three real facilities located in Almería was used. The schematic diagram of the case study is shown in Figure 3, and it was used to represent an agroindustrial district composed by several consumers agents (i.e., three greenhouses and an office building) and two water sources (i.e., a solar desalination plant and the water public utility network). Note that this small scale agroindustrial district was chosen to be representative of an industrial scale one and allow visualizing the results in a simple way. The plants included in the district are described in the following subsections.

It should be remarked that in the following subsections, the real location of the plants is established, but in real cases of application, the desalination plant should be located on the coast and the building near the greenhouses.

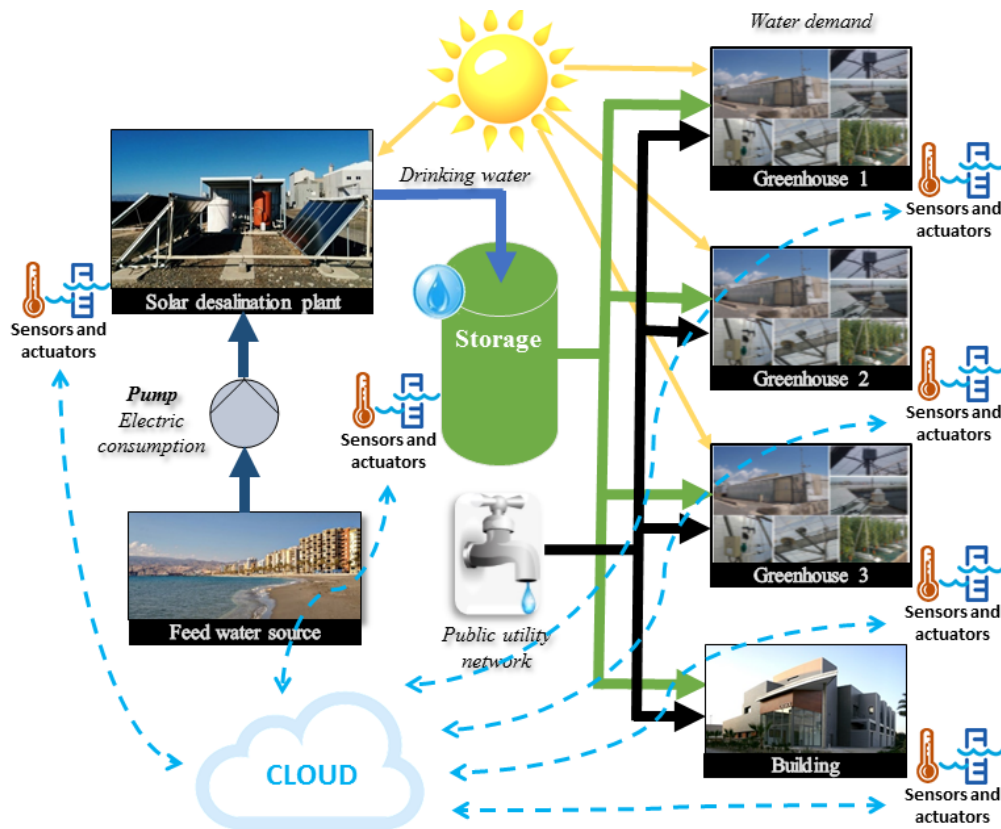


Figure 3. Layout of the case study.

### 3.4.1. Solar Desalination Plant

The solar desalination plant used as a reference in the case study was based on the Solar Membrane Distillation (SMD) facility at the Plataforma Solar de Almería (PSA, [www.psa.es](http://www.psa.es)), in southeast Spain. A real image of the plant is included in Figure 3. This facility was fully described in [35], and it is comprised of a solar field, which is responsible for providing the thermal power required by the Membrane Distillation (MD) procedure, several MD modules, and a heat exchanger connecting both systems. The plant is totally controlled, monitoring the main variables of the distillation procedure as pressure, temperature, and flow rate. It should be commented that for the present work, it was assumed that all the control and measurement systems were based on the IoT paradigm, and they were able to receive and send information directly from or to the cloud (see Figure 3).

As stated in [10], an industrial scale MD plant (as the one used in this work) must be composed of an array of MD modules since the production of current commercial MD modules is still relatively low, around 30 L/h in optimal operating conditions. Thus, each singular MD module was connected to the array composing the overall desalination unit, as was presented in [36], so that each MD module could be turned on/off depending on the state of the valves, which allowed us to adjust the distillate production to the water demand, thus obtaining economical savings in the operation of the feed water pump. In particular, the MD module used in this work was the Aquastill one, which was totally described in [10]. As reported in that work, the module had a limited operating range in terms of temperature and feed flow rate. The temperature at the inlet of the evaporator channel of the MD module could vary between 60 and 80 °C, whereas the flow rate between 400 and 600 L/h.

The feed solution enters through the condenser channel of the MD module, where it is preheated with the latent heat that crosses the membrane. Then, it is driven to the heat exchanger where the feed solution is heated with the fluid coming from the solar field. At last, the heated solution is flowed to the evaporator channel of the MD module, where the volatile molecules of the solution are evaporated and pass through the membrane, whereas the non-volatile ones are rejected in the form of brine. It should

be remarked that in this work, it was assumed that the feed solution was water coming from the Mediterranean sea at 35 g/L (mean salinity).

For the application of the MPC technique, a model of the desalination unit is required in order to predict its total distillate production ( $D_T$ ). As was presented in [10], the Aquastill module could be easily modeled by means of a polynomial equation based on empirical data. In this work, the same model was used, but it was modified by introducing binary variables ( $\delta_i$  with  $i = 1, \dots, N_{MD}$  where  $N_{MD}$  is the number of MD modules in the array fixed at 30) related to the position of the valves of each MD module  $i$ , assuming a value of zero when the MD module is turned off and one otherwise. In this way, the total distillate production of the overall desalination unit can be calculated as:

$$D_T(t) = \sum_{i=1}^{N_{MD}} [(3.24 + 0.072 \cdot T_{cs,out}(t) - 0.4896 \cdot T_{feed}(t)) \cdot (1 - \delta_i(t)) + (-0.024 \cdot F(t) + 0.0096 \cdot T_{cs,out}(t) \cdot F(t)) \cdot \delta_i(t)], \quad (1)$$

where all the terms of the equation are in L/h and all the variables are presented in Appendix A. It should be noted that, when an MD module is turned on, it is operated at its maximum operating range in terms of feed flow rate (i.e.,  $F(t) = 600$  L/h), which is its optimal operating point [10]. In this way, all the variables in the previous equation are constant and known, except  $\delta_i$  with  $i = 1, \dots, N_{MD}$ , which are computed by means of the MPC technique.

Moreover, as the MPC technique is aimed at reducing costs, the operating cost associated with the operation of the feed water pump must be estimated. For this aim, the electric power consumption of the feed water pump was calculated making use of the characteristic pump curve supplied by the manufacturer. The same pump as the one in [37] was used, whose characteristic curve is given by:

$$P_f(t) = 22.72 \cdot c_1 \cdot \sum_{i=1}^{N_{MD}} [F(t) \cdot \delta_i(t)] + 39.54, \quad (2)$$

where  $c_1$  is a conversion factor to transform L/h into  $m^3/s$  so that all the terms of the equation are in kW. Note that the summation term was used to take into account all the MD modules as the total feed water flow rate was equal to the sum of feed flow rate of all the modules.

It should be remarked that this model must be executed in the cloud, integrated in the MPC strategy of the IoT architecture. For this reason, it is important to note that the information exchanged between the plant and the cloud was minimum because of the way in which the models were posed. The plant had to send information only about the temperature at the outlet of the heat exchanger for the cold side ( $T_{cs,out}$ ) and the feed temperature ( $T_{feed}$ ), and it had to receive information only about  $\delta_i$  variables, with  $i = 1, \dots, N_{MD}$ . Moreover, as the MD modules in the array were identical, the value of these variables could be given only using an integer variable ( $NMD$ ) that contains the number of modules turned on at each sampling time, that is:

$$NMD = \sum_{i=1}^{N_{MD}} \delta_i. \quad (3)$$

Notice also that the desalination facility was connected to a storage tank. The use of this device in this kind of systems is natural, as water is a resource that can be stored. In this way, the storage device acted as an integrator system, helping to smooth the water demands, and for this reason, its level ( $L$ ) must also be sent to the IoT platform. This tank could be directly used or connected to the water distribution network.

### 3.4.2. Greenhouses

The greenhouse environments included in the case study were based on the pilot greenhouse located at Experimental Station of the Cajamar Foundation (also located in southeast Spain, 40 km

from the PSA), and real images of this facility can be seen in Figure 3. This pilot plant is formed by a multi-span “Parral-type” greenhouse with E-W orientation. The total surface area of the facility is 821 m<sup>2</sup>, among which 616 m<sup>2</sup> are effective cultivation area. The cover of the greenhouse is polyethylene, and it includes an automatic ventilation system with side windows on the south and north walls. In addition, the greenhouse is equipped with a diesel arothermal system, a biomass fueled heating system, a humidification/dehumidification system, and LED lights. The crop grows in rows with N-S-orientation, inside coconut coir bags, with three droppers and six plants each. The irrigation is performed by means of a demand tray system, which applies the irrigation to the crop periodically throughout each day. In [38], a more detailed description and explanation of the greenhouse environment can be found.

As in the desalination plant, the greenhouse was totally controlled and monitored, measuring variables such as solar irradiance, relative humidity, air temperature, CO<sub>2</sub>, wind direction and speed, and soil and cover temperature. For the purpose of this work, the greenhouses had to send information about their water requirements, which could be estimated by using well known models already presented in literature and based on the aforementioned measured variables, as was done in [10]. Thus, the IoT platform received information about the water needs of Greenhouses 1, 2, and 3 ( $D_{GH1}$ ,  $D_{GH2}$ ,  $D_{GH3}$ , respectively), and based on this information and according to the water production of the desalination plant ( $D_T$ ) and the level of the intermediate tank ( $L$ ), it had to decide the amount of water from the desalination plant and the public utility network used to cover the requirements of each greenhouse. Therefore, the IoT platform had to send the variables  $PN2GH1$  and  $DP2GH1$ ,  $PN2GH2$  and  $DP2GH2$ , and  $PN2GH3$  and  $DP2GH3$ , which were the water coming from the public utility network and the water coming from the desalination plant for Greenhouses 1, 2, and 3, respectively.

Note that for the simulations, it was assumed that the greenhouses had a tomato crop in a state of growth, with a Leaf Area Index (LAI) of 5.5 and in full production.

#### 3.4.3. Office Building

The office building incorporated in the case study was based on the Centro de Investigación de la Energía Solar (CIESOL) building ([www.ciesol.es](http://www.ciesol.es)) located at the University of Almería campus, also in south east Spain, 20 km away from PSA. This building had a total surface area of 1071.91 m<sup>2</sup> distributed into two floors. In addition, as in the other facilities composing the case study, CIESOL had a net of sensors to monitor the main variables affecting the building such as temperature, electricity, and water consumption. More details about the building can be found elsewhere [39].

For the management of the water network of the case study, the building had to send its water requirements ( $D_{OB}$ ) to the IoT platform, and as happened with the greenhouses, the IoT platform had to send to the building the amount of water coming from the desalination plant ( $DP2OB$ ) and the public utility network ( $PN2OB$ ).

#### 3.5. Application of the IoT Platform to the Case Study

The architecture proposed in this paper for the management of the agroindustrial district presented above in terms of water is shown in Figure 4. As mentioned in Section 3.3, it was divided into three layers: context producers, back end, and front end. It is important to remark that the proposed architecture was based on that already developed for the IoF2020UC4.2 Vegetables project [40,41], with the particularity of applying control techniques, among other data extraction functionalities adapted to this system.

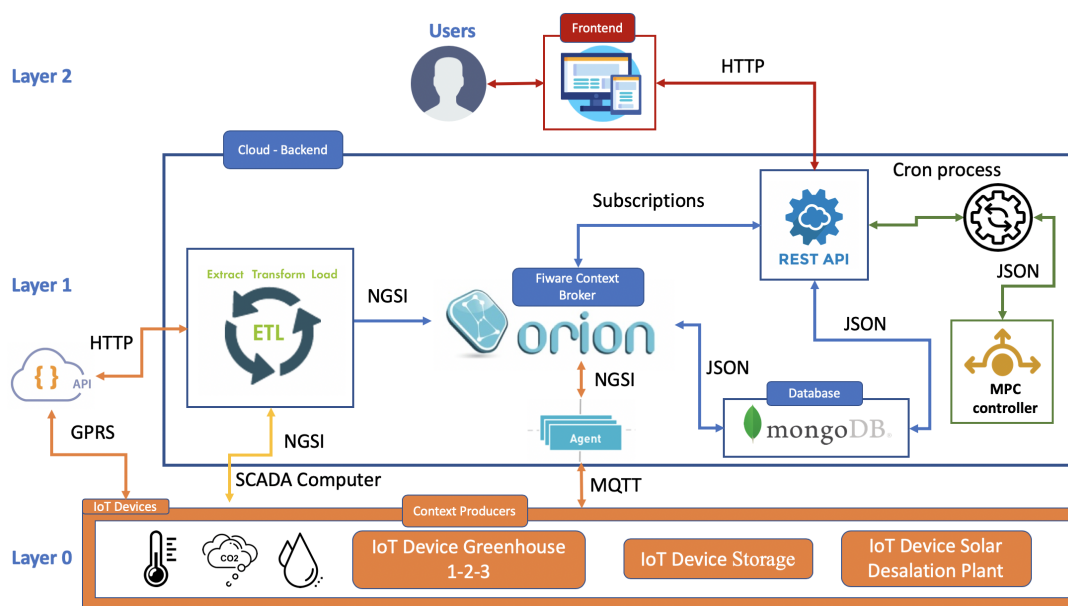


Figure 4. Architecture of the IoT platform.

### 3.5.1. Layer 0 Context Producers

All the devices and elements in charge of generating context information were available in this layer. Different kind of actuators and sensors were available in each plant forming the agroindustrial district. These sensors were connected to different commercial IoT stations or data acquisition systems. There were six types of context information production scenarios distributed in different parts of the proposed scenario: a solar desalination plant, three Parral-type greenhouses, an office building, and a water storage device. These facilities sent the measurements collected by the sensors to the cloud through the MQTT or HTTP requests, depending on the data extraction format. MQTT is one of the most extended communication protocols used in the IoT paradigm due to its lightness and simplicity, which are mainly produced by the power limitations in the devices and the bandwidth. It is based on the Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP) protocol, which reuses already open connections, unlike the HTTP 1.0 protocol, which makes new connections. Its operation is based on push messaging as editor/subscriber and themes. In addition, it has a central broker that manages the registration of the client's connections, allowing subscriptions to different topics. On the one hand, MQTT will be used for sending smart sensors to OCB; on the other hand, HTTP will be used for sending data from the acquisition systems to OCB.

### 3.5.2. Layer 1 Backend

This section describes the layer in charge of managing all the operations of the IoT system. Each of the services that make up this data layer was independent of the others, thus allowing updates and developments without affecting the performance and stability of the system. It was formed by a set of services that interacted with each other to form the ecosystem based on FIWARE:

- **Extract context information:** This service is responsible for extracting, transforming, and sending the data to the IoT system. There are two services called IDAS (represented by the block agent in Figure 4) and Extract, Transform, and Load (ETL), responsible for translating the information that comes from the sensors to the NGSI standard (see Figure 4). The objective of having two interpretation systems is to provide a solution that is as complete as possible. The context information can come from three data sources: commercial systems with their own REST services (represented in the form of a cloud API in Figure 4 based on General Packet Radio Service (GPRS) communication), data acquisition systems connected to a PC, and smart sensors prepared to send these data to the cloud. Commercial stations are available from the following manufacturers:



Hortisys of the Hispatec model, iMetos of the Pessl model, iMetos ECO D3, and the Hops model. The first service called ETL (see Figure 4) is responsible for extracting data from REST services of commercial stations or data acquisition systems connected to a PC, making the transformation to the NGSI standard, and then, sending it directly to OCB. The second service called IDAS (represented by the block agent in Figure 4) is an enabler developed by FIWARE, which comes into use in the case of having intelligent sensors sending data directly to OCB, performing the function of interpreting the MQTT communication protocol that these sensors use for the FIWARE NGSI standard.

- OCB: It is the core of the architecture (see Figure 4), and it is tasked with handling the context information. It acts as an intermediary between producers (publishers) and consumers (subscribers). It is based on the NGSI specification defined by OMA. The data model is based on entities, attributes, and metadata. There are six entities for each of the context producers: solar desalination plant, water storage tank, Greenhouse 1, Greenhouse 2, Greenhouse 3, and finally, office building. Table 1 shows exclusively each of the entities with their respective attributes and metadata necessary to perform the MPC technique. In addition, each of these entities has a set of sensors and actuators, sending the information to OCB. In Table 1, the internal attributes can be seen of the variables generated by these entities with the needs of the system, while the controller external attributes column includes those variables generated when applying the MPC techniques (each of these variables are explained in the Section 3.4). The objective of including the controller external attributes within the entity is to be able to link the system actuator with this attribute, allowing the action to be performed directly. This fact creates a new entity MPC controller. To differentiate between different types of stations in the same entity, FIWARE-Service and FIWARE-ServicePath are used, permitting hierarchical scopes in the same entity. The first element defines the name of the plant, whereas the second one, the name of the station or set of sensors. Each one of the sensors is detailed independently with its name and value in the attributes. Within these attributes, metadata are available, giving the possibility of creating fields such as the date when reading data and the common name, among others.
- REST API services: There are two types of services, one in charge of carrying out the persistence of the data and the other that manages the requests on behalf of the client. These two services are encapsulated within the REST API module (see Figure 4). As mentioned above, OCB allows entities to subscribe, and this is because the first REST service carries out a series of subscriptions to each of the available entities. When one of these entities undergoes a change in any of its attributes, this will be notified to all the services subscribed to the entity. An HTTP request will be sent to the persistence service, which will check if the data and date already exist in the system before saving the measurement. The second service offers a REST API, which is exposed to the end user through an application. The end user will make the necessary requests to the system, and it will return the requested response in JSON format.
- Cron process: This service is a Unix cron process (see Figure 4) designed to run periodically every 15 min. Its objective is to retrieve the data from the previous REST service in charge of obtaining the database information and send it to the controller to perform the MPC control technique. Once the controller finishes the execution, this same service sends the parameters of Table 1's controller external attributes column to its corresponding entity, updating the OCB information and thus the actuator with the new execution parameters. When there is a subscription to each entity, it notifies again a change to the REST service in charge of persisting the information and performs the action of saving in the database.
- MPC controller: This is the service in charge of carrying out the optimal management of the water resources (see Section 3.4). This service (see Figure 4) is controlled by a cron process and allows consulting the needs of each system through the REST service and inserting the new instructions in the control column of the external attributes of each entity (see Table 1). All the details about the implementation of the MPC controller are presented in Appendix B.

- Database: This architecture is supported by a non-relational database. It is based on MongoDB (see Figure 4), which allows managing a large volume of data, easy scalability, and a dynamic data model. The latter is essential in this architecture, as it allows adding or removing sensors from each entity without the risk of affecting the operation of the system.

**Table 1.** Entities of OCB FIWARE required for MPC control.

Entities	Internal Attributes	Controller External Attributes	Metadata
Solar desalination plant	$T_{cs,out}, T_{feed}$	$NMD$	Common name, Unix date
Water storage tank	$L$	-	Common name, Unix date
Greenhouse 1	$D_{GH1}$	$PN2GH1, DP2GH1$	Common name, Unix date
Greenhouse 2	$D_{GH2}$	$PN2GH2, DP2GH2$	Common name, Unix date
Greenhouse 3	$D_{GH3}$	$PN2GH3, DP2GH3$	Common name, Unix date
Office Building	$D_{OB}$	$PN2OB, DP2OB$	Common name, Unix date

### 3.5.3. Layer 2 Front End

This is the data visualization layer. The user makes the necessary requests to the system from this service. The objective of separating the front end as an independent service is to give versatility to the system of creating a web, desktop, or hybrid application. Any changes made to the application do not affect the operation of the IoT system.

## 4. Results and Discussion

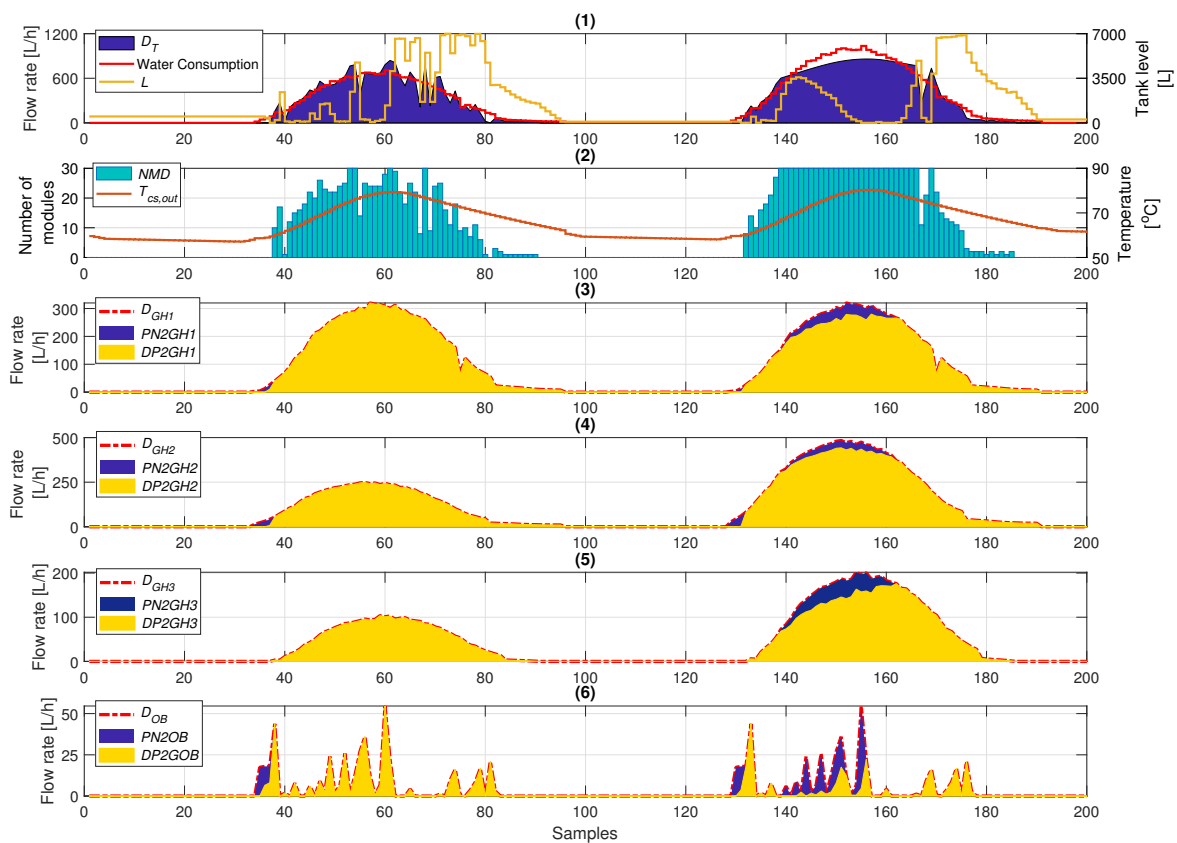
### 4.1. Simulation Results

To evidence the results that could be attained with the application of the designed IoT platform in an agroindustrial district, a simulation was carried out in MATLAB 2018b with the YALMIP toolbox. To perform the simulation, real Meteorological data from PSA and from Experimental Station of Cajamar Foundation on the day 20 July 2017 were used. The models of the desalination plant and the greenhouses presented in [37,38] respectively were simulated with the actual meteorological data to obtain  $T_{cs,out}$  and  $D_{GH1}$  and  $D_{GH2}$  and  $D_{GH3}$ . Moreover, in order to add difficulty to the management problem, different sizes were used for simulating the greenhouses, so that the size of Greenhouses 1 and 2 was fixed at 1 ha, whereas that of Greenhouse 3 at 0.5 ha. Besides, the irradiance data for Greenhouse 3 were shifted forward 15 min in the simulations. Conversely, real water consumption data of the aforementioned day from CIESOL building were used for  $D_{OB}$ . These data were also scaled considering a building with a surface area of 400 m<sup>2</sup>. Notice that to test the proposed strategy, two days were simulated duplicating the data, but augmenting the irradiance profiles used for simulating Greenhouses 2 and 3 in the second day in order to augment their water demand.

The configuration parameters of the MPC controller were set as: (i) sampling time ( $T_s$ ) fixed at 15 min, which was chosen taking into account the dynamics of the office building, desalination, and greenhouses, and (ii) prediction horizon ( $N$ ) fixed at six. Note that the prediction horizon must be selected large enough in order to catch the process transients. However, it should be taken into account that as the prediction horizon ( $N$ ) increases, so does the amount of decision variables included in the optimization problem and, therefore, the computational time. For this reason, the prediction horizon was chosen considering a tradeoff between these two issues and after exhaustive simulations.

The results obtained from the simulations are presented in Figure 5. It is worth noting that the costs related to the water coming from the public utility network are higher than those related to the operation of the feed pump of the desalination plant, even when all the MD modules are in operation. Therefore, the optimal management consists of feeding the consumer agents by the desalination plant whenever possible. In this way, at the end of the day, the storage tank level must be zero or very close to this value. Consequently, the initial state of the storage tank level was set to 50 L (see Figure 5(1)).





**Figure 5.** Simulation results. All the variables are according to Appendix A.

In this way, around Sample 34, the office building started demanding water (see Figure 5(6)), and in Sample 35, also Greenhouses 1 and 2 (see Figure 5(3),(4)). Nevertheless, as the temperature  $T_{cs,out}$  was below  $T^*$  at that moment (see Figure 5(2)), the desalination plant could not still produce fresh water, and the water requirements were met by the remaining water in the tank and water coming from the water utility public network. At Sample 37, the temperature  $T_{cs,out}$  was above  $T^*$ , and the desalination plant was turned on by the MPC controller (see Figure 5(2)). For the rest of the operation on this day, the greenhouse water necessities and the ones of the office building were satisfied by the desalination plant. The benefit of using an MPC controller was especially shown at the end of the day. In that moment, and before  $T_{cs,out}$  reaching  $T^*$ , the MPC controller increased the amount of modules turned on (see Sample 70 in Figure 5(2)) trying to augment the water stored in the tank, thus avoiding the use of water coming from the public utility network when all the MD modules were turned off.

In the second operating day, the beginning of the operation was similar to that from the previous day, but on this occasion, there was no water left in the storage tank, so that only water coming from the public utility network was used to fulfil the water needs. Moreover, as shown in Figure 5(3),(4), the water necessities of Greenhouses 2 and 3 were higher than in the first operating day. This fact caused the MPC controller to turn on all the MD modules included in the array (see Figure 5(2)). However, the water production of the desalination facility was not enough to fulfil the water needs, and for this reason, the water production was complemented with water coming from the public utility network, as shown in Figure 5(3)–(6). Finally, at the end of the day, the same fact happened as in the first day: the water level of the tank was increased to meet the water needs without using the public utility network when the desalination plant was turned off.

#### 4.2. Comparative Operating Cost Analysis

To illustrate the benefits achieved in terms of operating costs with the application of the proposed IoT platform in real agroindustrial districts, the results shown in the previous subsection were compared to those obtained using a manual operation. The manual operation consisted of turning on all the MD modules as long as  $T_{cs,out}$  was higher than  $T^*$ , which was not optimal from the point of view of the operation of the desalination plant, as it was producing more water than necessary and, therefore, consuming more electricity (increasing costs). The results are presented in Table 2.

**Table 2.** Comparative operating cost results. TPNC is the total operating cost associated to the water coming from the public utility network; TDPC is the total operating cost of the desalination facility; TC is the Total Cost; and SC is the Specific Cost, that is the cost per unit of water demanded in the agroindustrial district.

Management Method	TPNC (€)	TDPC (€)	TC (€)	SC (€/m <sup>3</sup> )
IoT platform	2.60	3.01	5.61	0.44
Manual	18.70	0.20	18.90	1.51

As can be seen, the economic savings were considerable. The costs associated with the operation of the desalination facility were reduced by 87%, whereas the total costs by 75% with the use of the proposed method. This was directly reflected in the specific cost of the water demanded, as it can be seen in Table 2 how with the application of the proposed method, the cost per unit of water demanded was 0.44 €/m<sup>3</sup>, whereas by using a non-optimal manual procedure, the cost was 1.51 €/m<sup>3</sup>.

#### 5. Conclusions

This work addressed the development of an IoT based water management architecture to be applied in agroindustrial districts including desalination plants, connection to the public utility network, and several consumer agents. The core of the platform was based on the use of FIWARE and an MPC controller that reflected the operational strategy in real time. Simulation tests using a case study based on three real facilities located in Almería were performed. The obtained results allowed us to draw the following conclusions:

1. The use of enabling technologies such as IoT on agroindustrial districts could be an effective tool to carry out the optimal management of the heterogeneous resources required by the elements that make up these environments.
2. In particular, the application of the proposed method to the case study demonstrated how an optimal management of the water resources could be done, adapting the water production of the desalination plant to the water demand of the consumer agents and minimizing the use of water coming from the public utility network, thus making a proper use of desalination facilities.
3. The comparative cost analysis performed with a manual operation showed how around 75% of the operational cost could be saved. In this way, the cost per unit of water demanded in the agroindustrial district was reduced with the application of the proposed strategy from 1.51 €/m<sup>3</sup> (cost of the manual operation) to 0.44 €/m<sup>3</sup>. This could be very relevant to maintain the economic sustainability of the agricultural system of Almería.

In relation to future work, the speed of computing and latency when replicating the control system on edge computing versus the current cloud computing could be compared. In this way, it would be possible to detect which system performs better control and what the response times would be. Furthermore, it would be interesting to carry out an economic viability analysis taking into account the different IoT systems, transport infrastructures, and desalination costs.

**Author Contributions:** J.D.G. and M.M. carried out most of the work presented in this paper. J.D.G. contributed to the paper in the sections related to the control system and M.M. to developing the IoT architecture of the system. F.R. contributed with the greenhouse knowledge and shared the greenhouse experimental data. L.R. contributed with the solar desalination plant knowledge and shared the experimental data. M.B. contributed to the control strategy. All of the authors participated in the manuscript revision. All authors read and agreed to the published version of the manuscript.

**Funding:** This work was funded by the IoF2020 Horizon 2020 Framework Programme of the European Union (Grant Agreement No. 731884) and by the Spanish R+D+i Plan Project DPI2017-85007-R of the Ministry of Economy, Industry and Competitiveness and ERDF funds. Juan D. Gil is supported by an FPIFellowship from the University of Almería.

**Acknowledgments:** The authors would to thank to Plataforma Solar de Almería, Experimental Station of the Cajamar foundation, and CIESOL Center for facilitating real data of their facilities.

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

## Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

CIESOL	Centro de Investigación de la Energía Solar
CoAP	Constrained Application Protocol
CHROMAE	Control and Optimal Management of Heterogeneous Resources in Agroindustrial production districts integrating renewable Energies
ETL	Extract, Transform, and Load
GEs	Generic Enablers
GPRS	General Packet Radio Service
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
ICT	Information and Communication Technology
IDAS	Intelligence Data Advanced Solution
IoT	Internet of Things
JSON	JavaScript Object Notation
LAI	Leaf Area Index
LWM2M	LightweightM2M
MD	Membrane Distillation
MPC	Model Predictive Control
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
NGSI	Next Generation Services Interface
OAuth2	Open Authorization
OCB	Orion Context Broker
OPC-UA	Object Linking and Embedding for Process Control-Unified Architecture
OMA	Open Mobile Alliance
PA	Precision Agriculture
PSA	Plataforma Solar de Almería
SMS	Short Message Service
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol

## Appendix A

### Nomenclature

Variable	Description	Value and Units
$c_1$	Conversion factor to transform L/h into m <sup>3</sup> /s	$2.7 \cdot 10^{-7}$ m <sup>3</sup> ·h/(L·s)
$c_2$	Conversion factor to transform min into h	0.016 h/min
$c_3$	Conversion factor to transform L/h into m <sup>3</sup> /min	$1.63 \cdot 10^{-5}$ m <sup>3</sup> ·h/(L·min)
$C_{PN}$	Total cost associated to the operation of the feed water pump of the desalination facility	€
$C_{PN}$	Total cost of the water coming from the public utility network	€
$D_T$	Total distillate production of the desalination plant	L/h
$D_{GH1}$	Water demand of Greenhouse 1	L/h
$D_{GH2}$	Water demand of Greenhouse 2	L/h
$D_{GH3}$	Water demand of Greenhouse 3	L/h
$D_{OB}$	Water demand of the office building	L/h
$DP2GH1$	Water coming from the desalination plant to Greenhouse 1	L/h
$DP2GH2$	Water coming from the desalination plant to Greenhouse 2	L/h
$DP2GH3$	Water coming from the desalination plant to Greenhouse 3	L/h
$DP2OB$	Water coming from the desalination plant to the office building	L/h
$E_p$	Electricity price	0.14 €/kWh
$F$	Feed flow rate	L/h
$L$	Water level of the storage tank	L
$L_{min}$	Minimum water level of the storage tank	L
$L_{max}$	Maximum water level of the storage tank	L
$N_{MD}$	Number of MD modules in the desalination unit	30
$m$	Constant 1 used in the MPC problem	−1000
$M$	Constant 2 used in the MPC problem	1000
$NMD$	Integer variable containing the number of MD modules turned on at each sampling time	-
$P_f$	Power consumption of the feed water pump of the desalination plant	kW
$PN2GH1$	Water coming from the public utility network to Greenhouse 1	L/h
$PN2GH2$	Water coming from the public utility network to Greenhouse 2	L/h
$PN2GH3$	Water coming from the public utility network to Greenhouse 3	L/h
$PN2OB$	Water coming from the public utility network to the office building	L/h
$T_{cs,out}$	Temperature at the outlet of the heat exchanger, cold side	°C
$T_{feed}$	Feed water temperature	°C
$T_s$	Sampling time	15 min
$T^*$	Minimum temperature required to operate the desalination plant	60 °C
$W_p$	Price of water coming from the public utility network	0.50 €/kWh
$\beta_i$	Auxiliary binary variable used in the MPC problem related to the valve position of each MD module $i$	0–1
$\delta_i$	Valve position of each MD module $i$	0–1
$\gamma$	Auxiliary binary variable used in the MPC problem related to the operational constraints	0–1

## Appendix B.

### MPC Control Formulation

The MPC control problem to be solved at each sampling time can be posed as a Mixed Integer Linear Programming (MILP) optimization problem as follows:

$$\min J = \sum_{j=1}^N [\hat{C}_{PN}(t+j|t) + \hat{C}_{DP}(t+j|t)], \quad (A1)$$

subjected to  $\forall j = 1, \dots, N$ :

$$\hat{D}_T(t+j|t) = \sum_{MDi=1}^N [(3.24 + 0.072 \cdot \hat{T}_{cs,out}(t+j|t) - 0.4896 \cdot \hat{T}_{feed}(t+j|t)) \cdot (1 - \beta_i(t+j-1|t)) + (-0.024 \cdot F(t+j-1|t) + 0.0096 \cdot \hat{T}_{cs,out}(t+j|t) \cdot F(t+j-1|t)) \cdot \beta_i(t+j-1|t)], \quad (A2)$$

$$\beta_i(t+j-1|t) \in \{0, 1\}, \quad \forall i = 1, \dots, N_{MD}, \quad (A3)$$

$$-m \cdot \gamma(t+j-1|t) \leq (\hat{T}_{cs,out}(t+j|t) - T^*) - m, \quad (A4)$$

$$-M \cdot \gamma(t+j-1|t) \leq -(\hat{T}_{cs,out}(t+j|t) - T^*), \quad (A5)$$

$$\gamma(t+j-1|t) \in \{0, 1\}, \quad (A6)$$

$$-\beta_i(t+j-1|t) + \delta_i(t+j-1|t) \leq 0, \quad \forall i = 1, \dots, N_{MD}, \quad (A7)$$

$$-\gamma(t+j-1|t) + \delta_i(t+j-1|t) \leq 0, \quad \forall i = 1, \dots, N_{MD}, \quad (A8)$$

$$\beta_i(t+j-1|t) + \gamma(t+j-1|t) - \delta_i(t+j-1|t) \leq 1, \quad \forall i = 1, \dots, N_{MD}, \quad (A9)$$

$$\delta_i(t+j-1|t) \in \{0, 1\}, \quad \forall i = 1, \dots, N_{MD}, \quad (A10)$$

$$\hat{L}(t+j|t) = \hat{L}(t+j-1|t) + c_2 \cdot T_s \cdot [\hat{D}_T(t+j|t) - DP2\hat{GH1}(t+j|t) - DP2\hat{GH2}(t+j|t) - DP2\hat{GH3}(t+j|t) - DP2\hat{GOB}(t+j|t)], \quad (A11)$$

$$L_{min} \leq \hat{L}(t+j|t) \leq L_{max}, \quad (A12)$$

$$\hat{D}_{GH1}(t+j|t) = DP2\hat{GH1}(t+j|t) + PN2\hat{GH1}(t+j|t), \quad (A13)$$

$$\hat{D}_{GH2}(t+j|t) = DP2\hat{GH2}(t+j|t) + PN2\hat{GH2}(t+j|t), \quad (A14)$$

$$\hat{D}_{GH3}(t+j|t) = DP2\hat{GH3}(t+j|t) + PN2\hat{GH3}(t+j|t), \quad (A15)$$

$$\hat{D}_{OB}(t+j|t) = DP2\hat{GOB}(t+j|t) + PN2\hat{GOB}(t+j|t), \quad (A16)$$

$$\hat{C}_{DP}(t+j|t) = (22.72 \cdot c_1 \cdot \sum_{i=1}^{N_{MD}} [F(t+j-1|t) \cdot \delta_i(t+j-1|t)] + 39.54) \cdot T_s \cdot c_2 \cdot E_p, \quad (A17)$$

$$\hat{C}_{PN}(t+j|t) = (PN2\hat{GH1}(t+j|t) + PN2\hat{GH2}(t+j|t) + PN2\hat{GH3}(t+j|t) + PN2\hat{GOB}(t+j|t)) \cdot c_3 \cdot T_s \cdot W_p. \quad (A18)$$

In this formulation, the objective function (Equation (A1)) aims to reduce the operational costs of the agroindustrial district in terms of water, considering the cost of the water coming from the public utility network ( $C_{PN}$ ) and that of the feed water pump of the desalination plant ( $C_{DP}$ ). Note that other types of costs in the desalination plant, as the ones of the solar field feeding it, have not been taken into account as they were already optimized in the previous published work [37]. The optimization problem is subjected to a set of process and operational constraints, which are presented in Equations (A2)–(A18).

Firstly, the set of constraints in Equations (A2)–(A10) is related to the desalination plant. In this set, the constraints in Equations (A2) and (A3) are used to compute the distillate production ( $\hat{D}_T(t+j|t)$ ) along the prediction horizon. Note that the model presented in Equation (1) is employed, but an auxiliary binary variable  $\beta_i(t+j-1|t)$  with  $i = 1, \dots, N_{MD}$  for taking into account the MD modules states (turned on/off) is used instead of the actual variable  $\delta_i(t+j-1|t)$  with  $i = 1, \dots, N_{MD}$ . This is because the modules can be only turned on if the temperature required to operate them ( $T^*=60$  °C) is reached. Thus, this statement is included in the optimization problem using the set of constraints in Equations (A4)–(A6), so that another auxiliary binary variable  $\gamma(t+j-1|t)$  takes the value of one if the aforementioned statement is true and zero otherwise. Finally, the value of the actual variable related to the valve position of each MD module ( $\delta_i(t+j-1|t)$  with  $i = 1, \dots, N_{MD}$ ) is computed at each

instant time as  $\delta_i(t + j - 1|t) = \beta_i(t + j - 1|t) \cdot \gamma_i(t + j - 1|t) \forall i = 1, \dots, N_{MD}$ . This multiplication is formulated in the problem by means of a set of linear constraints (see Equations (A7)–(A10)).

Secondly, the constraints in Equations (A11) and (A12) are related to the tank level. The first one is used to compute the level ( $\hat{L}(t + j|t)$ ) along the prediction horizon, which is calculated based on the level of the previous instant time ( $\hat{L}(t + j - 1|t)$ ), the water that is received from the desalination plant ( $\hat{D}_T(t + j|t)$ ), and the water that is sent to the office building and Greenhouses 1, 2, and 3 ( $DP\hat{2}OB(t + j|t)$ ,  $DP\hat{2}GH1(t + j|t)$ ,  $DP\hat{2}GH2(t + j|t)$ , and  $DP\hat{2}GH3(t + j|t)$ , respectively). The second one defines the maximum and minimum level of the tank.

Thirdly, the constraints in Equations (A13)–(A16) define the relationship between producers and consumer agents, so that the water demanded by each consumer agent must be covered by the sum of the water that it receives from the desalination plant and from the water public utility network.

Fourthly, the constraints in Equations (A17) and (A18) are used to calculate the cost related to the operation of the feed water pump of the desalination plant ( $C_{DP}$ ) and that of the water coming from the public utility network ( $C_{PN}$ ) along the prediction horizon.

Once the overall MPC problem is formulated, it should be pointed out that the decision variables of the optimization problem are  $\delta_i$  and  $\beta_i \forall i = 1, \dots, N_{MD}$ ,  $\gamma$ ,  $DP2GH1$ ,  $PN2GH1$ ,  $DP2GH2$ ,  $PN2GH2$ ,  $DP2GH3$ ,  $PN2GH3$ ,  $DP2OB$ , and  $PN2OB$ . Conversely,  $L$ ,  $T_{cs,out}$ ,  $T_{feed}$ ,  $D_{GH1}$ ,  $D_{GH2}$ ,  $D_{GH3}$ , and  $D_{OB}$  are state variables whose values change according to the operational conditions of the desalination plant and the greenhouses and office building, respectively. In the simulations, real data were used for predicting these variables.

## References

- De Rafael, G.H.; Fernández-Prados, J.S. Intensive agriculture, marketing and social structure: The case of South-eastern Spain. *Agric. Econ.* **2018**, *64*, 367–377, doi:10.17221/318/2016-AGRICECON. [\[CrossRef\]](#)
- Cazcarro, I.; Duarte, R.; Martín-Retortillo, M.; Pinilla, V.; Serrano, A. Water scarcity and agricultural growth in Spain: From curse to blessing. In *Natural Resources and Economic Growth: Learning from History*; Routledge: London, UK, 2015; pp. 339–361.
- Aznar-Sánchez, J.A.; Belmonte-Ureña, L.J.; Velasco-Muñoz, J.F.; Valera, D.L. Aquifer sustainability and the use of desalinated seawater for greenhouse irrigation in the campo de Níjar, southeast Spain. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2019**, *16*, 898.10.3390/ijerph16050898. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- García-Caparrós, P.; Contreras, J.I.; Baeza, R.; Segura, M.L.; Lao, M.T. Integral management of irrigation water in intensive horticultural systems of Almería. *Sustainability* **2017**, *9*, 2271.10.3390/su9122271. [\[CrossRef\]](#)
- Ocampo-Martínez, C.; Puig, V.; Cembrano, G.; Quevedo, J. Application of predictive control strategies to the management of complex networks in the urban water cycle. *IEEE Control Syst. Mag.* **2013**, *33*, 15–41.10.1109/MCS.2012.2225919. [\[CrossRef\]](#)
- Pascual, J.; Romera, J.; Puig, V.; Cembrano, G.; Creus, R.; Minoves, M. Operational predictive optimal control of Barcelona water transport network. *Control Eng. Pract.* **2013**, *21*, 1020–1034.10.1016/j.conengprac.2013.01.009. [\[CrossRef\]](#)
- Lopez Farias, R.; Puig, V.; Rodríguez Rangel, H.; Flores, J. Multi-model prediction for demand forecast in water distribution networks. *Energies* **2018**, *11*, 660.10.3390/en11030660. [\[CrossRef\]](#)
- Bhojwani, S.; Topolski, K.; Mukherjee, R.; Sengupta, D.; El-Halwagi, M.M. Technology review and data analysis for cost assessment of water treatment systems. *Sci. Total Environ.* **2019**, *651*, 2749–2761.10.1016/j.scitotenv.2018.09.363. [\[CrossRef\]](#)
- Roca, L.; Sánchez-Molina, J.A.; Rodríguez, F.; Bonilla, J.; de la Calle, A.; Berenguel, M. Predictive control applied to a solar desalination plant connected to a greenhouse with daily variation of irrigation water demand. *Energies* **2016**, *9*, 194.10.3390/en9030194. [\[CrossRef\]](#)
- Gil, J.D.; Álvarez, J.; Roca, L.; Sánchez-Molina, J.; Berenguel, M.; Rodríguez, F. Optimal thermal energy management of a distributed energy system comprising a solar membrane distillation plant and a greenhouse. *Energy Convers. Manag.* **2019**, *198*, 111791.10.1016/j.enconman.2019.111791. [\[CrossRef\]](#)
- Lee, S.W.; Sarp, S.; Jeon, D.J.; Kim, J.H. Smart water grid: The future water management platform. *Desalin. Water Treat.* **2015**, *55*, 339–346.10.1080/19443994.2014.917887. [\[CrossRef\]](#)

12. Bibri, S.E. The IoT for smart sustainable cities of the future: An analytical framework for sensor based big data applications for environmental sustainability. *Sustain. Cities Soc.* **2018**, *38*, 230–253. [[CrossRef](#)]
13. Sodhro, A.H.; Pirbhulal, S.; Luo, Z.; de Albuquerque, V.H.C. Towards an optimal resource management for IoT based Green and sustainable smart cities. *J. Clean. Prod.* **2019**, *220*, 1167–1179. [[CrossRef](#)]
14. Dijkman, R.; Sprenkels, B.; Peeters, T.; Janssen, A. Business models for the Internet of Things. *Int. J. Inf. Manag.* **2015**, *35*, 672–678.10.1016/j.ijinfomgt.2015.07.008. [[CrossRef](#)]
15. Pham, X.; Stack, M. How data analytics is transforming agriculture. *Bus. Horizons* **2018**, *61*, 125–133.10.1016/j.bushor.2017.09.011. [[CrossRef](#)]
16. Gill, S.S.; Chana, I.; Buyya, R. IoT based agriculture as a cloud and big data service: The beginning of digital India. *J. Organ. End User Comput. (JOEUC)* **2017**, *29*, 1–23. [[CrossRef](#)]
17. Muñoz, M.; Guzmán, J.; Sánchez, J.; Rodríguez, F.; Torres, M. Greenhouse Models as a Service (GMaaS) for Simulation and Control. *IFAC-PapersOnLine* **2019**, *52*, 190–195.10.1016/j.ifacol.2019.12.520. [[CrossRef](#)]
18. Pawlowski, A.; Guzman, J.; Rodríguez, F.; Berenguel, M.; Sánchez, J.; Dormido, S. Simulation of greenhouse climate monitoring and control with wireless sensor network and event based Control. *Sensors* **2009**, *9*, 232–252.10.3390/s90100232. [[CrossRef](#)]
19. López-Riquelme, J.A.; Pavón-Pulido, N.; Navarro-Hellín, H.; Soto-Valles, F.; Torres-Sánchez, R. A software architecture based on FIWARE cloud for Precision Agriculture. *Agric. Water Manag.* **2017**, *183*, 123–135.10.1016/j.agwat.2016.10.020. [[CrossRef](#)]
20. Adamchuk, V.I.; Hummel, J.W.; Morgan, M.T.; Upadhyaya, S.K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* **2004**, *44*, 71–91.10.1016/j.compag.2004.03.002. [[CrossRef](#)]
21. Zamora-Izquierdo, M.A.; Santa, J.; Martínez, J.A.; Martínez, V.; Skarmeta, A.F. Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing. *Biosyst. Eng.* **2019**, *177*, 4–17.10.1016/j.biosystemseng.2018.10.014. [[CrossRef](#)]
22. Popović, T.; Latinović, N.; Pešić, A.; Zečević, Ž.; Krstajić, B.; Djukanović, S. Architecting an IoT-enabled platform for precision agriculture and ecological monitoring: A case study. *Comput. Electron. Agric.* **2017**, *140*, 255–265.10.1016/j.compag.2017.06.008. [[CrossRef](#)]
23. Elijah, O.; Rahman, T.A.; Orikumhi, I.; Leow, C.Y.; Hindia, M.N. An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. *IEEE Internet Things J.* **2018**, *5*, 3758–3773.10.1109/JIOT.2018.2844296. [[CrossRef](#)]
24. Singh, S.; Chana, I.; Buyya, R. Agri-Info: Cloud based autonomic system for delivering agriculture as a service. *Internet Things* **2019**, *9*, 100131. [[CrossRef](#)]
25. Martínez-Álvarez, V.; Martín-Gorriz, B.; Soto-García, M. Seawater desalination for crop irrigation: A review of current experiences and revealed key issues. *Desalination* **2016**, *381*, 58–70.10.1016/j.desal.2015.11.032. [[CrossRef](#)]
26. Rodríguez, M.A.; Cuenca, L.; Ortiz, A. FIWARE open source standard platform in Smart Farming—A review. In *IFIP Advances in Information and Communication Technology*; Springer: Cham, Switzerland, 2018; Volume 534, pp. 581–589.
27. Munir, M.S.; Bajwa, I.S.; Naeem, M.A.; Ramzan, B. Design and implementation of an IoT system for smart energy consumption and smart irrigation in tunnel farming. *Energies* **2018**, *11*, 3427. [[CrossRef](#)]
28. Goap, A.; Sharma, D.; Shukla, A.; Krishna, C.R. An IoT based smart irrigation management system using Machine Learning and open source technologies. *Comput. Electron. Agric.* **2018**, *155*, 41–49.10.1016/j.compag.2018.09.040. [[CrossRef](#)]
29. Kamiński, C.; Soininen, J.P.; Taumberger, M.; Dantas, R.; Toscano, A.; Salmon Cinotti, T.; Filev Maia, R.; Torre Neto, A. Smart water management platform: IoT based precision irrigation for agriculture. *Sensors* **2019**, *19*, 276. [[CrossRef](#)]
30. Becattini, G. *Dal Settore Industriale Al Distretto Industriale. Alcune Considerazioni Sull'unità Di Indagine Dell'economia Industriale*; Il Mulino: New York, NY, USA, 1979.
31. Charu, S.; Kumar, R.; Gupta, N.; Jain, K.; Kumar Jangir, S. Open source solution for cloud computing platform using OpenStack. *Int. J. Comput. Sci. Mob. Comput.* **2014**, *3*, 89–98.10.13140/2.1.1695.9043. [[CrossRef](#)]



32. Ferreira, D.; Corista, P.; Gao, J.; Ghimire, S.; Sarraipa, J.; Jardim-Goncalves, R. Towards smart agriculture using FIWARE enablers. In Proceedings of the IEEE 2017 International Conference on Engineering, Technology and Innovation: Engineering, Technology and Innovation Management Beyond 2020: New Challenges, New Approaches, ICE/ITMC 2018, Funchal, Portugal, 27–29 June 2017; Volume 2018, pp. 1544–1551. [10.1109/ICE.2017.8280066](https://doi.org/10.1109/ICE.2017.8280066). [[CrossRef](#)]
33. Open Mobile Alliance. NGSI Context Management, OMA-TS-NGSI\_Context\_Management-V1\_0-20120529-A. Available online: <http://www.openmobilealliance.org> (accessed on 2 January 2020).
34. Camacho, E.F.; Alba, C.B. *Model Predictive Control*; Springer-Verlag Ltd.: London, UK, 2004.
35. Zaragoza, G.; Ruiz-Aguirre, A.; Guillén-Burrieza, E. Efficiency in the use of solar thermal energy of small membrane desalination systems for decentralized water production. *Appl. Energy* **2014**, *130*, 491–499. [10.1016/j.apenergy.2014.02.024](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.024). [[CrossRef](#)]
36. Gil, J.D.; Muñoz, M.; Roca, L.; Rodríguez, F.; Berenguel, M. An IoT based control system for a solar membrane distillation plant used for greenhouse irrigation. In Proceedings of the 2019 Global IoT Summit (GIoTS), Aarhus, Denmark, 17–21 June 2019; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019; pp. 1–6. [10.1109/GIOTS.2019.8766370](https://doi.org/10.1109/GIOTS.2019.8766370). [[CrossRef](#)]
37. Gil, J.D.; Roca, L.; Ruiz-Aguirre, A.; Zaragoza, G.; Berenguel, M. Optimal operation of a solar membrane distillation pilot plant via nonlinear model predictive control. *Comput. Chem. Eng.* **2018**, *109*, 151–165. [10.1016/j.compchemeng.2017.11.012](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.11.012). [[CrossRef](#)]
38. Rodríguez, F.; Berenguel, M.; Guzmán, J.L.; Ramírez-Arias, A. *Modeling and Control of Greenhouse Crop Growth*; Springer: Cham, Switzerland, 2015.
39. Castilla, M.d.M.; Álvarez, J.D.; Rodríguez, F.; Berenguel, M. *Comfort Control in Buildings*; Springer: Cham, Switzerland, 2014.
40. Rodríguez, F.; Berenguel, M.; Sánchez-Molina, J.; Muñoz Rodríguez, M. Farms, Fogs and Clouds: Data open-architecture for optimal crop growth control for IoF2020 project. In Proceedings of the European Conference on Agricultural Engineering, Wageningen, The Netherlands, 8–12 July 2018.
41. Muñoz Rodríguez, M.; Sánchez-Molina, J.A.; Torres, M.; Berenguel, M. IoT-Based APP architecture for greenhouse management. In Proceedings of the EFITA-HAICTA-WCCA Congress, Rodas, Greece, 27–29 June 2019.



© 2020 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).





## 3. Conclusiones y trabajos futuros

En esta tesis se ha identificado, analizado y evaluado la principal problemática de interoperabilidad a la que se enfrenta la tecnología IoT que surge como resultado de la naturaleza heterogénea de los datos. A continuación, se ha diseñado, desarrollado e implementado una plataforma IoT centrada en el provisionamiento servicios con el objetivo de ofrecer una solución en la nube a los problemas de acceso, interoperabilidad e integración de datos heterogéneos de diferentes proveedores de servicios en distintos dominios industriales. La plataforma IoT propuesta, formada por una arquitectura y sus respectivos módulos, pretende cubrir el ciclo completo de producción de diferentes sectores industriales como son: la obtención de medidas de los sensores y el envío de datos, el registro de nuevos dispositivos, el procesado de datos, los servicios de consulta de datos y la monitorización de los diferentes dominios. Además, otra de las funcionalidades que derivan del buen uso y del éxito de la plataforma IoT propuesta radica en el desarrollo de GMaaS y su fácil integración a través de peticiones HTTP en el marco del sector agroindustrial.

A continuación se presentan las conclusiones generales y específicas que se han extraído de cada uno de los artículos anteriores, las cuales están basadas en los estudios científicos logrados como resultado de la investigación. A partir de estas conclusiones, también se proporcionan algunas ideas para trabajos de investigación futuros.

### 3.1 Conclusiones generales

En esta sección se exponen las conclusiones genéricas obtenidas a partir de las tres contribuciones en que se concreta la tesis doctoral:

- La digitalización se encuentra presente en el día a día y derivada de ella el uso de tecnologías como el IoT. Cada vez existen más dispositivos conectados generando información del entorno en el que se encuentran con el objetivo de conectar el mundo físico con el virtual. En esta tesis doctoral se ha estudiado cómo el uso de la tecnología IoT puede ayudar a solucionar los problemas de escasez de recursos y falta de suministros actuales y futuros en el mundo a través de una correcta gestión de los datos.

- El estudio detallado de la literatura relevante para la temática de la tesis ha permitido identificar las características del IoT, los objetivos inteligentes y la importancia de una arquitectura basada en estándares dividida por capas. Asimismo, se han analizado las aplicaciones y los desafíos a los que se enfrenta esta tecnología. Además, se presentan los cinco tipos de interoperabilidad en IoT, así como las plataformas y arquitecturas de referencia en el sector. A continuación se ha estudiado la tecnología habilitadora del IoT, como es el *cloud computing*. Finalmente, se presenta el uso de modelos como servicios para la optimización de recursos con el fin de proponer una solución a la interoperabilidad y a los DSS tradicionales.
- Debido a la naturaleza heterogénea de los dispositivos IoT, la interoperabilidad entre dispositivos y dominios es un aspecto fundamental en esta tesis doctoral. El núcleo de la tecnología IoT se encuentra en los datos, los cuales a su vez utilizan diferentes lenguajes de comunicación, lo que dificulta esta interoperabilidad. En esta tesis se han intentado solucionar estos problemas mediante el desarrollo de una plataforma IoT que permita la interconexión entre dispositivos y plataformas. De este modo se pretende unificar la información en una plataforma acabando con las aplicaciones dependientes e interoperables «verticalmente».
- En esta tesis doctoral se ha propuesto una plataforma IoT para la gestión eficiente de los datos generados por los diferentes elementos que componen un sector industrial. Para el desarrollo de esta plataforma se utilizaron *frameworks* para la ayuda en la creación de los servicios disponibles mediante una API REST para la integración de datos heterogéneos de proveedores externos, así como una arquitectura funcional dividida por capas. Ha de señalarse que, aunque la tecnología IoT ha experimentado un gran avance en los últimos años, todavía persisten algunos desafíos de interoperabilidad en cuanto a la comunicación entre plataformas y dispositivos. Por este motivo, en esta tesis se ha diseñado una plataforma IoT de manera generalista que pueda adaptarse a diferentes sectores industriales apostando por la estandarización de los servicios desarrollados, unificando diferentes fuentes de datos heterogéneas en una misma plataforma y facilitando la gestión de los datos a los usuarios a través de una interfaz amigable y personalizada como es *iVeg*.
- La plataforma IoT propuesta emplea como núcleo semántico un modelo de datos estándar común basado en entidades, atributos y metadatos derivado del modelo de información OMA NGSI. Esto permite el intercambio de información entre cada uno de los diferentes elementos de la capa de almacenamiento y procesamiento de datos. Asimismo, este modelo expone los datos en la capa de aplicación, permitiendo su consulta de una forma estándar y normalizada.
- La arquitectura desarrollada cuenta con microservicios que permiten la extracción, procesamiento y carga de los datos para posteriormente ser transformados al modelo de datos establecido. Los servicios desarrollados en la solución IoT se encuentran alojados en contenedores, lo que permite un fácil escalado independientemente del dominio en el que se encuentren, aumentando la usabilidad de esta plataforma IoT. Además, el desarrollo de la arquitectura IoT dividida por capas aporta una descentralización en el desarrollo de nuevos módulos o servicios. El desarrollo de nuevas funcionalidades no afecta a los módulos ya diseñados y desplegados en producción, lo que evita paradas de servicio por una batería incorrecta de pruebas o caída completa de la aplicación. El servicio de adquisición de datos puede seguir trabajando, aunque la aplicación web este en mantenimiento evitando la pérdida de datos.

- La funcionalidad de la plataforma IoT desarrollada se ha validado en tres procesos industriales heterogéneos completamente diferenciados, dando como resultado una exitosa integración entre diferentes fuentes de datos heterogéneas de proveedores de servicios externos en los diferentes escenarios; permitiendo unificar estos en un modelo de datos estándar y en una única plataforma. Esta permite integrar sensores ordinarios y nuevos sensores inteligentes de forma fácil y escalable.
- Para finalizar, el uso de la plataforma IoT creada se presenta como una herramienta eficaz para gestionar la gran cantidad de datos heterogéneos generados en los entornos industriales, transformándolos en datos homogéneos que, con el adecuado tratamiento, darán como resultado la información útil que ayuda a la toma de decisiones.

### 3.1.1 Conclusiones de la plataforma IoT para la integración de datos y modelos como servicio en el sector agrícola

Las siguientes conclusiones se corresponden con las contribuciones derivadas del artículo plasmado en el capítulo 2 sección 2.1:

- La plataforma IoT desarrollada ofrece una solución basada en la nube para brindar servicios vinculados a la producción de cultivos de invernadero a través de una API REST. El enfoque propuesto trata de abordar una de las grandes preocupaciones de este tiempo, la escasez de recursos y la gestión eficiente de los mismos se plantea como uno de los principales retos del sector agroindustrial. Esta solución brinda diversos servicios para lograr tanto beneficios económicos como ambientales en el marco de la actividad agrícola, tratando de optimizar los recursos de que dispone el invernadero y mejorar la productividad del mismo mediante la gestión centralizada de los datos y el uso de GMaaS.
- El uso de tecnologías, como IoT, se presenta por tanto, como una herramienta eficaz para gestionar los datos heterogéneos resultantes de las tareas de monitorización del invernadero.
- Este trabajo cuenta con una primera fase de integración y creación de la plataforma y de los servicios ETL complementarios en un invernadero piloto descrito en la sección 1.6.1 y una segunda fase que escala la solución propuesta a ocho invernaderos en producción real repartidos por la provincia almeriense. El objetivo principal de la plataforma IoT propuesta es unificar los datos generados en el invernadero, homogeneizando los mismos y mostrándolos al usuario de forma clara y útil a fin de que con la información facilitada, el agricultor pueda llevar a cabo la toma de decisiones de la forma más eficiente, aumentando sus niveles de producción y mejorando la optimización de los recursos de que dispone.
- Dentro de los servicios facilitados por *iVeg*, se incluyen datos históricos, valores actuales, previsiones meteorológicas para un periodo de 72 horas, modelos climáticos, modelos de producción y modelos de riego. Esta solución es versátil y puede ser utilizada para fines de simulación, estudio y toma de decisiones en el ámbito agrícola y empresarial. Del mismo modo, se integra en la plataforma un innovador servicio llamado GMaaS, en el que se ofrecen modelos de invernaderos para estimar el clima interior, la producción de cultivo y los valores de riego. Los usuarios pueden utilizar diferentes fuentes de datos para la simulación, como datos históricos, datos de previsión meteorológica y datos de sensores actuales, lo que permite una mayor flexibilidad en el uso de los servicios. GMaaS es una tecnología beneficiosa para la producción de cultivos de invernadero, ya que ofrece acceso a modelos y servicios de manera versátil y flexible. Otro beneficio

es que todos estos servicios están disponibles como una API REST para satisfacer las diferentes necesidades de los usuarios. De hecho, la plataforma propuesta proporciona una aplicación gráfica basada en la web que se construye sobre esta API REST.

- Como resultado a destacar, la plataforma *iVeg* cuenta con un registro de propiedad intelectual n.º 04/2022/956.

### **3.1.2 Conclusiones de la plataforma IoT para la gestión de datos en una planta de cultivo de microalgas a escala industrial**

Las siguientes conclusiones se corresponden con las contribuciones derivadas del artículo plasmado en el capítulo 2 sección 2.2:

- Este trabajo propone una solución IoT basada en la nube para la gestión de datos a gran escala de un sistema de producción de biomasa a través del cultivo de microalgas como respuesta a la falta de digitalización del sector y los problemas de accesibilidad a los datos. El uso de tecnologías, como IoT, se presenta como una herramienta eficaz para gestionar los datos heterogéneos existentes en un sistema de producción de microalgas a gran escala.
- El trabajo se desarrolla y prueba en la planta real de SABANA especializada en la producción de biomasa ubicada en Almería, cubriendo el ciclo completo de producción de la planta. La plataforma IoT desarrollada es una solución propia y se basa en los estándares ya descritos en las conclusiones generales. A través de la misma se garantiza un intercambio eficaz de información entre las diferentes fuentes de datos, dando como resultado un ecosistema IoT interoperable y plenamente funcional.
- Los servicios proporcionados por la plataforma IoT desarrollada, denominada SABANA Data Center, realizan tareas de monitorización, acceso y extracción de los datos generados por los fotobiorreactores asociados a la planta SABANA. Los servicios disponibles para los usuarios son: datos en tiempo real, datos históricos, información de sensores, integración de sensores adicionales, creación de entidades IoT y monitorización del sistema. Este conjunto de servicios permite a los técnicos de la planta afrontar las necesidades de producción en cada fotobiorreactor de forma más eficiente como consecuencia de la plena homogeneización y consulta de los datos a través de un soporte unitario.
- La plataforma IoT propuesta expone los servicios disponibles a través de un conjunto de APIs REST, que permiten al usuario hacer uso de ellos de dos formas: a través de un conjunto de interfaces web, o mediante peticiones HTTP. El uso de la plataforma IoT no limita la explotación de sus ventajas a un único perfil de usuario. Esta puede ser utilizada tanto por el personal encargado de la gestión de la planta como por empresas, centros de investigación y, como por cualquier tipo de personal externo a la planta de forma fácil, aplicando las ventajas de la homogeneización de los datos para una gestión privada.

### **3.1.3 Conclusiones de la arquitectura IoT para la gestión de los recursos hídricos en entornos agroindustriales**

Las siguientes conclusiones se corresponden con las contribuciones derivadas del artículo plasmado en el capítulo 2 sección 2.3:

- Este trabajo aborda el desarrollo teórico de una arquitectura de gestión del agua basada en IoT para su aplicación en distritos agroindustriales. El núcleo de la plataforma se

basa en el uso de un modelo de datos estándar basado en OMA NGS1 y un controlador MPC que refleja la estrategia operativa en tiempo real en la nube. El uso de tecnologías habilitadoras como IoT sobre distritos agroindustriales podría ser una herramienta eficaz para llevar a cabo la gestión óptima de los recursos heterogéneos que requieren los elementos que componen estos entornos.

- Se han realizado pruebas de simulación mediante un caso de estudio basado en tres instalaciones reales situadas en Almería, descritas en la sección 1.6.1 que incluye una planta desalinizadora, conexión a la red de servicios públicos y varios agentes consumidores. En particular, la aplicación del método propuesto al caso de estudio ha demostrado cómo se puede realizar una gestión óptima de los recursos hídricos, adecuando la producción de agua de la desaladora a la demanda de agua de los agentes consumidores, y minimizando el uso de agua procedente de la red de servicio público, haciendo así un uso adecuado de las instalaciones de desalación.
- El análisis comparativo de costes realizado con una operación manual muestra cómo puede ahorrarse alrededor del 75% del coste operativo. De este modo, el coste por unidad de agua demandada en el distrito agroindustrial se redujo con la aplicación de la estrategia propuesta de 1,51 €/m<sup>3</sup> (coste de la operación manual) a 0,44 €/m<sup>3</sup>. Esto podría ser muy relevante para mantener la sostenibilidad económica del sistema agrícola de Almería.

### 3.2 Líneas futuras de investigación

Esta tesis presenta el desarrollo de una plataforma IoT basada en estándares abiertos para una gestión eficiente y centralizada de los datos con la versatilidad de ser escalada a diferentes sectores industriales. Esta puede servir de referencia para futuros investigadores o empresas que estén interesadas en el desarrollo de una plataforma interoperable basada en la provisión de servicios en la nube. La investigación realizada podría ampliarse y mejorarse con la inclusión de nuevas líneas de investigación.

A continuación, se presentan las futuras líneas de investigación:

- La plataforma IoT desarrollada en esta tesis doctoral fue enfocada desde un punto de vista conceptual de una manera genérica para una fácil adaptación a diferentes dominios de un ecosistema IoT. Esta plataforma podría someterse a validación en otros ámbitos (p. ej. ciudades inteligentes, medicina o sector de transportes) para estudiar su nivel de adaptación y escalabilidad.
- Una de las líneas de mejora disponibles sería la inclusión de la tecnología *blockchain* en la plataforma IoT. Esto aportaría veracidad, transparencia y trazabilidad de los datos generadores. La implementación de *blockchain* puede facilitar la automatización de tareas repetitivas, en un entorno IoT existe una gran cantidad de datos y es necesario disponer de mecanismos que puedan responder a eventos registrados por los sensores IoT de forma automática. Sería interesante adentrarse en el funcionamiento de los *smart contracts* y como podrían incluirse en la plataforma para validar la trazabilidad de un producto o cadena de producción.
- La generación de una cooperativa de datos en la nube basada en modelos de datos estándares y combinada con la tecnología *blockchain* podría proporcionar una solución a la problemática de acceso a los datos descrita a lo largo del documento de tesis doctoral. Esta nueva línea de investigación podría permitir crear un depósito de datos verificados y



contrastados, provenientes de diversos sectores industriales, en el que el usuario tiene control en todo momento del uso de sus datos. De esta forma, se podría establecer un mercado regulado donde empresas e investigadores pueden realizar pruebas o simulaciones con datos reales.

- La integración de algoritmos basados en inteligencia artificial para el tratamiento de datos junto a la tecnología IoT podría ser una línea de investigación futura interesante. Esta convergencia permitiría realizar un preprocesamiento de los datos recogidos por la plataforma IoT, incluyendo tareas de filtrado como la detección de valores fuera de rango y la detección de patrones para replicar la información en caso de pérdida de señal o cortes. Esto podría evitar lagunas de datos en el sistema y mejorar la calibración de los modelos, lo que a su vez podría mejorar la eficiencia de los sistemas DSS y, por lo tanto, de GMaaS.
- Ampliar las capacidades de comunicación bidireccional de la plataforma IoT con los actuadores conectados. Actualmente, las acciones ejecutadas por los actuadores ubicados en las diferentes plantas industriales son registradas en la aplicación en formato de monitorización y consulta. Una posible mejora sería la capacidad de interactuar con estos actuadores a través del modelo de datos establecido y el desarrollo de diferentes *middleware* que realicen tareas de traducción de nuevos adaptadores para los estándares y protocolos de cada dispositivo.
- Los servicios desarrollados en la plataforma IoT utilizan la tecnología de virtualización de contenedores. Estos se encuentran alojados en el Centro de Procesamiento de Datos de la Universidad de Almería en un servidor propietario. Bajo estas limitaciones de escalabilidad, una de las futuras líneas de mejora sería la migración de los servicios desarrollados a una plataforma en la nube que permita el uso de orquestadores de contenedores para una correcta gestión y automatización de la escalabilidad de la plataforma.
- Realizar un análisis comparativo de la tecnología utilizada en GMaaS frente a las nuevas técnicas basadas en datos. GMaaS es un DSS en la nube que permite su acceso a través de Internet por medio de peticiones HTTP. En su interior se encuentran modelos matemáticos encargados de realizar las operaciones de computación y ofrecer los datos DSS a los usuarios en el formato deseado. Dado que las ecuaciones matemáticas utilizadas son de naturaleza compleja, los sistemas resultan difíciles de programar. Por esta razón, surge la idea de comparar las técnicas de inteligencia artificial y redes neuronales, que se basan en datos y ofrecen un mejor tiempo de computación y sencillez en el desarrollo de los modelos.
- Incorporación de nuevos modelos como servicio en la plataforma IoT. Actualmente, GMaaS está enfocado únicamente en el cultivo en invernadero, ofreciendo tres modelos de tipo climático, producción y riego. Una posible mejora sería la inclusión de un modelo de plagas que informara al usuario de la probabilidad de tener un tipo de plaga según sus condiciones climáticas internas y haciendo uso de un almacén de datos que permitiera conocer los datos históricos de condiciones similares o plagas asociadas próximas a su cultivo, de esta forma se podría advertir de una posible infección futura.
- GMaaS actualmente proporciona predicciones climáticas para invernaderos a 72 horas, una posible nueva funcionalidad es un generador de consignas que notifique al usuario si las condiciones de temperatura están dentro o fuera del rango establecido, permitiendo

conocer si se cumplen las condiciones ideales de cultivo en un futuro.

- Dada la escalabilidad de la plataforma IoT desarrollada, surge una nueva línea de investigación con el objetivo de integrar la plataforma IoT y la arquitectura basada en sistemas ciberfísicos del proyecto Cybergreen en la que se está trabajando actualmente.
- La contribución presentada en el capítulo 2 sección 2.3 se fundamenta teóricamente en un sector industrial de referencia, sin tener en cuenta las limitaciones de comunicación y acceso a internet existentes. Una de las líneas de investigación futuras posibles podría estar relacionada con el análisis de viabilidad económica, teniendo en cuenta los diferentes sistemas IoT, infraestructuras de transporte y costes de desalación.





## 4. Otras contribuciones

Como se describe en los capítulos anteriores, el trabajo de investigación está respaldado por: i) 3 contribuciones en revistas JCR (2 en Q1 y 1 en Q2), ii) 7 contribuciones en congresos internacionales, iii) 1 contribución a congresos nacionales, iv) 1 artículo en revista de divulgación general, v) 1 registro de propiedad intelectual y vi) 2 premios asociados a dos contribuciones científicas. Además de estos trabajos, se han llevado a cabo varias colaboraciones que han dado como resultado publicaciones asociadas a la temática de la tesis. Asimismo, el doctorando ha colaborado en varios proyectos de investigación, proyectos con empresas y ha contribuido a la ciencia como revisor. Aparte de las actividades de investigación mencionadas, el doctorando también ha participado en actividades docentes divulgativas. Toda esta información se encuentra resumida en este capítulo.

### 4.1 Publicaciones y trabajos de investigación derivados

#### 4.1.1 Contribuciones a conferencias internacionales

El doctorando ha colaborado con otros investigadores, lo que ha dado como resultado dos publicaciones en congresos internacionales que tratan temas relacionados con la tesis, como el desarrollo de un cuaderno de campo y una herramienta de apoyo a la toma de decisiones basada en el crecimiento del pepino.

- V. Maldonado, J. A. Sánchez-Molina, **M. Muñoz**, M. Berenguel, y J. Cañadas, «Greenbook: App híbrida para el seguimiento y control de explotaciones agrarias intensivas,» en *X Congreso Ibérico de Agroingeniería*, Huesca, España, 2019, págs. 998-1003. Referencia: [203].
- C. Amate, J. A. S. Molina, L. Gallardo, **M. Muñoz**, y R. Thomson, «Design of a cucumber growth prediction model based on environmental data to be used as decision support system tool,» en *EFITA-HAICTA-WCCA Congress*, Rodas, Grecia, 2019. Referencia: [204].

### 4.1.2 Contribuciones a conferencias nacionales

Adicionalmente, el doctorando ha participado activamente en los diferentes congresos organizados por el Departamento de Informática de la Universidad de Almería. Esta participación ha dado lugar a las siguientes publicaciones:

- **M. Muñoz Rodríguez**, «Aplicación del IoT en la agricultura intensiva protegida,» en *II Jornadas de Doctorado en Informática de la Universidad de Almería*, Almería, España, 2019. Referencia: [205].
- **M. Muñoz Rodríguez**, «Actualización de la plataforma IoT para la agricultura intensiva con MaaS e integración de nuevas plataformas,» en *III Jornadas de Doctorado en Informática de la Universidad de Almería*, Almería, España, 2020. Referencia: [206].
- **M. Muñoz Rodríguez**, «Integración de modelos como servicio (GMaaS) en iVeg, plataforma IoT para la agricultura intensiva protegida,» en *IV Jornadas de Doctorado en Informática de la Universidad de Almería*, Almería, España, 2021. Referencia: [207].
- **M. Muñoz Rodríguez**, «IoT aplicado al sector agroindustrial, uso de modelos como servicio y arquitectura cloud,» en *V Jornadas de Doctorado en Informática de la Universidad de Almería*, Almería, España, 2022. Referencia: [208].

### 4.1.3 Colaboración en proyectos de investigación

El doctorando ha participado o se encuentra participando en un total de cinco proyectos de investigación, tres de ellos europeos y dos nacionales:

- Programa de Investigación e Innovación Horizonte 2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo de subvención n.º 731884 - Proyecto Internet de los Alimentos y la Agricultura 2020 (**IoF2020**). 01/01/2017-31/03/2021 (34 089 926 €).
- Proyecto de Investigación **GO Inverconec** financiado por el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER) de la Unión Europea y el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA), en el marco del Programa Nacional de Desarrollo Rural 2014-2020. 01/03/2021-01/03/2023 (529 724 €).
- Proyecto de Investigación del plan Nacional de Generación de Conocimiento, n.º PID2021-122560OB-I00, financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por «FEDER una manera de hacer Europa», Arquitectura Ciberfísica de Control para la Optimización del Nexo Agua-Energía-Carbono-Alimentación en Invernaderos (**Cybergreen**). 01/09/2022-01/09/2025 (113 000 €)
- Proyecto de Investigación e Innovación de la Unión Europea «HORIZON-CL6-2021-FARM2FORK-01» n.º 101060481. Coste de los alimentos e internalización de externalidades para la transición del sistema (**FoodCost**”, del inglés *Food Costing and Internalisation of Externalities for System Transistion*). 01/06/2022-31/05/2026 (413 125 €).
- Proyecto de Investigación Infraestructura FEDER EQC2019-006658-P, Sistema de Cultivo Intensivo Sostenible, Autónomo, Conectado y Abierto (**AgroConnect**). 01/01/2021 (308 850 €).
- Proyecto de Investigación de la Universidad de Almería, de la Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades y del Fondo Europeo de Desa-

rollo Regional (FEDER), Robot Colaborativo Agrícola Integrado en IoT I (**AGRICOBOT I**, del inglés *Agricultural Collaborative Robot Inside IoT I*). 01/01/2021-31/04/2023 (29 200 €).

- Proyecto de Investigación de la Consejería de Transformación Económica, Industria, Conocimiento y Universidades y del Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), Robot Colaborativo Agrícola Integrado en IoT II (**AGRICOBOT II**, del inglés *Agricultural Collaborative Robot Inside IoT II*). 05/10/2021-31/04/2023 (78 550 €).

### 4.1.4 Contratos con empresas

El doctorando ha participado en el desarrollo de contratos de transferencia de investigación con empresas:

- Asesoramiento al desarrollo de modelos para el diseño de invernaderos fotovoltaicos a partir de las condiciones externas en el marco del Proyecto Europeo **SUN4GRENN GA** n.º 756006. 01/11/2018-31/03/2019 (96 709 €).
- Escalado y evaluación de un sistema patentado de enriquecimiento carbónico a partir de gases de combustión para su utilización en invernaderos comerciales **CarbonTransfer**. 16/09/2019-30/09/2022 (31 771 €).
- Proyecto piloto para la determinación del momento óptimo de recolección para la mejora de la calidad en el sector del aceite de oliva. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Subdirección General de Cultivos Herbáceos e Industriales y Aceite de Oliva. 22/07/2021-21/05/2022 (18 148 €).

### 4.1.5 Colaboración en proyectos docentes

La actividad investigadora desarrollada en esta tesis ha contribuido al desarrollo de dos proyectos docentes:

- Proyecto de Investigación e Innovación de la Unión Europea n.º 621723- EPP-1-2020-1-EL-EPPKA2-KA. Nueva generación de formación sobre invernaderos inteligentes con aplicación (**NEGHTRA**, del inglés *Next Generation Training on Intelligent Greenhouses con Application*). 01/11/2020-31/10/2023 (979 800 €).
- IFAC Online Benchmark para el Control en Educación. En la Federación Internacional de Control Automático (**IFAC**, del inglés *Internacional Federacion of Automatic Control*). 01/01/2022-31/09/2023 (5000 €).

### 4.1.6 Contribución como revisor

El doctorando ha participado en el proceso de revisión de artículos contribuyendo a la investigación aceptando invitaciones como revisor. En concreto, el doctorando ha sido invitado a revisar contribuciones en congresos nacionales como «XLIII Jornadas de Automática».

## 4.2 Actividades pedagógicas

Como complemento a la labor investigadora, el doctorando ha participado en las siguientes actividades divulgativas:

- Seminario web, «Herramienta de integración de datos de sensores,» en *Tecnologías para la Mejora de la Sostenibilidad Ambiental en la Producción Hortícola*, 2022.

- Seminario web, «Digitalización del proceso de producción en un invernadero, La Agricultura Intensiva Entra en una Nueva Dimensión,» en *I Jornada Nuevas Tecnologías en Invernadero*, 2021.
- Seminario web, «Utilización de modelos para manejo óptimo, iVeg,» en *Sensores Y TICs para Fertirriego: Una Visión Práctica*, 2021.
- Seminario web, «Aplicación real del uso del IoT aplicado a la agricultura intensiva protegida,» en *Máster en Tecnologías y Aplicaciones en Ingeniería Informática*, 2021.
- Seminario web, «Caso de estudio 4.2 del proyecto loF2020 basado en digitalización de la agricultura - Arquitectura IoT y modelos predictivos,» en *Máster en Tecnologías y Aplicaciones en Ingeniería Informática*, 2020.
- Seminario web, «El Internet de las cosas dentro el invernadero loF,» en *Bases para la Transformación Digital en la Explotación Hortícola de Almería (formación básica)*, 2020.
- Seminario web, «Plataforma loF2020,» en *INVERCONEC Invernadero Conectado. Desde el Cultivo Hasta el Consumidor*, 2018.





## Bibliografía

- [1] C. yue Chiu, P. Gries, C. J. Torelli y S. Y. Cheng, «Toward a social psychology of globalization,» *Journal of Social Issues*, vol. 67, n.º 4, págs. 663-676, 2011.
- [2] I. Mergel, N. Edelmann y N. Haug, «Defining digital transformation: Results from expert interviews,» *Government Information Quarterly*, vol. 36, n.º 4, pág. 101 385, 2019.
- [3] J. Kitzes et al., «Shrink and share: Humanity's present and future ecological footprint,» *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 363, n.º 1491, págs. 467-475, 2007.
- [4] V. P. Kour y S. Arora, «Recent developments of the Internet of Things in agriculture: A survey,» *IEEE Access*, vol. 8, págs. 129 924-129 957, 2020.
- [5] A. Carra. «El planeta alcanzará en 2100 su pico máximo de 11.000 millones de personas.» (2015), dirección: <http://spanish.peopledaily.com.cn/n/2015/0812/c92121-8934771.html> (visitado 29-12-2022).
- [6] L. Brennan y P. Owende, «Biofuels from microalgae-a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, n.º 2, págs. 557-577, 2010.
- [7] N. L. Panwar, S. C. Kaushik y S. Kothari, «Solar greenhouse an option for renewable and sustainable farming,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n.º 8, págs. 3934-3945, 2011.
- [8] D. V.J., S. Murali y N. M.C., «Phycoremediation efficiency of three micro algae *Chlorella vulgaris*, *Synechocystis salina* and *Geloeocapsa gelatiosa*,» *SB Academic Review*, vol. 16, págs. 138-146, 2009.
- [9] N. Abdel-Raouf, A. A. Al-Homaidan e I. B. Ibraheem, «Microalgae and wastewater treatment,» *Saudi Journal of Biological Sciences*, vol. 19, n.º 3, págs. 257-275, 2012.
- [10] R. Gebbers y V. I. Adamchuk, «Precision agriculture and food security,» *Science*, vol. 327, n.º 5967, págs. 828-831, 2010.
- [11] T. Ringberg, M. Reihlen y P. Rydén, «The technology-mindset interactions: Leading to incremental, radical or revolutionary innovations,» *Industrial Marketing Management*, vol. 79, págs. 102-113, 2019.

- [12] G. Nelson y S. Ellis, «The history and impact of digitization and digital data mobilization on biodiversity research,» *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, vol. 374, n.º 1763, 2019.
- [13] M. Stürmer, G. Abu-Tayeh y T. Myrach, «Digital sustainability: Basic conditions for sustainable digital artifacts and their ecosystems,» *Sustainability Science*, vol. 12, págs. 1-16, 2017.
- [14] M. Chi, A. Plaza, J. A. Benediktsson, Z. Sun, J. Shen e Y. Zhu, «Big Data for remote sensing: Challenges and opportunities,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 104, n.º 11, págs. 2207-2219, 2016.
- [15] I. A. T. Hashem, I. Yaqoob, N. B. Anuar, S. Mokhtar, A. Gani y S. Ullah Khan, «The rise of “big data” on cloud computing: Review and open research issues,» *Information Systems*, vol. 47, págs. 98-115, 2015.
- [16] J. Sayer y K. G. Cassman, «Agricultural innovation to protect the environment,» *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 110, n.º 21, págs. 8345-8348, 2013.
- [17] A. G. Frank, L. S. Dalenogare y N. F. Ayala, «Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies,» *International Journal of Production Economics*, vol. 210, págs. 15-26, 2019.
- [18] D. Barh, V. Zambare y V. Azevedo, *Omics : Applications in biomedical, agricultural, and environmental sciences*. CRC Press/Taylor Francis, 2013.
- [19] J. Liu y J. P. Tao, «Research and application of agricultural greenhouse intelligence platform based on IoT (Internet of Things) and cloud computing,» *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, vol. 17, n.º 5, págs. 8.1-8.5, 2016.
- [20] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic y M. Palaniswami, «Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,» *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, n.º 7, págs. 1645-1660, 2013.
- [21] O. Elijah, T. A. Rahman, I. Orikumhi, C. Y. Leow y M. N. Hindia, «An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, n.º 5, págs. 3758-3773, 2018.
- [22] A. Kamilaris, A. Kartakoullis y F. X. Prenafeta-Boldú, «A review on the practice of big data analysis in agriculture,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 143, n.º 10, págs. 23-37, 2017.
- [23] A. Botta, W. De Donato, V. Persico y A. Pescapé, «Integration of cloud computing and internet of things: A survey,» *Future Generation Computer Systems*, vol. 56, págs. 684-700, 2016.
- [24] A. Kamilaris y F. X. Prenafeta-Boldú, «Deep learning in agriculture: A survey,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 147, págs. 70-90, 2018.
- [25] A. Kamilaris, F. Gao, F. X. Prenafeta-Boldu y M. I. Ali, «Agri-IoT: A semantic framework for internet of things-enabled smart farming applications,» en *2016 IEEE 3rd world forum on internet of things (WF-IoT)*, IEEE, 2016, págs. 442-447.
- [26] G. Kovács, R. Benotsmene y L. Dudás, «The concept of autonomous systems in industry 4.0,» *Advanced Logistic Systems - Theory and Practice*, vol. 12, págs. 77-87, 2019.
- [27] L. Tan y N. Wang, «Future internet: The internet of things,» *ICACTE 2010 - 2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering, Proceedings*, vol. 5, 2010.
- [28] B. Chandrayan y R. Kumar, «IoT Integration in Industry-A Literature Review,» en *Recent Advances in Mechanical Engineering*. 2020, págs. 9-17.

- 
- [29] A. Agra, M. Christiansen, K. S. Ivarsøy, I. E. Solhaug y A. Tomasgard, «Combined ship routing and inventory management in the salmon farming industry,» *Annals of Operations Research*, vol. 253, n.º 2, págs. 799-823, 2017.
- [30] R. Marcelino, L. C. Casagrande, R. Cunha, Y. Crotti y V. Gruber, «Internet of things applied to precision agriculture,» en *Online Engineering & Internet of Things*, Cham, Suiza, 2018, págs. 499-509.
- [31] J. Miranda, P. Ponce, A. Molina y P. Wright, «Sensing, smart and sustainable technologies for Agri-Food 4.0,» *Computers in Industry*, vol. 108, págs. 21-36, 2019.
- [32] B. Ahlgren, M. Hidell y E. C. Ngai, «Internet of things for smart cities: Interoperability and open data,» *IEEE Internet Computing*, vol. 20, n.º 6, págs. 52-56, 2016.
- [33] P. Misra, V. Rajaraman, K. Dhotrad, J. Warrior e Y. Simmhan, «An interoperable realization of smart cities with plug and play based device management,» *arXiv:1503.00923*, 2015.
- [34] S. M. Islam, D. Kwak, M. H. Kabir, M. Hossain y K. S. Kwak, «The internet of things for health care: A comprehensive survey,» *IEEE Access*, vol. 3, págs. 678-708, 2015.
- [35] B. R. Nugroho, «The architecture of an IoT-based healthcare monitoring system using smart e-health gateways in home/hospital domain,» *Buletin Inovasi ICT & Ilmu Komputer*, vol. 2, n.º 1, 2015.
- [36] S. H. Sutar, R. Koul y R. Suryavanshi, «Integration of smart phone and IoT for development of smart public transportation system,» en *2016 International Conference on Internet of Things and Applications (IOTA)*, Pune, India, 2016, págs. 73-78.
- [37] T. Qu, S. Lei, Z. Wang, D. Nie, X. Chen y G. Q. Huang, «IoT-based real-time production logistics synchronization system under smart cloud manufacturing,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 84, n.º 1, págs. 147-164, 2016.
- [38] T. Alam, «A reliable communication framework and its use in Internet of Things (IoT),» *International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology*, vol. 3, págs. 450-456, 2018.
- [39] M. Elkhodr, S. Shahrestani y H. Cheung, «The internet of things : New interoperability, management and security challenges,» *International Journal of Network Security Its Applications*, vol. 8, n.º 2, págs. 85-102, 2016.
- [40] M. Noura, M. Atiquzzaman y M. Gaedke, «Interoperability in internet of things: Taxonomies and open challenges,» *Mobile Networks and Applications*, vol. 24, n.º 3, págs. 796-809, 2019.
- [41] «Blue Growth Study - Scenarios and drivers for Sustainable Growth from the Oceans, Seas and Coasts | Maritime Forum.» (2012), dirección: <https://webgate.ec.europa.eu/maritimeforum/en/node/2946> (visitado 24-09-2022).
- [42] S. Madakam, R. Ramaswamy, S. Tripathi, S. Madakam, R. Ramaswamy y S. Tripathi, «Internet of Things (IoT): A literature review,» *Journal of Computer and Communications*, vol. 3, n.º 5, págs. 164-173, 2015.
- [43] H. Sundmaeker, P. Guillemin, P. Friess y S. Woelfflé, *Vision and challenges for realising the internet of things*. 2010.
- [44] Casagras. «Casagras final report: RFID and the inclusive model for the internet of things.» (2010), dirección: [http://rwi.future-internet.eu/index.php/Main\\_Page](http://rwi.future-internet.eu/index.php/Main_Page) (visitado 04-12-2022).
- [45] L. Gyu Myoung et al. «The internet of things concept and problem statement draft lee IoT problem statement status.» (2011), dirección: <https://datatracker.ietf.org/doc/pdf/draft-lee-iot-problem-statement-05.pdf> (visitado 24-08-2022).
-

- [46] International Telecommunication Union. «Overview of the internet of things.» (2012), dirección: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.2060-201206-I> (visitado 24-08-2022).
- [47] R. Van Kranenburg, *The internet of things: A critique of ambient technology and the all-seeing network of RFID*. Institute of Network Cultures, 2008.
- [48] M. H. Miraz, M. Ali, P. S. Excell y R. Picking, «A review on Internet of Things (IoT), Internet of everything (IoE) and Internet of Nano Things (IoNT),» en *2015 Internet Technologies and Applications (ITA)*, Wrexham, Reino Unido, 2015, págs. 219-224.
- [49] H. Sundmaeker, P. Guillemin, P. Friess y S. Woelfflé, *Vision and challenges for realizing the internet of things*. 2010.
- [50] L. Atzori, A. Iera y G. Morabito, «The internet of things: A survey,» *Computer Networks*, vol. 54, n.º 15, págs. 2787-2805, 2010.
- [51] W. Paper, «Cisco visual networking index: Forecast and methodology,» *Forecast and Methodology*, págs. 2015-2020, 2015.
- [52] M. Díaz, C. Martín y B. Rubio, «State-of-the-art, challenges, and open issues in the integration of internet of things and cloud computing,» *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 67, págs. 99-117, 2016.
- [53] G. Youngblood, D. Cook, L. Holder y E. Heierman, «Automation intelligence for the smart environment,» en *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Edimburgo, Escocia, 2005, págs. 1513-151.
- [54] G. Fortino, A. Guerrieri y W. Russo, «Agent-oriented smart objects development,» en *Proceedings of the 2012 IEEE 16th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, Wuhan, China, 2012, págs. 907-912.
- [55] D. Wobschall, «IEEE 1451-a universal transducer protocol standard,» en *2007 IEEE Autotestcon*, Baltimore, Estados Unidos, 2007, págs. 359-363.
- [56] G. Kortuem, F. Kawsar, V. Sundramoorthy y D. Fitton, «Smart objects as building blocks for the internet of things,» *IEEE Internet Computing*, vol. 14, n.º 1, págs. 44-51, 2010.
- [57] C. Bormann, M. Ersue y A. Keranen. «Terminology for constrained-node networks.» (2014), dirección: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7228> (visitado 24-08-2022).
- [58] RF Wireless World. «IoT devices | IoT device categories class 0,1,2.» (2012), dirección: <https://www.rfwireless-world.com/IoT/IoT-devices.html> (visitado 03-01-2023).
- [59] J. Guth, U. Breitenbucher, M. Falkenthal, F. Leymann y L. Reinfurt, «Comparison of IoT platform architectures: A field study based on a reference architecture,» en *2016 Cloudification of the Internet of Things, CloT 2016*, París, Francia, 2017, págs. 1-6.
- [60] O. Bhat, P. Gokhale y S. Bhat, «Introduction to IoT,» *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology ISO*, vol. 3297, n.º 1, 2007.
- [61] M. Weyrich y C. Ebert, «Reference architectures for the internet of things,» *IEEE Software*, vol. 33, n.º 1, págs. 112-116, 2016.
- [62] P. Sethi y S. R. Sarangi, «Internet of things: Architectures, protocols, and applications,» *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017, R. Khanna, ed., pág. 9324 035, 2017.
- [63] M. Wu, T.-J. Lu, F.-Y. Ling, J. Sun y H.-Y. Du, «Research on the architecture of internet of things,» en *2010 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering(ICACTE)*, vol. 5, Chengdu, China, 2010, págs. 484-487.

- 
- [64] R. Khan, S. U. Khan, R. Zaheer y S. Khan, «Future internet: The internet of things architecture, possible applications and key challenges,» en *2012 10th International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT 2012)*, Islamabad, Pakistan, 2012, págs. 257-260.
- [65] M. U.Farooq, M. Waseem, S. Mazhar, A. Khairi y T. Kamal, «A Review on Internet of Things (IoT),» *International Journal of Computer Applications*, vol. 113, n.º 1, págs. 1-7, 2015.
- [66] R. Porkodi y V. Bhuvaneswari, «The Internet of Things (IoT) applications and communication enabling technology standards: An overview,» en *2014 International Conference on Intelligent Computing Applications (ICICA)*, Coimbatore, India, 2014, págs. 324-329.
- [67] C. C. Sobin, «A survey on architecture, protocols and challenges in IoT,» *Wireless Personal Communications*, vol. 112, n.º 3, págs. 1383-1429, 2020.
- [68] H. U. Rehman, M. Asif y M. Ahmad, «Future applications and research challenges of IOT,» en *2017 International Conference on Information and Communication Technologies (ICICT)*, Karachi, Pakistan, 2017, págs. 68-74.
- [69] A. Assiri y H. Almagwashi, «IoT security and privacy issues,» en *2018 1st International Conference on Computer Applications Information Security (ICCAIS)*, Riad, Arabia Saudí, 2018, págs. 1-5.
- [70] W. Yang et al., «Narrowband wireless access for low-power massive internet of things: A bandwidth perspective,» *IEEE wireless communications*, vol. 24, n.º 3, págs. 138-145, 2017.
- [71] S. Chen, H. Xu, D. Liu, B. Hu y H. Wang, «A vision of IoT: Applications, challenges, and opportunities with China perspective,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, págs. 349-359, 2014.
- [72] I. Lee y K. Lee, «The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises,» *Business Horizons*, vol. 58, n.º 4, págs. 431-440, 2015.
- [73] M. Yannuzzi, R. Milito, R. Serral-Gracià, D. Montero y M. Nemirovsky, «Key ingredients in an IoT recipe: Fog computing, cloud computing, and more fog computing,» en *2014 IEEE 19th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, Atenas, Grecia, 2014, págs. 325-329.
- [74] R. Buyya y S. N. Srirama, «Integrating IoT + fog + cloud infrastructures: System modeling and research challenges,» en *Fog and Edge Computing: Principles and Paradigms*. 2019, págs. 51-78.
- [75] J. Lin, W. Yu, N. Zhang, X. Yang, H. Zhang y W. Zhao, «A survey on internet of things: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 4, n.º 5, págs. 1125-1142, 2017.
- [76] (ISO/IEC). «ISO/IEC 2382-1:1993 information technology – cocabulary – part 1: Fundamental terms.» (1993), dirección: <https://www.iso.org/standard/7229.html> (visitado 24-08-2022).
- [77] IEEE, «IEEE standard glossary of software engineering terminology,» *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, págs. 1-84, 1990.
- [78] J. Kiljander et al., «Semantic interoperability architecture for pervasive computing and internet of things,» *IEEE Access*, vol. 2, págs. 856-873, 2014.
- [79] G. Xiao, J. Guo, L. D. Xu y Z. Gong, «User interoperability with heterogeneous IoT devices through transformation,» *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, n.º 2, págs. 1486-1496, 2014.
-

- [80] D. Thaler, H. Tschofenig y M. Barnes. «Architectural considerations in smart object networking.» (2015), dirección: <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdf/rfc/rfc7452.txt.pdf> (visitado 24-08-2022).
- [81] J. Zhang, M. Ma, P. Wang y X.-d. Sun, «Middleware for the internet of things: A survey on requirements, enabling technologies, and solutions,» *Journal of Systems Architecture*, vol. 117, pág. 102 098, 2021.
- [82] M. Khanafer, M. Guennoun y H. Mouftah, «A survey of beacon-enabled IEEE 802.15.4 MAC protocols in wireless sensor networks,» *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 16, págs. 856-876, 2014.
- [83] N. Knyazev, V. Chechetkin y D. Letavin, «Comparative analysis of standards for Low-power Wide-area Network,» en *2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO)*, Kazán, Rusia, 2017, págs. 1-4.
- [84] J. Tosi, F. Taffoni, M. Santacatterina, R. Sannino y D. Formica, «Performance evaluation of bluetooth low energy: A systematic review,» *Sensors*, vol. 17, n.º 12, pág. 2898, 2017.
- [85] R. Bruno, M. Conti y E. Gregori, «Bluetooth: Architecture, protocols and scheduling algorithms,» *Cluster Computing*, vol. 5, n.º 2, págs. 117-131, 2002.
- [86] M. Di Francesco, G. Anastasi, M. Conti, S. K. Das y V. Neri, «Reliability and energy-efficiency in IEEE 802.15. 4/ZigBee sensor networks: An adaptive and cross-layer approach,» *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol. 29, n.º 8, págs. 1508-1524, 2011.
- [87] P. Baronti, P. Pillai, V. W. Chook, S. Chessa, A. Gotta e Y. F. Hu, «Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards,» *Computer communications*, vol. 30, n.º 7, págs. 1655-1695, 2007.
- [88] S. Devalal y A. Karthikeyan, «LoRa technology-an overview,» en *2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, India, 2018, págs. 284-290.
- [89] D. Davcev, K. Mitreski, S. Trajkovic, V. Nikolovski y N. Koteli, «IoT agriculture system based on LoRaWAN,» en *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, Imperia, Italia, 2018, págs. 1-4.
- [90] Z. Shelby, K. Hartke y C. Bormann. «The Constrained Application Protocol (CoAP).» (2014), dirección: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7252> (visitado 12-09-2022).
- [91] W. Colitti, K. Steenhaut, N. De Caro, B. Buta y V. Dobrota, «Evaluation of constrained application protocol for wireless sensor networks,» en *2011 18th IEEE Workshop on Local Metropolitan Area Networks (LANMAN)*, Chapel Hill, Carolina del Norte, EE.UU, 2011, págs. 1-6.
- [92] S.-M. Kim, H.-S. Choi y W.-S. Rhee, «IoT home gateway for auto-configuration and management of MQTT devices,» en *2015 IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSe)*, Malaca, Malasia, 2015, págs. 12-17.
- [93] A. Niruntasukrat, C. Issariyapat, P. Pongpaibool, K. Meesublak, P. Aiumsupucgul y A. Panya, «Authorization mechanism for MQTT-based internet of things,» en *2016 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*, Kuala Lumpur, Malasia, 2016, págs. 290-295.
- [94] W. Mahnke, S.-H. Leitner y M. Damm, *OPC unified architecture*. Springer Science & Business Media, 2009.
- [95] S. Cavalieri y F. Chiacchio, «Analysis of OPC UA performances,» *Computer Standards Interfaces*, vol. 36, n.º 1, págs. 165-177, 2013.

- 
- [96] Z. U. Haq, G. F. Khan y T. Hussain, «A comprehensive analysis of XML and JSON web technologies,» *New Developments in Circuits, Systems, Signal Processing, Communications and Computers*, págs. 102-109, 2014.
- [97] H. Rahman y M. I. Hussain, «A comprehensive survey on semantic interoperability for Internet of Things: State-of-the-art and research challenges,» *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 31, n.º 12, e3902, 2020.
- [98] M. Ganzha, M. Paprzycki, W. Pawłowski, P. Szmeja y K. Wasielewska, «Semantic interoperability in the internet of things: An overview from the INTER-IoT perspective,» *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 81, págs. 111-124, 2017.
- [99] W3C. «W3C semantic integration interoperability using RDF and OWL.» (2018), dirección: <https://www.w3.org/2001/sw/BestPractices/OEP/SemInt/> (visitado 09-12-2022).
- [100] G. Bajaj, R. Agarwal, P. Singh, N. Georgantas y V. Issarny, «A study of existing Ontologies in the IoT-domain,» *arXiv:1707.00112*, 2017.
- [101] I. Szilagyi y P. Wira, «Ontologies and Semantic Web for the Internet of Things-a survey,» en *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florencia, Italia, 2016, págs. 6949-6954.
- [102] T. R. Gruber, «A translation approach to portable ontology specifications,» *Knowledge Acquisition*, vol. 5, n.º 2, págs. 199-220, 1993.
- [103] J. Kiljander et al., «Semantic interoperability architecture for pervasive computing and internet of things,» *IEEE Access*, vol. 2, págs. 856-873, 2014.
- [104] J. Broekstra, A. Kampman y F. Van Harmelen, «Sesame: A generic architecture for storing and querying RDF and RDF schema,» en *International semantic web conference*, Cerdeña, Italia, 2002, págs. 54-68.
- [105] H. Neuhaus y M. Compton, «The semantic sensor network ontology,» en *AGILE workshop on challenges in geospatial data harmonisation*, Hannover, Alemania, 2009, págs. 1-33.
- [106] R. Bendadouche, C. Roussey, G. De Sousa, J.-P. Chanet y K. M. Hou, «Extension of the semantic sensor network ontology for wireless sensor networks: The Stimulus-WSNnode-Communication pattern,» en *Proceedings of the 5th International Conference on Semantic Sensor Networks - Volume 904*, Boston, Massachusetts, 2012, págs. 49-64.
- [107] H. Müller, L. Cabral, A. Morshed e Y. Shu, «From RESTful to SPARQL: A case study on generating semantic sensor data,» en *Conference: 6th International Workshop on Semantic Sensor Networks*, Sídney, Australia, 2013, págs. 51-66.
- [108] N. Kalatzis et al., «Semantic interoperability for iot platforms in support of decision making: an experiment on early wildfire detection,» *Sensors*, vol. 19, n.º 3, pág. 528, 2019.
- [109] C. Savaglio, G. Fortino y M. Zhou, «Towards interoperable, cognitive and autonomic IoT systems: An agent-based approach,» en *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Reston, EE.UU, 2016, págs. 58-63.
- [110] D. Anagnostopoulou, «The EU digital single market and the platform economy,» en *Economic Growth in the European Union: Analyzing SME and Investment Policies*. 2020, págs. 43-57.
- [111] E. Kovacs, M. Bauer, J. Kim, J. Yun, F. Le Gall y M. Zhao, «Standards-Based Worldwide Semantic Interoperability for IoT,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, n.º 12, págs. 40-46, 2016.
-



## BIBLIOGRAFÍA

---

- [112] F. Cirillo, G. Solmaz, E. L. Berz, M. Bauer, B. Cheng y E. Kovacs, «A standard-based open source IoT platform: FIWARE,» *IEEE Internet of Things Magazine*, vol. 2, n.º 3, págs. 12-18, 2019.
- [113] J. Conde, A. Munoz-Arcentales, Á. Alonso, S. López-Pernas y J. Salvachá, «Modeling digital twin data and architecture: A building guide with FIWARE as enabling technology,» *IEEE Internet Computing*, vol. 26, n.º 3, págs. 7-14, 2022.
- [114] M. Muñoz, J. L. Guzmán, M. Torres y F. G. Acién, «An IoT platform for data management in an industrial-scale microalgae cultivation plant,» *IEEE Access*, vol. 10, págs. 127 128-127 139, 2022.
- [115] M. Munoz, J. L. Guzmán, J. A. Sánchez-Molina, F. Rodríguez, M. Torres y M. Berenguel, «A new IoT-Based platform for greenhouse crop production,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, n.º 9, págs. 6325-6334, 2022.
- [116] M. Muñoz, J. D. Gil, L. Roca, F. Rodríguez y M. Berenguel, «An IoT architecture for water resource management in agroindustrial environments: A case study in Almería (Spain),» *Sensors*, vol. 20, n.º 3, 2020.
- [117] J. Swetina, G. Lu, P. Jacobs, F. Ennesser y J. Song, «Toward a standardized common M2M service layer platform: Introduction to OneM2M,» *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, n.º 3, págs. 20-26, 2014.
- [118] C.-W. Wu, F. J. Lin, C.-H. Wang y N. Chang, «OneM2M-based IoT protocol integration,» en *2017 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, Helsinki, Finlandia, 2017, págs. 252-257.
- [119] J. Swetina, G. Lu, P. Jacobs, F. Ennesser y J. Song, «Toward a standardized common M2M service layer platform: Introduction to OneM2M,» *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, n.º 3, págs. 20-26, 2014.
- [120] M. A. Pisching, M. A. Pessoa, F. Junqueira, D. J. dos Santos Filho y P. E. Miyagi, «An architecture based on RAMI 4.0 to discover equipment to process operations required by products,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 125, págs. 574-591, 2018.
- [121] J. Pizoñ y J. Lipski, «Perspectives for fog computing in manufacturing,» *Applied Computer Science*, vol. 12, n.º 3, 2016.
- [122] C. Zhu, V. C. Leung, L. Shu y E. C.-H. Ngai, «Green internet of things for smart world,» *IEEE access*, vol. 3, págs. 2151-2162, 2015.
- [123] W. Shi y S. Dustdar, «The promise of edge computing,» *Computer*, vol. 49, n.º 5, págs. 78-81, 2016.
- [124] F. Bonomi, R. Milito, P. Natarajan y J. Zhu, «Fog computing: A platform for internet of things and analytics,» en *Big Data and Internet of Things: A Roadmap for Smart Environments*. 2014, págs. 169-186.
- [125] F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu y S. Addepalli, «Fog computing and its role in the internet of things,» en *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing*, Helsinki, Finlandia, 2012, págs. 13-16.
- [126] B. Varghese, N. Wang, S. Barbhuiya, P. Kilpatrick y D. S. Nikolopoulos, «Challenges and opportunities in edge computing,» en *2016 IEEE International Conference on Smart Cloud (SmartCloud)*, Nueva York, EE. UU., 2016, págs. 20-26.
- [127] Y. Jararweh, A. Doulat, O. AlQudah, E. Ahmed, M. Al-Ayyoub y E. Benkhelifa, «The future of mobile cloud computing: integrating cloudlets and mobile edge computing,» en *2016 23rd International conference on telecommunications (ICT)*, Salónica, Grecia, 2016, págs. 1-5.

- 
- [128] Y. C. Hu, M. Patel, D. Sabella, N. Sprecher y V. Young, «Mobile edge computing-a key technology towards 5G,» *ETSI white paper*, vol. 11, n.º 11, págs. 1-16, 2015.
- [129] B. W. Wirtz, J. C. Weyerer y F. T. Schichtel, «An integrative public IoT framework for smart government,» *Government Information Quarterly*, vol. 36, n.º 2, págs. 333-345, 2019.
- [130] W. Shi, J. Cao, Q. Zhang, Y. Li y L. Xu, «Edge computing: Vision and challenges,» *IEEE internet of things journal*, vol. 3, n.º 5, págs. 637-646, 2016.
- [131] M. De Donno, K. Tange y N. Dragoni, «Foundations and evolution of modern computing paradigms: Cloud, IoT, edge, and fog,» *IEEE Access*, vol. 7, págs. 150 936-150 948, 2019.
- [132] R. Roman, J. Lopez y M. Mambo, «Mobile edge computing, fog et al.: A survey and analysis of security threats and challenges,» *Future Generation Computer Systems*, vol. 78, págs. 680-698, 2018.
- [133] P. Mach y Z. Becvar, «Mobile edge computing: A survey on architecture and computation offloading,» *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 19, n.º 3, págs. 1628-1656, 2017.
- [134] K. Dolui y S. K. Datta, «Comparison of edge computing implementations: Fog computing, cloudlet and mobile edge computing,» en *2017 Global Internet of Things Summit (GloTS)*, Ginebra, Suiza, 2017, págs. 1-6.
- [135] M. Gusev y S. Dustdar, «Going back to the roots-the evolution of edge computing, an IoT perspective,» *IEEE Internet Computing*, vol. 22, n.º 2, págs. 5-15, 2018.
- [136] C. Li, Y. Xue, J. Wang, W. Zhang y T. Li, «Edge-oriented computing paradigms: A survey on architecture design and system management,» *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 51, n.º 2, págs. 1-34, 2018.
- [137] M. Chiang, S. Ha, F. Risso, T. Zhang e I. Chih-Lin, «Clarifying fog computing and networking: 10 questions and answers,» *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, n.º 4, págs. 18-20, 2017.
- [138] M. Chiang y T. Zhang, «Fog and IoT: An overview of research opportunities,» *IEEE Internet of things journal*, vol. 3, n.º 6, págs. 854-864, 2016.
- [139] I. Stojmenovic y S. Wen, «The fog computing paradigm: Scenarios and security issues,» en *2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, Varsovia, Polonia, 2014, págs. 1-8.
- [140] M. Chiang, B. Balasubramanian y F. Bonomi, *Fog for 5G and IoT*. Wiley Online Library, 2017, vol. 288.
- [141] S. Yi, C. Li y Q. Li, «A survey of fog computing: Concepts, applications and issues,» en *Proceedings of the 2015 workshop on mobile big data*, Hangzhou, China, 2015, págs. 37-42.
- [142] R. Mahmud, R. Kotagiri y R. Buyya, «Fog computing: A taxonomy, survey and future directions,» en *Internet of Everything: Algorithms, Methodologies, Technologies and Perspectives*. 2018, págs. 103-130.
- [143] A. Carrega y M. Repetto, «A network-centric architecture for building the cloud continuum,» en *2017 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, Silicon Valley, EE. UU., 2017, págs. 701-705.
- [144] L. Bittencourt et al., «The internet of things, fog and cloud continuum: Integration and challenges,» *Internet of Things*, vol. 3-4, págs. 134-155, 2018.
- [145] M. Satyanarayanan et al., «Edge Analytics in the internet of things,» *IEEE Pervasive Computing*, vol. 14, n.º 2, págs. 24-31, 2015.
-

- [146] M. Armbrust et al., «A view of cloud computing,» *Communications of the ACM*, vol. 53, n.º 4, págs. 50-58, 2010.
- [147] Q. Zhang, L. Cheng y R. Boutaba, «Cloud computing: State-of-the-art and research challenges,» *Journal of Internet Services and Applications*, vol. 1, n.º 1, págs. 7-18, 2010.
- [148] Y. Wei y M. B. Blake, «Service-oriented computing and cloud computing: Challenges and opportunities,» *IEEE Internet Computing*, vol. 14, n.º 6, págs. 72-75, 2010.
- [149] P. Mell, T. Grance et al. «The NIST definition of cloud computing.» (2012), dirección: <http://faculty.winthrop.edu/domanm/csci411/Handouts/NIST.pdf> (visitado 24-08-2022).
- [150] A. R. Biswas y R. Giaffreda, «IoT and cloud convergence: Opportunities and challenges,» en *2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, Seúl, Corea (Sur), 2014, págs. 375-376.
- [151] A. C. Baktir, A. Ozgovde y C. Ersoy, «How can edge computing benefit from software-defined networking: A survey, use cases, and future directions,» *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, n.º 4, págs. 2359-2391, 2017.
- [152] N. Jain y S. Choudhary, «Overview of virtualization in cloud computing,» en *2016 Symposium on Colossal Data Analysis and Networking (CDAN)*, Indore, India, 2016.
- [153] M. G. Xavier, M. V. Neves, F. D. Rossi, T. C. Ferreto, T. Lange y C. A. De Rose, «Performance evaluation of container-based virtualization for high performance computing environments,» en *2013 21st Euromicro International Conference on Parallel, Distributed, and Network-Based Processing*, Belfast, Reino Unido, 2013, págs. 233-240.
- [154] M. Masdari, S. S. Nabavi y V. Ahmadi, «An overview of virtual machine placement schemes in cloud computing,» *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 66, págs. 106-127, 2016.
- [155] D. Liu y L. Zhao, «The research and implementation of cloud computing platform based on docker,» en *2014 11th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP)*, Chengdú, China, 2014, págs. 475-478.
- [156] R. Morabito, V. Cozzolino, A. Y. Ding, N. Beijar y J. Ott, «Consolidate IoT edge computing with lightweight virtualization,» *IEEE Network*, vol. 32, n.º 1, págs. 102-111, 2018.
- [157] I. Odun-Ayo, M. Ananya, F. Agono y R. Goddy-Worlu, «Cloud computing architecture: A critical analysis,» en *2018 18th International Conference on Computational Science and Applications (ICCSA)*, Melbourne, Australia, 2018.
- [158] F. Lombardi y R. Di Pietro, «Secure virtualization for cloud computing,» *Journal of network and computer applications*, vol. 34, n.º 4, págs. 1113-1122, 2011.
- [159] F. Hu et al., «A review on cloud computing: Design challenges in architecture and security,» *Journal of computing and information technology*, vol. 19, n.º 1, págs. 25-55, 2011.
- [160] A. Verma y S. Kaushal, «Cloud computing security issues and challenges: A survey,» en *International Conference on Advances in Computing and Communications*, Kochi, India, 2011, págs. 445-454.
- [161] S. Bhardwaj, L. Jain y S. Jain, «Cloud computing: A study of infrastructure as a service (IAAS),» *International Journal of engineering and information Technology*, vol. 2, n.º 1, págs. 60-63, 2010.

- [162] M. Aazam, I. Khan, A. A. Alsaffar y E.-N. Huh, «Cloud of things: Integrating internet of things and cloud computing and the issues involved,» en *Proceedings of 2014 11th International Bhurban Conference on Applied Sciences Technology (IBCAST) Islamabad, Pakistan, 14th - 18th January, 2014*, 2014, págs. 414-419.
- [163] Google. «Google Cloud IoT Core.» (2022), dirección: <https://cloud.google.com/iot-core> (visitado 24-08-2022).
- [164] Aws.amazon.com. «Internet de las cosas | Plataforma como servicio | AWS IoT.» (2021), dirección: <https://aws.amazon.com/es/iot/> (visitado 24-08-2022).
- [165] Y. Duan, G. Fu, N. Zhou, X. Sun, N. C. Narendra y B. Hu, «Everything as a Service (XaaS) on the cloud: Origins, current and future trends,» en *IEEE 8th International Conference on Cloud Computing*, Noida, India, 2015, págs. 621-628.
- [166] J. A. Sánchez-Molina, M. Li, F. Rodríguez, J. L. Guzmán, H. Wang y X. T. Yang, «Development and test verification of air temperature model for Chinese solar and Spanish Almeria-type greenhouses,» *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 10, n.º 4, págs. 66-76, 2017, cited By 1.
- [167] F. Rodríguez, M. Berenguel, J. L. Guzmán y A. Ramírez-Arias, *Modeling and control of greenhouse crop growth*. Springer, 2015.
- [168] J. A. Sánchez-Molina, F. Rodríguez, J. L. Guzmán y J. A. Ramírez-Arias, «Water content virtual sensor for tomatoes in coconut coir substrate for irrigation control design,» *Agricultural Water Management*, vol. 151, págs. 114-125, 2015, cited By 11.
- [169] J. A. Sánchez-Molina, N. Pérez, F. Rodríguez, J. L. Guzmán y J. López, «Support system for decision making in the management of the greenhouse environmental based on growth model for sweet pepper,» *Agricultural Systems*, vol. 139, págs. 144-152, 2015.
- [170] M. Gallardo, F. Arrabal, F. Padilla, M. Peña-Fleitas y R. Thompson, «Veg Syst-DSS software to calculate N and irrigation requirements for seven vegetable species grown with fertigation in greenhouses in SE Spain,» *Acta Horticulturae*, vol. 1182, págs. 65-72, 2017.
- [171] I. The MathWorks. «Matlab User Guide.» (2019), dirección: <https://es.mathworks.com/help/> (visitado 24-07-2022).
- [172] M. Muñoz-Rodríguez, J. L. Guzmán, J. A. Sánchez-Molina, F. Rodríguez y M. Torres, «Greenhouse Models as a Service (GMaaS) for simulation and control,» en *6th IFAC Conference on Sensing, Control and Automation Technologies for Agriculture*, Sydney, Australia, 2019.
- [173] J. L. Guzmán, F. G. Ación y M. Berenguel, «Modelling and control of microalgae production in industrial photobioreactors,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, vol. 18, n.º 1, págs. 1-18, 2021.
- [174] E. Rodríguez-Miranda, J. L. Guzmán, M. Berenguel, F. G. Ación y A. Visioli, «Diurnal and nocturnal ph control in microalgae raceway reactors by combining classical and event-based control approaches,» *Water Science and Technology*, vol. 82, n.º 6, págs. 1155-1165, 2020.
- [175] E. Rodríguez-Miranda, J. L. Guzmán, F. G. Ación, M. Berenguel y A. Visioli, «Indirect regulation of temperature in raceway reactors by optimal management of culture depth,» *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 118, n.º 3, págs. 1186-1198, 2021.
- [176] G. Zaragoza, A. Ruiz-Aguirre y E. Guillén-Burrieza, «Efficiency in the use of solar thermal energy of small membrane desalination systems for decentralized water production,» *Applied Energy*, vol. 130, págs. 491-499, 2014.

- [177] M. d. M. Castilla, J. D. Álvarez, F. Rodríguez y M. Berenguel, *Comfort control in buildings*. Springer, 2014.
- [178] S. Ahmed y Q. Mahmood, «An authentication based scheme for applications using JSON web token,» en *2019 22nd International Multitopic Conference (INMIC)*, Islamabad, Pakistán, 2019, págs. 1-6.
- [179] R. Shamshiri et al., «Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture,» *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, vol. 11, n.º 1, págs. 1-22, 2018.
- [180] J. Bauer y N. Aschenbruck, «Design and implementation of an agricultural monitoring system for smart farming,» en *2018 IoT Vertical and Topical Summit on Agriculture - Tuscany (IOT Tuscany)*, Toscana, Italia, 2018, págs. 1-6.
- [181] C. Cambra, S. Sendra, J. Lloret y L. Garcia, «An IoT service-oriented system for agriculture monitoring,» en *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, París, Francia, 2017, págs. 1-6.
- [182] G. Sushanth y S. Sujatha, «IoT based smart agriculture system,» en *2018 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, India, 2018, págs. 1-4.
- [183] R. Rupnik, M. Kukar, P. Vračar, D. Košir, D. Pevec y Z. Bosnić, «AgroDSS: A decision support system for agriculture and farming,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 161, págs. 260-271, 2019.
- [184] A. Kaloxylos et al., «A cloud-based farm management system: Architecture and implementation,» *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 100, págs. 168-179, 2014.
- [185] M. Muñoz-Rodríguez, J. A. Sánchez-Molina, M. Torres y M. Berenguel, «IoT-Based APP architecture for greenhouse management,» en *EFITA-HAICTA-WCCA Congress*, Rodas, Grecia, 2019, págs. 101-105.
- [186] M. Muñoz-Rodríguez, J. A. Sánchez-Molina, C. Giagnocavo y M. Berenguel, «IoT aplicado a la trazabilidad y a la toma de decisiones para cultivo de tomate en invernadero,» en *I Simposio Ibérico de Ingeniería Hortícola*, Lugo, España, 2018.
- [187] M. Muñoz-Rodríguez, J. A. Sánchez-Molina, F. Rodríguez, M. Berenguel y C. Giagnocavo, «Farms, fogs and clouds: Data open-architecture for optimal crop growth control for IoF2020 project,» en *Proceedings of the European Conference on Agricultural Engineering AgEng2018*, Wageningen, Países Bajos, 2018, págs. 8-12.
- [188] M. Muñoz-Rodríguez, J. A. Sánchez-Molina, M. Torres, M. Berenguel y C. Giagnocavo, «Experiencias en el uso de Internet de las Cosas en las tareas de producción en invernaderos mediterráneos,» en *II Simposio Ibérico de Ingeniería Hortícola*, Ponte de Lima, Portugal, 2020.
- [189] M. Muñoz-Rodríguez, J. A. Sánchez-Molina, M. Berenguel y C. Giagnocavo, «La importancia del IoT en la agricultura: herramienta para la ayuda a la toma de decisiones,» en *I Congreso de Jóvenes Investigadores en Ciencias Agroalimentarias*, Almería, España, 2018.
- [190] Á. Hoyo, J. L. Guzmán, J. C. Moreno y A. Baños, «Robust control of the pH in raceway photobioreactor,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 19, n.º 3, págs. 274-283, 2022.
- [191] J. González-Hernández, E. Rodríguez-Miranda, J. L. Guzmán, F. G. Ación y A. Visioli, «Temperature optimization in raceway reactors for the microlage production based on culture depth regulation,» *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, vol. 19, n.º 2, págs. 164-173, 2022.

- [192] K. Wang et al., «How does the Internet of Things (IoT) help in microalgae biorefinery?» *Biotechnology Advances*, vol. 54, pág. 107819, 2022.
- [193] P. E. Tham et al., «Sustainable smart photobioreactor for continuous cultivation of microalgae embedded with Internet of Things,» *Bioresource Technology*, vol. 346, pág. 126558, 2022.
- [194] H. R. Lim, K. S. Khoo, W. Y. Chia, K. W. Chew, S.-H. Ho y P. L. Show, «Smart microalgae farming with internet-of-things for sustainable agriculture,» *Biotechnology Advances*, vol. 57, pág. 107931, 2022.
- [195] M. Muñoz-Rodríguez, J. L. Guzmán, M. Torres, J. A. Sánchez-Molina y F. Acién, «Arquitectura cloud y tratamiento de datos en un sistema de producción basado en las microalgas,» en *III Simposio Ibérico de Ingeniería Hortícola*, Cartagena, España, 2018.
- [196] I. Cazarro, R. Duarte, M. Martín-Retortillo, V. Pinilla y A. Serrano, «Water scarcity and agricultural growth in Spain: from curse to blessing,» *Natural Resources and Economic Growth: Learning from History*. Routledge, London, págs. 339-361, 2015.
- [197] J. A. Aznar-Sánchez, L. J. Belmonte-Ureña, J. F. Velasco-Muñoz y D. L. Valera, «Aquifer sustainability and the use of desalinated seawater for greenhouse irrigation in the campo de Nijar, southeast Spain,» *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 16, n.º 5, pág. 898, 2019.
- [198] V. Martínez-Álvarez, B. Martín-Gorrioz y M. Soto-García, «Seawater desalination for crop irrigation: A review of current experiences and revealed key issues,» *Desalination*, vol. 381, págs. 58-70, 2016.
- [199] J. A. López-Riquelme, N. Pavón-Pulido, H. Navarro-Hellín, F. Soto-Valles y R. Torres-Sánchez, «A software architecture based on FIWARE cloud for precision agriculture,» *Agricultural Water Management*, vol. 183, págs. 123-135, 2017.
- [200] M. A. Zamora-Izquierdo, J. Santa, J. A. Martínez, V. Martínez y A. F. Skarmeta, «Smart farming IoT platform based on edge and cloud computing,» *Biosystems Engineering*, vol. 177, págs. 4-17, 2019.
- [201] J. D. Gil, M. Muñoz, L. Roca, F. Rodríguez y M. Berenguel, «An IoT based control system for a solar Membrane distillation plant used for greenhouse irrigation,» en *2019 Global IoT Summit (GloTS)*, Utrecht, Dinamarca, 2019, págs. 1-6.
- [202] M. Muñoz-Rodríguez, J. A. Sánchez-Molina, M. Torres, M. Berenguel y C. Giagnocavo, «Experiências do uso da Internet das Coisas (IoT) em tarefas de produção em estufas mediterrânicas,» en *Associação Portuguesa de Horticultura (APH)*, vol. 136, 2020, págs. 27-29.
- [203] V. Maldonado, J. A. Sánchez-Molina, M. Muñoz, M. Berenguel y J. Cañadas, «GreenBook: App híbrida para el seguimiento y control de explotaciones agrarias intensivas,» en *X Congreso Ibérico de Agroingeniería*, Huesca, España, 2019, págs. 998-1003.
- [204] C. Amate, J. A. S. Molina, L. Gallardo, M. Muñoz y R. Thomson, «Design of a cucumber growth prediction model based on environmental data to be used as decision support system tool,» en *EFITA-HAICTA-WCCA Congress*, Rodas, Grecia, 2019.
- [205] M. Muñoz-Rodríguez, «Aplicación del IoT en la agricultura intensiva protegida,» en *II Jornadas de Doctorado en Informática de la Universidad de Almería*, Almería, España, 2019.
- [206] M. Muñoz Rodríguez, «Actualización de la plataforma IoT para la agricultura intensiva con MaaS e integración de nuevas plataformas,» en *III Jornadas de Doctorado en Informática de la Universidad de Almería*, Almería, España, 2020.

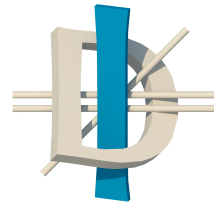
## BIBLIOGRAFÍA

---

- [207] M. Muñoz-Rodríguez, «Integración de modelos como servicio (GMaaS) en iVeg, plataforma IoT para la agricultura intensiva protegida,» en *IV Jornadas de Doctorado en Informática de la Universidad de Almería*, Almería, España, 2021.
- [208] M. Muñoz Rodríguez, «IoT aplicado al sector agroindustrial, uso de modelos como servicio y arquitectura cloud,» en *V Jornadas de Doctorado en Informática de la Universidad de Almería*, Almería, España, 2022.







DEPARTAMENTO  
DE INFORMÁTICA  
UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

