



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

Departamento de Informática y Automática
Facultad de Ciencias

TESIS DOCTORAL

Arquitectura Inteligente Edge Computing para entornos IoT

Autora:

Inés Sittón Candanedo

Director:

Dr. Juan Manuel Corchado Rodríguez

Codirectora:

Dra. Sara Rodríguez González

Salamanca, 2020

Papá, mamá, esto es por y para ustedes...
A mi abuela Idalina, la mujer más fuerte que he conocido...

Autorización del Director

En Salamanca, a 16 de enero de 2020.

HACEMOS CONSTAR:

Que como directores de la Tesis Doctoral de Inés Xiomara Sittón Candanedo, con Pasaporte: PA0307862, autorizamos a presentar la tesis doctoral *Arquitectura Inteligente Edge Computing para entornos IoT, mediante la modalidad de compendio de artículos* al disponer de los siguientes artículos publicados:

1. Sittón-Candanedo, I., Alonso, R. S., Corchado, J. M., Rodríguez-González, S., & Casado-Vara, R. (2019). *A review of Edge Computing Reference Architectures and a New Global Edge Proposal*. *Future Generation Computer Systems*, 99, 278-294.
2. Sittón-Candanedo, I., Alonso, R. S., García, Ó., Gil, A. B., & Rodríguez-González, S. (2020). *A Review on Edge Computing in Smart Energy by means of a Systematic Mapping Study*. *Electronics*, 9(1), 48.
3. Sittón-Candanedo, I., Alonso, R. S., García, Ó., Muñoz, L., & Rodríguez-González, S. (2019). *Edge computing, IoT and Social Computing in Smart Energy scenarios*. *Sensors*, 19(15), 3353.
4. Alonso, R. S., Sittón-Candanedo, I., García, Ó., Prieto, J., & Rodríguez-González, S. (2020). *An intelligent Edge-IoT platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario*. *Ad Hoc Networks*, 98, 102047.

Resumen

El Internet de las Cosas es una de las tecnologías disruptivas que mayor interés ha generado en los últimos años, no solo en el ámbito de la investigación científica, sino también en el sector gubernamental y empresarial. Su incorporación a todos los entornos de actividad humana y social como: los servicios públicos, agricultura, industria, economía, educación o salud, permite obtener datos desde cualquier dispositivo conectado a una red.

El principal problema de la acelerada integración de Internet de las Cosas es la gestión del gran volumen de datos generados constantemente por los dispositivos conectados, es decir, su procesamiento, distribución y almacenamiento, para que posteriormente sean utilizados a modo de información en los procesos de inteligencia de negocios.

La tesis doctoral que se presenta propone una solución tecnológica que consiste en el diseño de una arquitectura global que integra tecnologías del Edge Computing (EC) y el Internet de las Cosas (IoT), que permita su implementación en una diversidad de escenarios.

La arquitectura propuesta en esta investigación se denomina Global Edge Computing Architecture (GECA) y contribuye a un procesamiento eficiente de los datos que son generados por el creciente número de dispositivos IoT, que actualmente forman parte de nuestro entorno.

En este trabajo se presenta la descripción conceptual y técnica de la arquitectura propuesta, así como el componente experimental del estudio, que consistió en la ejecución de pruebas de la arquitectura GECA en entornos reales. Para lograrlo se establecieron dos escenarios de prueba mediante la integración de dispositivos IoT con la tecnología EC.

El primero es un caso de estudio del sector Smart Farming, en una granja mixta de producción de leche, ubicada en la provincia de Zamora, Comunidad Autónoma de Castilla y León. El segundo se realizó en las instalaciones del Grupo de Investigación BISITE de la Universidad de Salamanca, incorporando al análisis experimental un escenario Smart Energy.

Ambos casos de estudio están orientados a lograr maximizar los beneficios y aportes para la gestión eficiente y segura de los datos en las organizaciones. Las capas que componen la arquitectura propuesta han sido diseñadas para gestionar en el Edge la información que es recibida de la red de sensores inteligentes instalada.

Para la realización de diagnósticos y presentación de resultados se proponen técnicas de Data Analytics y Machine Learning. La seguridad en la arquitectura propuesta inicia en la capa base con el cifrado los datos generados por los sensores para procesarlos posteriormente en la capa Edge. Adicionalmente se incluye una descripción de la implementación de GECA en sistemas basados en otros framework como es el caso del CAFCLA.

Finalmente, hemos evaluado la viabilidad de la capa Edge y los beneficios que se pueden obtener al reducir los costes asociados con el consumo de ancho de banda, transferencia y almacenamiento de datos en el Cloud.

Abstract

The Internet of Things is a disruptive technology that has, in recent years, attracted much attention of the scientific community, the government and the business sector. The incorporation of IoT into all areas of human and social activity, such as public services, agriculture, industry, economy, education or health, will make it possible to obtain data from any network-connected device.

However, the rapid implementation of the Internet of Things is being hindered by limited data management i.e. the lack of capacity to process, distribute and store large volumes of data. IoT-connected devices generate data constantly but the IoT paradigm will not be effective if it is not possible to extract valuable information and apply it in business intelligence processes.

This doctoral thesis proposes an effective technological solution to this problem through the development of an architecture called the Global Edge Computing Architecture (GECA). GECA integrates Edge Computing (EC) and Internet of Things (IoT) technologies for the efficient processing of the data generated by the ever-increasing number of IoT devices in our environment.

This research presents the conceptual and technical description of the proposed architecture, it also details the experimental phase, which consisted in the testing of the GECA architecture in two scenarios in real environments.

The first one is a case study of the Smart Farming sector, conducted on a mixed dairy production farm, located in the province of Zamora, Castilla y León Autonomous Community. The second one was carried out at the facilities of the BISITE Research Group of the University of Salamanca, in which the experimental analysis involved a Smart Energy scenario.

Both case studies have been conducted with the aim of maximizing the benefits and contributions of GECA to the efficient and safe management of data in organizations. The layers that make up the proposed architecture have been designed to manage the information that is received from the deployed smart sensor network.

The base layer of the proposed architecture ensures security through the encryption of the data obtained from sensors. Encrypted data are processed at a later stage in the edge layer. Additionally, GECA's performance has also been studied in systems based on

other frameworks, such as CAFCLA. Data Analytics and Machine Learning techniques are proposed as tools for diagnoses and the outcomes are presented.

Finally, we have evaluated the feasibility of the Edge layer and the benefits that can be obtained from reducing the costs associated with bandwidth consumption and with the transfer and storage of data in the Cloud.

Agradecimientos

Al finalizar una etapa más en el camino, inicio agradeciendo a mis directores: Juan Manuel y Sara, porque quizá sin imaginarlo me han acompañado desde el 2015, primero en la distancia y luego al incorporarme al Grupo BISITE, gracias a ambos por vuestra confianza y apoyo durante estos años. A Juan Manuel mi admiración y respeto por su trabajo, visión de futuro e ideas que lo cambian todo y llegan siempre en el mejor momento.

Sara, hoy y siempre GRACIAS por indicarme el camino a seguir, por soportar la carga de correos que van y vienen. Por tu infinita paciencia para guiarme, por las revisiones, los cafés y las risas; sin tu apoyo no lo habría logrado.

Mamá, papá, habéis tenido una vida llena de esfuerzos y privaciones para darnos a mi hermano y a mí todo lo que estaba a vuestro alcance para educarnos. Gracias por todo, llegar hasta aquí no habría sido posible sin vosotros. Que la vida nos permita recuperar estos años que la distancia y este proyecto les han arrebatado.

Yen, gracias por tu apoyo, cariño y motivación para ir siempre a por más. Este trabajo también es el resultado de tu esfuerzo.

Sofía, mia principessa per sempre, posiblemente en este momento no comprendas mis palabras. Hija, gracias por ser la mejor compañera en este viaje, por tu eterna sonrisa y tus abrazos infinitos que hacen los días más cortos y las cargas más livianas.

A mi hermano, que quizá sin saberlo, me ha enseñado que no importa lo difícil que sea el camino, o cuanto peso lleves sobre los hombros, siempre es necesario encontrar un motivo para reír.

Gracias a mis tíos Fernando y Vilma, así como a Deyka, quienes nos extendieron su mano y confianza para la obtención de esta beca. Mi cariño y gratitud por todo vuestro apoyo incondicional.

Ricardo y Óscar, “edgecolegas” gracias por las trasnochadas, las correcciones, los consejos, los ánimos y todo el esfuerzo que habéis realizado durante este último año de trabajo en equipo. Sin café panameño, gif, emojis y buen humor la inspiración no llega.

Elena y Sara (en Salamanca) Deyka y Margareth (en la distancia), estos años me han acompañado haciendo ruido o en silencio, con risas o lágrimas, cada día bueno o malo, pero siempre ahí. Gracias por sus interminables consejos,

habéis sido amigas, maestras de la vida, soporte y compañía. ¡Que sean muchos años más así!

A mis Abuelos y Aura, gracias por cuidar de mí, ser ejemplo de dedicación, trabajo y amor. Mi agradecimiento a todos los tíos, primos, sobrinos o amigos, que en su día a día han acompañado y cuidado de mis padres en momentos complicados, y también se han hecho presentes mediante sus mensajes. Mi gratitud a todo el equipo BISITE, no sólo por recibirme, sino también por las enseñanzas, el tiempo, los cafés, las risas y los momentos que siempre permanecerán en mi recuerdo.

Finalmente, al Programa de Becas IFARHU-SENACYT por permitirme completar una etapa más de formación.

Tabla de Contenido

Autorización del Director	v
Aceptación escrita de los coautores de los artículos presentados	v
Aceptación escrita de los coautores de los artículos presentados	v
Aceptación escrita de los coautores de los artículos presentados	v
Resumen	xi
Abstract	xiii
Agradecimientos	xv
Glosario	xxi
Siglas y acrónimos	xxiii
1 Introducción	1
1.1 Planteamiento del Problema	3
1.2 Motivación e hipótesis	5
1.3 Metodología de Investigación	8
1.4 Estructura de la memoria	10
2 Estado del Arte	13
2.1 Edge Computing	15
2.2 Escenarios Edge Computing	19
2.2.1 Industria 4.0	19
2.2.2 Smart Farming	21
2.2.3 Smart Energy	22
2.3 Arquitecturas de Referencia Edge Computing	24
2.3.1 FAR-Edge	25
2.3.2 Edge Computing 2.0.	27
2.3.3 Industrial Internet Consortium	30

2.3.4	INTEL-SAP	32
2.4	Conclusiones	34
3	Contribuciones	35
3.1	Introducción	37
3.2	Arquitectura propuesta	38
3.3	Descripción técnica	42
3.3.1	IoT-Layer	42
3.3.2	Edge Layer	46
3.3.3	Business Solution Layer	47
3.4	GECA en un escenario de Smart Farming	49
3.4.1	Experimentación y resultados	50
3.5	GECA para Smart Energy	53
3.5.1	Un Estudio de Mapeo Sistemático de la Literatura	54
3.5.1.1	Experimentación y resultados	55
3.5.2	GECA aplicado a un escenario smart energy	60
3.5.2.1	Descripción	60
3.5.2.2	Experimentación y resultados	62
3.6	Conclusiones	65
4	Publicaciones acreditativas de la investigación realizada	67
4.1	A Review of Edge Computing Reference Architectures and a New Global Edge Proposal	69
4.1.1	Información de la publicación	69
4.1.2	Introducción	70
4.1.3	Objetivos	70
4.1.4	Conclusiones	71
4.1.5	Publicación Original	71
4.2	A Review on Edge Computing in Smart Energy by means of a Systematic Mapping Study.	89
4.2.1	Información de la publicación	89
4.2.2	Introducción	89
4.2.3	Objetivos	90
4.2.4	Conclusiones	90
4.2.5	Publicación Original	91
4.3	Edge computing, IoT and Social Computing in Smart Energy Scenarios .	125
4.3.1	Información de la publicación	125
4.3.2	Introducción	125
4.3.3	Objetivos	126
4.3.4	Conclusiones	127
4.3.5	Publicación Original	127
5	Evidencias y Resultados	149
5.1	Publicaciones	151
5.1.1	Publicaciones en revistas científicas internacionales	151
5.1.2	Publicaciones en congresos internacionales y workshops	152
5.2	Proyectos	153

6 Conclusiones	155
6.1 Conclusiones	157
6.2 Trabajo futuro	162
Bibliografía	165

Glosario

<i>Internet of Things</i>	La ITU (International Telecommunication Union) y el IERC (Internet of Things European Research Cluster), lo definen como: “una infraestructura de Red Global y dinámica con la auto-configuración de las capacidades basadas en protocolos de comunicación estándar e inter-operables, donde “cosas” físicas y virtuales tienen identidad, atributos físicos, personalidades virtuales y utilizan interfaces inteligentes que se integran a la perfección en la red de información”.
<i>Cloud Computing</i>	Un sistema para proporcionar acceso bajo demanda a un conjunto compartido de recursos informáticos, incluyendo servidores de red, almacenamiento y servicios de computación.
<i>Edge Computing</i>	Plataforma abierta distribuida en el borde de la red, cerca de las cosas o fuentes de datos, e integrando las capacidades de redes, almacenamiento y aplicaciones.
<i>Edge devices</i>	Dispositivo para recopilar y procesar los datos. También puede utilizar la capacidad limitada de almacenamiento de datos y computación de dispositivos de usuario tales como teléfonos inteligentes, ordenadores portátiles y sensores para procesar cargas de trabajo de computación de borde.
<i>Edge Node</i>	Un nodo de cálculo, como un servidor individual u otro conjunto de recursos informáticos, operado como parte de una infraestructura Edge Computing.
<i>Centro de Datos</i>	Se refiere a un nodo de cálculo y almacenamiento de datos en algunos contextos. Varía en escala entre un centro de datos centralizado, un centro de datos regional y un centro de datos de extremo.

<i>Latencia</i>	En el contexto de la transmisión de datos en red, el tiempo que tarda una unidad de datos (normalmente una trama o un paquete) en viajar desde su dispositivo de origen hasta su destino previsto. Medido en términos de mili-segundos en puntos únicos o repetidos en el tiempo entre dos o más puntos finales.
<i>Orquestación</i>	El proceso de determinar dónde y cómo se debe procesar una carga de trabajo de aplicaciones en el gradiente de n-niveles de los recursos de computación, almacenamiento de datos y red proporcionados por el edge. En la mayoría de los casos, la orquestación de la carga de trabajo se realiza mediante un sistema automatizado que tiene en cuenta los requisitos de rendimiento, tiempo y coste de un operador de aplicaciones en ese punto.
<i>Blockchain</i>	Es una estructura de datos en la que la información contenida se agrupa en conjuntos (bloques) a los que se les añade metainformaciones relativas a otro bloque de la cadena anterior en una línea temporal, de manera que gracias a técnicas criptográficas, la información contenida en un bloque solo puede ser repudiada o editada modificando todos los bloques posteriores.

Siglas y acrónimos

EC	Edge Computing
BC	Blockchain
IoT	Internet of Things
CC	Cloud Computing
MQTT	Message Query Telemetry Transport
RA	Reference Architecture
ECC	Edge Computing Consortium
ICC	Industrial Internet Consortium
GECA	Global Edge Computing Architecture
M2M	Machine 2 (to) Machine
BLE	Bluetooth Low Energy
ML	Machine Learning
LoRa	Long Range
WiFi	Wireless Fidelity
UNB	Ultra Narrow Band
SMP	Systematic Mapping Study
GPRS	General Packet Radio Service
CAFCLA	Context Aware Framework for Collaborative Learning Activities

CS	C loud S ervices
SE	S mart E nergy
SF	S mart F arming
EN	E dge N odes
SoC	S ystem o n a C hip
JSON	J ava S cript O bject N otation
API	A pplication P rogramming I nterface
HTTP	H yperText T ransfer P rotocol
XML	e Xtensible M arkup L anguage
SOAP	S imple O bject A ccess P rotocol

Capítulo 1

Introducción



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Introducción

1.1 Planteamiento del Problema

Las actividades que se desarrollan actualmente a nivel tecnológico, empresarial e industrial, se basan cada día más en los datos que producen los dispositivos de Internet de las Cosas (Internet of Things, por sus siglas en inglés IoT). En consecuencia, las organizaciones enfrentan un crecimiento del IoT, impulsado por el volumen de dispositivos que forman parte de su entorno: sensores, actuadores, teléfonos inteligentes, monitores portátiles de actividad física, por mencionar sólo algunos. Todos estos equipos tienen en común su capacidad para generar, monitorizar, enviar, recibir e incluso analizar grandes cantidades de datos [Capra et al., 2019] .

El paradigma IoT ha revolucionado los modelos de negocios y la vida de los usuarios, debido a la disminución de los costes de producción de dispositivos y el incremento de la demanda. Una tendencia que como se observa en la Figura 1.1, se ha incrementado rápidamente con el avance de los años, así lo afirman Yang et al. [2019] que utilizan los datos de Gartner ¹ (empresa de investigación y asesoramiento empresarial) y señalan que en 2020 se espera una producción de dispositivos IoT aproximadamente de 30 billones de unidades.

Esta evolución del IoT genera una gama de oportunidades de negocios, pero también un conjunto de requisitos como: aplicaciones que demandan una retroalimentación o respuesta constante, donde los datos generados (la mayoría sólo útiles por un período de tiempo), se procesen, almacenen y analicen en tiempo real. En consecuencia, los modelos tradicionales basados en el CC, en cuyo esquema el flujo de datos es único desde su fuente de origen hasta el Cloud, no tienen la capacidad de gestionar grandes

¹Gartner Website. Available online: <http://www.gartner.com>

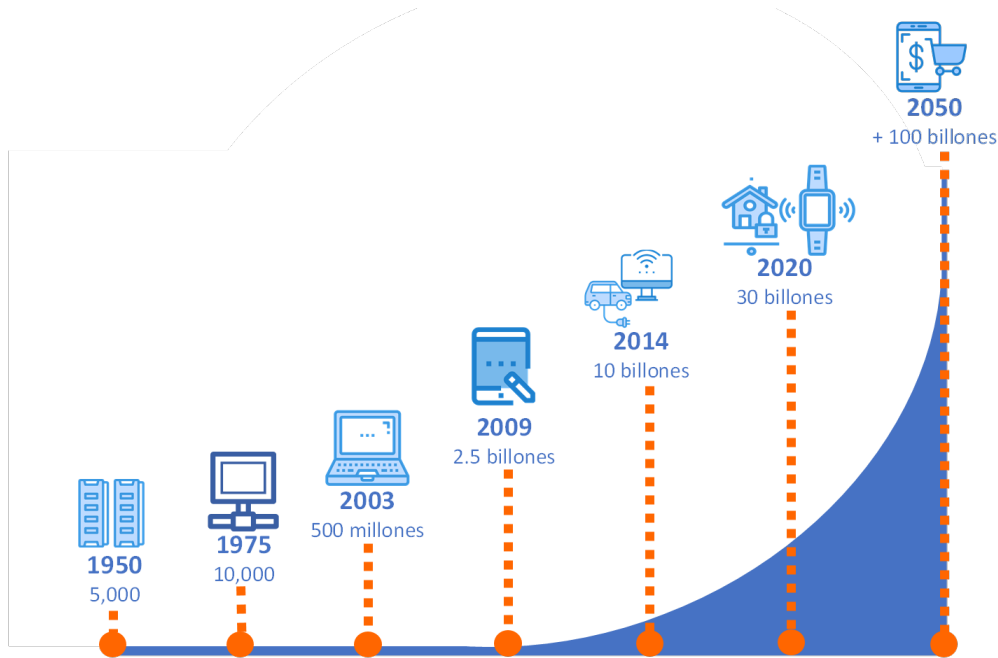


FIG. 1.1: Evolución de dispositivos IoT, basado en el trabajo de Capra et al. [2019]

volúmenes de datos, sin incrementar la latencia de la red, el consumo y los costes inherentes al ancho de banda y los centros de almacenamientos públicos o privados [BOSCH, 2018]. Adicionalmente, Damianou et al. [2019] plantean otro de los problemas de los modelos basados en CC: la vulnerabilidades de seguridad y privacidad. En este sentido, los entornos IoT se enfrentan a un creciente número de ataques, producto de la heterogeneidad de las soluciones.

Para encontrar una solución a los requerimientos de IoT, los investigadores han centrado su interés en un nuevo paradigma: la computación de borde o Edge Computing (EC). El propósito de este enfoque es mitigar la latencia y los costes asociados al CC, pero sin excluirlo de las soluciones para los entornos IoT [BOSCH, 2018, Capra et al., 2019].

Abordar los desafíos del IoT descritos anteriormente, requiere una solución más compleja que integre EC con métodos y tecnologías de seguridad cibernética. Por esta razón en este trabajo se considera la aplicación del Blockchain para mitigar los problemas de seguridad.

La integración de EC con Blockchain para entornos IoT, puede proporcionar: (i) accesos y controles seguros a la red; (ii) procesamiento y almacenamiento seguro de los datos; y (iii) escalabilidad, computación distribuida y gestión de los recursos desde el borde de la red [Yang et al., 2019]

Debido al panorama tecnológico descrito, esta tesis doctoral aborda los desafíos de IoT y sus entornos heterogéneos al proponer una Arquitectura Inteligente Edge Computing que integra la tecnología Blockchain desde el primer nivel, es decir, a partir de la fuente que genera los datos. La memoria que se presenta esta basada en el modelo de compendio de artículos y se estructura en capítulos. El primero es una Introducción en la que se explica la motivación, hipótesis y objetivos de la investigación. Posteriormente el Capítulo 2 presenta un estado del arte de las tecnologías aplicadas (EC y Blockchain) y los escenarios en los que previamente se han validado. El Capítulo 3 profundiza en el planteamiento del problema y describe la Arquitectura propuesta como solución.

Para evidenciar los resultados obtenidos, en el Capítulo 4 se incluyen las publicaciones que se han realizado en revistas, congresos y workshops, relacionadas con esta tesis doctoral, así como los proyectos que han sustentado el desarrollo de la investigación. En el Capítulo 5 se presentan las publicaciones originales que soportan esta memoria en el formato de compendio de artículos, cada uno de ellos precedido por una introducción, objetivos y los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones y trabajo futuro de investigación que se han generado a raíz de esta tesis doctoral se detallan en el Capítulo 6.

1.2 Motivación e hipótesis

El Cloud Computing (CC), es una tecnología que ha permitido incrementar la capacidad de computo y la prestación de servicios a través de Internet, durante los últimos años ha sido de considerable interés tanto para el mundo académico como para las organizaciones [De la Prieta and Corchado, 2016, Wang et al., 2015], sin embargo, los datos masivos procedentes de los entornos IoT plantean un desafío importante para las actuales soluciones del CC.

Una adecuada comprensión de las limitaciones del CC ante los rendimientos del IoT como: usuarios que buscan respuestas en tiempo real, gran variedad de tipos de datos, diferentes protocolos de comunicación, entre otros; ha originado nuevas líneas de investigación para encontrar soluciones híbridas [Larkin et al., 2014, Wells et al., 2014].

Estas características del IoT añaden más carga a las redes, lo que resulta en un aumento de la latencia y del almacenamiento y altos costes de ancho de banda [Ai et al., 2018]. Otros desafíos que no puede solucionar una arquitectura basada CC para IoT, los define Ai et al. [2018]:

- Seguridad e integridad de los datos: los dispositivos periféricos IoT actuales en su mayoría tienen una capacidad de procesamiento limitada, pequeñas cantidades de memoria y un sistema operativo restringido. En consecuencia, el dispositivo no es apto para implementar los mecanismos de seguridad y protección de los flujos de datos, que demanda una conexión constante a Internet.
- Heterogeneidad de dispositivos IoT: la gran diversidad de sensores, actuadores, teléfonos inteligentes, tabletas, pulseras inteligentes, ordenadores portátiles, etc., con diferentes protocolos y estándares, provoca incompatibilidades y problemas en procesos básicos como la comunicación y la transmisión de los datos desde su origen hasta el cloud.
- Solicitudes de servicio y respuestas: muchas aplicaciones de IoT (coches autónomos, aplicaciones de salud, de ciudades inteligentes o comunicaciones con control táctil en diversos sectores), requieren una respuesta en tiempo real y con baja latencia. Por lo tanto, el procesamiento remoto de los datos que se utiliza en el esquema CC tradicional, ocasiona una elevada latencia en la transmisión a larga distancia y un incremento en el consumo de ancho de banda.

Estas características forman parte de la motivación para las investigaciones que proponen el Edge Computing como una alternativa que permita procesar y filtrar grandes cantidades de datos en el borde de la red antes de transmitirlos al cloud; los beneficios de esto incluyen la reducción de los costes de ancho de banda, almacenamiento y consumo de energía [Shi and Schahram, 2016]. Por lo tanto, al integrar una arquitectura EC con IoT, las aplicaciones y los servicios proporcionan a los usuarios respuestas más rápidas, eficientes y seguras [Ai et al., 2018].

El término Edge Computing no es nuevo, su origen se remonta a los años 90, cuando Akami Technologies lo acuñó para referirse a las redes de entrega de contenido (CDN, por sus siglas en inglés "Content Delivery Networks"). Posteriormente, en 2016, es cuando

el término empieza a despertar el interés de organizaciones, gobiernos, universidades e investigadores por su potencial para facilitar el despliegue de IoT.

Uno de los primeros escenarios en los que se ha validado la utilidad del Edge Computing ha sido la Industria 4.0., donde organizaciones como INTEL, SAP o el Edge Computing Consortium, lo han presentado como una alternativa para solventar los problemas que generan los grandes flujos de datos generados por los dispositivos IoT y permitir que se optimicen los procesos de cómputo al no depender del CC para la ejecución de los mismos [Edge Computing Consortium and Alliance of Industrial Internet, 2017, FAR-EDGE, 2017, INTEL-SAP, 2018].

En el caso de Blockchain, basado en procesos de minería, permite la validación de transacciones mediante un ledger (se asocia al concepto de libro contable) con una lista verificada y segura de información. La minería inicia cuando "los mineros" requieren verificar las transacciones. Para ejecutar el proceso se utilizan mecanismos de consenso, es decir, cada bloque de la cadena se identifica con un valor Hash de cabecera, más la información que contiene [Yang et al., 2019]. Las funciones Hash se utilizan en BC para comprimir datos heterogéneos con longitudes variables o e-bits [Liang et al., 2018].

Las ventajas de aplicar BC sobre IoT se han presentado anteriormente, por ejemplo en Dorri et al. [2017a,b], se describen arquitecturas que se basan en BC y servicios CC, indicando que la capacidad de los dispositivos IoT es limitada en cuanto a procesamiento y/o almacenamiento de datos. Como alternativa, los autores proponen utilizar el CC para almacenar los registros de todas las transacciones que se realizan. Para Damianou et al. [2019], la opción de implementar directamente BC no es una solución eficiente para los escenarios en tiempo real, por el tiempo que consumen los procesos y lo que tardan en dar respuesta al usuario final.

En este sentido, la integración de BC y EC permitiría que la seguridad de la red, la integridad de los datos y la validez de los cálculos de un sistema mejorasen considerablemente. Por otro lado, esta unión dotaría a los sistemas de mayores recursos computacionales, almacenamiento distribuidos desde el borde de la red y escalabilidad Liu et al. [2017], Samaniego and Deters [2017], Sharma et al. [2017]. Para efectos de esta investigación se ha establecido como hipótesis de partida que: *mediante el diseño de una arquitectura modular basada en Edge Computing es posible la gestión inteligente y segura de soluciones dirigidas a entornos IoT.*

El estado actual de las soluciones existentes orientadas a entornos IoT y el desarrollo de nuevas tecnologías como el EC, figuran como la principal motivación que ha impulsado la realización de esta investigación. En este sentido, como objetivo principal se propone: *el establecimiento de una nueva arquitectura basada en un diseño modular y escalonado, denominada Global Edge Computing Architecture (GECA), que permita gestionar soluciones complejas dirigidas a una amplia gama de entornos de IoT, mediante la incorporación de Edge Computing y Blockchain para ofrecer datos, aplicaciones y servicios más seguros.*

Para alcanzar el objetivo principal, es necesario definir un listado de objetivos específicos, que se describen en el siguiente orden:

- **(OB1)** Realizar un estudio del estado del arte de Edge Computing, las tendencias y desafíos de esta tecnología disruptiva.
- **(OB2)** Identificar los requerimientos existentes en los entornos IoT y que se pueden robustecer a través de soluciones basadas en Edge Computing.
- **(OB3)** Revisar las arquitecturas de referencia existentes en las que el Edge Computing es el eje principal.
- **(OB4)** Desarrollar un estudio de mapeo sistemático de la literatura para identificar si existen soluciones Edge Computing aplicadas a Smart Energy y qué líneas futuras de investigación se pueden definir en este contexto.
- **(OB5)** Diseñar una arquitectura modular y escalonada para entornos del IoT.
- **(OB6)** Proporcionar un conjunto de tecnologías asociadas que se integren con el Edge Computing y el IoT de forma sencilla y a bajo coste.
- **(OB7)** Desplegar la arquitectura propuesta en casos de estudio que permitan su validación y evaluación en escenarios reales.

1.3 Metodología de Investigación

La metodología *Action-Research* (acción-investigación) ha ganado importancia en los proyectos de Ingeniería de Software, donde por sus características, su aplicación

resulta beneficiosa para la investigación en el campo, ya que simultáneamente permite la realización de investigaciones y acciones. La acción generalmente se asocia con una transformación en una determinada comunidad, organización o proyecto, y la investigación se distingue por una amplia comprensión de un fenómeno de cambio por parte del investigador (comunidad investigadora), persona (cliente), o ambos. Baskerville et al. [1999] han indicado que la Metodología de Investigación - Acción es el tipo de estudio donde se encuentra el escenario de mayor realismo al involucrar un contexto real para investigar los resultados de acciones concretas.

De acuerdo con Baskerville et al. [1999], citado por Tüzün et al. [2019], los estudios desarrollados bajo esta metodología comparten cuatro características comunes: (1) Una orientación a la acción y al cambio; (2) Un enfoque del problema; (3) Un proceso orgánico que implica etapas sistemáticas y a veces iterativas; (4) Colaboración entre los participantes. En general, la investigación-acción consta de cinco fases [Eden and Ackermann, 2018, Pinzon-Trejos, 2010, Tüzün et al., 2019], que para el desarrollo de esta tesis doctoral se describen en el siguiente orden:

1. Diagnóstico: Esta fase se corresponde con la identificación y planteamiento del problema en este trabajo. Es necesario delimitar el alcance, proponer una hipótesis y definir los objetivos que se pretenden alcanzar.
2. Revisión de la literatura: se realiza un estudio del estado del arte, para identificar las soluciones existentes al problema planteado y presentar una nueva solución. En este trabajo se realizó una revisión del estado del arte sobre Edge Computing, escenarios de aplicación y arquitecturas de referencia existentes. Posteriormente se utilizó la metodología del *Systematic Mapping Study* o Estudio de Mapeo Sistemático de la Literatura para identificar las soluciones existentes en las que se aplica el EC a entornos de Smart Energy.
3. Solución: Con los resultados obtenidos en las dos etapas anteriores, se propone una solución que responda a los objetivos establecidos. En este trabajo se propone una arquitectura global, escalar y modular que incorpora las tecnologías Edge Computing y Blockchain para resolver los requerimientos de los entornos IoT.
4. Evaluación: En esta fase se realizará la evaluación de la arquitectura propuesta, mediante la propuesta de dos casos de estudio en un entorno real, para realizar

el despliegue, implementación y evaluación de la arquitectura. En este trabajo los dos escenarios elegidos son: Smart Farming y Smart Energy, acordes con la realidad y heterogeneidad propias de IoT.

5. Resultados: Es la última fase del ciclo. La comunidad científica valora los resultados obtenidos mediante el conjunto de publicaciones que se someten a evaluación en revistas de alto impacto y congresos internacionales.

1.4 Estructura de la memoria

Con la finalidad de comprobar la hipótesis establecida para esta investigación y cumplir con los objetivos definidos, se estructura la presente memoria a través de seis capítulos. El primero de ellos es introductorio. El capítulo 2 presenta el estado del arte del Edge Computing, los principales autores que han contribuido a definirlo, así como los escenarios en los que se integra esta tecnología con el IoT. En este orden se analizan las arquitecturas de referencia que incorporan EC, pero que han sido desarrolladas para entornos de la Industria 4.0

Las contribuciones de esta tesis doctoral se detallan en el capítulo 3, en el cual, se incluye una descripción conceptual y técnica de la arquitectura propuesta, denominada Global Edge Computing Architecture (GECA). La arquitectura se desplegó en dos escenarios reales en los que se integraron dispositivos del IoT con la tecnología Edge Computing. El primero de ellos un caso de estudio Smart Farming en una granja mixta de producción de leche. El segundo en las instalaciones del Grupo de Investigación BISITE de la Universidad de Salamanca, para presentar un contexto de Smart Energy. En el capítulo 4 se presentan los resultados alcanzados mediante el desarrollo del estudio y que se validan a través de las publicaciones realizadas en: revistas, conferencias, workshops y capítulos de libros; así como los proyectos en los que se participó durante el periodo en calidad de estudiante del programa de doctorado.

Las publicaciones originales que forman parte de esta memoria por compendio de artículos se presentan en el capítulo 5, con su correspondiente introducción, descripción de la metodología de investigación utilizada y las conclusiones de los resultados obtenidos en cada uno.

El capítulo 6 presenta las principales conclusiones que han surgido del trabajo de investigación desarrollado, las aportaciones más relevantes y se definen las líneas para el desarrollo de trabajo futuro. Para finalizar, se incluye el listado de todas las fuentes bibliográficas que se han citado en esta memoria con el propósito de respaldar las afirmaciones y conceptos que se presentan.

Capítulo 2

Estado del Arte



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Estado del Arte

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés Internet of Things) ha sido objeto de importantes investigaciones durante la última década. Los primeros autores en abordar el tema lo definen como la conexión que existe entre el mundo físico y el digital [Ray, 2018]. El imparable crecimiento y la heterogeneidad de *cosas* conectadas a internet ha permitido que el entorno que nos rodea se convierta en inteligente o smart, tal es el caso de: ciudades, sistemas de transporte, sistemas de energía, hogares, sistemas de salud, gobiernos, educación, logística, cultura, agricultura, industria y negocios.

La adopción del IoT para generar estos escenarios smart, ha motivado que gobiernos, universidades, centros de investigación o empresas, estén en constante evolución para enfrentarse a los desafíos que trae consigo el despliegue de plataformas IoT.

Una de las soluciones emergentes para dar respuesta a las demandas IoT es el *Edge Computing (EC)*, término que utilizaremos en este trabajo para referirnos a la computación de borde. En este capítulo se presenta el estado del arte del Edge Computing (EC) como el eje central de esta investigación.

Iniciamos revisando el concepto de EC, los motivos de su disrupción y los escenarios en los que se está implementando. El capítulo incluye una revisión de: Blockchain, Industria 4.0 y su vinculación con el Edge Computing mediante un conjunto de arquitecturas de referencia que se han desarrollado con el propósito de implementar esta tecnología.

2.1 Edge Computing

El primero en utilizar el concepto Internet de las Cosas fue Kevin Ashton en 1999 para hacer referencia a la cadena de suministros mediante dispositivos RFID [Ashton

et al., 2009]. Su impacto ha afectado la evolución de la tecnología en los últimos 10 años, ampliando el conjunto de "cosas u objetos" conectados a internet que no sólo recolectan datos, también son capaces de interactuar con el mundo físico y los usuarios [Gubbi et al., 2013]. Portilla et al. [2019] consideran que la diversidad de dispositivos conectados a internet y su capacidad de recolectar gran volumen de datos son dos de las características del IoT que se convierten también en desafíos para el desarrollo de aplicaciones, despliegue de arquitecturas o implementar soluciones basadas en esta tecnología.

En la búsqueda de alternativas para hacer frente a los requisitos del IoT, emerge el EC [Razzaque et al., 2016]. Se denomina "Edge" porque el procesamiento de la información ya no se realiza únicamente en nodos centralizados o distribuidos *core*, sino también en el otro extremo *edges*, alejando del centro los procesos informáticos centralizados. Toda la información producida por los dispositivos IoT se procesa al máximo, liberando así la carga computacional de los servidores centralizados, evitando la sobrecarga del tráfico de la red y reduciendo el tiempo de respuesta requerido por las nuevas aplicaciones de IoT [Garcia et al., 2015]. Un gran número de organizaciones e investigadores han propuesto una definición para el Edge Computing, las principales se detallan en la Tabla 2.1, que está basada en el trabajo de revisión realizado por Sittón-Candanedo et al. [2019a].

De los conceptos mencionados en la Tabla 2.1 podemos resumir que el Edge Computing es un conjunto de dispositivos, sensores, recursos informáticos y ordenadores que producen y recogen datos que luego se envían a los centros de nube, sin embargo, EC también puede ser abordado en términos de su arquitectura, retos, tecnologías de software, beneficios y capacidades.

Si nos basamos en la definición del Edge Computing Consortium, al ofrecer servicios de inteligencia de vanguardia, EC cumple los requisitos clave de la digitalización para una conectividad ágil, servicios en tiempo real, optimización de datos, inteligencia de aplicaciones, seguridad y protección de la privacidad. Esta definición establece lo que las organizaciones demandan actualmente: "*plataformas capaces de procesar los datos de forma segura y privada, dando respuesta a los usuarios en tiempo real*" [Edge Computing Consortium and Alliance of Industrial Internet, 2017].

TAB. 2.1: Principales definiciones de Edge Computing.

Autores	Definiciones
García et al. [2015]	Proceso en el que las plataformas abiertas reúnen las capacidades básicas de las redes, la informática, el almacenamiento y las aplicaciones y proporcionan servicios inteligentes en el extremo de la red, cerca de la fuente de los objetos o datos, para satisfacer los requisitos críticos de una conexión ágil, servicios en tiempo real, optimización de datos, inteligencia de aplicaciones, seguridad y protección de la privacidad de la digitalización industrial.
Shi et al. [2016]	Tecnologías que permiten realizar computación en el borde de la red para que la computación se realice cerca de las fuentes de datos. En Edge Computing, el dispositivo final no sólo consume datos, sino que también los produce.
Satyanarayanan [2017]	Es un nuevo paradigma en el que los recursos sustanciales de computación y almacenamiento, como: <i>cloudlets</i> , microdatos o nodos de niebla, se colocan en el borde de Internet próximos a los dispositivos móviles y a los sensores.
Edge Computing Consortium and Alliance of Industrial Internet [2017]	Plataforma abierta distribuida en el borde de la red, cerca de las cosas o fuentes de datos, integrando las capacidades de las redes, el almacenamiento y las aplicaciones. Al ofrecer servicios de inteligencia de vanguardia, Edge Computing cumple con los requisitos clave de la digitalización industrial para una conectividad ágil, servicios en tiempo real, optimización de datos, inteligencia de aplicaciones, seguridad y protección de la privacidad.
Tseng et al. [2018]	Edge Computing, simplemente conocido como <i>edge</i> , acerca el procesamiento a la fuente de datos, y no necesita ser enviado a una Nube remota u otros sistemas centralizados para su procesamiento. Al eliminar la distancia y el tiempo que se tarda en enviar datos a fuentes centralizadas, mejora la velocidad y el rendimiento de la transmisión de datos, así como de los dispositivos y aplicaciones en el Edge.
Linthicum [2018]	Edge Computing elimina la necesidad de procesar datos en una nube remota u otro sistema centralizado mediante el procesamiento de datos cerca de su fuente. La transmisión de datos es más rápida y el rendimiento de los dispositivos y aplicaciones en el Edge mejora.
Zhang et al. [2018]	Edge Computing es un modelo de computación novedoso que coloca los recursos informáticos y el almacenamiento en el borde de la red, más cerca del usuario final. Provee servicios inteligentes colaborando con CC.

Como se mencionó anteriormente, las aplicaciones y servicios del IoT deben ser capaces de soportar dispositivos heterogéneos que generan grandes volúmenes de eventos y datos. Esta característica hace que sea difícil encontrar las especificaciones de desarrollo para explotar todo el potencial del IoT. Por lo tanto, el vínculo EC-IOT surge por algunas características del primero, que se explican a continuación [Alonso et al., 2019]:

- Los flujos de datos procedentes de los dispositivos IoT, también conocidos hoy como *edge devices*, son procesados por los nodos de borde para filtrar información sin valor. Esto permite ahorrar ancho de banda y recursos de almacenamiento.
- Proximidad y baja latencia, que se logra mediante la ejecución de los procesos cerca a su fuente de origen.

- El almacenamiento y procesamiento descentralizado de la información mejora la escalabilidad en las plataformas IoT.
- Una plataforma que incorpora EC proporciona a cada nodo de la red aislamiento y privacidad.

Actualmente, existen varias líneas de investigación orientadas a establecer estándares para el desarrollo de conceptos, arquitecturas o procesos incorporando EC. Sin embargo, se enfrenta a retos en su gestión descentralizada y de seguridad. Para abordar esta debilidad, Patil et al. [2017], Samaniego and Deters [2017], Stanciu [2017] sugieren la integración de BC y EC. De acuerdo con estos autores, mediante la incorporación de BC en un sistema EC, se puede obtener: acceso y control fiables de la red; almacenamiento y computación en un gran número de nodos edge distribuidos.

En consecuencia, la seguridad de la red, la integridad de los datos y la validez del cálculo del sistema puede ser considerablemente mejorada. Por otro lado, la incorporación de EC dota al sistema de una gran cantidad de recursos computacionales y de almacenamiento distribuidos en la red que descargan de forma efectiva el almacenamiento de los valores que genera el BC y la computación minera de los dispositivos con energía limitada. Además, el almacenamiento y el cálculo en los bordes de la red, permiten el almacenamiento escalable y la computación en BC [Yang et al., 2019].

La investigación sobre la integración de BC y EC es un campo bastante amplio, y quedan por delante algunos desafíos. Esta tesis doctoral intenta explorar brevemente las tecnologías relacionadas con esta integración a un nivel muy preliminar, lo que puede abrir una nueva vía para futuras líneas de investigación y desarrollos.

Por otro lado, importantes organizaciones y entidades independientes han propuesto: protocolos de comunicación, seguridad - protección de datos, así como arquitecturas de referencia, específicamente para entornos industriales [Edge Computing Consortium and Alliance of Industrial Internet, 2017, FAR-EDGE, 2017, INTEL-SAP, 2018, Tseng et al., 2018]. En el siguiente apartado se describen escenarios smart en los que se han presentado soluciones utilizando EC.

2.2 Escenarios Edge Computing

En la era posterior al *cloud*, EC ha surgido como un nuevo paradigma en el que parte de los datos se procesan en el borde de la red. La historia del paradigma de la computación de borde (EC) se describió en la obra “*On multi-access Edge Computing: a survey of the emerging 5G network Edge Cloud architecture and orchestration*” [Taleb et al., 2017]. Esta sección presenta escenarios smart donde el EC se presenta como tecnología que facilita el despliegue de arquitecturas IoT.

Toda la información producida por los dispositivos de IoT se procesa al máximo, liberando así la carga computacional de los servidores centralizados, evitando la sobrecarga del tráfico de la red y reduciendo el tiempo de respuesta requerido por las nuevas aplicaciones del IoT [García et al., 2015]. El beneficio de este tipo de enfoque de computación distribuida ha sido demostrado, por ejemplo, en hogares inteligentes, atención médica, redes de suministro eléctrico inteligentes, ciudades inteligentes, logística inteligente y monitoreo del medio ambiente [Chamoso et al., 2018, Hassan et al., 2018, Risteska Stojkoska and Trivodaliev, 2017] o también en el uso de Cloudlets (pequeñas nubes en el borde) utilizadas para reducir la sobrecarga informática de los dispositivos portátiles; esto ayuda a ahorrar entre un 30% y un 40% de energía [Ha et al., 2014].

2.2.1 Industria 4.0

Industria 4.0 es uno de los conceptos que mayor interés ha generado últimamente en organizaciones, gobiernos o centros de investigación, sin embargo, en 2014 el término aún sólo era conocido en Alemania, lugar donde fue utilizado por primera vez para impulsar el desarrollo de alta tecnología en los procesos de producción industrial con miras al 2020 [Lasi et al., 2014]. Actualmente se denomina también como *cuarta revolución industrial*, y fue Kagermann et al. [2011] quien lo acuñó, para referirse a la integración entre las máquinas y el mundo virtual mediante la conexión constante a internet, inteligencia artificial, robótica, digitalización y la automatización de procesos [Muhuri et al., 2019].

Posteriormente en un informe, Kagermann et al. [2013] presentaron la visión, las características de integración, las áreas prioritarias de acción y los ejemplos de

aplicaciones para la cuarta revolución industrial. Kagermann es uno de los autores más citados al referirse al concepto de Industria 4.0 y a partir de sus trabajos, un gran número de autores han realizado investigaciones y revisiones de literatura sobre Industria 4.0, destacando: Hermann et al. [2015], Liao et al. [2017], Cobo et al. [2018], Muhuri et al. [2019]. En su análisis bibliométrico, Muhuri et al. [2019], destacan los trabajos de:

- Lasi et al. [2014] como uno de los trabajos más citados porque define los principales conceptos de la Industria 4.0, sus aplicaciones y desafíos.
- Zhou et al. [2016] como pioneros al explorar la Industria 4.0. En su trabajo, clasifican y evalúan la infraestructura de las industrias chinas para hacer frente a la cuarta revolución industrial. Utilizan además el concepto Smart Factory.
- Lee et al. [2015] es uno de los primeros en Estados Unidos en publicar sobre Industria 4.0 y sistemas ciber-físicos. En su trabajo propone una arquitectura de 5 niveles para el despliegue de estos sistemas en un entorno industrial.

Para que una organización implemente la Industria 4.0 existen requisitos que debe cumplir como: la conectividad constante, la asistencia humana y la toma de decisiones descentralizada. Los componentes esenciales son: los sistemas ciber-físicos (CPS), IoT, fabricación aditiva, la realidad virtual y aumentada, computación en la nube y capacidad para análisis de datos, por mencionar sólo algunos [Gilchrist, 2016].

Los requisitos para el desarrollo de aplicaciones en la Industria 4.0 con IoT, son cada vez más difíciles de cumplir utilizando el esquema tradicional basado únicamente en un *cloud* centralizado. El análisis de grandes volúmenes de datos generados por *cosas* conectadas a Internet, para extraer la información o estadísticas que la organización necesita es una tarea que demanda un ancho de banda de red extremadamente alto [Jing et al., 2014].

En este contexto, investigaciones recientes han propuesto el uso de Edge Computing para encontrar soluciones a los desafíos de un escenario para la Industria 4.0, utilizando el potencial y capacidades del IoT, por ejemplo: Brogi and Forti [2017] plantean que con la incorporación del EC, el conjunto de datos generados se pueden procesar en el borde de la red en lugar de transmitirlos en su totalidad a un sistema remoto centralizado o distribuido en el *cloud*. Por otro lado, según Lin et al. [2017], las arquitecturas basadas en EC son las más adecuadas para integración con el IoT, proporcionando servicios más rápidos, seguros y eficientes a los usuarios finales.

2.2.2 Smart Farming

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) estima que hay aproximadamente 750 millones de personas en todo el mundo que se dedican al sector la producción agrícola [FAO, 2019]. Aunque el rendimiento de la producción varía considerablemente de una región a otra y depende del uso de la tecnología, las diferencias entre los países desarrollados y los países en desarrollo son cada vez menos evidentes a medida que el mercado se va globalizando y siendo cada vez más competitivo.

La necesidad de aumentar la eficiencia de los recursos, ser más respetuosos con el medio ambiente y aplicar las últimas tendencias tecnológicas, capaces de proporcionar información detallada al consumidor, garantizando la seguridad y la calidad del producto final, son algunos de los retos a los que se enfrentan los productores de todo el mundo. En este sentido, las pequeñas y medianas explotaciones agrícolas, tanto en los países desarrollados como en desarrollo, podrían beneficiarse de la aplicación de tecnologías de bajo coste para la vigilancia y optimización de los recursos hídricos y energéticos [Fleming et al., 2016] .

En la agricultura inteligente (Smart Farming), el paradigma del IoT permite la vigilancia de los recursos mediante la conexión de objetos múltiples y heterogéneos en las explotaciones, por ejemplo: en las que producen leche a partir de ganado y cultivan cereales para alimentar a los animales, se deben considerar: edificios, maquinaria, vehículos o incluso los organismos vivos (por ejemplo, ganado) [Jayaraman et al., 2016, Patil and Kale, 2016].

Como se explica en la sección 2.1, el concepto de EC es esencial para el funcionamiento de los sistemas de IoT, como lo demuestran las múltiples investigaciones que abordan estos dos temas conjuntamente. Desde una perspectiva conceptual, para reducir el tiempo de respuesta de los dispositivos y aumentar la calidad de los servicios que ofrecen, [Brogi and Forti, 2017] afirma que los datos generados por los objetos IoT pueden ser procesados en el borde de las redes, evitando la transmisión de datos no procesados a un Cloud centralizado. Esta afirmación está respaldada por el trabajo desarrollado por Lin et al. [2017], que afirma que las arquitecturas de EC son ideales para las soluciones dirigidas al IoT, debido a la eficiencia y seguridad que ofrecen a los usuarios.

Al respecto, múltiples ámbitos se han beneficiado de la combinación EC-IoT, en este trabajo se evalúa el potencial del EC aplicado al Smart Farming, mediante el despliegue de la arquitectura propuesta en un caso de estudio de una granja de producción lechera en la Comunidad Autónoma de Castilla y León, España. Considerando que el diseño, desarrollos e implantación de proyectos e infraestructuras de IoT de acuerdo con el paradigma EC, permite reducir los costes asociados a los recursos informáticos, de almacenamiento y de red en el Cloud, mediante el despliegue de servicios en el extremo de la red, lo que también implica la reducción en los tiempos de respuesta de los servicios y aumenta la calidad del servicio (QoS) y la seguridad de las aplicaciones Lin et al. [2017].

Adicionalmente, la integración del EC con la tecnología Blockchain mediante *Distributed Ledger Technologies* puede ser utilizada en escenarios de Smart Farming como un mecanismo mediante el cual los consumidores finales pueden seguir los procesos por los que ha pasado el producto en venta en la cadena de valor de la industria agroalimentaria, garantizando la integridad de la información [Patil et al., 2017]. En este sentido, las tecnologías BC están diseñadas como mecanismos que permiten a algunos actores realizar transacciones verificadas, con características como la distribución, la inmutabilidad, la transparencia, la seguridad y la auditabilidad [Reyna et al., 2018].

2.2.3 Smart Energy

En las secciones anteriores se ha explicado cómo el IoT ha impactado en diferentes ámbitos y esto incluye los escenarios Smart Energy, donde un gran número de sensores y fuentes de datos recogen y generan datos de forma constante. El objetivo de esta sección es analizar como el EC es una alternativa para los desafíos del IoT en el contexto Smart Energy.

La energía inteligente o Smart Energy es uno de los escenarios en los que se aplica el IoT para lograr un uso eficiente de la energía; este tema se ha tratado con más detalle en [Minoli et al., 2017]. Países, industrias y universidades han llevado a cabo investigaciones en eficiencia energética para obtener aplicaciones capaces de controlar, medir y gestionar el consumo de energía en edificios, redes y hogares. Además, innumerables investigaciones han aportado nuevas soluciones de hardware (sensores, controladores o contadores inteligentes) coordinados entre sí [Zeng and Xie, 2018].

A pesar de los esfuerzos realizados para hacer comprender a los usuarios la importancia de reducir el consumo de energía en los espacios públicos, en los entornos de trabajo o en el hogar, este problema continúa y es necesario encontrar una solución [Delzende et al., 2017, Morán et al., 2016]. El consumo incontrolado y el despilfarro de energía es más notorio en los espacios públicos; hay varias razones para ello: usuarios heterogéneos con diferentes preferencias/comodidades, edificios muy antiguos y la falta de recursos para la implementación de nuevas tecnologías que se adapten a su infraestructura.

La monitorización del consumo de energía y de otros parámetros permite una reducción del 40% del consumo de energía según García et al. [2017]. Los sensores y los dispositivos inteligentes han transformado la industria de la energía al permitir comprender mejor cómo se gasta y qué factores influyen en su consumo. Hay un conjunto de soluciones y enfoques en la literatura que abordan este problema, aunque todas tienen objetivos diferentes tales como:

- Lograr una mejor eficiencia y gestión de los recursos [Ejaz et al., 2017].
- Reducir las emisiones de carbono y los costes [Arshad et al., 2017].
- Mejorar los sistemas de respuesta a la demanda (DR).
- Mejorar el conocimiento y la automatización del sistema mediante la correlación de datos, tales como: la temperatura, la humedad, la luminosidad u otros sensores, la información meteorológica, el usuario y/o los perfiles de los segmentos y de los edificios [Barbierato et al., 2018].

Varios autores han propuesto soluciones para motivar, educar y concienciar a los usuarios sobre la importancia del consumo inteligente de energía, cada vez mayor, [García et al., 2017]. Un ejemplo son los juegos serios que consisten en el diseño de juegos en los que se definen objetivos individuales y/o colectivos para que los participantes adquieran habilidades, conocimientos o hábitos [Quintana and García, 2017]. En este sentido, estos juegos se han convertido en una de las principales soluciones para mejorar el comportamiento y los hábitos de consumo de energía de los usuarios [Catri et al., 2016, Csoknyai et al., 2019].

Aunque existe una diversidad de propuestas, la mayoría de ellas sólo contemplan el uso de juegos serios en los hogares y no incorporan características como tecnologías de sensores,

identificación y localización de usuarios en tiempo real, o dispositivos IoT que mejoren la interacción del usuario. Por lo tanto, analizamos el problema del consumo de energía en un ámbito Smart Energy, utilizando como punto de partida CAFCLA (Context-Aware Framework for Collaborative Learning Activities), un framework propuesto por García et al. [2017], para motivar a los usuarios a cambiar sus hábitos de consumo energético mediante el juego y la computación social.

En el Capítulo 3 de esta investigación se presenta un caso de estudio en el cual se ha integrado CAFCLA con la arquitectura EC propuesta, con el objetivo de evaluar la funcionalidad del EC y su rendimiento. El edificio público en el que se ha realizado el caso de estudio ha sido el laboratorio del Grupo de Investigación BISITE de la Universidad de Salamanca (España).

2.3 Arquitecturas de Referencia Edge Computing

Moghaddam et al. [2018], define una Arquitectura de Referencia o *Reference Architecture* (RA) como *un conjunto de documentos que incorporan las mejores prácticas aceptadas por la industria, proporcionando información como: requerimientos, directrices, tecnologías óptimas específicas para el desarrollo de arquitecturas*. Por lo tanto, las RAs ayudan a los gerentes de proyectos, desarrolladores de software, empresas, diseñadores y gerentes de tecnología, para que colaboren y se comuniquen de manera efectiva en la ejecución de un proyecto. Una vez que estén diseñadas, la mayoría de las arquitecturas de referencia se prueban y validan extensamente antes de ser documentadas.

Para el diseño de arquitecturas de referencia existen normas como la ISO/IEC/ IEEE 42010 [2011], que establece requerimientos y la forma en la que se organizan y expresan las descripciones de una arquitectura. Esta norma internacional especifica por ejemplo: los puntos de vista, los *frameworks*, los lenguajes de descripción, los términos y conceptos utilizados; presenta una guía para especificar los puntos de vista de la arquitectura; y demuestra su compatibilidad con otros estándares de calidad [Van Heesch et al., 2011].

Investigaciones recientes como la de Isaja et al. [2017] se han centrado en la capacidad del EC para reducir las limitaciones de las arquitecturas centradas en la nube. En este sentido, las arquitecturas con EC son capaces de desplazar una parte de la capacidad de cálculo que se realiza desde la nube a los nodos situados en el extremo de la red. En esta

sección se presenta una revisión de las arquitecturas de referencia (RA) que integran EC y han sido desarrolladas para la Industria 4.0.

2.3.1 FAR-Edge

La arquitectura se diseñó como parte del proyecto *Factory Automation Edge Computing Operating System Reference Implementation* conocido como FAR-EDGE, financiado por fondos el Programa Horizonte 2020 de la Unión Europea [FAR-EDGE, 2017]. Esta RA esta basada en Edge Computing (EC) y Distributed Ledger Technologies (DLT) y se considera el marco conceptual para el diseño e implementación de la plataforma del proyecto. Sus desarrolladores la vinculan con tecnología Blockchain mediante los DLT. Isaja et al. [2017] señalan como elementos principales de la arquitectura los ámbitos (*scopes*) y los niveles (*tiers*). Los *scopes* se refieren a los elementos de una planta, su ecosistema (maquinaria, dispositivos de campo, estaciones de trabajo), sistemas SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos), MES (Sistema de Ejecución de Fabricación) y ERP (Sistema de Planeación de Recursos Empresariales), y los *tiers* proporcionan información sobre los componentes de la arquitectura y su relación entre ellos.

La Figura 2.1 basada en el trabajo de [Isaja et al., 2017] muestra las tres principales capas de la arquitectura:

- Planta o Industria: la integran los dispositivos de planta como: sensores, actuadores, los PDA, teléfonos inteligentes, tabletas y ordenadores portátiles.
- Edge: se ubican los dispositivos Edge que funcionan como puertas de enlace entre el nivel de Campo y el entorno digital. Su principal función es realizar un análisis de los datos en tiempo real. En esta capa se incluyen los servicios ledgers mediante contratos inteligentes basados en la tecnología blockchain, con el objetivo de proporcionar soporte de seguridad a la arquitectura.
- Cloud: consiste en servidores Cloud (en la nube) que alojan el software responsable de la planificación, monitorización y gestión de los recursos. Esta capa se ocupa de la ejecución lógica de los componentes funcionales de la arquitectura.

La arquitectura está formada por tres dominios funcionales:

		Componentes funcionales			Componentes estructurales (tiers)
		Automatización	Analítico	Simulación	
Entorno de empresa	Aplicaciones			Cloud	
	Servicios del Cloud				
Planta	Servicios “Ledger”			Edge	
	Procesos Edge				
	Objetos inteligentes			Campo/planta	
	Dispositivos conectados				
	“Cosas”, usuario y entorno de fábrica				

FIG. 2.1: Arquitectura de Referencia Edge Computing 2.0, basada en el trabajo de [Isaja et al., 2017]

- **Automatización:** es responsable del control y la configuración automatizada de los procesos físicos. La configuración automatizada se refiere a la tecnología utilizada para supervisión, personalización y ajuste de los procesos críticos de organizaciones, como el proceso de producción de una fábrica. Esta tecnología controla el análisis y la simulación dominios.
- **Analítico:** contiene los instrumentos para la recogida y tratamiento de datos desde la perspectiva de inteligencia de negocios. El dominio analítico utiliza un gran ancho de banda como un canal de comunicación a través del cual se transfiere la información. El Dominio Analítico de la FAR-Edge es muy similar al denominado Dominio de la Información que se describe en la RA propuesta por el *Industrial Internet Consortium*. Ambos dominios coinciden entre sí y tienen un mínimo de diferencias.
- **Simulación:** este dominio agrupa los recursos para la simulación del comportamiento de los procesos físicos que se llevan a cabo para analizar los diferentes escenarios *what/if*, optimizando y obteniendo resultados sin afectar las actividades operativas de la fábrica. En el dominio de simulación, los objetos del entorno real deben estar sincronizados con los modelos de simulación digital que los representan.

Esta arquitectura de referencia se distingue por la implementación del EC, garantizando la seguridad de la información mediante contratos inteligentes. Sus creadores sugieren su

aplicación en entornos Industria 4.0 vinculados con automatización, análisis y simulación digital.

2.3.2 Edge Computing 2.0.

Un conjunto de organizaciones integrado por: Huawei, Shenyang Institute of Automation (SIA) de la Academia China de Ciencias, Intel, ARM, iSoftStone y la Academia China de Tecnología de Información y Comunicaciones (CAICT). La Academia China de Investigación en Telecomunicaciones (CATR) junto con el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información (MIIT) formaron en 2016 la Alianza de Internet Industrial (IIA) con el objetivo de desarrollar la cuarta revolución industrial en China [Edge Computing Consortium and Alliance of Industrial Internet, 2017]. En 2016, este equipo formó el Edge Computing Consortium (ECC).

La *Edge Computing Reference Architecture 2.0* (EC-RA) 2.0 fue propuesta a partir del trabajo conjunto entre el ECC y el AII y se basa en un modelo de capas horizontales con interfaces abiertas. Verticalmente esta arquitectura permite: la gestión del ciclo de vida de los datos y su seguridad, con el objetivo de proporcionar servicios inteligentes a lo largo de todo el ciclo de vida.

En la Figura 2.2 se ilustra el diseño de la arquitectura de referencia. Verticalmente la arquitectura se basa en la gestión, el ciclo de vida de los datos y la seguridad, mediante servicios inteligentes a lo largo de todo el ciclo de vida. Horizontalmente, sigue un modelo de capas con interfaces abiertas, como se observa en la Figura 2 y que se describe en el siguiente orden:

- Servicios Inteligentes: esta capa está basada en un marco de servicios basado en modelos. La coordinación inteligente entre el desarrollo y el despliegue de servicios se logra a través del marco de servicios de desarrollo y el marco de servicios de despliegue y operación. Estos marcos permiten interfaces coherentes de desarrollo de software e implementación y operaciones automáticas.
- Servicios de fábrica: define las tareas, los procesos tecnológicos, los planes de ruta y los parámetros de control de las fases de procesamiento y ensamblaje, implementando el rápido despliegue de políticas de servicio y el rápido procesamiento de múltiples tipos de productos.

- **Cómputo y conectividad:** la infraestructura de Operación, Tecnología de la Información y las Comunicaciones (OICT) se encarga de desplegar las operaciones y coordinar entre los servicios de recursos computacionales y las necesidades de la organización.

La arquitectura fue desarrollada en base a los estándares internacionales definidos por ISO/IEC/IEEE 42010:2011, lo que refuerza su uso como referencia para el desarrollo de soluciones industriales con EC.

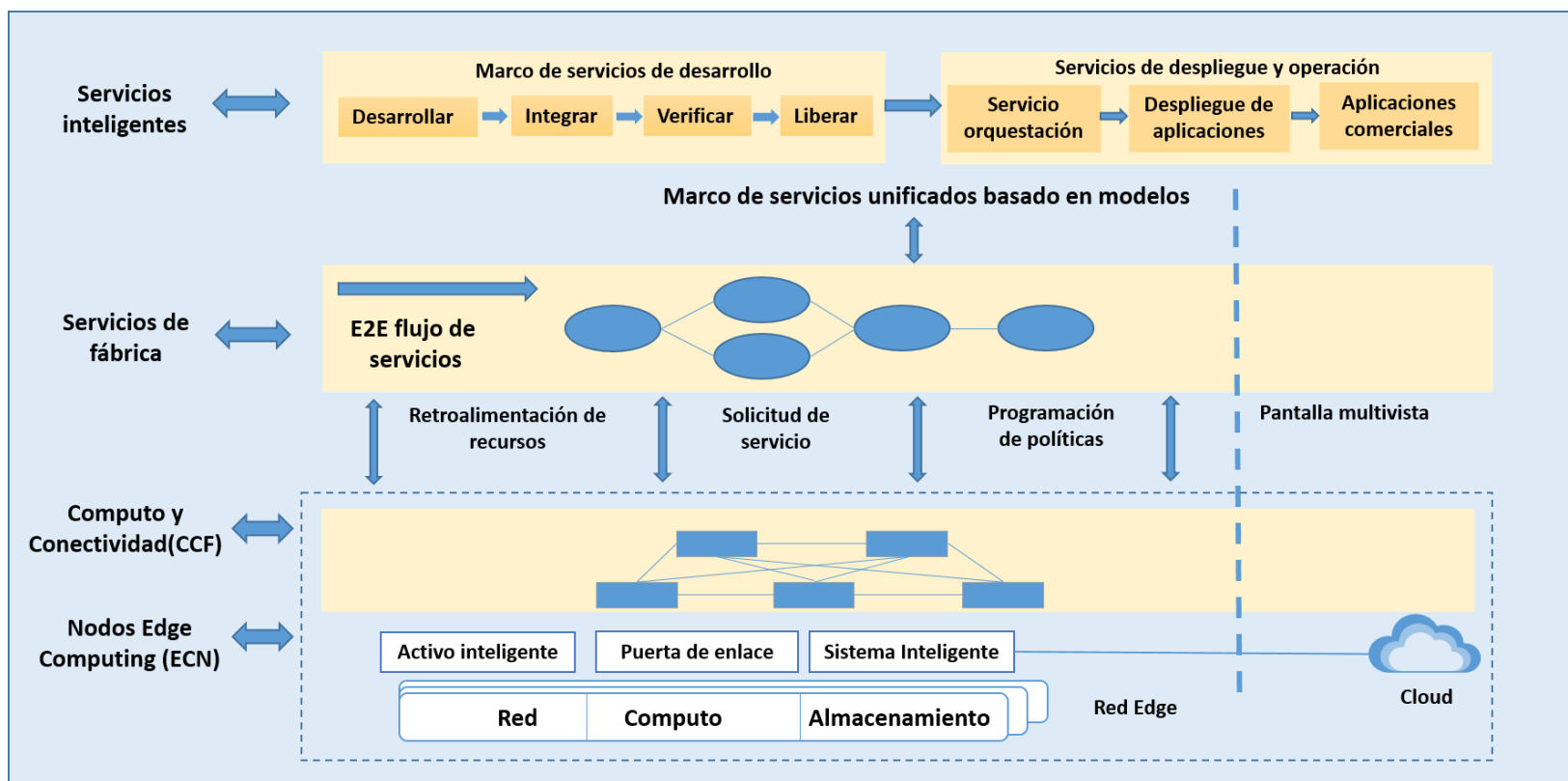


FIG. 2.2: Arquitectura de Referencia Edge Computing 2.0, basada en el trabajo de [Edge Computing Consortium and Alliance of Industrial Internet, 2017]

2.3.3 Industrial Internet Consortium

Como el Edge Computing Consortium, el Industrial Internet Consortium también ha desarrollado su arquitectura de referencia utilizando el estándar ISO/IEC/IEEE 42010:2011. Esta norma es la principal guía para identificar convenciones, principios y mejores prácticas para arquitecturas y marcos coherentes basados en la Internet de los objetos. La norma ISO/IEC/IEEE 42010:2011 facilita la evaluación, comunicación, documentación y resolución sistemática o efectiva en una arquitectura de referencia [7]. La Figura 3 presenta la Arquitectura de Referencia del Industrial Internet Consorcio (IIC-RA) y sus tres capas principales:

- Edge: esta capa recoge datos de los nodos edge a través de una red de proximidad. Las principales características arquitectónicas de esta capa incluyen la amplitud de la distribución, la ubicación, el alcance de la gobernanza y la naturaleza de la red de proximidad. Cada una de estas características cambiará según cada caso de uso.
- Plataforma: esta capa es responsable de procesar y enviar comandos de control desde la última capa denominada Empresa a la capa Edge. Su función principal es agrupar los procesos y analizar los flujos de datos de la capa Edge y las capas superiores. Gestiona los dispositivos activos en la capa Edge para la consulta y análisis de datos a través de servicios de dominio.
- Empresa: Finalmente, esta capa alberga aplicaciones específicas como sistemas de soporte a la toma de decisiones, interfaces de usuario final o gestión de operaciones, entre otras. Esta capa genera comandos de control para ser enviados a las capas Plataforma y Borde y también recibe flujos de datos de ellas.

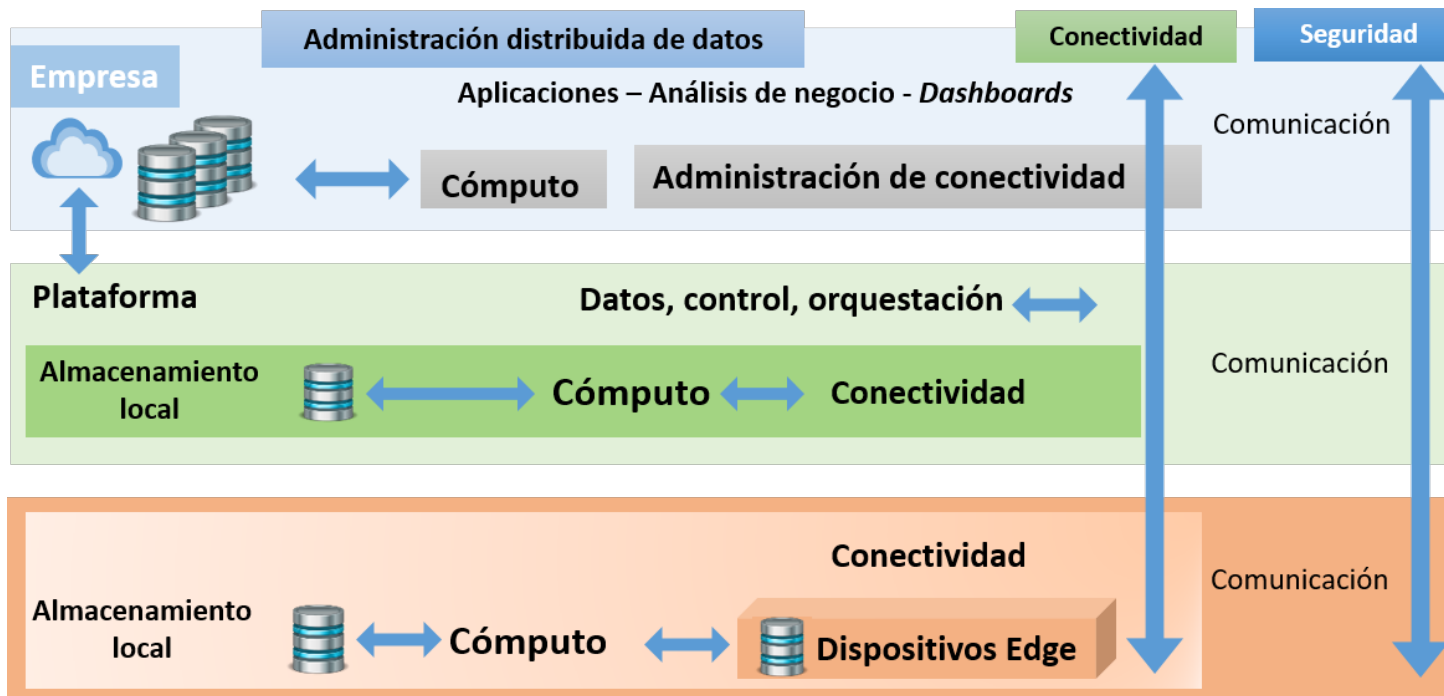


FIG. 2.3: Arquitectura de Referencia IIC, basada en el trabajo de [Tseng et al., 2018]

2.3.4 INTEL-SAP

INTEL y SAP han desarrollado una arquitectura de referencia que integra EC con productos de ambas empresas. El principal objetivo de esta arquitectura es permitir el desarrollo rápido y escalable de proyectos de IoT. La Figura 2.4 muestra los bloques funcionales utilizados por esta RA. A continuación se describen cada uno de los bloques [INTEL-SAP, 2018]:

- **Edge Endpoint:** los módulos IoT-Edge de la arquitectura reciben mensajes enviados por dispositivos autorizados y envían mensajes desde la pasarela al servidor en la Nube. La INTEL-SAP RA utiliza servicios de análisis de persistencia y *streaming* para el almacenamiento local de datos generados por sensores o dispositivos de IoT. Realiza el análisis de los flujos de datos del IoT en busca de excepciones y patrones que permitan la creación de eventos o alertas según el tipo de caso de uso.
- **Edge Gateway:** en esta arquitectura su gateway se autentica a través del certificado de dispositivo y establece una ruta de datos al proveedor de CC. Aquí se completa la incorporación del dispositivo para establecer los flujos de control y ruta de datos. El dispositivo se enciende y se comunica con un agente en la nube de INTEL. Este agente proporciona la dirección IP y redirige el dispositivo al SAP Cloud Trust Center. Las aplicaciones en el gateway son alimentadas con los datos provenientes de los sensores conectados y éstos son enviados a través de protocolos soportados por la arquitectura.
- **Cloud:** en este bloque, el SAP Cloud Trust Center es responsable de verificar la firma de Intel EPID y la propiedad del dispositivo y luego registrarlo. Genera un certificado de autenticidad y mantiene actualizada la lista de dispositivos autorizados. Se establece la ruta de conectividad entre el dispositivo y la Nube. Los certificados generados se envían para la configuración de las publicaciones - suscripciones en el gateway. Una vez que los datos han sido enviados a los servicios Cloud, se distribuyen a diferentes aplicaciones para su procesamiento y pueden ser enviados a aplicaciones back-end para su uso en otros procesos organizativos

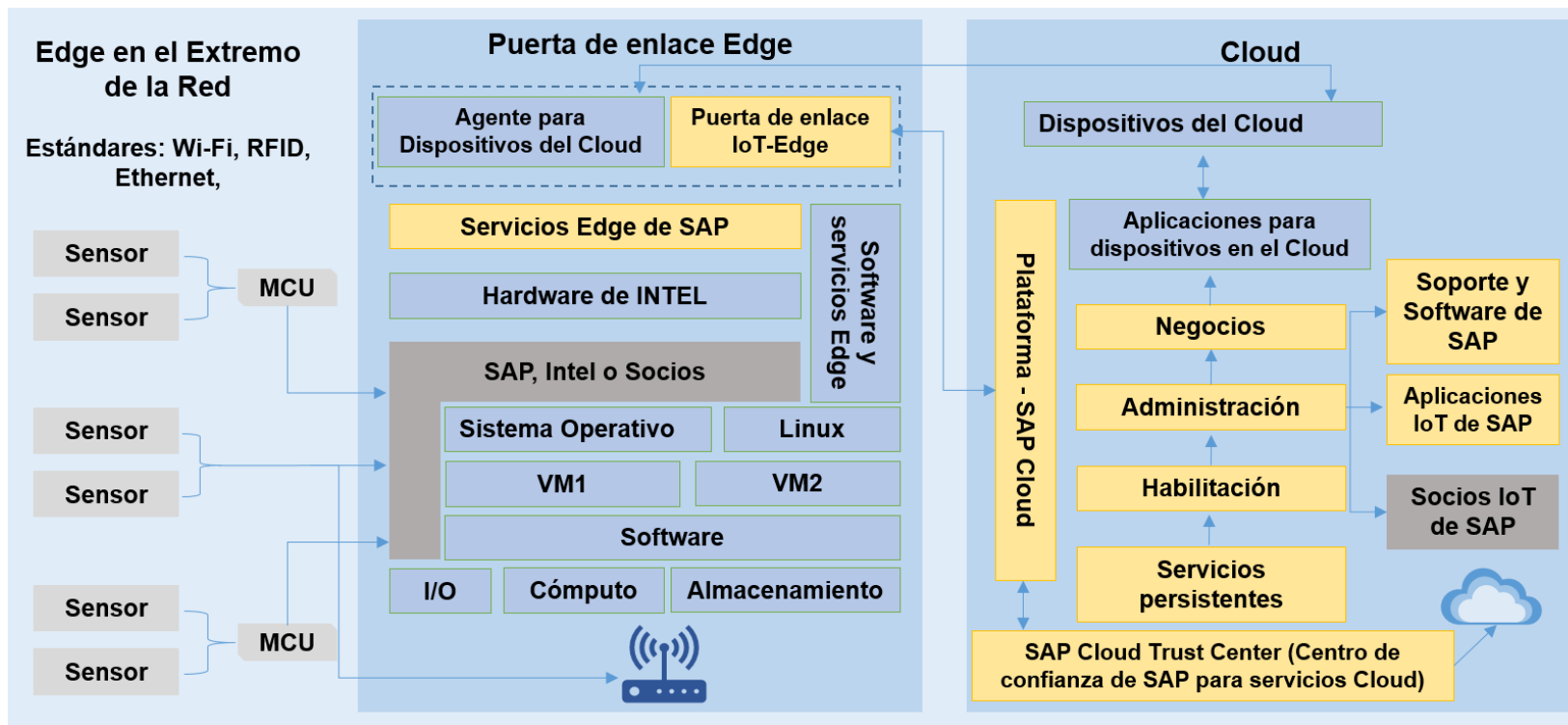


FIG. 2.4: Arquitectura de Referencia INTEL-SAP, basada en el trabajo de [INTEL-SAP, 2018]

2.4 Conclusiones

A partir del análisis del estado del arte realizado, se pueden extraer diferentes conclusiones. La Industria 4.0 está acompañada de nuevos desafíos por resolver, los describe Chen et al. [2017]: recolección, integración y análisis de datos; virtualización de recursos e interacción hombre-máquina. En este contexto, las arquitecturas y soluciones basadas en un Cloud centralizado que se han propuesto para aplicaciones del IoT, no son suficientes para resolver los problemas que surgen en un escenario donde se generan datos de manera constante y se requieren respuestas en tiempo real. EC es una tecnología recomendada para reducir la congestión por la demanda de recursos informáticos, red, o capacidad de almacenamiento. Con el EC, las infraestructuras computacionales y de servicios se acercan al usuario final migrando el filtrado, procesamiento o almacenamiento de datos al borde de la red.

Las cuatro arquitecturas de referencia descritas en esta sección se basan en una arquitectura por capas para EC, que no sustituye a los servicios Cloud, sino que los integra en el nivel final de la arquitectura. En los casos en que el volumen de datos es alto, los nodos Edge de estos RAs son los primeros en procesar, controlar y reducir el volumen de datos transferido a los servicios que se ejecutan en la Nube. De este modo, los nodos Edge reducen los requisitos de almacenamiento, reducen la latencia y proporcionan respuesta en tiempo real.

Estas RAs se centran en Cloud y EC para aplicaciones industriales, con los siguientes resultados esperados: mayor uso de los datos, control descentralizado, mejor automatización y seguridad de los procesos. Aunque las cuatro arquitecturas de referencia analizadas ofrecen numerosas ventajas para entornos en los que se recogen y procesan grandes volúmenes de datos, sólo FAR-Edge incorpora el concepto de Ledger para ofrecer seguridad mediante Smart Contracts en su capa intermedia. Sin embargo, esta arquitectura no especifica cómo se garantiza la seguridad en todos sus niveles.

Capítulo 3

Contribuciones



**VNiVERSIDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Contribuciones

3.1 Introducción

Durante la última década, las soluciones de Tecnologías de Información (TI), han girado en torno al CC. Su éxito se basa en la centralización de las operaciones del sistema y evitar los costes de construcción de centros de datos propios para cada organización. La consolidación del CC y su rendimiento económico favorable están más que probados y con ello su continuidad en las soluciones informáticas que se propongan a futuro. Sin embargo, el crecimiento acelerado de tecnologías como el Internet de las Cosas mediante la conexión de objetos a los que se les ha denominado dispositivos inteligentes, plantea nuevos retos a la informática actual y la forma en qué se procesan, distribuyen y almacenan los datos. En cifras de la *International Data Corporation-IDC*, en el 2020 se estima que existirán 50 mil millones de objetos conectados, ocasionando que el IoT esté presente en todos los sectores: servicios públicos (energía, transporte, salud, seguridad), agricultura, industria, economía y educación por mencionar los principales [Alamgir Hossain et al., 2018, Chamoso et al., 2018].

Ante estos desafíos, surge la alternativa de que las aplicaciones y servicios se ejecuten a partir del borde de la red, idea que ha ido evolucionando gradualmente. De este modo, el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) crea en 2014 un equipo de trabajo al que nombra Grupo de Especificaciones de la Industria (ISG), con el objetivo de establecer las especificaciones de la industria frente al paradigma del *Mobile Edge Computing (MEC)* y que estaba conformado por Huawei, IBM, Intel, Nokia Networks, NTT DoCoMo y Vodafone. El primer congreso organizado por el ISG se celebró en 2016 y el concepto original de MEC cambió por Computación Edge de Múltiples Accesos, para incluir a empresas más allá del mercado de las operadoras de móviles y comunicaciones.

En este primer congreso se estableció como conclusión que a partir de finales de 2017, el Edge Computing sería una realidad en Europa.

El concepto de Edge Computing ha sido descrito en detalle en el Capítulo 2, así como escenarios de aplicación y arquitecturas de referencia. El alcance de las arquitecturas de referencia descritas está centrado en la Industria 4.0 y ante situaciones como: la amplitud de escenarios IoT; las limitaciones de Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES), cuyo capital financiero no les permite el despliegue de plataformas comerciales de costes elevados.

Esta tesis doctoral propone una arquitectura global que integra EC-IoT y su potencial, permitiendo a las PYMES y pequeños sectores alcanzar una solución para el procesamiento de los datos masivos generados por sus dispositivos IoT desde el borde de la red, en lugar de estar obligados a transmitirlos en su totalidad a una infraestructura centralizada en el Cloud y sus consecuentes preocupaciones de los costes que conlleva el ancho de banda y el consumo de energía.

El Edge Computing, además, proporciona servicios con una respuesta más rápida y una mayor calidad, en comparación con el CC. El EC es más adecuado para integrarse con el IoT, a fin de proporcionar servicios eficientes y seguros a un gran número de usuarios finales.

En este capítulo se presenta la arquitectura propuesta, que ha sido diseñada de manera escalable para futuros requerimientos del IoT, su descripción técnica y las principales aportaciones del trabajo desarrollado. Se describe la relación y coherencia que existe entre las publicaciones principales de esta tesis doctoral.

3.2 Arquitectura propuesta

Esta sección presenta: *Global Edge Computing Architecture* (GECA), que incluye un nivel de seguridad que comienza en la capa base cifrando los datos generados por los sensores que se procesan posteriormente en la capa Edge. La Figura 3.1 ilustra la arquitectura propuesta. Se ha utilizado la tecnología de cadenas de bloques para reforzar la seguridad proporcionada por la arquitectura propuesta. En 2008 Satoshi Nakamoto

presentó el concepto de cadena de bloques como un mecanismo que permite a algunos actores realizar transacciones verificadas.

La visión de Nakamoto era proporcionar un ledger con características tales como: distribución, inmutabilidad, transparencia, seguridad y auditabilidad [Nakamoto, 2009]. Además, otros autores como Antonopoulos [2017] o Reyna et al. [2018], señalan que Blockchain permite acceder a las transacciones de forma abierta y completa a través de consultas y todas las entidades del sistema pueden ser verificadas y cotejadas en cualquier momento.

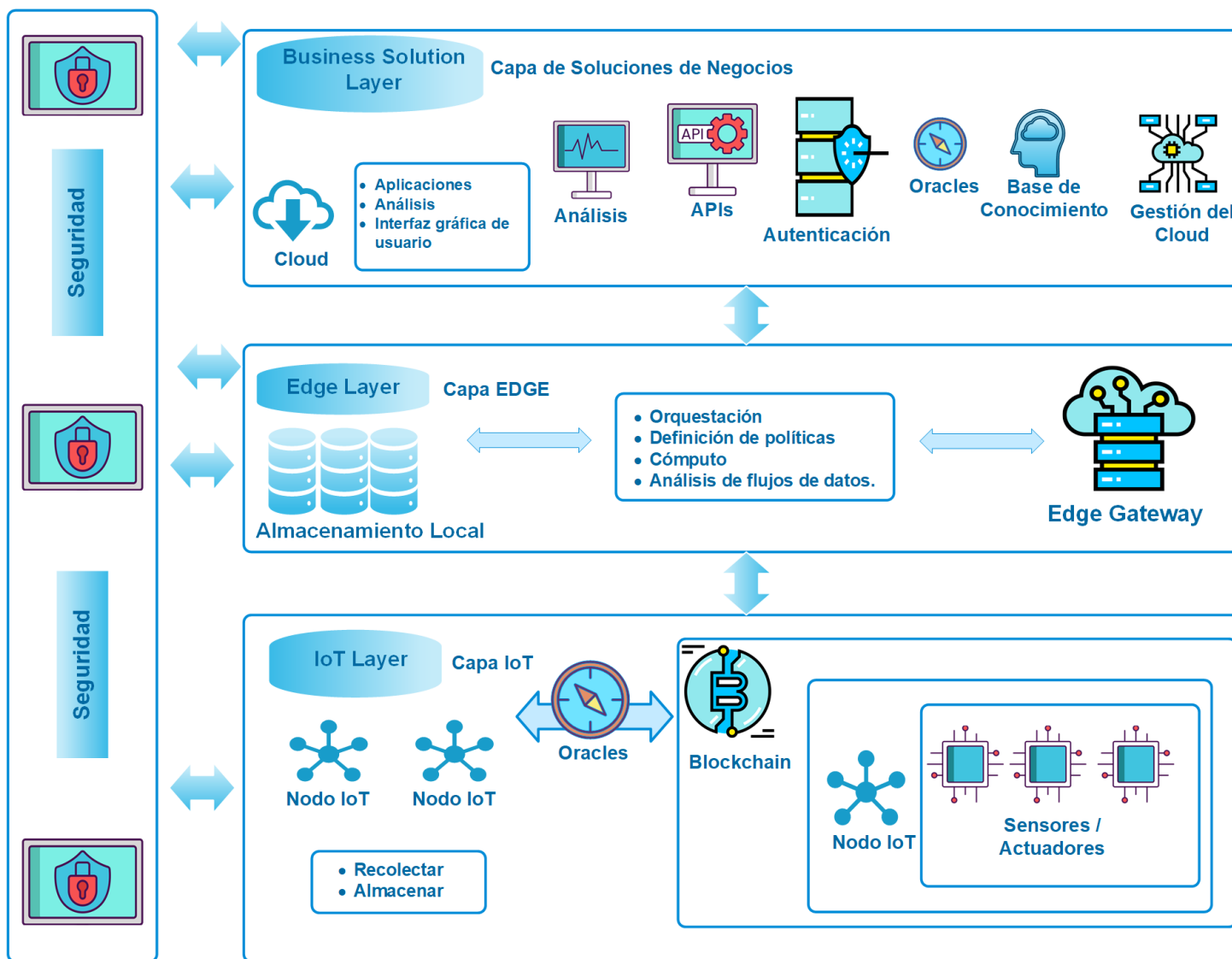


FIG. 3.1: Arquitectura propuesta: Global Edge Computing Architecture - GECA

El diseño de la arquitectura propuesta se basa en algunos componentes de las cuatro arquitecturas de referencia descritas en el Capítulo 2 y que se resumen a continuación:

- FAR-Edge: el componente principal de esta arquitectura es el concepto de *smart contract* de la capa intermedia; los servicios *ledger* evalúan y aprueban las llamadas de solicitud de servicio realizadas por los nodos Edge de la primera capa. Con ese marco de referencia, la arquitectura propuesta en este trabajo incorpora el Blockchain desde su primera capa para proteger los datos a partir del momento en que son generados por los sensores. Otros autores han utilizado BC con EC, tales como Stanciu [2017], quien propuso una cadena de bloques basada en la distribución de sistemas de control para EC, aplicando la norma IEC 61499 estándar, sin embargo, su trabajo, únicamente contempla el uso de la tecnología de cadenas de bloques en el último nivel de la arquitectura en los servicios Cloud como estrategia de supervisión.
- INTEL-SAP: en esta arquitectura, el SAP Cloud Trust Center es un componente importante porque verifica la propiedad de dispositivos que intenten formar parte de la plataforma y los registra. Genera un certificado de autenticidad y mantiene actualizada la lista de dispositivos autorizados. En este sentido, la arquitectura propuesta incluye un mecanismo de autenticación en el Cloud que valida el acceso de dispositivos o usuarios antes de que puedan participar en los sistemas y plataformas construidos sobre la base de GECA.
- Edge Computing RA 2.0: el Edge Computing Consortium hace hincapié en la importancia de utilizar estándares internacionales como: ISO/IEC/IEEE 42020:2011 al presentar soluciones y marcos de trabajo de vanguardia a las industrias. Por lo tanto, la propuesta se basa en la norma IEC 61499, que propone el diseño de arquitecturas mediante bloques funcionales (FBs) definidos como la unidad estructural básica de los modelos. GECA fue diseñada siguiendo el modelo de FBs, donde cada bloque se caracteriza por sus entradas, salidas y funciones internas, como es el caso de los diagramas de bloques clásicos. En la arquitectura propuesta, los FBs no se ejecutan hasta que reciben una señal de entrada, por lo que permanecen en estado de reposo para permitir la portabilidad y reutilización de los bloques funcionales, que se comportan como una señal de entrada completa y unidad independiente del resto [Querol et al., 2014].

- IIC: de esta arquitectura se utilizó como referencia para el diseño de GECA su capa Empresarial, en la que se ejecutan procesos y aplicaciones específicas en el Cloud (privado o público), tales como: sistemas de soporte a la decisión, gestión de operaciones, análisis de grandes datos, formación de modelos, predicciones y análisis de negocio.

3.3 Descripción técnica

En la Figura 3.1 se presenta la arquitectura propuesta. Los componentes que integran cada una de sus capas: IoT, Edge y Business Solution, se describen en esta sección.

3.3.1 IoT-Layer

Es la primera capa de la arquitectura y está formada por los dispositivos u objetos físicos que monitorizan servicios, actividades o equipos en funcionamiento. En esta capa se incluyen sensores, actuadores, controladores y pasarelas para entornos IoT, lo que permite la gestión y el almacenamiento de recursos computacionales en los dispositivos. Para estos escenarios normalmente se utiliza un estándar inalámbrico de comunicación, como Wi-Fi, BLE, ZigBee, LoRa o SigFox [Postcapes, 2019]. Los principales conceptos de estos estándares son los siguientes:

- Wi-Fi: destinado a la comunicación inalámbrica en áreas locales. Utiliza bandas espectrales de 5 GHz y 2,4 GHz. Debido a este alcance limitado se utiliza principalmente en espacios cerrados, proporcionando conectividad a Internet a través de nodos conocidos como *puntos de acceso a la red inalámbrica*. Los puntos de acceso operan normalmente dentro de un rango máximo de 1 km. Las principales desventajas de esta tecnología son el alto consumo de energía y los riesgos de seguridad asociados a la conectividad WiFi gratuita. Otro problema en el proceso de comunicación es la frecuencia con la que se utiliza el WiFi y su sensibilidad a la interferencia [Ali et al., 2017].
- BLE: Bluetooth Low Energy (BLE) es una versión mejorada de la versión 4.0 original de Bluetooth, diseñada para administrar dispositivos a gran escala con baja latencia y consumo de energía eficiente, pero sólo para aplicaciones

inalámbricas de corto alcance. Del mismo modo, la tecnología Bluetooth clásica BLE funciona en la banda ISM de 2,4 GHz a 2,4835 GHz [Cho et al., 2016].

- En 2005, ZigBee Alliance introdujo ZigBee como una tecnología basada en el estándar IEEE 802.15.4 para empresas que requieren una comunicación de baja latencia y bajo consumo. Es adaptable a otros protocolos estándar y utiliza la asignación directa de direcciones, de modo que cada nodo sabe dónde debe enviarse el paquete. Actualmente, ZigBee es ampliamente utilizado en escenarios de demanda de energía y de gestión de carga [Montori et al., 2018] [García et al., 2017].
- La LoRa Alliance introdujo la tecnología LoRa en 2015, basada en una capa física de Chirp Spread Spectrum (CSS) en la que cada símbolo se codifica con una secuencia de bits más larga. En la topología de la red LoRa, cada dispositivo final se comunica en un solo salto con una o más pasarelas LoRa y éstas, a su vez, con un nodo central llamado *LoRa NetServer* que funciona como un servidor. Cuando se utiliza LoRa, un dispositivo final nunca se asocia directamente con el Gateway sino con el NetServer, por lo que toda la complejidad se transfiere al nodo central [LoRa-Alliance, 2015].
- SigFox: Es una red de áreas extendidas de baja potencia para aplicaciones de Máquina a Máquina (M2M) tales como seguridad, salud y puntos de venta. El objetivo principal de SigFox es utilizar la tecnología UNB (Ultra Narrow Band) para conectar dispositivos remotos que requieran la transferencia de pequeñas cantidades de datos en un ancho de banda bajo y con un consumo energético eficiente. SigFox cumple con los requisitos M2M para operaciones de interfaz complejas con bajos requerimientos de energía [Ali et al., 2017].

Blockchain (BC) es otro elemento clave de esta capa. Samaniego and Deters [2016] sugiere que los permisos basados en cadenas de bloques se alojan en el Cloud para asegurar su distribución y persistencia en el almacenamiento de datos. Para garantizar la integridad y validez de los datos en esta capa, se utiliza un esquema básico de BC con valores hash y el algoritmo SHA-256 y RSA. SHA-224 y SHA-256 usan la misma secuencia de sesenta y cuatro palabras constantes de 32 bits [National Institute of Standards and Technology, Department of Commerce, United State of America, 2015]:

$$K_0^{256}, K_1^{256}, \dots, K_{63}^{256} \quad (3.1)$$

En el caso de SHA-256, el valor inicial del hash, $h^{(0)}$ está formado por:

$$h^{(0)} = 6a09e667$$

$$h^{(1)} = bb67ae85$$

...

$$h^{(7)} = 5be0cd19$$

Las funciones Hash se utilizan cuando es necesario comprimir datos heterogéneos (longitudes variables o e-bits) y a los que se asigna el nombre del valor hash h [Liang et al., 2018]. El SHA-256 puede aplicarse para comprimir datos en un mensaje y obtener un resumen del mensaje en un bloque [National Institute of Standards and Technology, Department of Commerce, United State of America, 2015, Pilkington, 2016]. Asimismo, el algoritmo RSA ha sido desarrollado para encriptación de clave pública en 1970 por Ron Rivest, Adi Shamir y Len Adleman [Rivest et al., 1977]. Stallings et al. [2012] describe el algoritmo y menciona que está basado en una llave pública PU y una llave privada R . Estas llaves consisten en dos números primos, $PU = e, n$ y $K = d, n$. Para encriptar un mensaje M se calcula un cifrado C usando $C = M^e \bmod n$. El mensaje puede ser recuperado posteriormente usando la llave privada $M = C^d \bmod n$. En la arquitectura propuesta, se asigna una clave pública al nodo o dispositivo de IoT.

El SHA-256 se aplica a los datos generados para crear un hash que se almacena en la cadena de bloques. Además, el algoritmo RSA cifra los datos y los envía a un Edge Node como un objeto JSON. El Edge Node va a usar una clave privada para descifrarlas. En este punto del procedimiento, el Edge Node puede aplicar un SHA-256 que va a crear un hash. Si existen dudas o indicios de ataques o datos maliciosos, el hash generado puede compararse con el almacenado en la cadena de bloques. Si los hash son iguales, los datos son correctos.

El concepto de *oracles* está incluido en esta capa. Los *oracles* son agentes que actúan como intermediarios entre el BC y los datos procedentes del mundo real [Gatteschi et al., 2018]. Los *oracles* verifican los datos y los envían a la BC, donde pueden ser utilizados en contratos inteligentes. La función de los *oracles* es proporcionar datos externos de

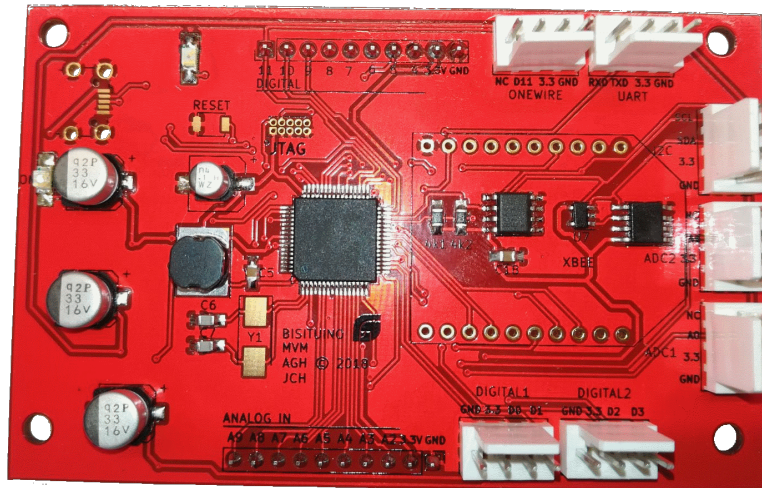


FIG. 3.2: Crypto IoT desarrollado por el grupo de Investigación BISITE de la Universidad de Salamanca.

forma segura y de acuerdo con las condiciones predefinidas establecidas en los contratos inteligentes, desbloqueando los valores y ejecutando los eventos en BC. Los valores o conjuntos de datos pueden ser de cualquier tipo, tales como: temperatura, fluctuaciones de precio, humedad, vibraciones, registros de pagos, etc. [BlockchainHub, 2019].

Los *oracles*-IoT (es decir, los puertos del sensor de E/S o del actuador) y la BC interactúan entre sí en GECA gracias a las tarjetas Crypto-IoT mostradas en la Figura 3.2, que han sido diseñadas y ensambladas por el Grupo de Investigación BISITE de la Universidad de Salamanca. Estos dispositivos están diseñados como pasarelas genéricas destinadas a la construcción de aplicaciones y sistemas basados en BC. El punto fuerte de estos dispositivos agnósticos es que garantizan la seguridad y fiabilidad de los datos que obtienen del entorno y los transfieren a las capas superiores de la arquitectura desarrollada [Sittón-Candanedo et al., 2019a].

Las características de los dispositivos Crypto-IoT son importantes para el funcionamiento general de la Arquitectura. Sittón-Candanedo et al. [2020] describen las siguientes:

- Chip de encriptación ATSHA204A con tecnología SHA-256.

- XBee para la integración de diferentes módulos de telecomunicaciones (ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, FM Radio, RPMA).
- Un módulo de comunicación USB que actúa en modo host y que permite la conexión de micro-servidores como el frambuesa Pi y módulos de procesamiento neural.
- Todo tipo de sensores I2C de una manera fácil de conectar y usar.

3.3.2 Edge Layer

Se sitúa cerca de los Nodos IoT de la capa base (IoT Layer), lo que permite la correcta orquestación de los diferentes activos tecnológicos de la organización, contribuyendo a una mejora significativa en el suministro, monitorización y actualización de los recursos existentes.

Esta capa es responsable del filtrado y pre-procesamiento de los datos que se obtienen de la capa IoT y que posteriormente serán transferidos a la última capa (Business Solution Layer). Su función es mantener la integridad de todos los datos recogidos por los sensores desplegados en los nodos de la primera capa, normalmente gobernados por microcontroladores con recursos computacionales y de almacenamiento reducidos, son filtrados y pre-procesados en elementos de cálculo dentro de la capa Edge.

Los elementos pueden ser soluciones de bajo coste, como los microordenadores basados en arquitecturas educativas como Raspberry Pi [Tang, 2018] o de arquitectura abierta como Orange Pi que está basado en Raspberry Pi. Estos dispositivos tienen un bajo coste y proporcionan arquitecturas con un Sistema Operativo Linux de 32 a 64 bits, con entre 256 MB y 1 GB de RAM, microprocesadores de entre 1 y 4 núcleos y frecuencias de reloj en torno a 1 GHz, lo que permite el uso de tarjetas SD con varios GB de almacenamiento.

Estas características les permiten procesar una cantidad de información mucho mayor que los microcontroladores que se utilizan habitualmente en los dispositivos de IoT, con el objetivo de minimizar el consumo de energía y ejecutar programas de lógica y control de lectura simple en puertos de entrada y salida de propósito general (GPIO), puertos serie (UART, SPI) o buses de comunicación entre circuitos integrados (I2C).

Aunque este tipo de dispositivos también vienen con puertos I/O que permiten conectarlos con sensores y actuadores, haciendo posible la implementación de las capas IoT y Edge dentro de un solo dispositivo. El enfoque general consiste en utilizarlos para coordinar una red de dispositivos IoT más económicos, en la que actúan como elementos centrales o recopiladores de datos a lo largo de la IoT y hasta el Edge. Estos dispositivos se encuentran a veces fuera del alcance de las redes de suministro de energía y, por lo tanto, deben ser alimentados por baterías y paneles solares.

La arquitectura propuesta está abierta a dispositivos Edge que ejecuten nuevas capas de IoT de diferentes proveedores, incluyendo Amazon Web Services IoT Greengrass, Azure IoT Edge de Microsoft o Cloud IoT Edge de Google [Das et al., 2018].

Estas capas permiten aplicar técnicas de Machine Learning en el Edge, por ejemplo mediante las librerías TensorFlowLite [Tang, 2018] en Raspberry Pi o dispositivos similares, facilitando así el rendimiento de *Data Analytics* en el Edge, ahorrando la cantidad de datos enviados al *Cloud*, reduciendo sus costes asociados, así como ofreciendo datos valiosos a los usuarios incluso si la comunicación con Internet y el *Cloud* se pierde temporalmente.

3.3.3 Business Solution Layer

Esta capa incluye el conjunto de servicios y aplicaciones de negocio presentes en el Cloud. Aquí las llamadas individuales de API (Application Programming Interface, por sus siglas en inglés), se activan ejecutando conjuntos de operaciones más complejos que implican el uso de interfaces interactivas y forman parte del ecosistema de aplicaciones empresariales. Los servicios en nube públicos (alojamiento de datos en servidores comerciales) o privados (centro de datos corporativo) pueden utilizarse a este nivel. Los principales componentes de esta capa incluyen:

- **Análisis:** el uso de razonamiento basado en casos, técnicas de inteligencia artificial y algoritmos de aprendizaje automático permite una mayor flexibilidad en las capacidades de análisis y visualización de datos requeridas por las diferentes unidades de negocio y equipos operativos.
- **Administración del Cloud:** un servicio de almacenamiento y administración permite la segregación física o virtual de los datos almacenados de acuerdo con

la capacidad del inquilino para realizar un seguimiento del uso del servicio por parte del inquilino. El uso del servicio por parte de varios inquilinos es una característica integral incluso en los servicios de gestión de la nube privada. En este contexto, los inquilinos serán los diferentes departamentos o grupos de trabajo de una organización pública o privada. La escalabilidad es otra característica distintiva de la Arquitectura de Computación Global Edge y, desde el punto de vista del almacenamiento, a menudo se deriva de tecnologías que aprovechan grandes grupos de componentes de hardware de consumo que pueden ampliarse de forma fácil y económica a medida que crece la demanda de infraestructura y recursos de almacenamiento.

- Autenticación: hay dos maneras en las que la Arquitectura Informática Global Edge aborda la autenticación, la autorización y la transacción distribuida:
 - En un contexto típico de Smart City el Cloud-Edge es público y muchas entidades diferentes pueden participar en él. La entidad central de autorización (Autenticación) en la nube establece un contrato inteligente con cada nuevo elemento de IoT que le permite transferir o extraer información de la cadena de bloques y determinar las condiciones en las que se va a llevar a cabo el proceso.
 - Cuando el Cloud-Edge es un entorno privado usa una cadena de bloques con permiso. El nodo inicial que ha creado la cadena de bloques (la entidad central de autorización en el Cloud) establece las reglas en el primer bloque, de esta forma, sólo los nodos de administrador pueden asignar a los nuevos la función de administrador. Estos nodos son los únicos que proporcionan acceso a los nuevos nodos IoT y se encargan de transferir o extraer tráfico de la cadena de bloques. El proceso de aceptación se ejecuta entre los nodos de administrador y los dispositivos mediante un algoritmo de consenso.
- Base de conocimiento: se podría desarrollar una máquina social utilizando la organización virtual de agentes y sistemas de apoyo a la toma de decisiones basados en los datos de los sensores [González-Briones et al., 2018]. Este componente se complementará con una orquestación basada en el Cloud que permitirá el aprovisionamiento, la supervisión y la actualización de los recursos tecnológicos conectados.

- APIs: es un conjunto de aplicaciones (con métodos estándar, como HTTP RESTful, XML y llamadas SOAP) a través de las cuales se pueden llamar los servicios Cloud. Gracias a estas aplicaciones, los servicios pueden estar disponibles a través de un navegador web estándar u otra aplicación cliente HTTP [Sittón-Candanedo et al., 2019a].

En los siguientes apartados se describen los escenarios en los que se ha desplegado la arquitectura, el proceso de experimentación y los resultados obtenidos.

3.4 GECA en un escenario de Smart Farming

El objetivo principal del caso de estudio es maximizar los beneficios de una plataforma agroindustrial, minimizar sus gastos y ahorrar tiempo y dinero a través de la gestión eficiente de una granja lechera mixta en Castilla y León, España. Una vez implementada la plataforma, fue posible localizar e identificar los recursos disponibles en este escenario. Como resultado, los recursos se han utilizado de manera más eficiente. Ha sido posible localizar a los animales y monitorear sus condiciones de salud en tiempo real. La aplicación de técnicas de Data Analytics y Machine Learning ha facilitado el diagnóstico ya que ha permitido asociar los parámetros obtenidos con enfermedades específicas.

La arquitectura propuesta ha sido diseñada para gestionar en el Edge la información recibida de la red de sensores instalada. La descripción completa del proceso de implementación de GECA en este escenario Smart Farming se encuentra en Sittón-Candanedo et al. [2019a]. La arquitectura proporciona a la plataforma las siguientes características:

- La nueva arquitectura cuenta con un entorno de alta disponibilidad que proporciona a los usuarios información en tiempo real a través de la capa Business Solution, a la que los usuarios pueden acceder de forma remota.
- Los nuevos sensores pueden incorporarse a la plataforma abierta mediante las capas IoT y Edge de la arquitectura.
- Tanto la capa Edge como Business Solution incluyen técnicas de Inteligencia Artificial como algoritmos de Machine Learning para la detección de patrones anómalos en el comportamiento del ganado.

3.4.1 Experimentación y resultados

El uso de un paradigma de computación distribuida basado en EC en escenarios de IoT, permite mover la carga computacional a los nodos de las capas que se encuentran más cerca de los puntos de recogida de datos. Gracias a la disponibilidad de microordenadores de bajo coste y consumo energético en el mercado (como la Raspberry Pi o similar), es posible trasladar parte de la carga computacional a las instalaciones donde se recogen los datos, reduciendo el tráfico de los datos enviados al Cloud y ahorrando los costes recurrentes mensuales.

Para evaluar la Arquitectura de Computación Global Edge que se ha implementado en la plataforma de este escenario Smart Farming, se realizaron dos pruebas de un mes en períodos de tiempo separados. La primera prueba se utilizó como período de referencia, mientras que la segunda se utilizó para verificar la posibilidad de optimizar el rendimiento del mismo sistema mediante la adición de la capa Edge. El objetivo de la capa Edge es facilitar la transferencia de una mayor cantidad de datos entre los sensores y el cloud.

Las dos pruebas que se realizaron en este caso de estudio, se sometieron exactamente a las mismas condiciones. La importancia de verificar la viabilidad de la capa Edge reside en el hecho de que la transferencia de datos representa una gran parte del coste total del uso del sistema y de las aplicaciones en el cloud. En la primera prueba medimos la cantidad de datos transferidos en la versión antigua del sistema entre los sensores IoT y el Cloud. Esta versión no se benefició de las ventajas de la capa Edge de la nueva arquitectura. En la segunda prueba, se realizó el mismo experimento para evaluar la nueva versión del sistema de monitorización que incluía la nueva capa Edge. Por lo tanto, en la segunda prueba la transmisión de datos se midió en dos etapas: desde los sensores IoT a la capa Edge, y desde la capa Edge al Cloud.

El sistema desplegado en la primera prueba era una versión anterior, no incluía los nuevos dispositivos Crypto-IoT, elementos Edge basados en el modelo B de Raspberry Pi-3 y TensorFlowLite o Blockchain. Así, en la primera prueba, los nodos recolectan los datos a través de ZigBee y Wi-Fi y los reenvían directamente a la aplicación en la Nube sin filtrar, pre-procesar, o encriptar. En la segunda prueba, tanto los dispositivos

Crypto-IoT como los nuevos elementos *edge* basados en Rasperry Pi-3 modelo B y TensorFlowLite fueron incorporados.

En ambas fases se ha utilizado el mismo número de nodos IoT:

1. Un router Wi-Fi que recoge datos de 15 collares para la sensorización del ganado (temperatura, pulso, respiración y acelerómetros). Cada 5 minutos, el collar envía cuatro valores, uno para cada uno de los parámetros que mide.
2. Un Colector ZigBee que recopila datos de:
 - 2 nodos de IoT (temperatura, humedad y cuatro tipos de gases) en los dos graneros de la granja. Cada nodo envía sus valores cada 10 minutos.
 - 12 estaciones agro-meteorológicas divididas en:
 - 2 estaciones base con: pluviómetro, humedad del suelo, temperatura del suelo y del aire, humedad del aire, energía solar radiación, dirección y velocidad del viento.
 - 10 estaciones satélite con: pluviómetro, humedad del suelo, suelo temperatura.

Cada estación envía cada uno de sus valores cada 15 min.

Específicamente, medimos la cantidad de datos enviados a la capa de aplicación en el Cloud, esta capa fue desplegada en la plataforma Google Cloud utilizando el App Engine como PaaS (Platform as a Service), Google Functions as Faas (Functions as a Service), Cloud SQL como base de datos relacional MySQL y BigQuery como base de datos NoSQL para el análisis de datos en el Cloud, obteniendo las siguientes medidas de transmisión para las dos pruebas, tal y como se representa en la Tabla 3.1.

TAB. 3.1: Datos transmitidos entre los diferentes componentes Edge y Cloud en las dos pruebas.

Estado	Estado 1 (sin Edge)	Estado 2 (basado en Edge)
Dispositivos IoT ↔ Edge nodes (gratis)	0.0 MB / mes	98.2 MB / mes
Dispositivos IoT ↔ Cloud	124.6 MB / mes	0.0 MB / mes
Edge nodes ↔ Cloud	0.0 MB / mes	76.2 MB / mes

Los datos de la tabla demuestran que la nueva arquitectura de referencia permite construir plataformas en las que la cantidad de datos totales transferidos al Cloud (en un sistema con las mismas condiciones de uso y sensibilización) se redujo en un 38,84%.

Esta reducción podría ser mayor en otras aplicaciones y sistemas que permiten un mayor uso del filtrado y pre-procesamiento del Edge. Lógicamente, en un escenario de datos masivos, la reducción del tráfico también implica una reducción de los costes asociados a la transmisión de datos al Cloud, el tiempo de ejecución de los procesos de computo, así como el almacenamiento, sobre todo si está sobre el nivel del límite libre disponible en el proveedor del cloud, debido al hecho de que los datos redundantes ya han sido descartados en el Edge (por ejemplo, las retransmisiones en la capa de aplicación de la pila de protocolos de ZigBee).

Además, a nivel cualitativo, la implementación de la nueva arquitectura implicó una mejora sustancial en la seguridad e integridad de los datos. En la versión antigua del sistema los datos eran recogidos y cifrados mediante un sistema sencillo con un algoritmo de cifrado basado en una clave simétrica de sólo 32 bits ejecutado por los microcontroladores de 8 bits ATmega 1281 y 8 kB de RAM. La encriptación de datos del nuevo esquema es más segura gracias a la transmisión de datos a través del Blockchain y el algoritmo SHA-256 que se implementan en el dispositivo Crypto-IoT.

Gracias a la posibilidad de acceder al Servidor web alojado en el Raspberry Pi, el agricultor puede visualizar información, medidas y estadísticas de los últimos 30 días incluso si la conexión con el Cloud se ha perdido temporalmente debido al acceso limitado a Internet (la información se transmite a través de radio debido a la falta de acceso DSL o por cable).

En este sentido, la seguridad es una de las características más destacadas de la nueva arquitectura, que proporciona un método para asegurar la transferencia de datos entre todas las entidades, independientemente de si están en el Edge o en el Cloud. La capa IoT permite que todas las comunicaciones estén encriptadas. Además, su innovación en comunicaciones radica en el hecho de que ningún nodo en la red puede rechazar la información proporcionada por otro nodo existente. Dado que todas las transmisiones pasan a formar parte del Blockchain, la información permanece inviolable, lo que permite la establecimiento de contratos inteligentes entre las diferentes entidades, incluidos los proveedores o clientes de la cadena de valor.

El trabajo de investigación llevado a cabo en la tesis y publicado en [Sittón-Candanedo et al., 2019a] sustenta que la nueva arquitectura permite construir plataformas en las que la cantidad total de datos transferidos al Cloud (en un sistema con las mismas

condiciones de uso y sensibilización) se redujo en un 38,84%. En un escenario de datos masivo, la reducción del tráfico también implica una reducción de: los costes asociados a la transmisión de datos al Cloud; el tiempo de ejecución de los componentes informáticos; así como el almacenamiento; sobre todo si está por encima del límite de nivel libre en el proveedor de servicios, debido a que los datos redundantes ya han sido descartados en el Edge. Además, a nivel cualitativo, la implementación de la nueva arquitectura implicó una mejora sustancial en la seguridad e integridad de los datos.

La antigua versión del sistema que existía en la granja utilizada para el caso de estudio, recogía y cifraba los datos mediante un simple algoritmo de cifrado basado en el flujo y en una clave simétrica de sólo 32 bits ejecutada por los microcontroladores de 8 bits ATmega 1281 y 8 kB de RAM.

La encriptación del nuevo esquema es más segura gracias a la transmisión de datos a través de la cadena de bloques y algoritmos de encriptación de SHA-256 que se implementan en los dispositivos Crypto-IoT. Además, gracias a la posibilidad de acceder al servidor web alojado en el Raspberry Pi, el agricultor puede visualizar información, medidas y estadísticas de los últimos 30 días incluso si la conexión con el Cloud se ha perdido temporalmente debido al acceso limitado a Internet (la información se transmite por radio debido a la falta de DSL o acceso por cable).

3.5 GECA para Smart Energy

En el Capítulo 2 se analizó la importancia del EC y de escenarios en los que actualmente es objeto de investigación, como el caso de los smart energy. En esta sección se identifican los estudios que se han publicado sobre Edge Computing aplicado a escenarios de Energía Inteligente y las futuras líneas de investigación en este campo.

El estado del arte y la identificación de las contribuciones más relevantes en este contexto, se desarrolló bajo la metodología de Mapeo Sistemático de la Literatura, siguiendo los procedimientos establecidos por Kitchenham et al. [2011] y Petersen et al. [2015] para realizar *Systematic Mapping Studies*(SMS). Gracias a este tipo de mapeos, es posible realizar la categorización de los estudios existentes en un área específica de investigación, mediante un esquema y una estructura que indica la frecuencia con la que se lleva a cabo la investigación en esa área, mostrando los resultados obtenidos visualmente en forma

de un mapa [Odun-Ayo et al., 2018]. La metodología y los resultados obtenidos en este trabajo se detallan en la sección 3.5.1.

3.5.1 Un Estudio de Mapeo Sistemático de la Literatura

Un Estudio de Mapeo Sistemático de la Literatura (Systematic Mapping Study, por sus siglas en inglés, SMS), es una metodología que ayuda a los investigadores a identificar, analizar y clasificar un campo de interés [Petersen et al., 2008]. Esta metodología está ampliamente extendida en la investigación médica y se ha hecho común en informática, y más concretamente en el área de ingeniería de software, durante los últimos años [Keele et al., 2007]. El objetivo principal de estos estudios es determinar la cobertura de un campo de investigación concreto mediante el análisis de la frecuencia de las publicaciones para múltiples categorías en forma de un esquema. Estos esquemas pueden adaptarse para centrarse en temas de investigación específicos (Petersen et al. [2015]).

Heinz [2014] define una lista de objetivos importantes que un trabajo de este tipo debe alcanzar. Entre ellos:

- Identificar y revisar los informes primarios.
- Describir la metodología y los resultados de los informes primarios.
- Desarrollar un esquema de clasificación.
- Construir un esquema de clasificación y estructurar un campo de interés por categorías.
- Estructura del tema de investigación, el tipo de investigación realizada y los resultados obtenidos.
- Identificar las frecuencias de las publicaciones para cada categoría.
- Definir la cobertura del campo de investigación.
- Combinar los resultados obtenidos para mejorar la visión general del campo de investigación.
- Visualizar los resultados en forma de un esquema de mapeo.

Actualmente, Edge Computing se ha utilizado en escenarios de IoT a través de su inclusión en arquitecturas de referencia para Industry 4.0. [Sittón-Candanedo et al., 2019a]. La principal motivación del SMS propuesto, es la revisión de los trabajos existentes sobre la incorporación de Edge Computing, principalmente en el contexto de Smart Energy, para proponer una solución y definir futuras líneas de investigación.

3.5.1.1 Experimentación y resultados

Las preguntas de investigación que nos permitirán encontrar la evidencia en la que se basa nuestro estudio de mapeo sistemático son las siguientes:

- ¿Qué tipo de propuestas se han reportado sobre EC para escenarios Smart Energy?
- ¿Cómo se benefician los escenarios Smart Energy de la implementación de las arquitecturas EC?

Respondiendo a estas preguntas, será posible categorizar los trabajos existentes hasta el 4 de junio de 2019 y presentar mapas visuales como resultado. Para realizar un SMS, es importante construir una estrategia de búsqueda y definir las cadenas por palabras claves. En este SMS, las palabras clave son Edge Computing y Smart Energy. Adicionalmente se incluyeron: Smart Grid, Smart Consumption, Green Energy y Energy Optimization.

Estas palabras clave se agregaron para ampliar los resultados obtenidos en las búsquedas, ya que se definió una primera cadena de búsqueda simple y los resultados obtenidos no superaron los 36 artículos, por lo que los autores decidieron ampliar la cadena de búsqueda aumentando el número de palabras clave. Las cadenas de búsqueda se construyeron para los siguientes repositorios: Web of Science, Scopus y Springer. En la Tabla 3.2, se detallan las cadenas programadas para cada repositorio.

TAB. 3.2: Cadenas de búsqueda programadas para cada repositorios.

Repositorio	Cadena de Búsqueda
Web of science (WS1)	(TS=((“Edge Computing*”) AND (“Smart Energy*”))).
Web of science (WS2)	(TS=((“Edge Computing”) AND (“Smart Energy”OR”smart gird”OR”smart consumption”OR”green energy” OR “energy optimization”))).
Web of Science (WS3)	(TS=((“Edge Computing”OR”edge cloud computing”) AND (“Smart Energy”OR”smart gird”OR”smart consumption”OR”green energy”OR”energy optimization”))) Bases de datos= WOS, CCC, DIIDW, KJD, MEDLINE, RSCI, SCIELO Período de tiempo=Todos los años Idioma de búsqueda=Auto.
Scopus (SC1)	TITLE-ABS-KEY (“Edge Computing”) AND (“Smart Energy*”) .
Scopus (SC2)	TITLE-ABS-KEY (“Edge Computing*”) AND (“Smart Energy*” OR “smart gird*” OR “smart consumption*” OR “green energy*” OR “energy optimization*”).
Scopus (SC3)	TITLE-ABS-KEY (“Edge Computing*” OR “edge cloud computing”) AND (“Smart Energy*” OR “smart gird*” OR “smart consumption*” OR “green energy*” OR “energy optimization*”).
Springer (SP1)	(“Edge Computing”) AND (“Smart Energy*”).
Springer (SP2)	(“Edge Computing*”) AND (“Smart Energy*” OR “smart gird*” OR “smart consumption*”OR”green energy*”OR”energy optimization*”).
Springer (SP3)	(“Edge Computing*” OR “edge cloud computing”) AND (“Smart Energy*” OR “smart gird*” OR “smart consumption*” OR “green energy*” OR “energy optimization*”).

En su guía, Petersen et al. [2015] señalan la importancia de establecer las características que deben cumplir los estudios identificados para ser incluidos o excluidos de un estudio

de mapeo sistemático. Utilizando esta guía como base, se consideraron los siguientes criterios de inclusión y exclusión al seleccionar un trabajo:

Criterios de inclusión:

- Capítulos de libros revisados por pares y documentos publicados en revistas o conferencias.
- Estudios publicados entre 2015 y junio de 2019.
- Estudios en el campo de EC y Smart Energy.

Criterios de exclusión:

- Artículos duplicados.
- Publicaciones cuyo tema principal no sea EC y Smart Energy.
- Aquellos artículos en los que los autores dudan si aportan o no soluciones que incorporen EC en los escenarios Smart Energy.

La Figura 3.3 muestra el total de artículos encontrados y el proceso de filtrado al aplicar los criterios de inclusión y exclusión definidos.

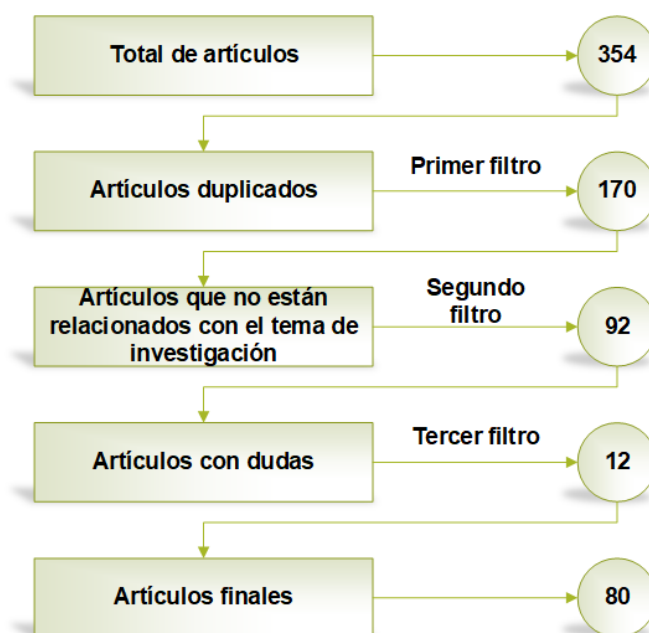


FIG. 3.3: Proceso de filtrado para obtener los artículos finales para su revisión.

En la Figura 3.4, se han considerado tres dimensiones: Tipo de propuesta, tipo de investigación y tipo de publicación. Los resultados permiten identificar que de los 80 trabajos relevantes, aproximadamente el 43,8% no incluyen una arquitectura, marco, método o modelo como contribución, sino que realizan una revisión exhaustiva de los conceptos o del estado del arte.

De los frameworks identificados, sólo tres están validados, pero utilizando herramientas de simulación para representar: vehículos inteligentes, gestión de un sistema de vídeo y hogares inteligentes. El objetivo de estos enfoques es gestionar eficazmente el uso de la energía y reducir el consumo. Sin embargo, ninguno de los casos ha sido validado en un escenario real que permita medir los resultados obtenidos y considerarlos como soluciones óptimas para diferentes escenarios de energía inteligente.

Las arquitecturas representan un 17,5% de los artículos primarios, en ellas desataca el uso de EC e IoT para entornos Smart Energy. Su prioridad es recoger y analizar los datos de los dispositivos IoT, asegurando la conectividad y la comunicación entre sus capas. Algunas de sus principales limitaciones son:

- Escalabilidad: están diseñadas para escenarios específicos y tienen una capacidad limitada para adaptarse a un mayor número de usuarios, hardware y software.
- Seguridad: estos estudios no definen estrategias claras para garantizar la seguridad de los datos en las arquitecturas propuestas.
- Estándares: no utilizan un estándar de referencia como ISO/IEC/IEEE 42020:2011, para diseñar las arquitecturas, por lo que los subsistemas/componentes y las relaciones entre ellos no están claramente definidos.

Los algoritmos de optimización, deep learning y los algoritmos basados en redes neuronales representan el mayor porcentaje de las soluciones propuestas a los problemas de energía. En un análisis más detallado, hemos identificado que los artículos abordan particularmente cuatro problemas: consumo, eficiencia, gestión y optimización de la energía.

Los trabajos analizados en este SMS han sido categorizados por las soluciones que aportan a los escenarios de Smart Energy. Sin embargo, el contexto es complejo y requiere desarrollos y propuestas que reduzcan el consumo y el costo de la energía, mejoren la eficiencia operativa, a través de la gestión de la infraestructura, tomen decisiones basadas en el análisis de datos y el acceso a la información en tiempo real.

Adicionalmente, para responder a las demandas del mercado actual, las soluciones energéticas deben dar a los usuarios la oportunidad de programar su consumo de energía de manera inteligente y personalizada. Los aspectos importantes a tener en cuenta en este tipo de desarrollos son: la existencia de variantes en los índices de generación de energía y en las demandas de procesamiento de datos. En los escenarios de Smart Energy debe haber una adecuada distribución de tareas y una programación eficiente de los requerimientos energéticos, de manera que exista una correspondencia entre los factores de oferta y demanda.

En este sentido, los resultados de este SMS han permitido identificar un número limitado de trabajos de investigación, que proponen el diseño y la implementación de marcos y plataformas unificadas, que integran EC-IoT para un entorno Smart Energy.

3.5.2 GECA aplicado a un escenario smart energy

Para evaluar y validar los beneficios de incluir el Edge Computing en aplicaciones basadas en IoT para smart energy, hemos realizado caso de estudio. Más específicamente, se examina cómo mejora el rendimiento del marco de trabajo de CAFCLA mediante la adición de una capa Edge, desplegando GECA. La versión mejorada del marco ha sido probada en un escenario destinado a identificar la eficiencia del consumo de energía en los edificios públicos por medio de la Computación Social y los dispositivos IoT del contexto. La anterior versión sin Edge de CAFCLA había sido previamente probada y descrita por García et al. [2017a].

3.5.2.1 Descripción

Para esta investigación, se prueba y compara las dos versiones del sistema, la anterior que no utiliza Edge y la nueva basada en el despliegue de GECA, en el mismo escenario utilizado por García et al. [2017a]. Como en el trabajo de García et al. [2017a], el objetivo

principal del escenario es la aplicación de las características de IoT y Computación Social de CAFCLA, para el desarrollo de juegos serios que utilicen información contextual y fomenten un cambio de comportamiento hacia hábitos energéticos más eficientes en edificios públicos y/o en el lugar de trabajo.

La información contextual requerida se recoge mediante dispositivos de IoT, formando una Red de Sensores Inalámbricos, que facilitan la adquisición de cantidades físicas asociadas al consumo de energía (por ejemplo, temperatura, luminosidad) en diferentes puntos, así como información sobre la presencia de cada trabajador en todo el edificio (es decir, la localización de cada trabajador se detecta mediante un *Sistema de Localización en Tiempo Real*), y centrándose en un uso eficiente de los sistemas de iluminación, estaciones de trabajo, calefacción, ventilación y aire acondicionado, así como ascensores. Además, una Organización Virtual de Agentes (VOA) apoya un juego serio diseñado para concienciar a los usuarios y ayudarles a adquirir buenos hábitos de forma natural, fomentando un cambio en su comportamiento, de forma que el ahorro energético se logra a través de un uso más eficiente de los recursos.

Se propone además, la integración de las reglas de diseño y las características de GECA para el marco de CAFCLA. El objetivo es la gestión y seguridad de los nodos edges, mejorando la eficiencia energética de los edificios públicos. García et al. [2017b] y García et al. [2012] definen a CAFCLA como un marco que permite el desarrollo de aplicaciones y sistemas de e-Learning basados en un método pedagógico de aprendizaje colaborativo asistido por ordenador (CSCL) así como el paradigma de la Inteligencia Ambiental.

En el trabajo presentado por Sittón-Candanedo et al. [2019b] se muestra cómo los tres niveles de GECA pueden ser implementados en sistemas basados en el marco de CAFCLA. Este framework está formado por cinco capas que son descritas en profundidad por García et al. [2017b]: *Physical, Communication, Context-awareness, Management* y *Application*, las cuales han sido modificadas y distribuidas de acuerdo a las reglas de GECA.

En la Figura 3.5 se integran los componentes de la capa física de CAFCLA (es decir, sensores de temperatura, humedad y encendido/apagado (ON/OFF), tabletas, teléfonos inteligentes y otros) en la capa IoT de GECA. Las capas de Comunicación y Conocimiento del Contexto y sus elementos, como ZigBee y Wi-Fi, se incluyen en GECA

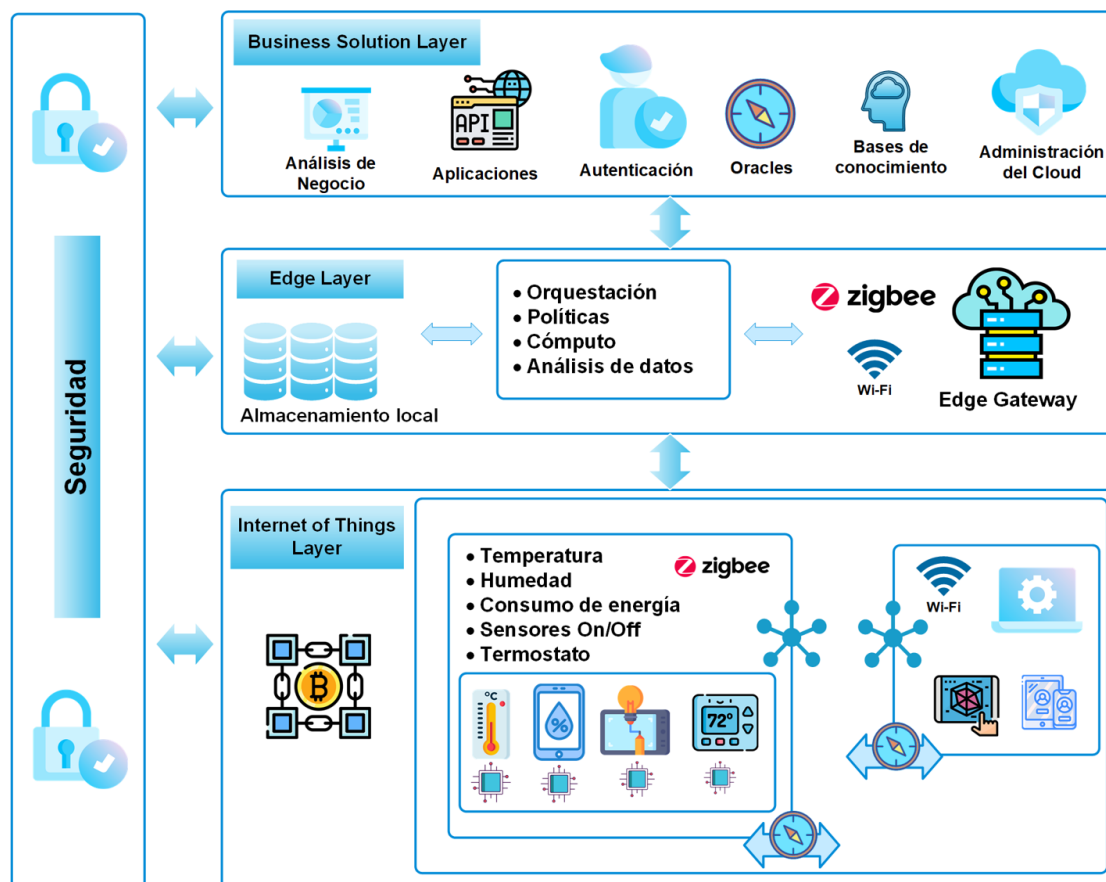


FIG. 3.5: Aplicando la Arquitectura GECA a escenarios de Eficiencia Energética

en sus capas: IoT y Edge. Asimismo, las capas de Gestión y Aplicación se incorporan en la Capa Business Solution de GECA.

3.5.2.2 Experimentación y resultados

Para probar y validar los beneficios de utilizar GECA en el marco de CAFCLA, en términos de ahorro en los costes de transmisión de entrada (de los dispositivos IoT o nodos Edge al Cloud) y de salida (del Cloud a los dispositivos de IoT o nodos Edge), la plataforma se evaluó en el mismo caso de uso en el entorno del Grupo de Investigación BISITE en un periodo de 4 semanas (28 días naturales cada uno). Estas dos pruebas se llevaron a cabo en períodos de tiempo separados. La primera prueba se realizó del 3 de septiembre de 2018 al 30 de septiembre de 2018, ambos días incluidos, y la segunda prueba se realizó del 1 de octubre de 2018 al 28 de octubre de 2018, ambos días incluidos. Por lo tanto, se consideró el mismo número de días laborables y fines de semana dentro de las dos pruebas.

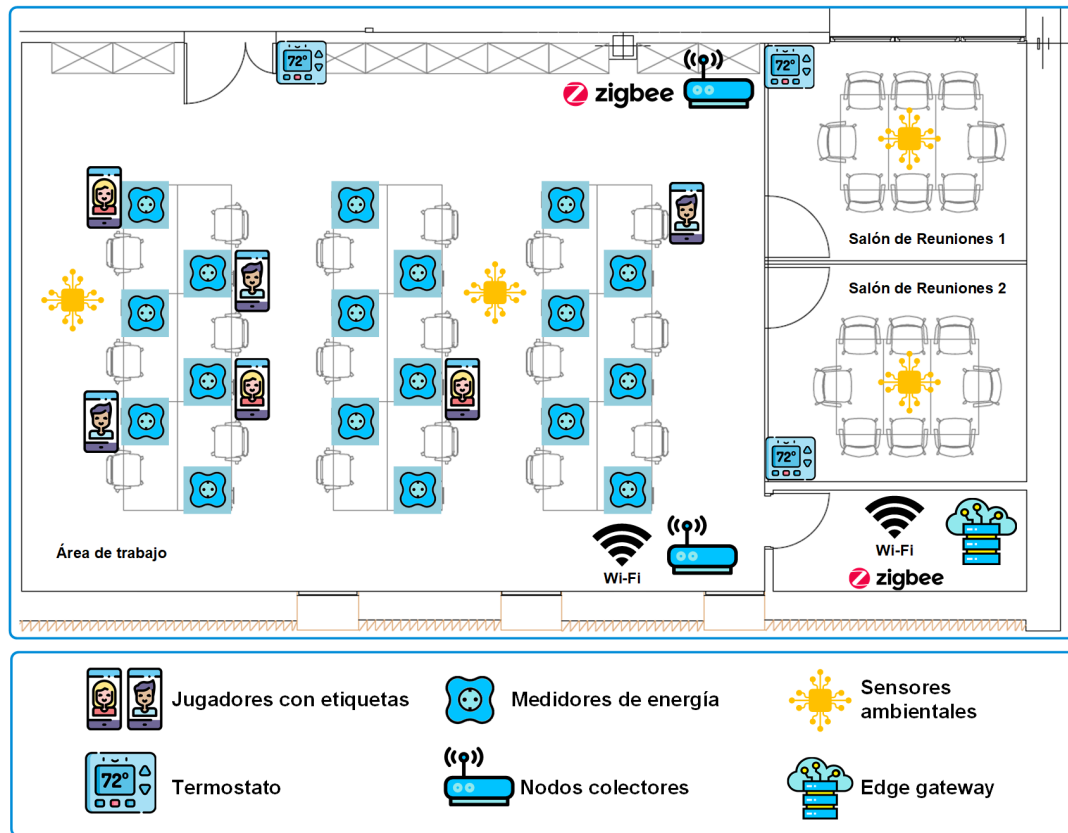


FIG. 3.6: Dispositivos IoT y capa Edge en el escenario de evaluación de la eficiencia energética en edificios públicos (basado en García et al. [2017a])

La Figura 3.6 muestra el laboratorio del Grupo de Investigación BISITE (Universidad de Salamanca, España) elegido como escenario de implantación. Como se puede ver, hay un espacio de trabajo principal (88 m^2), con 18 escritorios para 18 trabajadores, todos ellos involucrados en el experimento, y dos salas de reuniones adicionales (12 m^2 cada una). Este laboratorio se encuentra en el segundo piso del edificio. Por lo tanto, los trabajadores deben acceder a ella subiendo las escaleras o tomando un ascensor.

La primera prueba se utilizó como período de referencia sin la capa Edge, sólo considerando la capa IoT (dispositivos de IoT y pasarela de IoT-Cloud) y la capa Business Solution. La segunda se utilizó para verificar la posibilidad de optimizar el rendimiento del mismo sistema, mediante la adición de la capa Edge y el despliegue completo de la arquitectura propuesta, es decir, con la Capa IoT, la Capa Edge y la Capa Business Solution en el Cloud, y ejecutándose dentro de la plataforma. Los dos ensayos se sometieron exactamente a las mismas condiciones en cuanto a las fuentes de datos IoT.

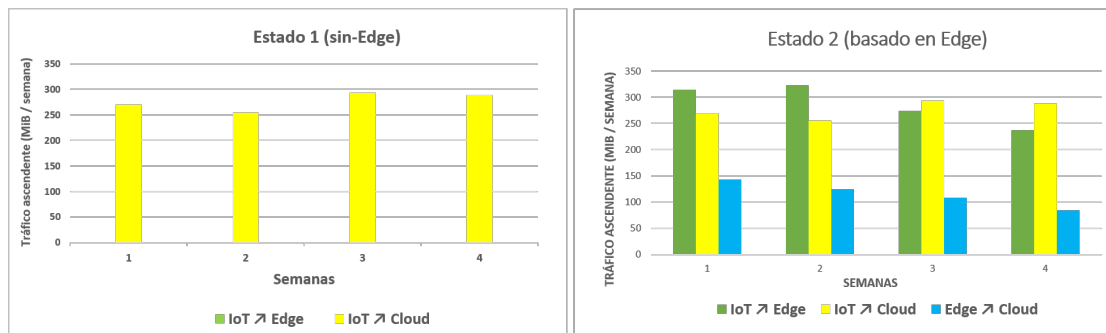


FIG. 3.7: Comparación de la cantidad de datos transferidos en las dos pruebas (ascendente)

En la primera prueba, las pasarelas IoT-Cloud recogieron los datos a través de ZigBee y Wi-Fi y los reenviaron directamente al Cloud mediante una conexión a Internet de fibra óptica sin filtrarlos, preprocesarlos o encriptarlos. Por el contrario, en la segunda prueba se incorporaron los nuevos elementos Edge basados en el modelo B de Raspberry Pi 3 y TensorFlowLite, siguiendo así todas las características y reglas de diseño de la *Global Edge Computing Architecture*. En ambas pruebas, el número de fuentes de datos IoT y el número de participantes (jugadores) fueron los mismos.

Por un lado, la Figura 3.7 muestra una comparación gráfica entre el tráfico de enlace ascendente (de dispositivos IoT a nodos Edge, de dispositivos IoT a Cloud y de nodos Edge a Cloud) en las dos pruebas de cuatro semanas, no basadas en Edge y Edge, respectivamente. Por otro lado, la figura 3.8 muestra la misma comparación entre el tráfico del enlace descendente (de nodos Edge a dispositivos IoT, de nodos Cloud a dispositivos IoT y de nodos Cloud a Edge) en las dos pruebas. Lógicamente, en la Etapa 1 (no Edge) sólo hay un único flujo de datos bidireccional directo entre los dispositivos IoT y el Cloud, ya que en esa etapa no se implementa ningún dispositivo Edge. Por otro lado, en la Etapa 2 (basada en Edge), en la que se incorporan dispositivos Edge, no hay comunicación directa entre los dispositivos IoT y el Cloud, pero hay dos flujos bidireccionales: el primero entre los dispositivos IoT y los nodos Edge, y el segundo entre los nodos Edge y el Cloud.

Los datos de las gráficas demuestran que la aplicación de la Arquitectura propuesta al sistema de eficiencia energética de Computación Social ha sido beneficiosa. Permite reducir la cantidad total de datos transferidos al Cloud, gracias a la inclusión de la capa Edge. Estos resultados muestran que la arquitectura GECA ha contribuido considerablemente al framework de CAFCLA, dado que se habían establecido las mismas

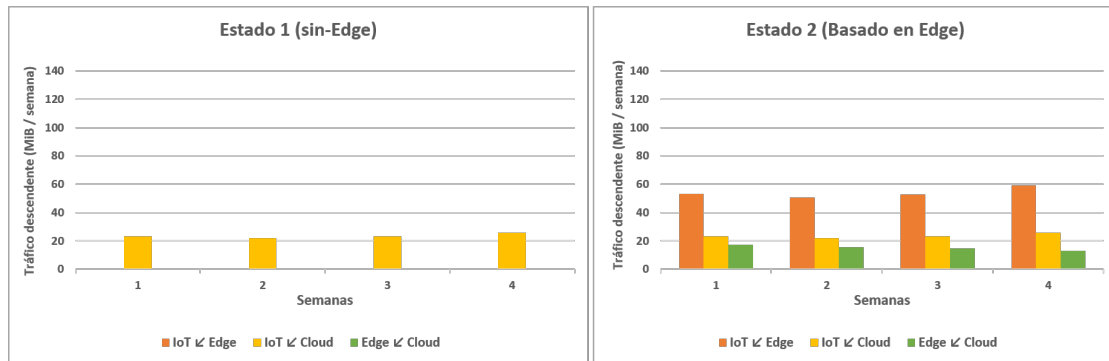


FIG. 3.8: Comparación de la cantidad de datos transferidos en las dos pruebas (descendente)

condiciones en el escenario de los edificios públicos y el nivel de sensibilización era el mismo.

En el esquema de costes habitual de los proveedores de servicios Cloud, el almacenamiento e ingestión de datos tiende a tener un precio reducido, mientras que los costes son más altos tanto en el cálculo que se realiza sobre los datos como en la extracción real de datos del Cloud de forma repetitiva Wu et al. [2018]. Aunque la reducción del tráfico es más significativa en la carga de datos (tráfico ascendente) que en la descarga de datos (tráfico descendente), la reducción de la carga de tráfico en el Cloud permite reducir los costes informáticos asociados al procesamiento de dichos datos. En este sentido, gracias a la utilización de la arquitectura GECA en la nueva versión de la plataforma para la implantación del sistema, la reducción del volumen de datos transferidos, es mucho menor que en la primera versión del sistema. Esta reducción podría ser diferente en otros escenarios donde se facilita el uso de diferentes filtraciones y pre-procesos en la capa Edge, tales como el escenario smart farming presentado por Sittón-Candanedo et al. [2019a].

3.6 Conclusiones

Las conclusiones obtenidas del análisis del estado del arte presentado en el Capítulo 2, así como la Sección 1.2 del Capítulo 1, permitieron el diseño de GECA, cuyo despliegue ha generado contribuciones científicas que se han presentado en este apartado y que se describen a continuación:

- El problema para gestionar los datos generados por el Internet de las Cosas, así como el coste de desplegar arquitecturas comerciales ha dado origen a la solución propuesta: una arquitectura global, escalable y modular basada en EC.
- Las capas de GECA integran tecnología segura y de bajo coste para captura, procesamiento y almacenamiento de datos en tiempo real.
- Los escenarios de caso de estudio Smart Farming y Smart Energy utilizados para desplegar, validar y evaluar la arquitectura propuesta, se corresponden con la realidad de las necesidades actuales de las empresas, para fomentar el ahorro energético, proteger el ambiente, reducir costes de consumo de ancho de banda, almacenamiento de datos en el cloud, disminuir la latencia, pero garantizando aplicaciones y soluciones con respuestas seguras y en tiempo real.

Capítulo 5

Evidencias y Resultados



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Evidencias y Resultados

En este Capítulo se presentan el conjunto de publicaciones en revistas científicas internacionales, que han permitido el desarrollo de este trabajo y los resultados obtenidos. La Sección 5.1 detalla las publicaciones en: revistas científicas de alto impacto, revistas internacionales, conferencias y workshops internacionales. La sección 5.2 menciona los proyectos en los que se ha participado y que han sustentado la investigación desarrollada.

5.1 Publicaciones

5.1.1 Publicaciones en revistas científicas internacionales

1. Sittón-Candanedo, I., Alonso, R. S., Corchado, J. M., Rodríguez-González, S., & Casado-Vara, R. (2019). A review of edge computing reference architectures and a new global edge proposal. *Future Generation Computer Systems*, 99, 278-294.
2. Alonso, R. S., Sittón-Candanedo, I., García, Ó., Prieto, J., & Rodríguez-González, S. (2019). An intelligent Edge-IoT platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario. *Ad Hoc Networks*, 102047.
3. Sittón-Candanedo, I., Alonso, R. S., García, Ó., Muñoz, L., & Rodríguez-González, S. (2019). Edge computing, IoT and Social Computing in Smart Energy scenarios. *Sensors*, 19(15), 3353.
4. Sittón Candanedo, I., Rodríguez González, S., & Muñoz, L. (2019). Extracción de patrones para la Industria 4.0 a través de un modelo predictivo.

5. Sittón-Candanedo, I., & Corchado, J. M. (2019). An Edge Computing Tutorial. *Oriental Journal of Computer Science and Technology*, 12(2), 34-38.

5.1.2 Publicaciones en congresos internacionales y workshops

1. Sittón-Candanedo, I., Alonso, R. S., Muñoz, L., & Rodríguez-González, S. (2019, August). Arquitecturas de Referencia Edge Computing para la Industria 4.0: una revisión. In *Memorias de Congresos UTP* (pp. 16-23).
2. Alonso, R. S., Sittón-Candanedo, I., García, O., Rodríguez-González, S., & Prieto, J., A Survey on Software-Defined Networks and Edge Computing over IoT. In *Highlights of Practical Applications of Survivable Agents and Multi-Agent Systems. The PAAMS Collection: International Workshops of PAAMS 2019, Ávila, Spain, June 26–28, 2019, Proceedings* (p. 289). Springer.
3. Sittón, I., Alonso, R. S., Hernández-Nieves, E., Rodríguez-Gonzalez, S., & Rivas, A. (2019, July). Neuro-Symbolic Hybrid Systems for Industry 4.0: A Systematic Mapping Study. In *International Conference on Knowledge Management in Organizations* (pp. 455-465). Springer, Cham.
4. Sittón-Candanedo, I. (2019, June). A New Approach: Edge Computing and Blockchain for Industry 4.0. In *International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence* (pp. 201-204). Springer, Cham.
5. Sittón-Candanedo, I. (2019, June). Edge Computing: A Review of Application Scenarios. In *International Symposium on Distributed Computing and Artificial Intelligence* (pp. 197-200). Springer, Cham.
6. Sittón-Candanedo, I., Alonso, R. S., Rodríguez-González, S., Coria, J. A. G., & De La Prieta, F. (2019, May). Edge Computing Architectures in Industry 4.0: A General Survey and Comparison. In *International Workshop on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications* (pp. 121-131). Springer, Cham.
7. Sittón-Candanedo, I., Hernández-Nieves, E., Rodríguez-González S., Corchado-Rodríguez, J.M. “Fault predictive model for HVAC Systems in the context of Industry 4.0”, in: Francisco Herrera, Sergio Damas, Rosana Montes

- (Eds.), XVIII Conf. La Asoc. Española Para La Intel. Artif., Granada, Spain, Octubre, 2018: pp. 21–26.
8. Sittón I., Hernández, E., Rodríguez, S., Santos, M.T., González, A. “Machine learning predictive model for Industry 4.0”. 2018 Thirteenth International Conference on Knowledge Management in Organizations – KMO 2018. Slovakia 6-8 de Agosto de 2018.
 9. Sittón I., Rodríguez, S., González A., De La Prieta, F., MASPI: A Multi agent system for prediction in Industry 4.0 Environment. International Joint Conference SOCO'18-CISIS'18-ICEUTE'18, San Sebastián, España, 6-8 de Junio, 2018.
 10. Sittón I., A self-organized multiagent system for Industry 4.0. 15th International Conference on Distributed Computing and Artificial Intelligence, 20-22 Junio 2018, Toledo, España.
 11. Sittón, I.; Rodríguez, S.; Muñoz, L.; “Diseño de un modelo predictivo en el contexto Industria 4.0”. KnE Engineering, 6th Engineering, Science and Technology Conference - Panama 2017 (ESTEC 2017), Vol. 3, no 1, p. 543-551, 2018. DOI: 10.18502/keg.v3i1.1458.
 12. Sittón, I.; Rodríguez, S., “Pattern extraction for the design of predictive models in industry 4.0”, Advances in Intelligent Systems and Computing, 15th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems, PAAMS 2017, Vol., 619, pp. 258-261, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-61578-3_31.

5.2 Proyectos

- Nombre del proyecto: PRODUCTIO: Productivity Industrial Enhancement through Enabling Technologies.

Entidad/es financiadora/s: Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial Tipo de entidad: Entidad Empresarial.

Ciudad entidad financiadora: Madrid, Comunidad de Madrid, España.

Nombre del programa: Proyectos estratégicos CIEN.

Fecha de inicio-fin: 09/2016 - 08/2021.

- Nombre del proyecto: CityChain: Plataforma de Smart City e IoT para una sociedad hiperconectada. Veracidad y seguridad mediante registro distribuido (blockchain).
Entidad/es financiadora/s: Junta de Castilla y León Tipo de entidad: Junta.
Ciudad entidad financiadora: Valladolid, Castilla y León, España.
Fecha de inicio-fin: 05/2018 - 05/2020.
- Nombre del proyecto: TrustedIndustry: Arquitectura abierta de ciberseguridad frente a las amenazas en la industria 4.0
Entidad/es financiadora/s: Junta de Castilla y León Tipo de entidad: Junta.
Ciudad entidad financiadora: Valladolid, Castilla y León, España.
Fecha de inicio-fin: 05/2018 - 05/2020.
- Nombre del proyecto: Emprendimiento inclusivo: Oportunidad y negocio en el ámbito transfronterizo.
Entidad/es financiadora/s: Fondo Europeo de Desarrollo Regional.
Nombre del programa: Interreg España-Portugal.
Fecha de inicio-fin: 10/2015 - 12/2019.
- Nombre del proyecto: PRISMA: PlatafoRma BigData e IoT para la optimización de los procesos.
Entidad/es financiadora/s: Ministerio de Industria Turismo y Comercio Tipo de entidad: Ministerio.
Ciudad entidad financiadora: Madrid, Comunidad de Madrid, España.
Nombre del programa: Acción Estratégica Economía y Sociedad Digital (AEESD).
Fecha de inicio-fin: 10/2016 - 12/2018.

Capítulo 6

Conclusiones



**VNiVERSiDAD
D SALAMANCA**

CAMPUS DE EXCELENCIA INTERNACIONAL

Conclusiones

En esta Tesis Doctoral se ha presentado una Arquitectura Inteligente Edge Computing para entornos IoT. Las publicaciones que conforman esta memoria por compendio de artículos presentan la arquitectura propuesta con el nombre de Global Edge Computing Architecture (GECA, por sus siglas en inglés).

GECA es una arquitectura por niveles con un enfoque modular que proporciona y gestiona numerosas soluciones seguras, para diferentes entornos IoT y que se ha validado en escenarios de Smart Farming y Smart Energy.

Este Capítulo presenta en la Sección 6.1, las principales conclusiones que se han obtenido durante la realización de la Tesis Doctoral. Finalmente, las líneas futuras de investigación que han surgido durante el proceso de desarrollo de esta memoria se presentan en la Sección 6.2.

6.1 Conclusiones

Edge Computing (EC) representa un paradigma dirigido a resolver algunos desafíos encontrados en entornos IoT, así como: la adquisición, procesamiento y transferencia de datos entre dispositivos masivos e interconectados. Gracias a la aplicación de las técnicas de EC, es posible evitar la sobrecarga de los procesos informáticos, así como las obstrucciones en el flujo de datos y los servicios que se envían o solicitan al Cloud. Esto se hace ejecutando tareas informáticas más cercanas a los dispositivos o fuentes de origen, es decir, directamente en el borde de la red.

En las soluciones EC la gestión, almacenamiento, análisis de datos, así como la toma de decisiones, se realiza en múltiples nodos de borde en la red IoT, en lugar de gestionarse

en el Cloud, mejorando el tiempo de respuesta, la seguridad y la QoS (Quality of Service) de los servicios ejecutados.

Para esta Tesis Doctoral se estableció como hipótesis que mediante el diseño de una arquitectura modular basada en Edge Computing es posible la gestión inteligente y segura de soluciones dirigidas a entornos IoT.

El planteamiento de esta hipótesis permitió definir el objetivo principal y los objetivos específicos, mediante los cuales se ha demostrado la veracidad de la hipótesis de partida. En este contexto, el objetivo principal establecido consiste en la propuesta de una arquitectura modular y escalonada, capaz de gestionar soluciones complejas dirigidas a una amplia gama de entornos de IoT, mediante la incorporación de Edge Computing y Blockchain para ofrecer datos, aplicaciones y servicios más seguros.

La metodología Investigación - Acción fue el marco metodológico en el cual se enmarcó el desarrollo de esta tesis doctoral. Se definieron cinco fases que permitieron alcanzar los objetivos definidos. Una revisión del estado del arte y la aplicación de la técnica del *Systematic Mapping Study* o Estudio de Mapeo Sistemático de la Literatura, dan soporte a esta investigación, al permitir identificar que, las arquitecturas basadas en EC existentes, están orientadas a un entorno específico. En consecuencia, se propone una arquitectura global capaz de abordar todas las necesidades y requerimientos importantes asociados a los entornos IoT heterogéneos.

Para la gestión inteligente y segura de soluciones dirigidas a entornos IoT, planteadas en la hipótesis, se implementó la arquitectura en dos casos de estudio para entornos reales: uno en Smart Farming y otro en Smart Energy, permitiendo su evaluación y validación. Las conclusiones obtenidas permiten afirmar que se ha cumplido con los objetivos definidos (OB1, OB2, OB3, OB4, OB5, OB6 y OB7) y comprobar la veracidad de la hipótesis, las mismas se detallan en el siguiente orden:

- **Objetivos OB1, OB2, OB3 Y OB5**

En referencia a los objetivos: OB1, OB2, OB3 y OB5, en la primera publicación de este compendio de artículos se logró [Sittón-Candanedo et al., 2019a]:

- Una revisión de la literatura en EC, las tendencias y desafíos de esta tecnología disruptiva.

- Se mencionan los requerimientos existentes en los entornos IoT y cómo se robustecen a través de soluciones basadas en EC
- Revisamos las arquitecturas de referencia existentes para un entorno industrial, en las que el EC es el eje principal.

La revisión y el análisis realizado en esta publicación, permitió cumplir con el OB5, al proponer el diseño de una arquitectura modular y escalonada para entornos IoT. La arquitectura propuesta, GECA, consiste en tres capas principales [Sittón-Candanedo et al., 2019a]:

Capa IoT (IoT Layer, por su nombre en inglés): Las tecnologías de Ledger distribuido (DLT), son una de las características más destacadas de GECA, ya que proporcionan un nivel de seguridad, desde la misma capa IoT (la capa base), hasta la arquitectura completa. Esto permite encriptar los datos generados por los sensores y enviarlos a la siguiente capa para su procesamiento.

La capa IoT de GECA es capaz de ingerir datos de distintas redes de sensores heterogéneos, sin importar su estándar (SigFox, Wi-Fi, LoRa, ZigBee y otros). En esta capa se encuentran un conjunto de agentes llamados oracles, que actúan como intermediarios entre los datos procedentes de los dispositivos IoT y la BC. El proceso se inicia cuando los dispositivos IoT envían los datos a los oracles para su verificación. Los oracles en GECA aplican SHA-256 a los datos generados y crean un hash que posteriormente se almacenará en la BC.

Una vez verificados, los datos se envían a BC donde se utilizarán para ejecutar contratos inteligentes. Se utiliza un algoritmo RSA para encriptar los datos que se enviarán a los nodos edge. Con el algoritmo SHA-256, el nodo Edge que recibe los datos genera un hash que puede ser comparado en cualquier momento con el almacenado en la BC para asegurar que nadie ha alterado los datos. Los hashes generados deben ser los mismos que validan que los datos son correctos.

Capa Edge: La Capa Edge, como capa intermedia de la arquitectura esta ubicada cerca de los nodos Edge. Es responsable de la orquestación, monitorización y actualización de la infraestructura tecnológica. Esto incluye el pre-procesamiento de los datos que recibe de la capa IoT para filtrar los datos que serán enviados al Cloud. Para facilitar la implementación de las capas IoT y Edge, los datos son

controlados por micro-computadoras de bajo coste como Raspberry o Orange Pi, creando una arquitectura abierta con puertas de entrada y salida.

Estas puertas facilitan la conexión de los dispositivos a los sensores o la gestión de las redes de dispositivos IoT, desde la capa base hasta que los datos recogidos se transfieren a la capa Edge. Otra característica importante de la capa Edge de GECA es que soporta la ejecución de dispositivos Edge que incorporan técnicas de aprendizaje automático (por ejemplo, TensorFlow Lite) permitiendo que diferentes procesos, como el análisis de datos, se ejecuten en la capa, reduciendo los costes y el volumen de datos transferidos al Cloud.

Capa Business Solution: Las aplicaciones y servicios de Business Intelligence, así como el almacenamiento final de los datos analizados para la toma de decisiones se ejecutan en la capa Business Solution. GECA permite que los procesos de almacenamiento se ejecuten tanto en Cloud públicas (servidores comerciales) como privadas (centros de datos de la organización). Los principales componentes de la capa incluyen: la Analítica, la gestión del Cloud, Autenticación, base de conocimientos y API (Interfaces de Programación de Aplicaciones).

Mediante el componente de Base de Conocimiento, es posible implementar máquinas sociales basadas en Organizaciones Virtuales de Agentes o Sistemas de Soporte a las Decisiones basados en datos de sensores IoT.

Esta capa se complementa con una orquestación de servicios basados en el Cloud, que proporciona los mecanismos necesarios para el aprovisionamiento, monitorización y actualización de los recursos utilizados de forma escalable y elástica. El componente de Autenticación proporciona dos formas de autenticar nuevos usuarios/nodos: utilizando sistemas no permitidos (habitual en entornos públicos como las Ciudades Inteligentes) o BC permitidas (más habitual en entornos privados como la Industria 4.0 o la Agricultura Inteligente).

En este segundo modo de autenticación, la entidad central de autorización en el Cloud se comporta como el nodo inicial y el administrador primario de la BC permitida. El nodo primario administrador mina el primer bloque en el que establece las reglas de trabajo. Sólo los nodos administradores existentes pueden asignar el papel de administrador a un nuevo nodo, y sólo los nodos administradores pueden permitir a los nodos IoT para acceder, lo que se resuelve mediante un algoritmo de consenso.

- **Objetivo OB4**

Para el cumplimiento del Objetivo 4 (OB4) se desarrolló un estudio de mapeo sistemático de la literatura para identificar si existen soluciones Edge Computing aplicadas a Smart Energy y qué líneas futuras de investigación se pueden definir en este contexto. Los resultados obtenidos en la publicación Sittón-Candanedo et al. [2020] han permitido:

- Al finalizar la revisión de 80 artículos en el estudio de mapeo sistemático de la literatura, se concluye que aún es muy reducido el número investigaciones que aporten soluciones basadas en el diseño y la implementación de marcos y plataformas unificadas, donde se integren EC-IoT para un contexto Smart Energy.
- Los escenarios Smart Energy son complejos y requieren soluciones donde los usuarios puedan reducir el consumo y el coste de la energía. Estas propuestas deben ser capaces de mejorar la eficiencia operativa, mediante la gestión de las infraestructuras y la toma de decisiones basadas en el análisis de datos y el acceso a la información en tiempo real.
- Implementar EC en escenarios Smart Energy, permite la interconexión de los dispositivos y la red doméstica con Internet, contribuyendo significativamente a mejorar la eficiencia de las tareas y procesos generales. Además, el consumo de energía se reduce significativamente.

- **Objetivos OB6 y OB7**

El despliegue de la arquitectura propuesta en los dos casos de estudio descritos en esta memoria de tesis doctoral y un tercer caso publicado [Alonso et al., 2019], utilizando tecnologías asociadas que se integren con el EC y el IoT de forma sencilla y a bajo coste; ha permitido cumplir con los Objetivos 6 y 7 (OB6 Y OB7) de esta Tesis Doctoral. Las conclusiones obtenidas con la implementación de la arquitectura son las siguientes:

- En el primer caso de estudio, presentado en Sittón-Candanedo et al. [2019a] se demostró que es posible reducir los costes asociados a la transferencia de datos entre el IoT y el Cloud, desplegando GECA en una plataforma agroindustrial orientada a la monitorización, trazabilidad y optimización de

- recursos y procesos realizados es una granja. Además, la introducción de los nodos Edge mejora la fiabilidad de las comunicaciones con el Cloud mediante la reducción del número de valores perdidos en la base de datos en el Cloud. Los nodos Edge de GECA, filtran y preprocesan los datos procedentes de los dispositivos de la capa IoT. Además, se encargan de descartar los valores que se han repetido debido a la retransmisión de tramas desde las subcapas físicas (ZigBee, Wi-Fi) a la capa IoT. También pueden realizar promedios y análisis de datos de regresión que tienen lugar en el mismo Edge. En ambos casos, se reduce la cantidad de datos, disminuyendo los costes asociados al tráfico de datos, la necesidad de cálculo y almacenamiento en el Cloud.
- El segundo caso de estudio ha demostrado los beneficios de aplicar las reglas de diseño y la funcionalidades de GECA al marco de CAFCLA, especialmente en entornos IoT y Computación Social para una mayor eficiencia energética. Con el despliegue de la arquitectura, se ha mejorado notablemente un sistema de eficiencia energética existente, reduciendo el tráfico de datos que entra Cloud, especialmente disminuyendo la cantidad de información que debe ser transmitida desde los dispositivos IoT al Cloud.
 - Los resultados obtenidos en ambos casos de estudio han demostrado las ventajas de la arquitectura desarrollada en los siguientes aspectos: análisis en tiempo real de los datos a nivel de dispositivos locales y nodos de borde; menores costes operativos y de gestión debido a la reducción del tráfico y la transferencia de datos a la nube; mejor rendimiento de las aplicaciones; mayor nivel de seguridad mediante la incorporación de tecnologías BC en las capas de la arquitectura.
 - En base a las conclusiones obtenidas y descritas en este apartado, se demuestra que existe aún un amplio margen de mejoras para los desafíos asociados a los entornos IoT con EC y BC.

6.2 Trabajo futuro

Durante el desarrollo de la tesis y una vez alcanzados los objetivos inicialmente propuestos, han surgido nuevas líneas de investigación que generan interés como trabajo futuro. En este apartado se presentan algunas de ellas:

- Blockchain: la arquitectura propuesta incluye Blockchain y encriptación de datos en sus tres niveles, en este sentido como trabajo futuro, se propone evaluar la implementación de las placas Crypto-IoT en los dispositivos IoT y cómo se incrementaría la eficiencia del sistema en términos de seguridad, trazabilidad e integridad de los datos.
- CAFCLA y consumo energético: una importante línea de investigación se desprende de la integración de CAFCLA y GECA en relación con la implementación de placas Crypto-IoT con dispositivos IoT de sensibilización y localización, para mejorar el sistema en términos de seguridad, trazabilidad e integridad de los datos.
- A nivel de la arquitectura propuesta: para fortalecer GECA, se plantea su futura implementación en otros entornos IoT con un gran volumen de datos tales como: ciudades inteligentes, sistemas de sanidad, logística y transporte marítimo, entre otros. Su despliegue en estos escenarios permitirá la ejecución de nuevos experimentos para evaluar no sólo la cantidad de datos que se transfieren al Cloud, sino también el tiempo de cálculo y el coste de ejecución de las aplicaciones en el Cloud en las diferentes situaciones: antes de incorporar la capa Edge y después de implementar GECA.

Finalmente, continuamos investigando en mejoras del proceso de integración Edge-IoT, porque son paradigmas muy fuertes actualmente, un ejemplo del trabajo que se está realizando es la aplicación de Edge Computing y Algoritmos de control de fallas en Edificios Inteligentes con dispositivos IoT.

Bibliografía

- Ai, Y., Peng, M., and Zhang, K. (2018). Edge computing technologies for Internet of Things: a primer. *Digital Communications and Networks*, 4(2):77–86.
- Alamgir Hossain, S. K., Anisur Rahman, M., and Hossain, M. A. (2018). Edge computing framework for enabling situation awareness in IoT based smart city. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 122:226–237.
- Ali, A., Shah, G. A., Farooq, M. O., and Ghani, U. (2017). Technologies and challenges in developing Machine-to-Machine applications: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 83:124–139.
- Alonso, R. S., Sittón-Candanedo, I., García, Ó., Prieto, J., and Rodríguez-González, S. (2019). An intelligent edge-iot platform for monitoring livestock and crops in a dairy farming scenario. *Ad Hoc Networks*, page 102047.
- Antonopoulos, A. M. (2017.). *Mastering Bitcoin: programming the open blockchain.* ” O’Reilly Media, Inc.”, second edition.
- Arshad, R., Zahoor, S., Shah, M. A., Wahid, A., and Yu, H. (2017). Green iot: An investigation on energy saving practices for 2020 and beyond. *IEEE Access*, 5:15667–15681.
- Ashton, K. et al. (2009). That ‘internet of things’ thing. *RFID journal*, 22(7):97–114.
- Barbierato, L., Estebansari, A., Pons, E., Pau, M., Salassa, F., Ghirardi, M., and Patti, E. (2018). A distributed iot infrastructure to test and deploy real-time demand response in smart grids. *IEEE Internet of Things Journal*, 6(1):1136–1146.
- Baskerville, R. L., by Richard Baskerville, and Baskerville, R. (1999). Investigating Information Systems with Action Research. *Communications of the Association for Information Systems*, 2.

- BlockchainHub (2019.). What's a blockchain oracle?
- BOSCH (2018). Edge computing for IoT.
- Brogi, A. and Forti, S. (2017.). QoS-aware deployment of IoT applications through the fog. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(5):1–8.
- Capra, M., Peloso, R., Masera, G., Roch, M. R., and Martina, M. (2019). Edge computing: A survey on the hardware requirements in the Internet of Things world. *Future Internet*, 11(4):1–25.
- Castri, R., Wemyss, D., Cellina, F., De Luca, V., Frick, V., Lobsiger-Kaegi, E., Galbani Bianchi, P., and Carabias, V. (2016). Triggering electricity-saving through smart meters: Play, learn and interact using gamification and social comparison. In *Proceedings of the 1st ever Energy-Feedback Symposium - Teddinet 1st Energy-Feedback Symposium "Feedback in energy demand reduction: Examining evidence and exploring opportunities"*.
- Chamoso, P., González-Briones, A., Rodríguez, S., and Corchado, J. M. (2018). Tendencies of Technologies and Platforms in Smart Cities: A State-of-the-Art Review. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2018.
- Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., and Yin, B. (2017). Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. *IEEE Access*, 6:6505–6519.
- Cho, K., Park, G., Cho, W., Seo, J., and Han, K. (2016). Performance analysis of device discovery of Bluetooth Low Energy (BLE) networks. *Computer Communications*, 81:72–85.
- Cobo, M., Jürgens, B., Herrero-Solana, V., Martínez, M., and Herrera-Viedma, E. (2018). Industry 4.0: a perspective based on bibliometric analysis. *Procedia Computer Science*, 139:364–371.
- Csoknyai, T., Legardeur, J., Akle, A. A., and Horváth, M. (2019). Analysis of energy consumption profiles in residential buildings and impact assessment of a serious game on occupants' behavior. *Energy and Buildings*.
- Damianou, A., Angelopoulos, C. M., and Katos, V. (2019). An architecture for blockchain over edge-enabled IoT for smart circular cities. In *Proceedings - 15th*

- Annual International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems, DCOSS 2019*, pages 465–472.
- Das, A., Patterson, S., and Wittie, M. (2018). Edgebench: Benchmarking edge computing platforms. In *2018 IEEE/ACM International Conference on Utility and Cloud Computing Companion (UCC Companion)*, pages 175–180. IEEE.
- De la Prieta, F. and Corchado, J. M. (2016). Cloud computing and multiagent systems, a promising relationship. In *Intelligent Agents in Data-intensive Computing*, pages 143–161. Springer.
- Delzendeh, E., Wu, S., Lee, A., and Zhou, Y. (2017). The impact of occupants' behaviours on building energy analysis: A research review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80:1061–1071.
- Dorri, A., Kanhere, S. S., and Jurdak, R. (2017a). Towards an optimized blockchain for iot. In *Proceedings of the Second International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation*, pages 173–178. ACM.
- Dorri, A., Steger, M., Kanhere, S. S., and Jurdak, R. (2017b). Blockchain: A distributed solution to automotive security and privacy. *IEEE Communications Magazine*, 55(12):119–125.
- Eden, C. and Ackermann, F. (2018). Theory into practice, practice to theory: Action research in method development. *European Journal of Operational Research*, 271(3):1145–1155.
- Edge Computing Consortium and Alliance of Industrial Internet (2017.). Edge Computing Reference Architecture 2.0. Technical report, Edge Computing Consortium.
- Ejaz, W., Naeem, M., Shahid, A., Anpalagan, A., and Jo, M. (2017). Efficient energy management for the internet of things in smart cities. *IEEE Communications Magazine*, 55(1):84–91.
- FAO (2019). La Agricultura Climáticamente Inteligente. Technical report, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO).
- FAR-EDGE, P. (2017.). FAR-EDGE Project H2020.

- Fleming, K., Waweru, P., Wambua, M., Ondula, E., and Samuel, L. (2016). Toward quantified small-scale farms in africa. *IEEE Internet Computing*, 20(3):63–67.
- García, Ó., Alonso, R. S., Prieto, J., and Corchado, J. M. (2017). Energy efficiency in public buildings through context-aware social computing. *Sensors (Switzerland)*, 17(4):22.
- García, Ó., Alonso, R. S., Prieto, J., and Corchado, J. M. (2017a). Energy Efficiency in Public Buildings through Context-Aware Social Computing. *Sensors*, 17(4):826.
- García, Ó., Alonso, R. S., Tapia, D. I., and Corchado, J. M. (2012). Cafcla, a framework to ease design, development and deployment ami-based collaborative learning applications. In *7th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI 2012)*, pages 1–6.
- García, Ó., Prieto, J., Alonso, R., and Corchado, J. (2017b). A framework to improve energy efficient behaviour at home through activity and context monitoring. *Sensors*, 17(8):1749.
- Garcia, P., Montresor, A., Epema, D., Datta, A., Higashino, T., Iamnitchi, A., Barcellos, M., Felber, P., and Riviere, E. (2015.). Edge-centric computing: Vision and challenges. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 45(5):37–42.
- García, O., Chamoso, P., Prieto, J., Rodríguez, S., and de la Prieta, F. (2017). A Serious Game to Reduce Consumption in Smart Buildings. In Bajo, J., Vale, Z., Hallenborg, K., Rocha, A. P., Mathieu, P., Pawlewski, P., Del Val, E., Novais, P., Lopes, F., Duque Méndez, N. D., Julián, V., and Holmgren, J., editors, *Highlights of Practical Applications of Cyber-Physical Multi-Agent Systems*, Communications in Computer and Information Science, pages 481–493. Springer International Publishing.
- Gatteschi, V., Lamberti, F., Demartini, C., Pranteda, C., and Santamaría, V. (2018). To blockchain or not to blockchain: That is the question. *IT Professional*, 20(2):62–74.
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0*. Apress.
- González-Briones, A., Chamoso, P., Yoe, H., and Corchado, J. M. (2018). Greenvmas: virtual organization based platform for heating greenhouses using waste energy from power plants. *Sensors*, 18(3):861.

- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., and Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, 29(7):1645–1660.
- Ha, K., Chen, Z., Hu, W., Richter, W., Pillai, P., and Satyanarayanan, M. (2014.). Towards wearable cognitive assistance. In *Proceedings of the 12th annual international conference on Mobile systems, applications, and services - MobiSys '14*, pages 68–81.
- Hassan, N., Gillani, S., Ahmed, E., Yaqoob, I., and Imran, M. (2018.). The role of edge computing in Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 2018, no 99, p. 1-6, 99:1–6.
- Heinz, M. (2014). Systematic mapping studies. *Mainz: Universität Koblenz-Landau*.
- Hermann, M., Pentek, T., Otto, B., and Pentek, T. (2015). Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review.
- INTEL-SAP (2018.). IoT Joint Reference Architecture from Intel and SAP. Technical report, INTEL-SAP.
- Isaja, M., Soldatos, J., and Gezer, V. (2017). Combining Edge Computing and Blockchains for Flexibility and Performance in Industrial Automation. In *International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies (UBICOMM)*, pages 159–164.
- ISO/IEC/ IEEE 42010 (2011). Systems and software engineering — Architecture description. Technical report, ISO/IEC/ IEEE.
- Jayaraman, P., Yavari, A., Georgakopoulos, D., Morshed, A., and Zaslavsky, A. (2016). Internet of things platform for smart farming: Experiences and lessons learnt. *Sensors*, 16(11):1884.
- Jing, Q., Vasilakos, A. V., Wan, J., Lu, J., and Qiu, D. (2014.). Security of the Internet of Things: perspectives and challenges. *Wireless Networks*, 20(8):2481–2501.
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., and Wahlster, W. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion.

- Kagermann, H., Lukas, W.-D., and Wahlster, W. (2011). Industrie 4.0: Mit dem internet der dinge auf dem weg zur 4. industriellen revolution. *VDI nachrichten*, 13(1).
- Keele, S. et al. (2007). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. Technical report, Technical report, Ver. 2.3 EBSE Technical Report. EBSE.
- Kitchenham, B. A., Budgen, D., and Pearl Brereton, O. (2011). Using mapping studies as the basis for further research - A participant-observer case study. *Information and Software Technology*, 53(6):638–651.
- Larkin, R. D., Lopez Jr, J., Butts, J. W., and Grimaila, M. R. (2014). Evaluation of security solutions in the scada environment. *ACM SIGMIS Database: the DATABASE for Advances in Information Systems*, 45(1):38–53.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., and Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business and Information Systems Engineering*, 6(4):239–242.
- Lee, J., Bagheri, B., and Kao, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3:18–23.
- Liang, G., Weller, S. R., Luo, F., Zhao, J., and Dong, Z. Y. (2018). Distributed Blockchain-Based Data Protection Framework for Modern Power Systems against Cyber Attacks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3053(c):1–12.
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. d. F. R., and Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 - a systematic literature review and research agenda proposal.
- Lin, J., Yu, W., Zhang, N., Yang, X., Zhang, H., and Zhao, W. (2017). A survey on internet of things: Architecture, enabling technologies, security and privacy, and applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(5):1125–1142.
- Linthicum, D. (2018.). Edge computing vs. fog computing: definitions and enterprise uses.
- Liu, B., Yu, X. L., Chen, S., Xu, X., and Zhu, L. (2017). Blockchain based data integrity service framework for iot data. In *2017 IEEE International Conference on Web Services (ICWS)*, pages 468–475. IEEE.

- LoRa-Alliance (2015). A technical overview of LoRa [®]and LoRaWAN [™] What is it? Technical report, LoRa-Alliance.
- Minoli, D., Sohraby, K., and Occhiogrosso, B. (2017). Iot considerations, requirements, and architectures for smart buildings—energy optimization and next-generation building management systems. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(1):269–283.
- Moghaddam, M., Cadavid, M. N., Kenley, C. R., and Deshmukh, A. V. (2018). Reference architectures for smart manufacturing: A critical review. *Journal of Manufacturing Systems*, 49:215–225.
- Montalvillo, L. and Díaz, O. (2016). Requirement-driven evolution in software product lines: A systematic mapping study. *Journal of Systems and Software*, 122:110–143.
- Montori, F., Bedogni, L., Di Felice, M., and Bononi, L. (2018). Machine-to-machine wireless communication technologies for the Internet of Things: Taxonomy, comparison and open issues. *Pervasive and Mobile Computing*, 50:56–81.
- Morán, A. J., Profaizer, P., Zapater, M. H., Valdavida, M. A., and Bribián, I. Z. (2016). Information and communications technologies (icts) for energy efficiency in buildings: Review and analysis of results from eu pilot projects. *Energy and buildings*, 127:128–137.
- Muhuri, P. K., Shukla, A. K., and Abraham, A. (2019). Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 78:218–235.
- Nakamoto, S. (2009). Bitcoin open source implementation of P2P currency. *P2P Foundation*, 18.
- National Institute of Standards and Technology, Department of Commerce, United State of America (2015.). Secure Hash Standard (SHS). Technical report, Department of Commerce, United States of America.
- Odun-Ayo, I., Goddy-Worlu, R., Geteloma, V., and Grant, E. (2018). A systematic mapping study of cloud, fog, and edge/mobile devices management, hierarchy models and business models. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 4(2):91–101.

- Patil, A. S., Tama, B. A., Park, Y., and Rhee, K.-H. (2017). A framework for blockchain based secure smart green house farming. In *Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing*, pages 1162–1167. Springer.
- Patil, K. A. and Kale, N. R. (2016). A model for smart agriculture using iot. In *2016 International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*, pages 543–545.
- Petersen, K., Feldt, R., Mujtaba, S., and Mattsson, M. (2008). Systematic Mapping Studies in Software Engineering. *12Th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, 17:10.
- Petersen, K., Vakkalanka, S., and Kuzniarz, L. (2015). Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update. In *Information and Software Technology*, volume 64, pages 1–18.
- Pilkington, M. (2016). *11 Blockchain technology: principles and applications*. Edward Elgar Publishing.
- Pinzon-Trejos, C. I. (2010). *DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA Y AUTOMÁTICA*. PhD thesis, Universidad de Salamanca.
- Portilla, J., Mujica, G., Lee, J. S., and Riesgo, T. (2019). The Extreme Edge at the Bottom of the Internet of Things: A Review. *IEEE Sensors Journal*, 19(9):3179–3190.
- Postcapes (2019.). IoT Standards & Protocols Guide — 2019 Comparisons on Network, Wireless Comms, Security, Industrial.
- Querol, E., Romero, J. A., Estruch, A. M., and Romero, F. (2014). Norma Iec-61499 Para El Control Distribuido. Aplicación Al Cnc. *Actas de las XXXV Jornadas de Automática*, page 8.
- Quintana, Y. and García, Ó. (2017). *Serious Games for Health: Mejora tu salud jugando*. Editorial GEDISA.
- Ray, P. P. (2018). A survey on Internet of Things architectures.
- Razzaque, M., Milojevic-Jevric, M., Palade, A., and Clarke, S. (2016). Middleware for Internet of Things: a Survey. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(1):70–95.

- Reeves, B., Cummings, J. J., Scarborough, J. K., and Yeykelis, L. (2015). Increasing energy efficiency with entertainment media: An experimental and field test of the influence of a social game on performance of energy behaviors. *Environment and Behavior*, 47(1):102–115.
- Reyna, A., Martín, C., Chen, J., Soler, E., and Díaz, M. (2018). On blockchain and its integration with IoT. Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 88:173–190.
- Risteska Stojkoska, B. L. and Trivodaliev, K. V. (2017). A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions. *Journal of Cleaner Production*, 140:1454–1464.
- Rivest, R. L., Shamir, A., and Adleman, L. (1977). A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems. *M.I.T. Laboratory for Computer Science Technical Memo*, 82:120–126.
- Samaniego, M. and Deters, R. (2016). Hosting virtual IoT resources on edge-hosts with blockchain. *Proceedings - 2016, 16th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, CIT.*, pages 116–119.
- Samaniego, M. and Deters, R. (2017). Virtual resources & blockchain for configuration management in iot. *Journal of Ubiquitous Systems & Pervasive Networks*, 9(2):01–13.
- Satyanarayanan, M. (2017). The Emergence of Edge Computing. *Computer*, 50(1):30–39.
- Sharma, P. K., Singh, S., Jeong, Y.-S., and Park, J. H. (2017). Distblocknet: A distributed blockchains-based secure sdn architecture for iot networks. *IEEE Communications Magazine*, 55(9):78–85.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., and Xu, L. (2016). Edge Computing: Vision and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5):637–646.
- Shi, W. and Schahram, D. (2016). The promise of Edge Computing. *Computer*, 49(0018):78–81.
- Sittón-Candanedo, I., Alonso, R. S., Corchado, J. M., Rodríguez-González, S., and Casado-Vara, R. (2019a). A review of edge computing reference architectures and a new global edge proposal. *Future Generation Computer Systems*, 99:278–294.

- Sittón-Candanedo, I., Alonso, R. S., García, Ó., Gil, A. B., and Rodríguez-González, S. (2020). A review on edge computing in smart energy by means of a systematic mapping study. *Electronics*, 9(1):48.
- Sittón-Candanedo, I., Alonso, R. S., García, Ó., Muñoz, L., and Rodríguez-González, S. (2019b). Edge computing, iot and social computing in smart energy scenarios. *Sensors*, 19(15):3353.
- Stallings, W., Brown, L., Bauer, M. D., and Bhattacharjee, A. K. (2012). *Computer security: principles and practice*. Pearson Education.
- Stanciu, A. (2017). Blockchain Based Distributed Control System for Edge Computing. *Proceedings - 2017, 21st International Conference on Control Systems and Computer, CSCS 2017*, pages 667–671.
- Taleb, T., Samdanis, K., Mada, B., Flinck, H., Dutta, S., and Sabella, D. (2017). On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(3).
- Tang, J. (2018). *Intelligent Mobile Projects with TensorFlow: Build 10+ Artificial Intelligence Apps Using TensorFlow Mobile and Lite for IOS, Android, and Raspberry Pi*. Packt Publishing Ltd.
- Tseng, M., Canaran, T. E., and Canaran, L. (2018.). Introduction to Edge Computing in IIoT. Technical report, Industrial Internet Consortium.
- Tüzün, E., Tekinerdogan, B., Macit, Y., and İnce, K. (2019). Adopting integrated application lifecycle management within a large-scale software company: An action research approach. *Journal of Systems and Software*, 149:63–82.
- Van Heesch, U., Avgeriou, P., and Hilliard, R. (2011). A documentation framework for architecture decisions. *The Journal of Systems & Software*, 85:795–820.
- Wang, P., Gao, R. X., and Fan, Z. (2015). Cloud computing for cloud manufacturing: benefits and limitations. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137(4):040901.
- Wells, L. J., Camelio, J. A., Williams, C. B., and White, J. (2014). Cyber-physical security challenges in manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 2(2):74–77.

- Wu, C., Toosi, A. N., Buyya, R., and Ramamohanarao, K. (2018). Hedonic pricing of cloud computing services. *IEEE Transactions on Cloud Computing*.
- Yaghmaee, M. H., Leon-Garcia, A., and Moghaddassian, M. (2017). On the performance of distributed and cloud-based demand response in smart grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(5):5403–5417.
- Yang, R., Yu, F. R., Si, P., Yang, Z., and Zhang, Y. (2019). Integrated Blockchain and Edge Computing Systems: A Survey, Some Research Issues and Challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 21(2):1508–1532.
- Yassine, A., Singh, S., Hossain, M. S., and Muhammad, G. (2019). Iot big data analytics for smart homes with fog and cloud computing. *Future Generation Computer Systems*, 91:563–573.
- Zeng, F. and Xie, Z.-y. (2018). Coordinated control system of multi-level belt conveyors for promotion the energy efficiency based on iot-technology. In *2018 5th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE)*, pages 675–679. IEEE.
- Zhang, J., Chen, B., Zhao, Y., Cheng, X., and Hu, F. (2018). Data Security and Privacy-Preserving in Edge Computing Paradigm: Survey and Open Issues. *IEEE Access*, 6(March):18209–18237.
- Zhou, K., Liu, T., and Zhou, L. (2016). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2015*, pages 2147–2152.
- Zhou, S. and Zhang, L. (2018). Smart home electricity demand forecasting system based on edge computing. In *2018 IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, pages 164–167. IEEE.