



UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Programa de doctorado:

Computación avanzada, energía y plasmas

Título de la tesis

**Realidad Aumentada para mejorar la
eficiencia energética del uso final en el
marco de las Smart Grids**

MEMORIA DE TESIS DOCTORAL

presentada por

Manuel Alonso Rosa

dirigida por:

Dr. Antonio Moreno Muñoz
Dra. Aurora del Rocío Gil de Castro

Fecha de depósito tesis en el Idep: 5 de marzo de 2021

Córdoba, 5 de marzo 2021

TITULO: *Realidad Aumentada para mejorar la eficiencia energética del uso final en el marco de las Smart Grids*

AUTOR: *Manuel Alonso Rosa*

© Edita: UCOPress. 2021
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

<https://www.uco.es/ucopress/index.php/es/>
ucopress@uco.es

Informe directores



TÍTULO DE LA TESIS: Realidad Aumentada para mejorar la eficiencia energética del uso final, en el marco de las Smart Grids

DOCTORANDO/A: Manuel Alonso Rosa

El doctorando Manuel Alonso Rosa ha realizado satisfactoriamente y en los plazos previstos el trabajo de investigación que se presenta en esta memoria de Tesis: **Realidad Aumentada para mejorar la eficiencia energética del uso final en el marco de las Smart Grids.**

En ella, el doctorando ha realizado un análisis extensivo y pormenorizado tanto hardware como software, contemplando las numerosas y nuevas alternativas que surgen diariamente en relación con el ámbito de la realidad aumentada.

Ha realizado una amplia labor experimental hasta desarrollar el prototipo, con pruebas en laboratorio a través de la programación de microcontroladores y su comunicación con sensores de medida; así como numerosos ensayos en los que ha comprobado su correcto funcionamiento realizando medidas con una amplia diversidad de cargas domésticas. Por otro lado, respecto a la realidad aumentada, ha abierto un campo de investigación, alejado del tradicional uso de esta tecnología en videojuegos o marketing, para servir de base en la visualización en tiempo real de variables eléctricas, con la perspectiva de eficiencia y ahorro energéticos.

En definitiva, esta tesis supone un hito importante ya que ha contribuido al conocimiento general de este ámbito de la monitorización y visualización de datos de consumo.

Durante el desarrollo de esta tesis se han publicado varios artículos en revistas científicas, así como ponencias en congresos entre los que cabe destacar:

- M. Alonso-Rosa; A. Gil-de-Castro; A. Moreno-Munoz; J. Garrido-Zafra; E. Gutierrez-Ballesteros; E. Cañete-Carmona. An IoT based mobile augmented reality application for energy visualization in buildings environments. Applied Sciences, 2020
- M. Alonso-Rosa; A. Gil-de-Castro; R. Medina-Gracia; A. Moreno-Munoz; E. Cañete-Carmona. Novel internet of things platform for in-building power quality submetering. Applied Sciences (Switzerland). 8 - 8, 2018

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 05 de abril de 2021

Firma del/de los director/es

GIL DE CASTRO
AURORA DEL
ROCIO -
30981795J

Firmado digitalmente por
GIL DE CASTRO AURORA
DEL ROCIO - 30981795J
Fecha: 2021.04.05
02:34:54 +02'00'

Fdo.: Aurora R. Gil de Castro

MORENO MUÑOZ
ANTONIO -
30506571S

Firmado digitalmente por MORENO
MUÑOZ ANTONIO - 30506571S
Nombre de reconocimiento (DN): c=ES,
serialNumber=DCE:30506571S,
givenName=ANTONIO, sn=MORENO
MUÑOZ, cn=MORENO MUÑOZ ANTONIO -
30506571S
Fecha: 2021.04.05 09:10:22 +02'00'

Fdo.: Antonio Moreno Muñoz

...

Abstract

As the number of facilities adopting a Building Management System under the Industry 4.0 paradigm increases, it is critical to ensure the good health of their operations. Business continuity and uninterrupted operations are key requirements for any building, for which Power Quality and Supply Reliability sophisticated monitoring can play an extremely important role. Submetering, as opposed to point of common coupling metering, implies measuring power consumption for individual units or appliances in a building complex. An Internet of Things device network, which brings ubiquitous power quality submetering inside the entire facility, would be extremely beneficial for the management of the building thus ensuring seamless business operations.

This work describes a novel low-cost Internet of Things sensor for measuring and analyzing power quality at the input of any individual Alternating Current (AC) appliance, providing an early detection and analysis system which controls those critical variables inside the facility and leads to anticipate faults with early-stage alerts. Moreover, the recorded power quality parameters that are processed in the Cloud can help to reduce energy consumption, as power quality disturbances can be automatically analyzed and even compared to standard values. The proposed Internet of Things sensor will help users to detect most power quality steady-state and events disturbances, while monitoring the energy consumption. This Internet of Things Power Quality sensor is built around a flexible microcontroller, which manages an energy metering Integrated Circuit (IC) through Serial Peripheral Interface (SPI), increasing its original capabilities by including new sophisticated software functionality. Additionally, it wirelessly communicates with a cloud-based Internet of Things Platform to allow the storage and supervision of the different power quality events for the entire facility. An example of the access to the data is also included.

Augmented reality (AR) improves how we acquire, understand, and display information without distracting us from the real world. These technologies can be used in different applications and industries as they can incorporate domain-specific visualizations on a real-world screen. Mobile augmented reality (MAR) essentially consists of superimposing virtual elements over real objects on the screen of mobile devices (Smartphones, tablets and PDAs) to give added value and enrich the interaction with reality. In numerous plants, it is being used for maintenance and repair tasks, as well as training. The Internet of Things (IoT) is increasingly pervading every aspect of our lives, including the power infrastructure of our buildings. IoT-enabled devices offer many connectivity options for helping supervise all-important energy assets. Aggregating data to cloud-based platforms enables operations teams to have on-time information access to make fast decisions and have a fast response regarding energy use, while maintenance teams keep on top of the appliance power quality and reliability needed by using MAR. This thesis presents a novel approximation for visualizing appliance-related power quality to enhance awareness about the consumed electricity. A combined solution of MAR with IoT technologies is employed. Engineered solutions' hands-free way to get data about surrounding appliances reduces the complexity, saves energy, and speeds up the operations. An innovative way to measure things at the right time leads to a competitive advantage.

Resumen

A medida que aumenta el número de instalaciones que adoptan un sistema de gestión de edificios bajo el paradigma de la Industria 4.0, es fundamental asegurar la buena salud de sus operaciones. La continuidad de las actividades y las operaciones ininterrumpidas son requisitos clave para cualquier edificio, para lo cual la supervisión sofisticada de la calidad y la fiabilidad del suministro de energía puede desempeñar un papel extremadamente importante. La submedición, a diferencia de la medición en el punto de conexión común, implica la medición del consumo de energía para unidades individuales o electrodomésticos en un complejo de edificios.

El Internet de las cosas (IoT) está difundiéndose cada vez más por todos los aspectos de la vida, incluyendo la infraestructura energética de nuestros edificios. Los dispositivos IoT ofrecen muchas opciones de conectividad para ayudar a supervisar todos los activos energéticos importantes. Una red de dispositivos de Internet de las cosas, que permita la submedición de la calidad de la energía eléctrica dentro de toda la instalación, sería sumamente beneficiosa para la gestión del edificio, garantizando así la continuidad de las operaciones comerciales.

Por tanto, en esta tesis, se describe un novedoso sensor de bajo costo, con tecnología IoT, para medir y analizar la calidad de la energía eléctrica a la entrada de cualquier electrodoméstico individual de corriente alterna (CA), que proporciona un sistema de detección y análisis tempranos que controla esas variables críticas dentro de las instalaciones y permite anticiparse a las fallas con alertas tempranas. Además, los parámetros de calidad de la energía registrados que se procesan en la Nube pueden ayudar a reducir el consumo de energía, ya que las perturbaciones de la calidad de la energía pueden analizarse automáticamente e incluso compararse con los valores estándar.

Este sensor IoT propuesto ayudará a los usuarios a detectar la mayoría de las perturbaciones de régimen permanente de la calidad de la energía, así como los eventos, al tiempo que monitoriza el consumo de energía.

Este sensor de calidad de energía de IoT está construido sobre la base de un microcontrolador que gestiona un Circuito Integrado (CI) de medición de energía a través de una Interfaz Periférica en Serie (SPI), aumentando sus capacidades originales mediante la inclusión de nuevas y sofisticadas funcionalidades de software. Además, se comunica de forma inalámbrica con una plataforma IoT en la Nube para permitir el almacenamiento y la supervisión de los diferentes eventos de calidad de la energía para toda la instalación.

La realidad aumentada (AR) mejora la forma en que adquirimos, comprendemos y mostramos la información del mundo real sin distracciones. Estas tecnologías pueden ser utilizadas en diferentes aplicaciones e industrias ya que pueden incorporar visualizaciones específicas en una pantalla del mundo real. La realidad aumentada móvil (MAR) consiste esencialmente en superponer elementos virtuales sobre objetos reales en la pantalla, para dar un valor añadido y enriquecer la interacción con la realidad.

La visualización de datos a través de AR y en plataformas basadas en la Nube permite a los equipos de operaciones tener acceso a la información en tiempo casi real para tomar decisiones rápidas y tener una respuesta rápida con respecto al uso de la energía, mientras que

los equipos de mantenimiento se mantienen al tanto de la calidad de la energía de los aparatos y la fiabilidad necesaria mediante el uso de la IoT.

En este documento se presenta una novedosa aproximación para visualizar la calidad de la energía eléctrica consumida por un electrodoméstico, con el fin de aumentar la conciencia sobre el ahorro energético, para ello se emplea una solución combinada de MAR con tecnologías de IoT.

Publicaciones

- [An IoT Based Mobile Augmented Reality Application for Energy Visualization in Buildings Environments](https://www.mdpi.com/2076-3417/10/2/600) (<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/2/600>) Alonso-Rosa, M.; Gil-de-Castro, A.; Moreno-Munoz, A.; Garrido-Zafra, J.; Gutierrez-Ballesteros, E.; Cañete-Carmona, E. An IoT Based Mobile Augmented Reality Application for Energy Visualization in Buildings Environments. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 600.
- [Novel Internet of Things Platform for In-Building Power Quality Submetering](https://www.mdpi.com/2076-3417/8/8/1320) (<https://www.mdpi.com/2076-3417/8/8/1320>) Alonso-Rosa, M.; Gil-de-Castro, A.; Medina-Gracia, R.; Moreno-Munoz, A.; Cañete-Carmona, E. Novel Internet of Things Platform for In-Building Power Quality Submetering. *Appl. Sci.* **2018**, *8*, 1320.
- [An IoT Low-Cost Voltage Sag Detector](https://ieeexplore.ieee.org/document/8472001) (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8472001>) Ricardo Medina-Gracia; Aurora Gil-de-Castro; Manuel Alonso-Rosa; Eduardo Canete-Carmona; Antonio Moreno-Munoz; David Matabuena 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN) Year: 2018 | Conference Paper | Publisher: IEEE

Agradecimientos

Quiero agradecer su apoyo y confianza a mis directores de tesis, Antonio Moreno Muñoz y Aurora Gil de Castro. Ellos han ido tirando de mí a lo largo de este largo camino. El trabajo que han desarrollado en Power Quality, ha marcado mi tesis. La seriedad, trabajo, esfuerzo y tesón de Aurora, me ha servido de inspiración; Sin ellos, probablemente, esta tesis no sería hoy una realidad.

A mi mujer y a mi hija, por su apoyo inquebrantable.

A mis padres por su perseverancia y dedicación.

Abreviaturas

AC	Alternating Current	Corriente alterna
ADC	analog / digital converter	convertidor analogico/digital
API	Application Programming Interface	Interfaz de Programación de Aplicaciones
AR	Augmented Reality	Realidad Aumentada
ARP	Address Resolution Protocol	Protocolo de resolución de direcciones
CA	Alternating current	Corriente Alterna
CI	Integrated circuit	Circuito Integrado
CT	current transformer	transformador de corriente
DLC	Direct Load Control	Control Directo de Carga
DSP	digital signal processor	Procesador de señales digitales
EMS	Energy Management System	Sistema de Gestión Energética en los Edificios
IDAE	Instituto para la diversificación y el ahorro de la energía	
IoT	Internet of things	Internet de las Cosas
JSON	JavaScript Object Notation	notación de objeto de JavaScript
MAR	Mobile Augmented Reality	Realidad Aumentada Móvil
MCU	microcontroller unit	microcontrolador
M2M	machine to machine	máquina a máquina
MITM	man-in-the-middle attack	Ataque de hombre en el medio
MQTT	Message Queue Telemetry Transport	Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes
OTA	Over-The-Air	Programación sobre el aire
PQ	Power quality	calidad de la energía eléctrica
PCB	Printed circuit board	Placa de Circuito Impreso
POI	point of interest	puntos geolocalizados
QR	Quick Response code	Código de respuesta rápida
REST	representational state transfer	transferencia de estado representacional
RTC	reloj de tiempo real	real-time clock
RMS	root means square	corriente eficaz
SDK	software development kit	kits de Desarrollo
SPI	Serial Peripheral Interface	Interfaz Periférica Serial

SoC	system on a chip	sistema en un chip
TIC	tecnologías de la información y las comunicaciones	
USART	receptor-transmisor universal síncrono y asíncrono programable en serie	
UART	receptor-transmisor asíncrono universal	
URL	Uniform Resource Locator	localizador de recursos uniforme

Índice de contenido

Contenido

Abstract	I
Resumen	II
Publicaciones.....	IV
Agradecimientos.....	V
Abreviaturas	VI
Índice de contenido	VIII
Índice de figuras	XI
Índice de tablas.....	XIII
1 Introducción.....	1
1.1. Motivación y objetivos de la tesis.	2
1.2. Contribuciones de la tesis.	4
2 Antecedentes.....	6
2.1. La importancia de la reducción del consumo de energía eléctrica. 6	
2.2. La calidad de la energía eléctrica	7
2.2.1. Medición de la calidad de la energía	8
2.3. Realidad Aumentada	9
2.3.1. Funcionamiento de un sistema de AR	10
2.3.2. Juegos de herramientas y bibliotecas	10
2.3.3. SDK Vuforia para Realidad Aumentada	11
2.3.4. Unity y Vuforia	12
2.4. Internet de las Cosas (IoT) y sus plataformas	13
2.4.1. Protocolos de comunicaciones	15
3 Materiales y Métodos	17
3.1. Componentes hardware	18
3.1.1. Sensor de tensión	20
3.1.2. Sensor de corriente	20
3.1.3. Calibración	21

3.1.4. Prototipo final	22
3.2. Comunicaciones	23
3.3. Componentes software	24
3.4 Método para la implementación de la medida de la calidad de la energía	25
3.4.1 RMS	25
3.4.2 Potencia	27
3.4.3 Energía	28
3.4.4 Huecos de tensión	29
3.5 Método de visualización de consumo de energía eléctrica con Realidad Aumentada: Unity y Vuforia	32
3.5.1 Entrenamiento y reconocimiento de imágenes objetivo	33
3.5.2 Flujo de trabajo de la aplicación AR	34
4 Resultados y discusión	37
4.1. Prueba del dispositivo IoT PQ en una instalación real	37
4.1.1. Prueba 1	37
4.1.2. Prueba 2	39
4.1.3. Discusión de los resultados	45
4.2. Resultados de la plataforma IoT	45
4.2.1. Resultados y pruebas en ThingSpeak	45
4.2.2. Análisis de la seguridad del sistema	47
4.3. Resultados del sistema de Realidad Aumentada.	50
4.3.1. Selección de imágenes objetivo	51
4.3.2. Entorno real	51
4.3.3. Entorno impreso	52
4.3.4. Rendimiento del sistema	53
4.3.5. Análisis de seguridad a la aplicación de Realidad Aumentada	54
4.3.6. Evaluación de impacto y usabilidad	55
4.3.7. Cuestionario de impacto	56
4.3.8. Cuestionario de usabilidad	57

5	Conclusiones y trabajo futuro.....	58
	5.1. Conclusiones	58
	5.2. Trabajo futuro	59
6	Bibliografía.....	61
	Anexo A: Publicaciones	68
	Anexo B: Proyectos derivados	69

Índice de figuras

Figura 2-1 Búsquedas en Google del término IoT desde 2004 hasta hoy. El valor 100 corresponde al pico de búsquedas mundiales.....	13
Figura 2-2. Esquema de publicación en un canal de Thinkspeak.....	16
Figura 3-1 Arquitectura general de la aplicación de AR para monitorizar consumo de energía eléctrica.	18
Figura 3-2. Diagrama de bloques de interfaz hardware para el prototipo de sensor PQ IoT.....	19
Figura 3-3. Circuito de acondicionamiento de la señal de tensión al ADC.	20
Figura 3-4 Circuito de acondicionamiento de la señal a la corriente ADC..	21
Figura 3-5. (a) Prototipo de placa de sensor de IoT PQ desarrollado. (b) Diseño y enrutamiento de placa de circuito impreso (PCB). Vista superior (c) e inferior (d) del ensamblado de la PCB	23
Figura 3-6 Esquema de la pasarela entre el microcontrolador y la Nube.....	23
Figura 3-7 Canal en Thingspeak donde se almacenan los datos	24
Figura 3-8 Proceso de lectura del RMS implementado en la MCU.	26
Figura 3-9 Comunicación entre el CI ADE7758 y ATmega328P cuando se lee el registro VRMS (Ch1. CS, Ch2. SCLK, Ch3. MOSI, Ch4. MISO).....	27
Figura 3-10 (a) Cálculo de la potencia activa. (b) Diagrama de flujo. (c) Proceso para la acumulación de la potencia activa. (d) Proceso para la acumulación de la potencia aparente.....	28
Figura 3-11 Proceso de medición de energía implementado en la MCU.....	29
Figura 3-12. Proceso de detección de huecos de tensión implementado en la MCU.....	30
Figura 3-13. Secuencia de tiempo en un proceso de detección de huecos de tensión.....	31
Figura 3-14. Comunicación entre el CI ADE7758 y ATmega328P cuando se lee el registro VRMS (Ch1. CS, Ch2. SCLK, Ch3. MOSI, Ch4. MISO).....	32
Figura 3-15. Conceptos sobre Vuforia y Unity.	33
Figura 3-16. Imagen objetivo de una cocina y sus puntos característicos....	34
Figura 3-17 Flujo de trabajo de la aplicación.....	35
Figura 3-18 La información virtual se muestra en la pantalla del teléfono inteligente cuando se enfoca la campana extractora.	36
Figura 4-1. (a y b) Evolución temporal de la potencia activa y aparente. (c y d) Evolución temporal del valor eficaz de la tensión y de la corriente eléctrica en la prueba 1.	39
Figura 4-2. Potencia (W) agregada medida por el sensor del nodo 6 en la prueba 2.....	40
Figura 4-3. Potencia (W) desagregada medida por el sensor del nodo 10 en la prueba 2.....	40
Figura 4-4. Patrones de consumo de algunos electrodomésticos.	41

Figura 4-5. Patrón de consumo del frigorífico	41
Figura 4-6. Patrón de consumo de una Lavadora en condiciones reales de funcionamiento, a) sintético frío. b) Sintético 40°C y c) Sintético 60°C.....	42
Figura 4-7. Patrón de consumo de la vitrocerámica	43
Figura 4-8. Medida y análisis del consumo de energía eléctrica en un microondas en condiciones reales de funcionamiento, a) 200 W, b) 270 W, c)360 W y d)700 W	44
Figura 4-9. Medida y Análisis del consumo de energía eléctrica de una plancha en condiciones reales de funcionamiento, a) Algodón, b) Lana, c) Sintéticas y d) Agodón con vapor e) Lana con vapor y f) Sintéticas con vapor.....	44
Figura 4-10 Comparativa del consumo de la vivienda del 15 al 21 de julio de 2018.....	45
Figura 4-11. Información sobre el consumo de energía de un horno almacenada en la plataforma en la Nube ThingSpeak.....	46
Figura 4-12. a) VRMS b) IRMS cargado en ThingSpeak de un microondas.	47
Figura 4-13 Estructura de red del sistema AR PQ IoT	47
Figura 4-14 Ataque MITM (hombre en medio) por envenenamiento de ARP	49
Figura 4-15 Wireshark, ataque al Sensor IoT (a) Protocolo HTTP (b) Protocolo MQTT	49
Figura 4-16. La relación entre las características detectadas y las condiciones de luz.	51
Figura 4-17. Información de energía aumentada que se muestra en la pantalla del teléfono inteligente.	52
Figura 4-18. Detección exitosa del objetivo de la imagen según los parámetros de tamaño y ángulo	53
Figura 4-19. Uso de la CPU de la aplicación por marco (ms).....	54
Figura 4-20 Ataque MITM (hombre en medio) por envenenamiento de ARP en la aplicación AR	54
Figura 4-21 Wireshark, análisis MITM a APP AR	55

Índice de tablas

Tabla 2-1 Calificación de las plataformas IoT	14
Tabla 3-1. Resultados de la calibración de la tensión.	21
Tabla 3-2. Resultados de la calibración de la corriente.....	22
Tabla 4-1. Patrón de conexión/desconexión de las cargas empleadas en el experimento.....	38
Tabla 4-2. Resultados del cuestionario de impacto ($n = 16$).	56
Tabla 4-3. Resultados de usabilidad del Sistema (System usability scale SUS) ($n = 16$).....	57

1 Introducción

En este primer capítulo se tratan los conceptos que posteriormente se utilizarán en los siguientes capítulos, como es el caso del Internet de las cosas (Internet of things IoT) y de la Realidad Aumentada (Augmented Reality AR). La sección 2 contiene el estado del arte. La sección 3 presenta los materiales y métodos. La sección 4 está dedicada a la evaluación de la plataforma y la discusión, incluyendo la evaluación del impacto y la usabilidad. Por último, la sección 5 aborda la conclusión de este trabajo.

Actualmente estamos sumergidos de lleno en la era del IoT y del Big data, a través de los cuales, se pueden conectar casi cualquier cosa o partes de algún proceso industrial o comercial, los electrodomésticos en las viviendas, los vehículos, etc y los datos, de manera que se puedan resolver problemas empresariales y/o sociales hasta ahora impensables. Dentro de este nuevo panorama, podemos centrarnos en la monitorización de los consumos de energía eléctrica, ya que unido al avance que se ha experimentado en el desarrollo de la electrónica, la conexión digital y la constante subida de los precios de la energía hace que cobre especial importancia dicho control de los consumos energéticos a cualquier nivel.

Además del IoT, la realidad aumentada es otra tecnología en auge debido en gran medida a la innovación que está generando en varias áreas como es el caso del sector energético. Para trabajar o experimentar con AR se pueden aprovechar tecnologías de bajo coste como los teléfonos inteligentes, al igual que pasa con el IoT, que solo necesita de hardware y software en versiones libres o gratuitas para poner en marcha cualquier experimento. Por estos motivos en este trabajo se ha implementado la integración de la tecnología IoT con la AR, en el desarrollo de una aplicación que muestra el potencial de su interconexión poniendo en valor lo que denominamos realidad mixta.

En general, la información de cualquier instalación relacionada con la energía es muy pobre, esto se debe a que, si se dispone de la proporcionada por los fabricantes, en la mayoría de los casos no está normalizada y, conocer la información de energía en los diferentes estados de funcionamiento de cada máquina es difícil en la práctica [53].

Por tanto, el propósito de este trabajo es explorar la utilidad de estas nuevas vías de interacción hombre-máquina para mostrar diferentes variables eléctricas (potencia activa y reactiva, tensión, corriente eficaz (root means square RMS), temperatura, tiempo, etc.) para aumentar la conciencia de ahorro energético en los usuarios. Además, se puede utilizar un proceso de fusión de datos para relacionar los datos de consumo de energía con los datos espaciales de cada dispositivo con el fin de impulsar un cambio en el comportamiento de los usuarios y ayudar al ahorro global [54]. Sin embargo, la proliferación de tecnologías tan complejas no es una garantía de éxito a menos que se vinculen consistentemente con interfaces de usuario que transmitan información detallada sobre el uso de los electrodomésticos, y luego traduzcan esa información en ahorros de energía. Estos datos deben darse de forma que permitan

comparaciones entre diferentes fechas, sean comprensibles para personas no expertas, y proporcionen información que ayude al usuario a comprender qué parámetros tienen mayor influencia en el consumo total de energía. Sin esta característica, los usuarios necesitarían más tiempo para percibir y analizar números tan grandes y gráficos diferentes.

La realidad aumentada es una aproximación a la realidad en la que los objetos físicos están vinculados a una contraparte virtual, con información contextual generada por ordenador. La AR ha recorrido un largo camino desde un sueño de ciencia-ficción hasta una disciplina científica claramente establecida [55]. Hasta hace poco, el coste de la AR la hacía algo prohibitiva. Afortunadamente, la situación ha cambiado, y la AR puede implementarse a un costo competitivo en dispositivos que van desde teléfonos inteligentes, tabletas, gafas inteligentes, o incluso más complejos como las lentillas haciendo que la experiencia resulte mucho más realista. Hoy en día, la AR móvil se encuentra en el ciclo de la propaganda tecnológica, que ha atraído el interés tanto de la investigación como de la industria. Así pues, con el desarrollo de la tecnología móvil inteligente, han proliferado muchas aplicaciones, servicios y contenidos. Con el apoyo de este tipo de herramienta informática, centrada en ampliar la perspectiva del mundo real mediante el uso de dispositivos móviles, se presentan imágenes virtuales que trascienden la percepción común y revelan un nuevo universo por descubrir.

La medición del consumo de energía eléctrica (también conocida como submedición cuando se consideran las mediciones de los aparatos individuales) y la adecuada visualización de cada detalle es el primer paso para saber por qué y, en consecuencia, para tomar conciencia y adoptar las medidas adecuadas para ahorrar electricidad en cualquier operación. En este trabajo se investiga el uso de herramientas de AR para mejorar la visualización del consumo de energía de cada electrodoméstico, y así hacer instalaciones más eficientes y sostenibles. Por tanto, el propósito es emplear tecnologías AR para visualizar los datos de energía captados por los sensores con tecnología del Internet de las Cosas, colocados en los electrodomésticos, para convertirlos en inteligentes.

1.1. Motivación y objetivos de la tesis.

La bajada de precios o disminución de los costos para la adquisición de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC), combinada con el aumento de las presiones ambientales y reglamentarias en favor de la eficiencia energética y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, favorece y permite que muchas ciudades y comunidades inteligentes se replanteen o estén considerando actualmente el Internet de las cosas como la herramienta adecuada para abordar el ahorro de energía en los edificios residenciales y comerciales. El concepto de IoT comprende un conjunto de aplicaciones y tecnologías. El conjunto de tecnologías que fundaron la IoT pretendía convertir cualquier dispositivo en una fuente de autoinformación. Una buena definición de IoT puede encontrarse en [10]. Inspirado en el actual modelo de IoT, y publicado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología [11], se pueden establecer y utilizar cuatro conceptos básicos: *sensor, agregador, análisis y toma de decisiones*. En el corazón de este ecosistema están los datos, recogidos por los sensores IoT y agregados a las aplicaciones basadas en la Nube. A través de estas plataformas de software de IoT, la información puede ser analizada, almacenada y visualizada de una manera bien diseñada, y lo más importante es que puede ser accesible desde cualquier parte del mundo.

Estos datos pueden ser luego analizados a través de modernas técnicas de análisis de datos, para permitir un conocimiento más profundo a nivel granular del suministro y uso localizado de la

electricidad. En este contexto, la Infraestructura de Medición Avanzada de las empresas eléctricas juega un papel principal, sobre todo porque es necesario armonizar la integración de los sensores IoT en la arquitectura existente, basada en estándares Smart-Grid, de dispositivos electrónicos inteligentes conectados.

La calidad de la energía eléctrica (Power quality PQ) es una preocupación no sólo por el daño que se produce en el equipo y en el propio sistema de distribución eléctrica, sino porque desperdicia energía y reduce la capacidad eléctrica. Los problemas de PQ en los países de la UE-25 crean pérdidas financieras de más de 150.000 millones de euros al año [12]. Detectar un problema desde el principio, antes de que empeore y cuando es fácil de abordar, puede reducir al mínimo la probabilidad de que se produzcan costosos daños en los equipos o costosas interrupciones de las actividades.

Si la infraestructura de medición y el IoT continúan evolucionando -y lo harán- los medidores inteligentes podrían complementarse mejor con información proporcionada por dispositivos de submedición IoT PQ embebidos. Esto permitirá a los aparatos autocontrolar no sólo su consumo de energía eléctrica sino también su calidad, un enfoque hasta ahora inexplorado.

Posteriormente, esto impulsaría el desarrollo de herramientas de comportamiento energético más disruptivas para hacer que los datos energéticos generados por la IoT sean manejables por los clientes. Como conclusión, con una plataforma de PQ de IoT, sería posible ofrecer funcionalidades avanzadas para aplicaciones de gestión de la energía a los consumidores finales y a los administradores de edificios.

La AR es, sin duda, una de las tecnologías que transformará la forma en que los seres humanos interactúan con su entorno. Esta tecnología consiste esencialmente en superponer elementos virtuales sobre objetos reales en la pantalla, para dar un valor añadido y enriquecer la interacción con la realidad. Existen diferentes campos en los que la AR se aplica actualmente permitiendo al usuario tener una experiencia más real, por ejemplo, videojuegos, museos y educación. Además, la AR ha crecido lo suficiente como para ser aplicada con éxito en distintos entornos industriales y comerciales, como las fábricas inteligentes [56], los sistemas de gestión de energía de edificios [57], la industria aeroespacial y la automotriz [58]. La AR también se ha empleado en entornos de subestaciones eléctricas en [59,60]; en ambos trabajos, la AR se utiliza para la formación del personal técnico. Se están extendiendo las aplicaciones que utilizan la AR para apoyar la visualización de datos en el sector de la infraestructura [58].

Una de las razones es que la AR es una de las formas más eficientes e intuitivas de proporcionar información contextualizada sobre objetos en entornos reales, ya que aparecen en el mismo lugar que el objeto en cuestión [59]. Los aspectos más determinantes del diseño de un sistema industrial de AR para el caso de los astilleros de la Industria 4.0 se estudiaron en los trabajos de [61], incluyendo las últimas tecnologías y las investigaciones y desarrollos más relevantes para la industria de la construcción naval. Recientemente se publicó un informe sobre los requisitos funcionales para los proveedores de AR con el fin de mejorar el rendimiento y la eficiencia en diferentes actividades relacionadas con la ingeniería de operación y mantenimiento [62]. Estas directrices ayudarán a desarrollar productos para usuarios industriales, acelerando así las tareas al permitir el acceso inmediato sobre el terreno a datos en tiempo real, manuales de mantenimiento, guías de instrucciones, esquemas, etc.

Según el documento [63], la AR permite ver la huella de carbono de unos cereales o del agua embotellada en una tienda de comestibles [64]. Sin embargo, ninguno de los documentos analizados está relacionado con los aspectos de visualización de la información energética para los usuarios. En este trabajo, el objetivo es plantear un sistema AR para que los usuarios visualicen, en tiempo casi real, el consumo de energía de sus electrodomésticos, así como

parámetros adicionales de calidad de la energía. Esta aplicación proporcionará a los usuarios una potente herramienta para comprender el consumo de energía de algunos de los electrodomésticos de sus hogares, ayudándoles a seguir diferentes estrategias para intentar reducir el consumo de energía y, por lo tanto, para reducir la factura de electricidad.

Por tanto, el objetivo principal de este trabajo es ayudar a visualizar y monitorizar el consumo de energía eléctrica de cualquier aparato eléctrico, doméstico o industrial. Para ello se ha diseñado e implementado un medidor de energía del que se obtienen distintas variables eléctricas. Este sistema de monitorización es gestionable, sencillo de instalar y fácil de mantener y permite monitorizar el consumo de energía eléctrica de diferentes dispositivos conectados a la red eléctrica o de las diferentes secciones de una instalación eléctrica de manera no intrusiva. Además, proporciona al usuario históricos del consumo de energía de forma diaria, semanal y mensual, etc por cada uno de los dispositivos conectados y permite una visualización atractiva y fácil de comprender para el usuario.

1.2. Contribuciones de la tesis.

Se ha desarrollado una solución basada en IoT y AR de bajo costo que monitoriza las variables de consumo de energía eléctrica dentro de las instalaciones; esto resulta sumamente beneficioso para la gestión de un edificio. Las publicaciones anteriores consideran que los parámetros de PQ registrados que se encuentran en la Nube pueden ayudar a reducir el consumo de energía eléctrica en un edificio. Sin embargo, esos datos también pueden utilizarse para detectar automáticamente las perturbaciones de PQ e incluso compararse con los valores estándar. Para ello se ha implementado una plataforma abierta que mida y compare algunos de los valores con los límites estándar.

Hasta donde sabemos, no existe ningún sistema de IoT de bajo costo dedicado a la monitorización simultánea de PQ y energía. El artículo recientemente publicado [65] presenta un sistema de monitorización fácil de usar basado en IoT y AR, sin embargo, sus mediciones provienen de un medidor energético tradicional, sin realizar ninguna medición relacionada con la PQ, ni considerar la submedición. Proporcionar información sobre PQ se considera como un sensor de buena calidad que permite ahorrar energía y aumenta la capacidad eléctrica. Además, si comparamos el artículo indicado con el trabajo [66], podremos afirmar que nuestra gran contribución es hacer posible la "granularidad" en la medida de la energía que se ofrece al usuario. Hasta ahora, la falta de submedición o registro del consumo de energía "detrás del contador electrónico", por ejemplo, a nivel del sistema o en los electrodomésticos individuales, ha sido una barrera infranqueable que impedía conocer en detalle cómo se consumía la energía.

Esta tesis resuelve este problema mediante un novedoso y económico sensor de AR e IoT para medir el consumo y analizar la calidad de la energía a la entrada de cualquier aparato individual de Corriente Alterna (CA), proporcionando un sistema de detección y análisis tempranos que controla esas variables críticas dentro de la instalación y permite anticiparse a las fallas con alertas en etapas tempranas. Además, los parámetros de PQ registrados que se procesan en la Nube pueden ayudar a reducir el consumo de energía eléctrica, ya que las perturbaciones de la calidad de la energía pueden analizarse automáticamente e incluso compararse con los valores estándar.

Esta tesis presenta un dispositivo de bajo costo capaz de analizar los parámetros de calidad de la energía, subirlos a una plataforma de IoT en la Nube y mostrar dicha información a través de AR. Esta es la novedad de la tesis: la capacidad de medir y enviar datos agregados de PQ al sistema de IoT en la Nube, así como procesar los datos, comprobar el cumplimiento

de la norma y mostrar la información al usuario a través de AR. Un punto importante aquí es que esta información es accesible por cualquier dispositivo que tenga una conexión a Internet y la aplicación de AR instalada. Un teléfono móvil puede acceder a todos los datos a través de nuestra aplicación de AR. Las caídas de tensión se controlan mediante la amplitud y la duración, además de clasificarse según la curva SEMI F-47. Esto resulta adecuado para la submedición de instalaciones industriales o comerciales, ya que los datos del sensor PQ pueden ser una indicación del rendimiento del equipo en cuanto a la eficiencia y el cumplimiento de las normas de PQ.

2 Antecedentes

2.1. La importancia de la reducción del consumo de energía eléctrica.

En los últimos años la demanda mundial de energía ha aumentado y se espera que el consumo de energía mundial aumente en más de un tercio hasta el año 2035. Entre toda la demanda de energía, el sector de la construcción representa un promedio del 20-40% del uso de energía mundial [1]. Estos valores pueden aumentar aún más ya que se prevee un aumento en la demanda de electricidad procedente de los edificios, principalmente debido a las bombas de calor eléctricas, y en segundo lugar debido al impacto de las instalaciones de recarga de los vehículos eléctricos. En consecuencia, la distribución temporal de la demanda de manera más uniforme y una mejor coordinación con la disponibilidad de electricidad podrían evitar, en parte, la necesidad de nuevas infraestructuras.

En el marco de la Red Eléctrica Inteligente se podrían lograr ahorros de energía sustanciales mediante un Sistema de Gestión Energética en los Edificios (*Energy Management System EMS*). Así, la combinación de algoritmos de Control Directo de Carga (*Direct Load Control DLC*), durante un evento de Respuesta a la Demanda, con mediciones detalladas y, además, con la información y el análisis contextual de la energía, tendría un impacto significativo en la reducción de los costos de la energía eléctrica. Sin embargo, la falta de medida de la carga final (o como podríamos llamarlo: submedición) o de registro del consumo de energía "aguas abajo del contador electrónico", por ejemplo, a nivel del sistema o a nivel de electrodoméstico, ha sido una barrera insuperable hasta ahora. Sin embargo, todo señala que la submedición será algo obligatorio en los próximos años. En algunos casos, la submedición en los edificios multiresidenciales puede reducir el consumo medio de electricidad en un 34% para los edificios sin calefacción eléctrica, y en un 27% para los edificios con calefacción eléctrica [2]. Sin embargo, la submedición podría ser no sólo una forma importante de identificar las oportunidades de eficiencia operativa, sino también de regular la demanda, por ejemplo, mediante la agregación virtual de diferentes submedidores, para integrarse en un sistema de energía que depende progresivamente de los recursos energéticos distribuidos.

Hoy en día, las empresas, ONGs y las instituciones gubernamentales están incluyendo diferentes acciones para incrementar su responsabilidad social corporativa, como podría ser su impacto en el medio ambiente. Este compromiso los lleva a limitar este impacto ambiental en todas sus operaciones reduciendo el consumo de energía eléctrica. Por lo tanto, la eficiencia energética no es sólo un esfuerzo aislado para ser rentable, sino que también es un objetivo central que refleja la actitud hacia sus clientes. Una de las medidas es a través del EMS, mediante el cual se controla el consumo de energía promoviendo comportamientos energéticamente eficientes. Para lograr esta conciencia se requiere una visualización manejable, pero también más granular, de los valores de energía [52].

En general, se dispone de datos sobre parámetros funcionales, diseño o características con respecto a algún estándar. Sin embargo, en muchos casos, la información energética de la instalación es escasa. Esto se debe a que, si se dispone de la información proporcionada por los fabricantes, en la mayoría de los casos no está normalizada. Además, conocer la información energética en los diferentes estados de funcionamiento de cada equipo es difícil en la práctica [53]. Por tanto, la ausencia de supervisión de la carga final (submedida) ha sido hasta ahora una barrera insuperable.

2.2. La calidad de la energía eléctrica

La PQ contempla las desviaciones de la forma de onda de la tensión o la corriente con respecto a la onda sinusoidal ideal de amplitud y frecuencia constantes. El deterioro de la PQ se debe a perturbaciones o sucesos transitorios (caídas de tensión, subidas de tensión, impulsos, etc.) y a perturbaciones en estado estacionario (distorsión armónica, desequilibrio, parpadeo) [3]. En la actualidad, las perturbaciones de la PQ son cada vez más preocupantes debido al uso generalizado de los equipos de electrónica de potencia en los edificios industriales, comerciales y residenciales. Los electrodomésticos son especialmente sensibles a tales imperfecciones.

Entre todas las categorías de perturbaciones de energía, los huecos de tensión y las interrupciones momentáneas son las más frecuentes en los procesos industriales automatizados. Las duraciones de los huecos se subdividen según IEEE Std. 1159 [4] en tres categorías: instantáneas, momentáneas y temporales. En las redes de distribución, las faltas del sistema de energía son principalmente el origen de los huecos de tensión. La ocurrencia de faltas en otros lugares puede crear huecos de tensión que pueden perturbar a los consumidores en diferentes grados dependiendo de su proximidad en la red eléctrica. Los huecos de tensión afectan a un mayor número de clientes y, para algunos de ellos pueden causar problemas extremadamente graves. Algunos ejemplos son los equipos sensibles que no tienen una capacidad adecuada para soportar las fluctuaciones del suministro eléctrico [5]. La necesidad de regular el nivel de tensión sigue siendo necesaria para satisfacer las demandas de alta productividad industrial. Hay varias soluciones de acondicionamiento que se han desarrollado para proporcionar protección a los problemas de PQ [6].

La potencia consumida en un circuito de CA se denomina potencia activa. Por otro lado, el producto del valor eficaz (RMS) de tensión y la corriente se conoce como potencia aparente. Mientras que la potencia activa hace el trabajo real en la carga, la potencia aparente es la potencia total en un circuito de CA tanto disipada como absorbida/devuelta. La energía aparente se debe tener en cuenta al diseñar y operar sistemas de energía, ya que, aunque la corriente asociada con la energía reactiva no tiene efectos en la carga, debe ser suministrada por la fuente de energía. Por lo tanto, los conductores, transformadores y generadores deben dimensionarse para transportar la corriente total, no solo la corriente que hace un trabajo útil.

La relación entre la potencia activa y la potencia aparente en un circuito se denomina *factor de potencia*. Esta es la razón para incluir ambas mediciones en este sensor IoT. Un sistema con un factor de potencia bajo tendrá una elevada corriente que se traduce en pérdidas y una reducida eficiencia. Toda esta información conducirá a un análisis adecuado de los patrones de parámetros operativos, así como al conocimiento de la red de distribución y las condiciones de carga de los múltiples dispositivos que existen en el edificio. Estos datos serán útiles para el mantenimiento y soporte del equipo, y en última instancia para la conciencia energética del usuario.

2.2.1. Medición de la calidad de la energía

La correlación y la categorización (por ejemplo, el tipo de evento, la magnitud y la duración) pueden clasificarse de acuerdo con las normas EN 50160 [7] o IEEE Std. 1159 [4]. Sin embargo, sólo la norma EN 50160 establece los límites de la tensión suministrada por la red de distribución pública. Los eventos de PQ deben ser medidos, dependiendo de su naturaleza determinística o estocástica, siguiendo la norma IEC 61000-4-30 [8]. Por otro lado, las variaciones de la señal de estado estacionario, como los armónicos, se procesan según la norma IEC 61000-4-7 [9]. Las distorsiones relacionadas con la amplitud deben ser preprocesadas y registradas sólo si tienen el potencial de afectar a cualquier dispositivo de la instalación. En la mayoría de los casos, la probabilidad de que ocurra un evento de PQ se evalúa en base al cambio de la forma de onda sinusoidal (RMS). Según la norma IEC 61000-4-30, este valor RMS debe medirse a lo largo de un ciclo de forma de onda, empezando por un cruce por cero, y actualizándose cada medio ciclo ($V_{RMS(1/2)}$). Así pues, esta norma establece los huecos, sobretensiones e interrupciones de tensión como una variación del RMS por debajo del 90%, por encima del 110% y por debajo del 10% del valor nominal, respectivamente.

El análisis automatizado de eventos de PQ implica las siguientes etapas: detección, segmentación y caracterización del evento de PQ. Existen numerosos estudios relacionados con estas etapas, en los que se han aplicado las técnicas más avanzadas, desde el área de procesamiento de señal hasta la inteligencia artificial. Véanse, por ejemplo, los últimos trabajos presentados en [23-25].

El analizador de PQ más avanzado del mercado hoy en día, que cuesta entre 4.495 y 13.460 euros [26], proporciona una monitorización de PQ trifásica de alto rendimiento con monitorización, estadísticas e informes incorporados según EN 50160 o IEEE Std. 1159. Estos analizadores pueden dividirse entre una solución portátil para estudios de carga y auditorías de PQ, o ser fijos para una monitorización continua a largo plazo 24/7. Como se puede ver, la mayoría de estos analizadores presentan buenas características, pero suelen ser muy caros, por lo que sólo se suelen utilizar conectados a la entrada de la instalación. Aunque se pueden capturar todos los eventos importantes, esto podría dar lugar a un exceso de datos de eventos no críticos. Los métodos de análisis manuales son caros, llevan mucho tiempo y son propensos a errores. Por lo tanto, el diseño de un sistema que pueda analizar, condensar e interpretar datos brutos voluminosos de manera que los niveles puedan evaluarse en relación con los límites, así como que pueda ampliarse fácilmente, se convertiría en el reto más importante en el ámbito actual de la medición de la PQ. Además de los medidores profesionales de PQ, se dispone de registradores de calidad de tensión que detectan y registran diferentes perturbaciones a precios alrededor de 900 euros. Por consiguiente, se necesita un sistema de bajo costo capaz de observar los datos de PQ de forma continua.

Los equipos actuales de medición de energía inteligentes permiten a día de hoy, debido al enorme desarrollo de la tecnología de semiconductores, disponer de muchos dispositivos o componentes electrónicos con altos rendimientos de operación en variadas condiciones ambientales. Compañías como Analog Devices ofrecen chips confiables y de bajo coste, por ejemplo, el chip multifunción CI ADE7758 [41], para la medición de la calidad de la energía eléctrica, combina convertidores analógico/digital (ADC) con procesadores de señales digitales (DSP) de función fija para ser capaz de detectar las caídas de tensión, sobretensión, suspensión de servicio, frecuencia de línea e incluso error en la secuencia de fases conectadas.

Debido a estas capacidades [90] que dispone el ADE7758, se ha decidido utilizar este circuito integrado como dispositivo para adquisición de las señales eléctricas de la red, ya que no se buscaba el micro más pequeño o de mayor precisión como en el trabajo [91]

2.3. Realidad Aumentada

Entendemos la Realidad Aumentada como la mezcla o suma de los elementos del mundo físico o real con otros elementos u objetos virtuales que aportan y añaden información multimedia como video, sonido, gráficos o datos. En la realidad virtual ó mundo alternativo, el usuario se sumerge completamente sin ningún tipo de referencia o nexos con el mundo real [86]. A diferencia de la realidad virtual, la AR lo que hace es aumentar o superponer cierta información a los elementos del mundo real, pero no los sustituye.

Con el uso de esta tecnología se confunde la línea entre lo que es real y lo que es generado por ordenador al aumentar la información sobre lo que vemos. En el espectro entre la realidad virtual, la cual crea entornos generados por ordenador e inmersivos, la AR está más cerca del mundo real, ya que agrega datos, gráficos, sonidos y retroalimentación al mundo natural.

No obstante, ambas tienen una diferencia clara, cualquier sistema de AR se compone principalmente de dos partes. Por un lado, la fuente de datos encargada de generar y proporcionar la información de interés (en nuestro caso, el sensor IoT PQ) y, por otro lado, los componentes de software (aplicación, análisis de datos, etc.) encargados de mostrar al usuario final esta información de manera amigable.

Se podría decir que la AR está cambiando la forma en que observamos el mundo, por ejemplo, con un dispositivo móvil o pantallas de realidad aumentada, como gafas de AR, se mostrarían en nuestro campo de visión datos y gráficos informativos al observar un objeto como, por ejemplo, un electrodoméstico. Estos “aumentos” se actualizarán continuamente para reflejar los movimientos de tu cabeza o dispositivo. De hecho, ya existen dispositivos y aplicaciones similares, particularmente en smartphones.

Se pretende mostrar mediante AR la información almacenada en la Nube y proporcionada por el sensor IoT sobre el consumo de energía eléctrica de cualquier aparato eléctrico, por lo que la tecnología AR puede ofrecernos un entorno apropiado para conocer dicho consumo de una forma mucho más visual y amigable. Esto se puede lograr mediante la adición de objetos virtuales multimedia como texto, botones, gráficos y otros objetos a un marcador mientras se observa un entorno real.

En este trabajo se explora un nuevo sistema de AR combinado con IoT que permita visualizar de un modo diferente el consumo de energía eléctrica y para ello, creemos necesario que deba cumplir varias premisas como, por ejemplo, combinar el mundo real con el mundo virtual y hacerlo en tiempo casi real con datos de consumo de energía eléctrica reales. Esta nueva experiencia de visualización podría proporcionar al usuario un valor añadido a la hora de observar un electrodoméstico cualquiera de los que usamos a diario de manera que lo convierta en algo interesante o diferente que despierte su curiosidad y le proporcione valiosa información.

2.3.1. Funcionamiento de un sistema de AR

Para poder disfrutar de una experiencia de Realidad Aumentada sólo necesitamos cualquier dispositivo electrónico que posea una cámara para captar la imagen del entorno, un microprocesador con capacidad suficiente para procesar video y de una pantalla o monitor donde se pueda visualizar lo que capte la cámara, combinado, en tiempo real, con el contenido digital y la información de consumo de energía eléctrica proporcionada por el sensor IoT PQ; y además, hay que sumarle el software de AR. Con estos requisitos cumplen dispositivos tales como smartphones o teléfonos móviles inteligentes, ordenadores personales con una webcam, tablets e incluso, consolas de videojuegos con cámara.

También hay que disponer de los elementos activadores de la Realidad Aumentada, además de los elementos de hardware y software anteriores, para que, al detectarlos, provoquen la reacción del sistema y se añada la capa de información digital. Estos elementos activadores pueden ser imágenes en 2D o 3D, códigos QR, marcadores objetos o puntos geolocalizados (POI).

Resumiendo, para conseguir superponer elementos virtuales sobre un entorno real o físico determinado, el sistema AR debe estar formado por una cámara para captar la imagen del mundo real y que puede ser la cámara del smartphone o de la tablet o la webcam del ordenador portátil, un procesador, que es el hardware que mezcla la imagen con la información virtual que queremos añadir, el software o algoritmo que gestiona todo el proceso; la pantalla donde los elementos virtuales se muestran mezclados o combinados con los reales; la conexión a Internet para enviar los datos reales, obtenidos por el sensor, al servidor remoto y posteriormente, recuperar la información virtual asociada para superponerla; el activador, que es el elemento designado del mundo real que el algoritmo utiliza para reconocer el electrodoméstico y poder seleccionar la información virtual que lleva asociada y que se va a añadir. Como se ha comentado anteriormente, el marcador puede ser un código QR, una imagen o un POI, aunque también podría ser una imagen impresa en papel o un objeto 3D en el espacio real.

2.3.2. Juegos de herramientas y bibliotecas

Lo interesante de la AR es la adecuada combinación con las entidades u objetos del mundo real. Los investigadores y los desarrolladores han innovado muchas herramientas y kits de Desarrollo (SDK) para desarrollar aplicaciones de AR. Estas normalmente utilizan las bibliotecas gráficas y los motores 3D existentes para la representación. La primera biblioteca para crear aplicaciones de AR fue ARToolkit (activa desde 2006) [84]. Esta fue la biblioteca más completa para desarrollar aplicaciones basadas en AR, y se ha extendido a aplicaciones autónomas de escritorio, aplicaciones móviles y aplicaciones web.

Generalmente, los usuarios están más preocupados por el rendimiento de la aplicación que por el enfoque utilizado para su desarrollo. Es difícil distinguir qué conjunto de herramientas es el más preferible para el desarrollo porque difiere según las necesidades, niveles y funcionalidades. Por lo tanto, hay muchos juegos de herramientas de AR dependiendo de las necesidades de una aplicación.

Algunos *toolkits* o juegos de herramientas pueden ser:

- **ARToolKit**[84]: Se trata de una librería de software desarrollada por Hirokazu Kato en 1999 en C y C++ que facilita el desarrollo de aplicaciones de AR. Para ello, utiliza las capacidades de seguimiento de vídeo, con el fin de calcular, en tiempo real, la posición de la cámara y la orientación relativa a la posición de los marcadores físicos.
- **ARMedia**: Con esta herramienta se puede diseñar, implementar y compartir una creación rápidamente ofreciendo una experiencia inmersiva apenas sin código de programación.
- **NyARToolKit**: Se trata de otra librería de AR que permite el reconocimiento de patrones simples en su licencia gratuita y de opciones más avanzadas en su versión comercial.
- **Wikitude**: Es una aplicación de realidad aumentada que nos permite crear nuestro propio mundo y podemos etiquetar todo lo que tengamos alrededor. Se trata de una potente herramienta de AR para crear experiencias inmersivas que transforman el mundo real.
- **Layar**: Esta empresa ofrece a las empresas y usuarios la capacidad de utilizar sus abundantes recursos para sacarle mayor partido a sus propias imágenes usadas como marcadores para las aplicaciones de AR. Se trata de una aplicación de pago ya desarrollada, por lo que la descartamos para este trabajo.

Para mostrar la información de energía contextual se necesita una herramienta AR capaz de detectar las *imágenes objetivo (Image Target)* donde se superpondrán los datos de energía. En la actualidad, hay muchas bibliotecas para el desarrollo de aplicaciones AR. En comparación con estos juegos de herramientas, Vuforia [68] permite el acceso a un poderoso conjunto de funcionalidades; es decir, reconocimiento de los diferentes tipos de objetos visuales, reconocimiento de texto y entorno, desarrollo de aplicaciones independientes de la plataforma, etc.

2.3.3. SDK Vuforia para Realidad Aumentada

Vuforia es un Kit de desarrollo de software de realidad aumentada diseñado para dispositivos móviles utilizada para facilitar la tarea de crear nuevas aplicaciones APP. Este SDK es ofrecido por Qualcomm que ha aumentado su participación de mercado en la industria de la AR en los últimos años. [68]

Vuforia, que Qualcomm inició en 2006, ahora es propiedad de PTC [93] desde noviembre de 2015. Vuforia utiliza la cámara del móvil para identificar o reconocer y rastrear imágenes y marcadores en tiempo real. Según el análisis comparativo realizado en [69], se ha demostrado que utiliza el algoritmo de seguimiento más rápido y con mayor estabilidad de imagen. Vuforia se puede combinar con Unity [70] de manera que resulta más fácil de implementar aplicaciones en múltiples plataformas para realizar pruebas. Algunas aplicaciones desarrolladas con Vuforia son Lego Nexo King, MekaMon, Qualcomm Insights, ARV4 T.I.G entre otras. [68]

Vuforia incluye varios componentes para que el desarrollo de aplicaciones de AR sea fluido y realista, además, la empresa Qualcomm facilita a los desarrolladores de Vuforia acceso a su

portal de recursos, donde podemos encontrar la posibilidad de crear marcadores a partir de imágenes subidas por el propio usuario desarrollador. Se puede subir una imagen, la que se quiera utilizar de marcador, y en poco tiempo dispondremos de un archivo que podremos descargar en dos formatos, o bien para desarrolladores de aplicaciones que trabajen con SDK eclipse, o para los que usen Unity, como es nuestro caso. También ponen a disposición de los desarrolladores aplicaciones parciales y completas ya desarrolladas con el fin de que sirvan como muestra o como punto de partida para la creación de nuevas aplicaciones.

2.3.4. Unity y Vuforia

Unity es una plataforma diseñada originalmente para el desarrollo de videojuegos, permitiendo agilizar el desarrollo facilitando un gran abanico de herramientas [70]. En la actualidad es una de las plataformas más usadas. Unity nos ofrece la posibilidad de desarrollar tanto en 2D como en 3D, obteniendo una adecuada calidad gráfica junto a la facilidad de programación que tiene tanto en C#, Unity Script o Boo. La implementación que realiza de funcionalidades básicas, pero que llevarían mucho tiempo programarlas desde cero, acelera rápidamente el desarrollo de cualquier proyecto. A pesar de parecer que su uso se limite al desarrollo de videojuegos, realmente puede aplicarse a una gran cantidad de campos, entre los cuales se encuentra la AR y la realidad virtual. Esto es posible gracias a la implementación de *assets* o paquetes descargables en su tienda, que ya sean de pago o gratuitos, pueden llegar a ser sistemas complejos completamente programados y listos para usar. También hay *frameworks* o SDK que se integran con Unity dotando de mayor polivalencia a este.

Para desarrollar un proyecto de AR es necesario depender de un framework externo que se integre con Unity, debido a que este último da soporte a la tecnología, pero no la implementa de base. Vuforia es el framework de AR a emplear en esta tesis, siendo de los más asequibles en un comienzo, ya que buena parte de sus características las ofrece de forma gratuita. Su amplio y extendido uso, sobre todo en aplicaciones móviles, hace que sea un gran candidato por la gran cantidad de información que se tiene al alcance, comparado con otros. Ofrece una gran variedad de objetivos de AR para su implementación, desde simples imágenes planas hasta la detección de objetos tridimensionales, pasando por cilindros como objetivo formado por múltiples imágenes [68]. También ofrece detección basada en la Nube o sets de datos alojados en ella, además de herramientas para digitalizar objetivos de objetos reales u obtener dichos objetivos mediante un plano, siendo compatible con múltiples formatos como cad, fbx u obj. Su rendimiento y su capacidad multiplataforma con todos los cascos (*headsets*) de realidad virtual o aumentada hacen que destaque, ya que no es necesario por parte del desarrollador invertir tiempo en optimizaciones o en compatibilidades, ya que de todo esto se encarga Vuforia.

Se usa Unity para esta tesis principalmente por su facilidad de uso, ya que, una plataforma tan intuitiva como esta es un gran beneficio. También hay que tener en cuenta la documentación y su comunidad a la hora de obtener información. A esto se le suma la compatibilidad con el framework Vuforia.

La imagen de destino es la parte más esencial del SDK Vuforia y sin la cual no funciona en absoluto. A diferencia de otros conjuntos de herramientas, la especialidad de Vuforia es su imagen de destino, que hace que aumente la información de los objetos. Usando este componente, se puede detectar cualquier imagen de destino y mostrar el contenido de AR. El contenido AR se superpondrá sobre la imagen de destino y se puede mover por todo el espacio, aunque la imagen de destino sea pequeña, lo que generalmente explica que la imagen objetivo solo es necesaria para apuntar al objeto a aumentar. Los objetivos de imagen

admitidos son imágenes JPEG o PNG en RGB o escala de grises. El portal del desarrollador de Vuforia está disponible en el sitio web [68] y resulta útil para crear imágenes de destino personalizadas.

2.4. Internet de las Cosas (IoT) y sus plataformas

El concepto IoT se podría definir como “conectar los dispositivos a Internet y permitirles comunicarse entre ellos”, por lo que, podríamos considerar que el IoT es una red de aparatos o dispositivos electrónicos interconectados a través de Internet, que son capaces de obtener, almacenar y compartir los datos o la información que recogen sobre el entorno físico donde se encuentran con el usuario o con otros dispositivos con los que se relaciona o con grandes bases de datos locales o en la Nube para el posterior análisis o estudio de los mismos. Por tanto, se trata de convertir objetos cotidianos en fuentes de información que están conectados a la red.

El IoT fue un concepto que nació en los 70 con la idea de interconectar dispositivos, pero no fue hasta 1999 cuando, Kevin Ashton, tuvo la iniciativa y lo nombró como IoT y desde entonces el crecimiento y la expectación alrededor del término ha ido en aumento de forma exponencial. En la Figura 2-1 se puede observar la evolución del interés por el término IoT según las búsquedas en Google.



Figura 2-1 Búsquedas en Google del término IoT desde 2004 hasta hoy. El valor 100 corresponde al pico de búsquedas mundiales.

Por tanto, al IoT le queda aún un largo camino por recorrer, con más objetos interconectados en el trabajo y el hogar, más información estará fluyendo desde estos sistemas simples hacia grandes bases de datos, donde se podrán realizar correlaciones y llegar a tomar decisiones.

Para el desarrollo del sistema que pretendemos experimentar se necesita un servicio IoT en la Nube para almacenar y controlar los datos, y para ello se han considerado varias opciones: ThingSpeak, Amazon Web Service, Windows Azure, Google Cloud Plataform, Microsoft Azure y Alibaba Cloud [88]. La selección se realizó teniendo en cuenta varios items como se observa en la Tabla 2-1

Tabla 2-1 Calificación de las plataformas IoT

VARIABLE	ALMACENAMIENTO EN LA NUBE					
	AWS	AZURE	GCP	ThingSpeak	IBMC	Alibaba
Almacenamiento						
Bases de Datos	Si	Si	No	Si	Si	Si
Seguridad						
RespalDOS	Si	Si	No	Si	Si	Si
Recuperación de desastres	Si	Si	No	Si	No	Si
Autenticación y gestión de acceso.	Muy Buena	Muy Buena	Muy Buena	Muy Buena	Buena	Muy Buena
IoT						
Monitoreo	Muy Eficiente	Muy Eficiente	Muy Eficiente	Muy Eficiente	Muy Eficiente	Muy Eficiente
Administración	Eficiente	Muy Eficiente	Eficiente	Eficiente	Eficiente	Eficiente
Lenguajes de Programación Soportados	Alto	Alto	Medio	Alto	Alto	Alto
Facilidad de Programación	Baja	Baja	Baja	Alta	Media	Media
Escalabilidad y disponibilidad	Medio	Alto	Medio	Alto	Medio	Alto
Infraestructura	Alto	Medio	Medio	Alto	Alto	Alto
Almacenamiento de Aplicaciones	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Precios	Bueno	Bueno	Bueno	Muy bueno	Bueno	Bueno

Se ha analizado este conjunto de plataformas de IoT para seleccionar la que permite al sensor IoT enviar un número razonable de mensajes sin exigir un largo proceso de integración dentro del dispositivo.

A continuación, se analizan brevemente otras plataformas IoT interesantes (además de las indicadas en la Tabla 2-1):

- Kaa IoT [13] es una plataforma de código abierto y libre para IoT que soporta una variedad de dispositivos de hardware. Es una plataforma fiable y segura para desarrollar proyectos de IoT. Además, el servidor Kaa proporciona servicios como la gestión, integración y visualización de datos. Otras plataformas similares a Kaa son ThingsBoard [32], OpenIoT [33] y Thinger [35].
- Altair (carriots) [36] es una Plataforma de almacenamiento y desarrollo especializada en proyectos de IoT y máquina a máquina (M2M). Permite a los usuarios recopilar y almacenar datos de varios dispositivos y construir aplicaciones a través de su SDK. En comparación con el Kaa, el proceso de desarrollo, así como la información intercambiada entre los dispositivos y la plataforma hace necesario el uso de una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API).
- Particle [37] es un ecosistema (hardware y software) para facilitar las aplicaciones de desarrollo de cualquier proyecto IoT. Desde el punto de vista del software, proporciona eventos en tiempo real, distribución y gestión automática de firmware de OTA (*Over-The-Air*) y mensajería segura y eficiente. En comparación con Altair, permite la gestión libre de hasta 25 dispositivos que pueden enviar hasta 250.000 mensajes al mes.

Por último, hablamos de ThingSpeak [38] que es una plataforma de IoT que nos permite almacenar, analizar y visualizar los datos proporcionados por los sensores. Esta plataforma es abierta, de código libre y con una suscripción gratuita. Su código está disponible en GitHub [92] y dispone de una gran comunidad de desarrolladores dando soporte a una gran variedad de dispositivos, como Arduino, ESP8666 y otros. Esta plataforma ofrece tanto un almacenamiento en la Nube gestionado por la desarrolladora (MathWorks), como el código de su plataforma para modificarlo y ejecutarlo en servidores propios o en la Nube. Los datos

viajan desde los dispositivos a la API mediante los protocolos HTTP y Transporte de Telemetría de Cola de Mensajes (MQTT).

Para transmitir información desde los sensores a la Nube, ThingSpeak presenta el concepto de canal. Cada canal permite almacenar hasta ocho campos de datos, que pueden contener, como máximo, 255 caracteres alfanuméricos. Además, toda la información enviada a través de un canal ThingSpeak se marca con fecha y hora y se identifica con una identificación secuencial. Estos canales se pueden configurar para ser privados o públicos y también están asociados con una URL (Uniform Resource Locator) que se puede usar para incrustar un gráfico de datos en, por ejemplo, nuestra aplicación AR. Una vez creado el canal, los dispositivos electrónicos pueden enviar los datos con la información definida en el canal. Si el mensaje tiene el formato correcto, la plataforma lo almacenará y lo graficará.

ThingSpeak acelera el desarrollo de los sistemas de IoT, principalmente aquellos que requieren análisis de información, además permite crear sistemas de IoT sin apenas configurar servidores o desarrollar código. ThingSpeak ofrece una forma flexible y fácil de almacenar la información recogida por los sensores en la Nube, por lo que se ha elegido la plataforma no sólo para monitorizar los datos registrados por el sensor IoT PQ diseñado, sino también por su capacidad de operar con datos que soportan la integración del código MATLAB®. En comparación con otras plataformas, ThingSpeak requiere menos tiempo de desarrollo ya que los usuarios sólo deben utilizar una API (*Application Programming Interface*) y, en comparación con Carriots o Particle, ThingSpeak es gratuito para proyectos pequeños no comerciales (<3 millones de mensajes/año o alrededor de 8200 mensajes/día). Las ventajas mencionadas hacen de ThingSpeak la plataforma elegida para el sensor PQ desarrollado para recoger, analizar y visualizar los datos de consumo de energía eléctrica.

2.4.1. Protocolos de comunicaciones

La información recogida por el sensor IoT PQ puede ser escrita en los canales de ThingSpeak a través de dos métodos diferentes: Transferencia de Estado Representativo (REST) [47] y MQTT [48]. El primero está diseñado como un modelo de solicitud/respuesta que se comunica a través de HTTP y es aconsejable utilizarlo para recuperar grandes cantidades de datos, así como para crear, ver, borrar o eliminar un canal, o incluso cuando se necesita una respuesta a su solicitud GET o POST. Sin embargo, MQTT es un modelo de publicación/suscripción que funciona sobre sockets TCP/IP o WebSocket [48] que debe ser usado si el dispositivo que actualiza el canal tiene limitaciones de potencia, ya que la operación de publicación de MQTT es más rápida y consume menos energía. Esta es la razón principal por la que se ha elegido el método MQTT para gestionar el flujo de información de los datos registrados por el sensor IoT PQ diseñado. La Figura 2-2 muestra el modelo de publicación/suscripción del MQTT. El broker MQTT es el punto central de comunicación, que envía todos los mensajes entre el emisor y los receptores legítimos. Nuestro sensor IoT PQ es el cliente que se conecta con el broker para publicar diferentes parámetros de energía bajo diferentes temas. Alternativamente, hay otros clientes (ordenadores portátiles, teléfonos móviles, tabletas, etc.) que pueden comunicarse con el broker para suscribirse a los temas que les interesan.

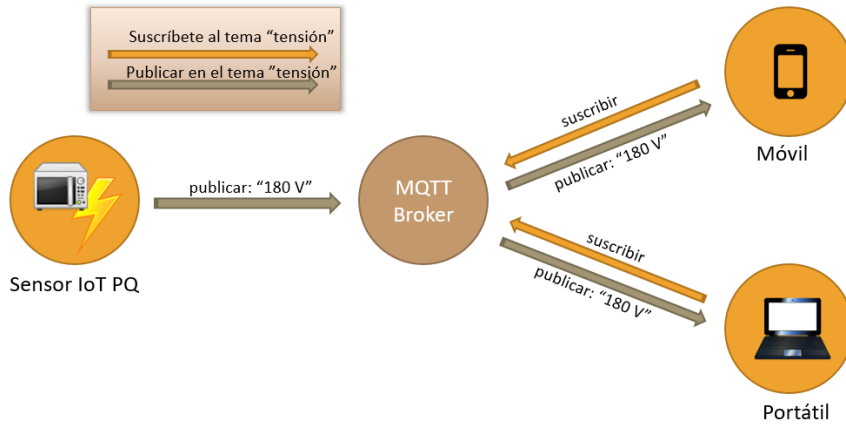


Figura 2-2. Esquema de publicación en un canal de ThinkSpeak.

3 Materiales y Métodos

Hoy en día la monitorización del consumo de energía eléctrica resulta imprescindible para poder gestionar sistemas de una forma segura y eficiente. Para poder llevar a cabo esta misión existe una amplia gama de sensores en el mercado dependiendo de las magnitudes a medir y de las prestaciones que se requieran. Con los circuitos integrados utilizados en algunos de los equipos de medición más utilizados se puede llevar a cabo esta tarea. Para ello es necesario conocer sus aplicaciones, prestaciones y limitaciones, para elegir adecuadamente aquel que satisface nuestros requerimientos.

La llegada de soluciones “hardware” asequibles al mercado ha hecho posible montar, automatizar y configurar todo un sistema de forma sencilla y eficiente. La solución que se plantea en esta tesis va encaminada justamente en esa dirección.

En términos generales, nuestro sistema de visualización con AR se compone de tres elementos principales: un conjunto de nodos o sensores encargados de recopilar información del consumo de energía eléctrica de diferentes electrodomésticos para almacenarla en la Nube; una interfaz de usuario AR compatible con un dispositivo como un teléfono o gafas inteligentes, a través del cual se puede acceder a la información recopilada por los sensores; y, finalmente, un marcador o imagen objetivo AR que permite vincular la información con un punto físico de forma dinámica. La combinación de estos tres elementos permite crear una aplicación que es mucho más intuitiva que las tradicionales para mostrar información sobre el consumo de energía eléctrica.

La Figura 3-1 muestra la arquitectura general de nuestro sistema de AR para monitorizar los parámetros de energía. Los componentes de esta plataforma son un sensor IoT PQ capaz de medir tensión, potencia activa, corriente, potencia aparente y otros parámetros eléctricos importantes; un subsistema de comunicación encargado del intercambio de datos entre el sensor y la plataforma en Internet, y entre la plataforma y el dispositivo AR. La plataforma de internet es un servidor, responsable del análisis y el almacenamiento de los datos recopilados por el medidor inteligente.

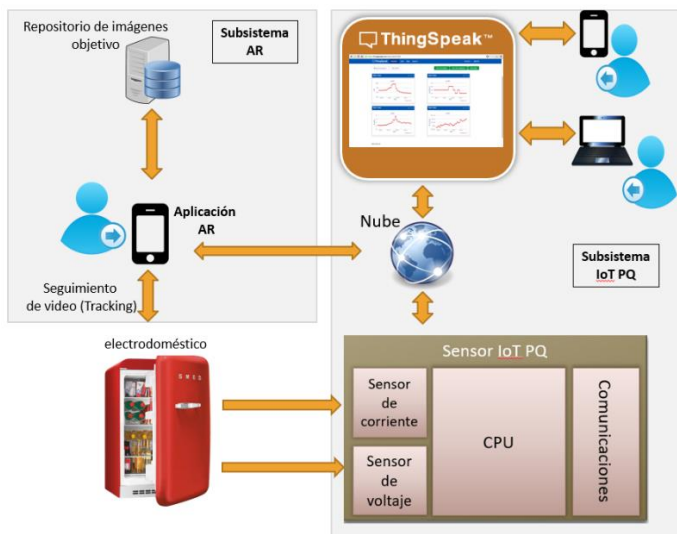


Figura 3-1 Arquitectura general de la aplicación de AR para monitorizar consumo de energía eléctrica.

A su vez, el subsistema IoT se compone principalmente de dos partes. Por un lado, la fuente de datos encargada de generar y proporcionar la información de interés (en nuestro caso, el sensor IoT PQ) y, por otro lado, los componentes software (Nube, análisis de datos, etc.) encargados de almacenar y mostrar al usuario final esta información.

Para contextualizar la integración del sensor inteligente PQ IoT en esta arquitectura, se va a describir primero desde el punto de vista del hardware y, posteriormente, desde el punto de vista del software. La Figura 3-1 muestra la arquitectura general del Sistema IoT, con el procedimiento completo seguido por el sensor IoT PQ implementado: desde que el sensor mide los parámetros eléctricos del electrodoméstico, hasta que se almacena en la base de datos en la Nube donde estarán disponibles para analizarlos y/o mostrarlos mediante AR. En comparación, en la Figura 3-17 se muestra la arquitectura completa con el sensor IoT, la Nube con el almacenamiento de datos, la aplicación AR integrada en un dispositivo móvil y los marcadores o imágenes objetivo, a través de las cuales, se podrá acceder a los datos de consumo de energía eléctrica del electrodoméstico.

3.1. Componentes hardware

Esta sección presenta el prototipo del dispositivo de medición de energía inteligente. El dispositivo hardware principal es una placa electrónica que funciona como sensor IoT PQ.

Este sensor [67] es un diseño propio que proporciona información relacionada con PQ y el consumo de energía eléctrica sobre un electrodoméstico de una instalación. Dicho sensor IoT PQ se utiliza para proporcionar información sobre tensión, corriente, potencia activa, potencia aparente y otros parámetros eléctricos de interés.

El sensor inteligente propuesto puede instalarse de forma no intrusiva en un electrodoméstico, dentro de un edificio y es capaz de subir los datos recogidos a la plataforma

en la Nube de IoT. Este sensor se basa en la tecnología ATmega, que procesa los datos adquiridos y los prepara para subirlos a la Nube. Incluye el Circuito Integrado (CI) ADE7758 para medir los parámetros de calidad de la energía de acuerdo con la norma IEC 61000-4-30, un contador en tiempo real (RTC) con información precisa sobre el tiempo, así como un módulo Wi-Fi ESP8266 para enviar datos a la Nube. Para visualizar los datos grabados, se puede utilizar un dispositivo móvil como un smartphone o una tablet.

Centrándose en el propio dispositivo del sensor IoT PQ, mide el voltaje y la corriente RMS, la potencia activa y aparente, la energía activa y aparente, así como los huecos de tensión en un sistema de distribución trifásico. La Figura 3-2 muestra el diagrama de bloques de los componentes del prototipo de medición y monitorización de PQ. Este sistema, basado en el concepto de IoT, incorpora en su construcción los siguientes componentes: microcontrolador ATmega328P (MCU), el CI ADE7758, y el módulo Wi-Fi ESP8266. Para alimentar el sistema se necesitan una fuente de alimentación dual de 5 V y 9 V (uno para cada chip). Se añade un periférico RTC al MCU para obtener la marca de tiempo. Por último, se necesita un circuito de acondicionamiento de señal en la entrada de tensión del convertidor analógico/digital (ADC) del ADE7758.

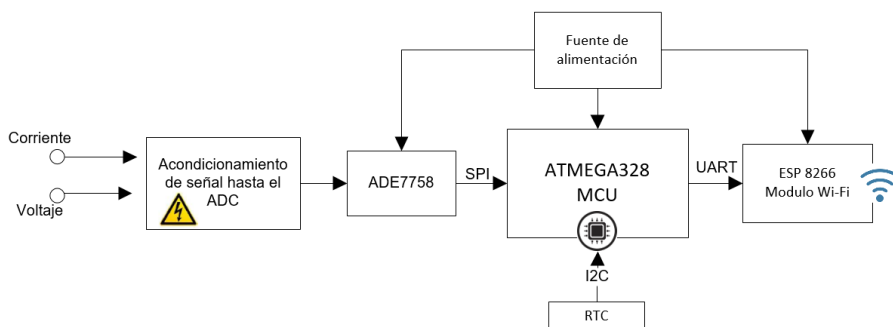


Figura 3-2. Diagrama de bloques de interfaz hardware para el prototipo de sensor PQ IoT.

El ATmega328P-PU es un microcontrolador de bajo consumo de un solo chip de 8 bits basado en RISC mejorado que posee una memoria Flash ISP de 32 kB con capacidad de lectura/escritura, 1 kB EEPROM, 2 kB SRAM, 23 líneas de E/S, 32 registros de trabajo y un receptor-transmisor universal síncrono y asíncrono programable en serie (USART). Se pueden encontrar más características en [40]. Este microcontrolador, diseñado específicamente para la automatización de casas y edificios, gestiona este económico y flexible medidor PQ permitiendo la comunicación entre el chip multifunción CI ADE7758 [41] para la medición de energía y el chip Wi-Fi ESP8266 [42]. La marca de tiempo, una parte crítica en un dispositivo de medición se ha abordado con el uso de un periférico RTC (DS1307ZN) [43] comunicado con el ATmega328P a través del bus I2C. Por último, el prototipo incluye el módulo Wi-Fi ESP8266, que es un chip Wi-Fi de bajo costo con TCP/IP y MCU [42]. El módulo ESP8266 se seleccionó debido a la reciente popularidad en la investigación de prototipos de IoT y a su coste asequible.

La parte más destacada de este nuevo prototipo es el CI ADE7758 [41] que representa el corazón del diseño. Este medidor de energía multifunción tiene un canal de tensión y un canal de corriente diferencial. El valor de la tensión se lleva hasta el ADC, y con la configuración apropiada, el chip detecta el cruce por cero, dando varios parámetros de PQ a través de diferentes registros internos. Por otro lado, el canal de corriente diferencial adapta sus niveles

de corriente de fase a una tensión diferencial proporcional medida por el ADC para este propósito. Los niveles de tensión diferencial pueden configurarse en función de los requisitos del equipo que se vaya a medir. En cuanto a los parámetros que mide, los seleccionados son la tensión y corriente RMS, la duración de los huecos de tensión, la tensión RMS mínima del hueco, la potencia activa, aparente y la energía activa y aparente. Además, lo que es más interesante para la aplicación, la medición de la marca de tiempo que muestra exactamente el momento en que se realiza la medición. Este chip y el ATmega328P se comunican a través de la Interfaz Periférica Serial (SPI) [44].

El CI ADE7758 requiere un circuito acondicionador de señal en la entrada de tensión para las mediciones de tensión y corriente. Los sensores de tensión y corriente se describen a continuación desde el punto de vista del hardware.

3.1.1. Sensor de tensión

El sensor de tensión usado siguiendo las recomendaciones del fabricante [41] se muestra en la Figura 3-3. En el terminal de este circuito, el nivel de V_A es de $\pm 0,5$ V cuando la tensión de fase es de ± 500 V ($353,55$ Vrms). En esta aplicación, el nivel de tensión de entrada debe ser ajustado, ya que la tensión nominal de fase en Europa es de 230 VRMS (considerando una onda sinusoidal ideal a 50 Hz) y el pico de tensión es, aproximadamente, 325 V, por lo que el nivel V_A es de ± 0.325 V.

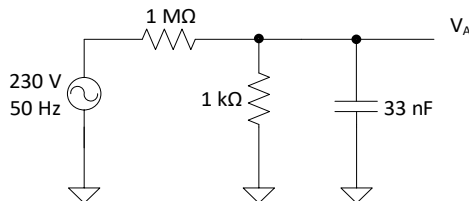


Figura 3-3. Circuito de acondicionamiento de la señal de tensión al ADC.

3.1.2. Sensor de corriente

El circuito de acondicionamiento de corriente se ha implementado siguiendo las recomendaciones del fabricante [41] y se muestra en la Figura 3-4. El cable de fase activa pasa a través de un transformador de corriente (CT) con una relación de transformación de 1:1000. La corriente que se ve en el secundario del transformador depende de la resistencia de carga (R_L) utilizada para medir una tensión proporcional a la corriente de este circuito secundario. Por lo tanto, es importante un diseño adecuado de esta resistencia para tener un rango de corriente apropiado en el circuito medido. El rango de corriente de entrada está limitado debido a las limitaciones funcionales del prototipo.

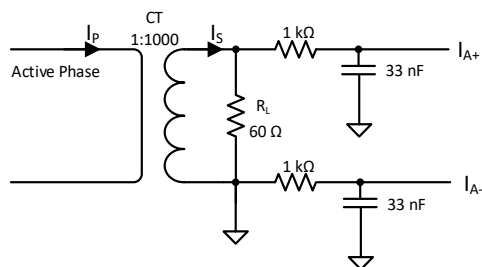


Figura 3-4 Circuito de acondicionamiento de la señal a la corriente ADC.

El circuito de adaptación resistencia-condensador en cada nodo de la entrada analógica diferencial se utiliza como filtro antialiasing, filtrando las frecuencias por encima de la frecuencia de muestreo en la entrada del ADC.

3.1.3. Calibración

Los circuitos de acondicionamiento para las mediciones de tensión y corriente se calibraron en el prototipo de sensor PQ teniendo en cuenta las condiciones en estado estable. El sistema de medición completo y los circuitos de acondicionamiento se calibraron para la verificación del algoritmo de medida de tensión y corriente. El equipo utilizado para estas pruebas de calibración estaba compuesto por un sistema de alimentación programable de CA, una carga activa programable y el sensor PQ conectado a la salida del sistema de alimentación. El sistema de alimentación programable de CA, California Instruments 3001iX [45], integra un analizador de red de transitorios y también puede realizar varias pruebas de PQ estandarizadas como huecos de tensión. La carga activa programable, California Instruments 3091LD [45], proporciona cargas no lineales controladas con precisión para probar los equipos de generación de energía de CA. Por lo tanto, utilizando diferentes niveles de tensión y corriente, se determinó la calidad del sistema de medición en un amplio rango dinámico, así como la estabilidad de diferentes condiciones de generación de señales. Para este objetivo se diseñó un programa que se ejecutó localmente en el dispositivo medidor IoT PQ. La Tabla 3-1 muestra una prueba de calibración del sistema de medición de tensión en la que la carga electrónica se configuró como una carga resistiva (corriente constante) y conectada a una onda sinusoidal pura, consiguiendo la unidad de Factor de Potencia requerida por la carga probada.

Tabla 3-1. Resultados de la calibración de la tensión.

Valor de referencia (V)	RMS antes de la calibración ()	% Desviación	RMS después de la calibración (V)	% Desviación
230	230,3	0,13	230,05	0,02
50	50,2	0,30	50,06	0,11

Las cifras típicas de tolerancia de los componentes utilizados en el medidor son del 5%, lo que significa que el medidor que se ha construido tiene un error inherente de la misma magnitud. Por lo tanto, cada sensor debe ser calibrado antes de que se puedan medir resultados precisos. En este caso, la calibración de la tensión y la corriente se ha hecho utilizando dos puntos de calibración para cada parámetro como se recomienda en la hoja de datos del CI [41]. Los resultados se muestran en las Tablas 3.1 y 3.2. Después de las pruebas

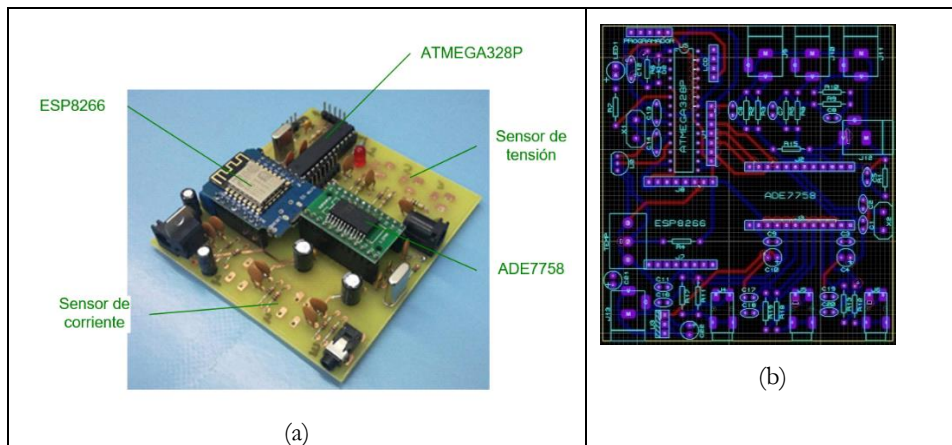
de calibración se alcanzó una desviación máxima de 0,11% para las mediciones de tensión y 0,26% para las de corriente.

Tabla 3-2. Resultados de la calibración de la corriente.

Valor de referencia (A)	RMS antes de la calibración (A)	% Desviación	RMS después de la calibración (A)	% Desviación
2,95	2,9811	1,06	2,9521	0,07
0,05	0,0504	0,84	0,0501	0,26

3.1.4. Prototipo final

Por último, a nivel de hardware, el dispositivo se implementó utilizando técnicas de Placa de Circuito Impreso (PCB). La Figura 3-5 (a) muestra el prototipo final implementado y en la (b) tanto la serigrafía como el enrutamiento de la placa. En la placa se puede observar el microcontrolador ATmega con su circuito de acondicionamiento, así como el módulo wifi ESP8266. En color verde se puede observar el circuito integrado (CI) ADE 7758 y los circuitos de acondicionamiento de tensión y corriente descritos.



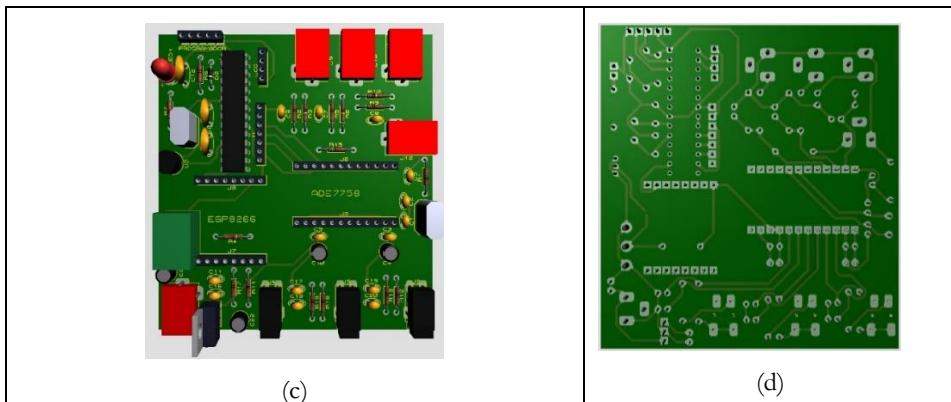


Figura 3-5. (a) Prototipo de placa de sensor de IoT PQ desarrollado. (b) Diseño y enrutamiento de placa de circuito impreso (PCB). Vista superior (c) e inferior (d) del ensamblado de la PCB

3.2. Comunicaciones

Una vez obtenidos todos los parámetros del consumo de energía eléctrica, procesados y preparados por el Atmega328p (MCU), debemos enviarlos al Módulo ESP8266 para que los suba, a través de la wifi, a los servicios de la Nube para almacenarlos.

El ESP8266 se utiliza como un adaptador Wi-Fi con antena incorporada para proporcionar capacidades Wi-Fi a la MCU. Este módulo es un SoC (*system on a chip*) autónomo que incluye una pila del protocolo TCP/IP integrada que puede dar al microcontrolador ATmega328 acceso a una red Wi-Fi [42]. Este módulo soporta el protocolo 802.11 b/g/n y tiene Wi-Fi directo junto con la capacidad de un punto de acceso habilitado por software. Es un dispositivo de bajo consumo diseñado específicamente para dispositivos móviles, electrónica portátil y aplicaciones de red. Para la comunicación con el módulo se utilizan estándares de comunicación como el SPI y el receptor-transmisor asíncrono universal (UART). Este módulo Wi-Fi también es muy económico, por lo que es ideal para utilizarlo e implementarlo a gran escala. El ESP8266 se configuró para enviar continuamente los datos recogidos por el sensor IoT a la plataforma en la Nube de código abierto seleccionada a través del módulo Wi-Fi.

La comunicación del MCU con el módulo Wi-Fi se realiza mediante el puerto serie como se puede ver en la Figura 3-6.

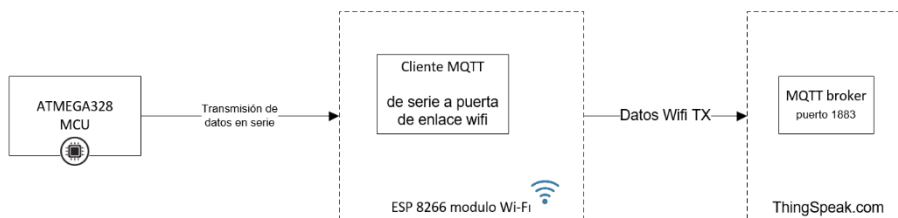


Figura 3-6 Esquema de la pasarela entre el microcontrolador y la Nube

Para conectar el dispositivo ESP8266 a la red Wi-Fi se utilizó WiFiManager [89], que es una librería software que permite gestionar las conexiones Wi-Fi del ESP8266 mediante un portal web accesible desde cualquier dispositivo, como ordenadores, móviles o tabletas.

El servicio de enlace Wi-Fi decodifica los datos recibidos del MCU ATMEGA328 y los publica en el servidor de IoT ThingSpeak utilizando el protocolo MQTT como se explicó en el apartado 2.4.1. Los datos de energía consumida se medirán y publicarán en ThingSpeak cada 15 segundos.

3.3. Componentes software

En este apartado se describen los componentes software (Nube, análisis de datos, etc.) encargados de almacenar y mostrar al usuario final esta información.

La novedad de esta tesis es la capacidad de medir y enviar datos agregados de PQ a la Nube, así como procesar los datos y comprobar el cumplimiento de la norma. El punto importante aquí es que esta información es accesible por cualquier dispositivo que tenga una conexión a Internet y un motor de búsqueda. Un teléfono móvil puede acceder a todos los datos, sin necesidad de ninguna configuración o aplicación adicional, pero hay varias aplicaciones gratuitas con una interfaz amigable que pueden utilizarse si el usuario prefiere una forma más rápida de acceder a la plataforma.

Como se muestra en la arquitectura del sistema (Figura 3-1), una parte fundamental es la plataforma de software IoT utilizada para almacenar la información obtenida por el sensor PQ. La plataforma en la Nube IoT [38] ofrece una forma de almacenar la información recopilada por los sensores permitiendo acceder a ella desde cualquier lugar en tiempo casi real.

A la hora de seleccionar una plataforma IoT resulta importante valorar que tenga una API que nos permitirá consultar, modificar y borrar la información desde otros dispositivos.

Para esta tesis, se seleccionó ThingSpeak como plataforma en la Nube del sistema AR desarrollado. ThingSpeak ofrece todas las características de una plataforma de IoT Cloud: almacenamiento, acceso remoto, análisis de datos, interfaz amigable, etc.

Por tanto, los datos recopilados por el sistema de medición se almacenan en un canal de la plataforma ThingSpeak, que cuenta con varios campos de datos. (ver Figura 3-7)

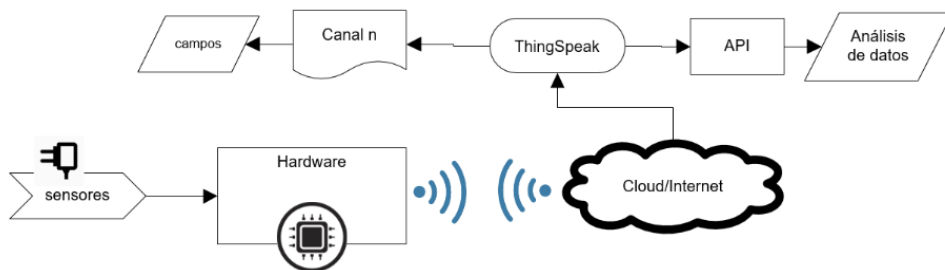


Figura 3-7 Canal en Thingspeak donde se almacenan los datos

En el sensor IoT PQ desarrollado se ha creado un canal público para almacenar seis variables de energía (VRMS, IRMS, Potencia Activa, Potencia Aparente, Energía Activa y Energía Aparente) que se obtienen tras analizar la información recibida de los sensores de corriente y tensión. Además, se utilizan otros dos campos para controlar la información cuando se produce un hueco de tensión, uno de ellos contiene de forma codificada la información conjunta del VRMS mínimo y la duración del evento, y el otro campo y más determinístico, el tiempo de inicio del evento, es decir, la marca de tiempo ofrecida por el RTC. Como ThingSpeak no es una plataforma en tiempo real, el instante exacto se proporciona al sistema en la Nube con esta variable adicional.

Hay una limitación de datos en la versión de ThingSpeak que se utiliza en esta tesis, lo que significa que sólo se puede cargar un dato cada 15 s, por lo que el compromiso que se sigue aquí es enviar tanto el VRMS como el IRMS cada 15 s. Sin embargo, el uso de otra plataforma de IoT de las anteriormente descritas, permitirá cargar los datos en una escala de tiempo más corta, si así lo requiere la aplicación.

3.4 Método para la implementación de la medida de la calidad de la energía

El prototipo de sensor diseñado para IoT puede medir datos de PQ como corriente y tensión RMS, así como eventos como huecos de tensión. También se mide la potencia y energía activa y aparentes, ya que puede ayudar a identificar no sólo la presencia de cargas inductivas de los compresores y motores de los aparatos, sino también las cada vez más abundantes cargas no lineales, que pueden introducir desequilibrios de fase y aumentar el contenido de armónicos perturbadores en la línea eléctrica. La información de PQ es importante para conocer el origen y determinar las responsabilidades del operador de la red, el fabricante del aparato o el cliente final. Todos esos datos se cargan en la Nube, y se accede a ellos a través de cualquier dispositivo electrónico con conexión a Internet, como se ha indicado anteriormente, y se describirá más detalladamente en la sección Resultados.

En los dispositivos de recursos limitados es importante aplicar técnicas de agregación de datos para reducir la cantidad de datos transmitidos, lo que implica, por un lado, la reducción del consumo de energía del dispositivo y, por otro, la subida a la Nube sólo de la información relevante. El intervalo de frecuencia de medición es configurable por software y depende de la relación de carga de datos dada por la plataforma de la Nube, en este caso es de 15 s. El valor RMS almacenado calculado por el sensor PQ IoT es el promedio de los valores de entrada entre dos subidas consecutivas a la plataforma en la Nube, por ejemplo, si transcurren 15 s entre dos envíos consecutivos, la medición de la tensión y la corriente RMS será un promedio de ciclo a ciclo en este período, y luego se agregará dentro del intervalo considerado.

3.4.1 RMS

La medición de los valores RMS de tensión y corriente se realiza en el ATmega328P, leyendo el registro interno del Circuito Integrado (CI) ADE7758 a una frecuencia de muestreo constante, y siguiendo el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 3-8. De acuerdo con las recomendaciones del fabricante, y para asegurar la estabilidad en el procedimiento de medición, la medición RMS se sincroniza con el cruce por cero a positivo de tensión detectado por una solicitud de interrupción (el cruce por cero en el canal de tensión de la fase A -bandera ZXA- se establece en el registro de estado de reinicio -RSTATUS-), siguiendo la norma IEC

61000-4-30. Por lo tanto, cuando se produce un cruce por cero, la medición de corriente y tensión RMS corresponde al ciclo de línea anterior.

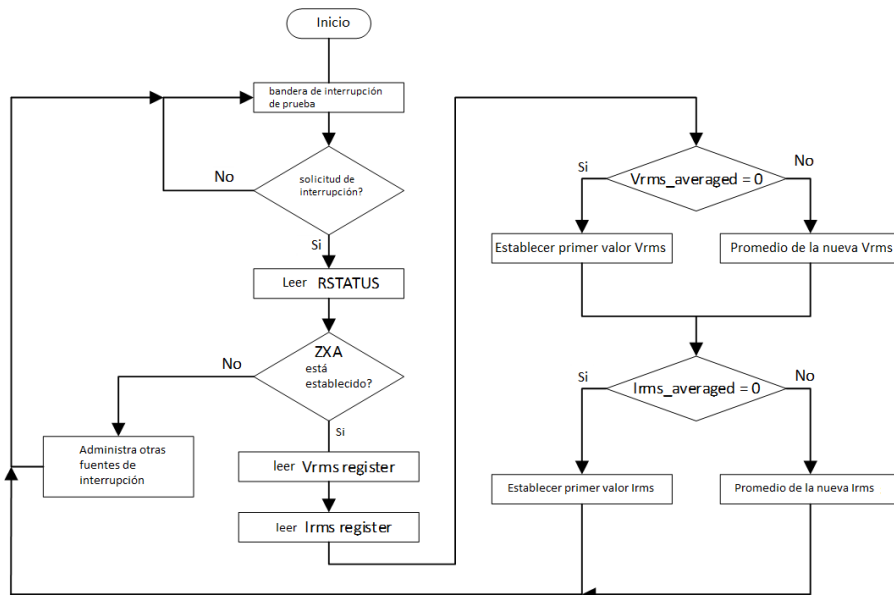


Figura 3-8 Proceso de lectura del RMS implementado en la MCU.

Como se ha dicho anteriormente, el MCU se comunica con el CI con comunicación de bus SPI. La comunicación se inicia cuando el indicador de cruce por cero se establece en el registro RSTATUS. La Figura 3-9 contiene en el canal 4 una lectura del registro VRMS (0x0D), y la petición vista en la línea MOSI (Salida del Maestro, Entrada al Esclavo.) La línea MISO (Entrada al Maestro Salida del Esclavo) corresponde a la lectura del VRMS, en este caso, 228,4 VRMS. La entrada de reloj en serie para la interfaz serie síncrona (SCLK) está configurada a 4 kHz.

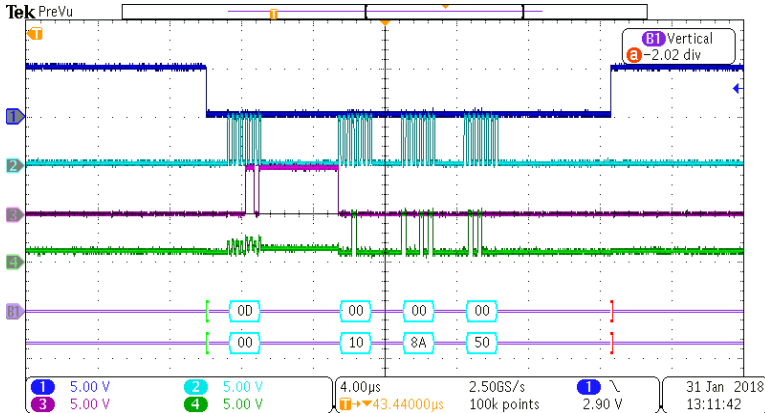


Figura 3-9 Comunicación entre el CI ADE7758 y ATmega328P cuando se lee el registro VRMS (Ch1. CS, Ch2. SCLK, Ch3. MOSI, Ch4. MISO).

3.4.2 Potencia

Para poder calcular la potencia activa y aparente, el ADE7758 cuenta con una serie de registros para su almacenamiento, ya que este chip, realiza internamente la integración de la señal de potencia activa. La señal de potencia instantánea se genera multiplicando las señales de tensión y corriente.

La potencia se va acumulando de forma continua en un registro interno de 40 bits. Este registro, llamado WATTHR, representa los 16 bits más significativos de los registros internos de energía, que es el que finalmente se lee para tomar las mediciones de energía.

En la Figura 3-10 se observa el esquema del proceso del cálculo de la potencia en el ADE7758, donde se realiza la multiplicación de las señales de tensión y corriente eléctrica, la señal resultante se hace pasar por un filtro pasa baja de tal manera que se conserva una señal en corriente continua que es equivalente al valor de la potencia activa consumida, el resultado obtenido es guardado en AWATTHR.

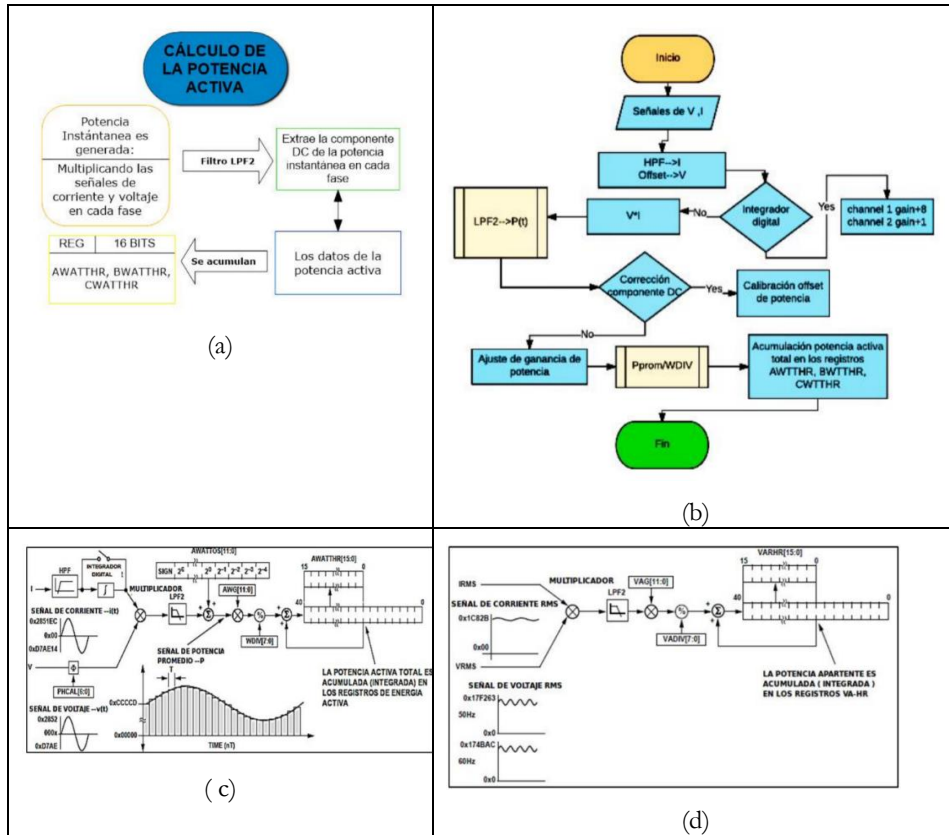


Figura 3-10 (a) Cálculo de la potencia activa. (b) Diagrama de flujo. (c) Proceso para la acumulación de la potencia activa. (d) Proceso para la acumulación de la potencia aparente.

Como se puede observar, la media de la señal de potencia activa se añade continuamente al registro interno de energía.

Para el cálculo de la Potencia Aparente, el ADE7758 usa el método de aproximación aritmética, Figura 3-10 (d). Se multiplican los valores eficaces de la tensión y la corriente para obtener la potencia aparente. La salida del multiplicador pasa por un filtro pasa bajo y se obtiene la potencia aparente promedio que es almacenada en el registro VARHR.

3.4.3 Energía

Siguiendo la misma metodología de trabajo que en el caso del RMS, el prototipo diseñado se calibró para medir la energía activa y aparente. El MCU se programó para acceder al CI ADE7758 [41], que tiene varios registros para calcular la energía consumida. La energía se calcula integrando la potencia instantánea (activa o aparente) de la fase a medir. El factor de integración de la energía es programable, por lo que al finalizar esta integración se dispara una petición de interrupción (bandera de acumulación de energía en línea (LEENERGY) en el registro RSTATUS) en el CI y se accede al registro que contiene la energía acumulada (ver

diagrama de flujo de la Figura 3-11). Se programa la resolución del contador de energía en Wh/LSB (vatios-hora por bit menos significativo) para cada incremento del contador de energía, y en este caso concreto, representa un valor de 0,00906997 mWh/LSB en el registro de acumulación. El MCU extrae la medición actualizando la energía activa y aparente consumida desde el inicio de la medición, añadiendo la última energía calculada por integración. La energía activa acumulada se encuentra en el registro de acumulación vatios-hora (WATTHR) y la energía aparente en el registro de acumulación VA-hora (VAHR).

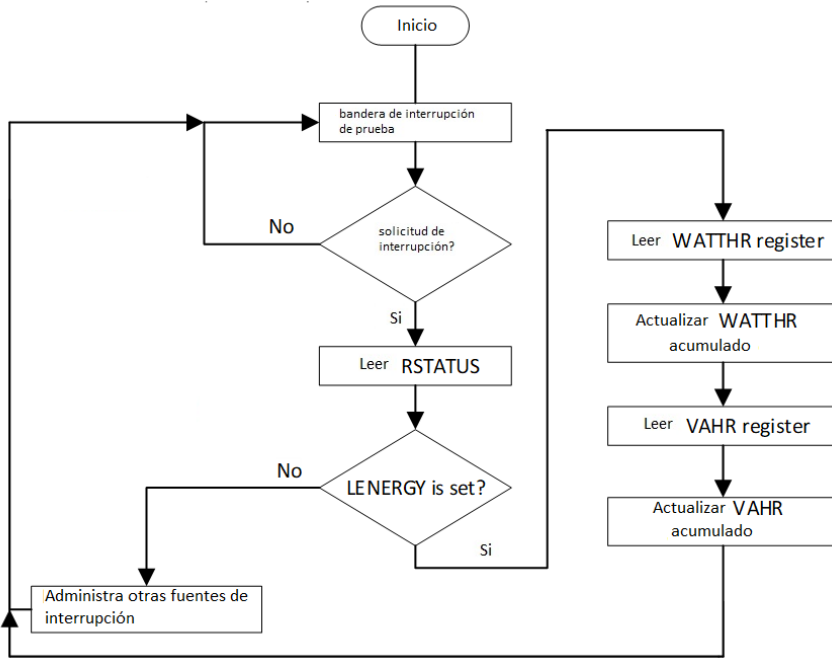


Figura 3-11 Proceso de medición de energía implementado en la MCU.

3.4.4 Huecos de tensión

El diagrama de flujo seguido por el software para la medida de huecos de tensión implementado en la MCU se muestra en la Figura 3-12. La solicitud de interrupción se comprueba continuamente. Si se detecta una solicitud de interrupción, el MCU lee el registro RSTATUS en el CI ADE7758 a través del puerto SPI, y el proceso continúa si se activa la bandera de interrupción *sag* (hueco). Si eso ocurre, el primer paso es leer el VRMS del hueco de tensión, actualizando aún más el valor mínimo guardado si la última lectura contiene un valor RMS más pequeño. Siempre que se produce un hueco por primera vez se guarda la hora de inicio (con una resolución de 1 s obtenida del periférico RTC). Como la resolución mínima en el CI es de 20 ms (1 ciclo en el sistema de 50 Hz), la siguiente vez que se detecta la solicitud de interrupción, la duración del hueco aumenta en 20 ms, y lo mismo ocurre con las siguientes detecciones. En la Figura 3-12 se muestra una explicación más detallada de las detecciones consecutivas. En la Figura 3-13 se muestra la secuencia temporal de una detección de un hueco de tensión.

Por lo tanto, los huecos de tensión se monitorizan y se clasifican según la curva SEMI F-47.

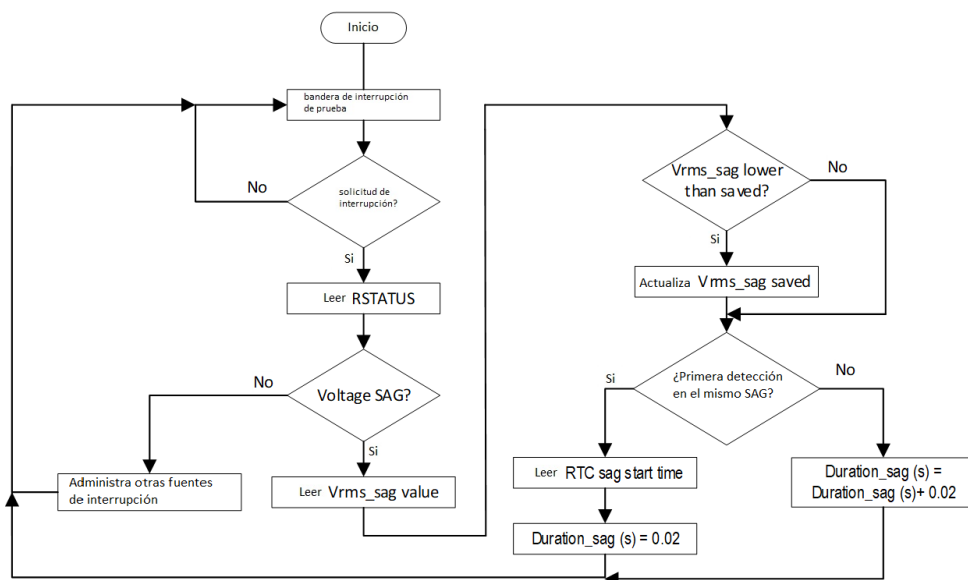


Figura 3-12. Proceso de detección de huecos de tensión implementado en la MCU.

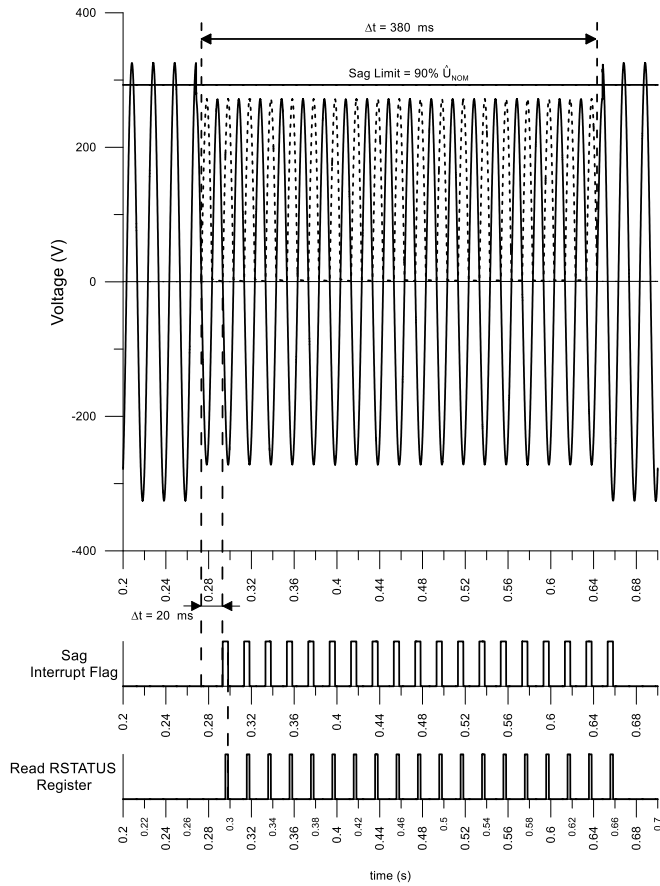


Figura 3-13. Secuencia de tiempo en un proceso de detección de huecos de tensión.

En este caso, la comunicación se inicia cuando el indicador de interrupción de caída se establece en el registro RSTATUS. La Figura 3-14 contiene una lectura del registro VRMS (0x0D), petición vista en la línea MOSI. La línea MISO corresponde a la lectura del VRMS, en este caso, 192,52 VRMS.

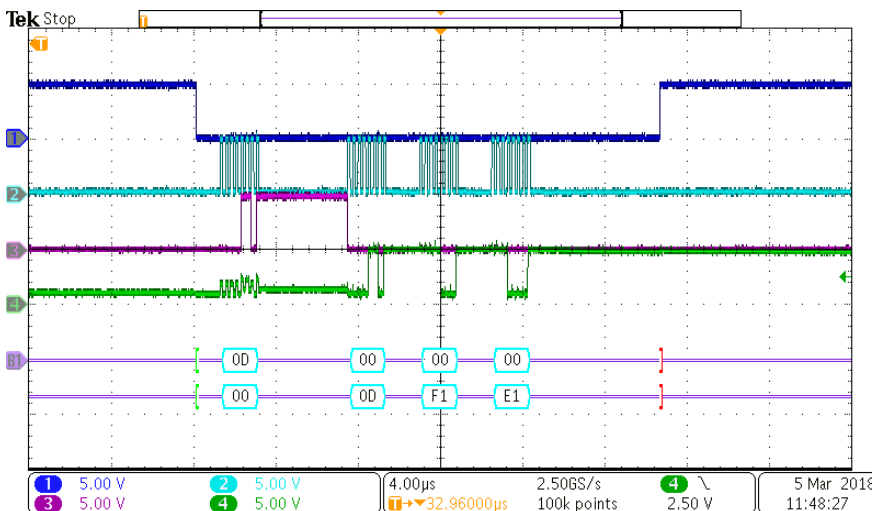


Figura 3-14. Comunicación entre el CI ADE7758 y ATmega328P cuando se lee el registro VRMS (Ch1. CS, Ch2. SCLK, Ch3. MOSI, Ch4. MISO).

3.5 Método de visualización de consumo de energía eléctrica con Realidad Aumentada: Unity y Vuforia

Como hemos dicho, vuforia es un conjunto de herramientas que se utilizan para desarrollar aplicaciones de AR y la razón para elegirla en lugar de ARToolkit u otros kits de desarrollo fue, entre otras, la simplicidad y la eficiencia del software, la potencia en el reconocimiento de las imágenes objetivo usadas como marcadores, la posibilidad de integración con el entorno de desarrollo Unity que nos facilitaba representar los datos de consumo de energía eléctrica.

Gracias a Vuforia conseguimos solucionar el reto del reconocimiento de imagen basado en el seguimiento (tracking) de la imagen, y con Unity pudimos integrar el contenido real con la información virtual que queríamos representar.

Como hemos dicho, Vuforia trabaja en torno al concepto de *Image Target (imagen objetivo)*, que son imágenes preseleccionadas que el motor de Vuforia (Vuforia Engine) puede detectar y rastrear (ver Figura 3-15 a). Para llevar a cabo este proceso, Vuforia no utiliza marcadores tradicionales como códigos QR o similares, y tampoco se necesita que las imágenes objetivo utilizadas posean zonas o regiones especiales para ser reconocidas; sino que, Vuforia detecta y rastrea las características que se encuentran naturalmente en la imagen en sí (vea los puntos amarillos en la Figura 3-15 b) comparándolas con una base de datos de imágenes objetivo conocida. Una vez que el sistema identifica una imagen objetivo, se rastrea hasta que desaparece del campo visual de la cámara. Esta imagen se utiliza como base para superponer la información de interés; en nuestro caso, la información energética obtenida por el sensor IoT PQ.

En nuestro caso, Unity se usó como la infraestructura base para desarrollar la aplicación de nuestro sistema AR. En otras palabras, Unity nos ayuda a desarrollar la aplicación de AR y a diseñar interfaces gráficas atractivas e intuitivas para monitorear los valores del sensor IoT PQ a través del concepto de objetos de Unity (ver Figura 3-15 c). Estos objetos (elementos 3D o 2D) están asociados con la imagen objetivo y se muestran en la pantalla cada vez que la

aplicación detecta el marcador asociado (ver Figura 3-15 d). En resumen, la imagen objetivo es la imagen asociada con la parte del mundo real en la que se superpondrá la información virtual, y los objetos de Unity son los elementos virtuales (texto, objetos 3D, etc.) superpuestos en la imagen objetivo.

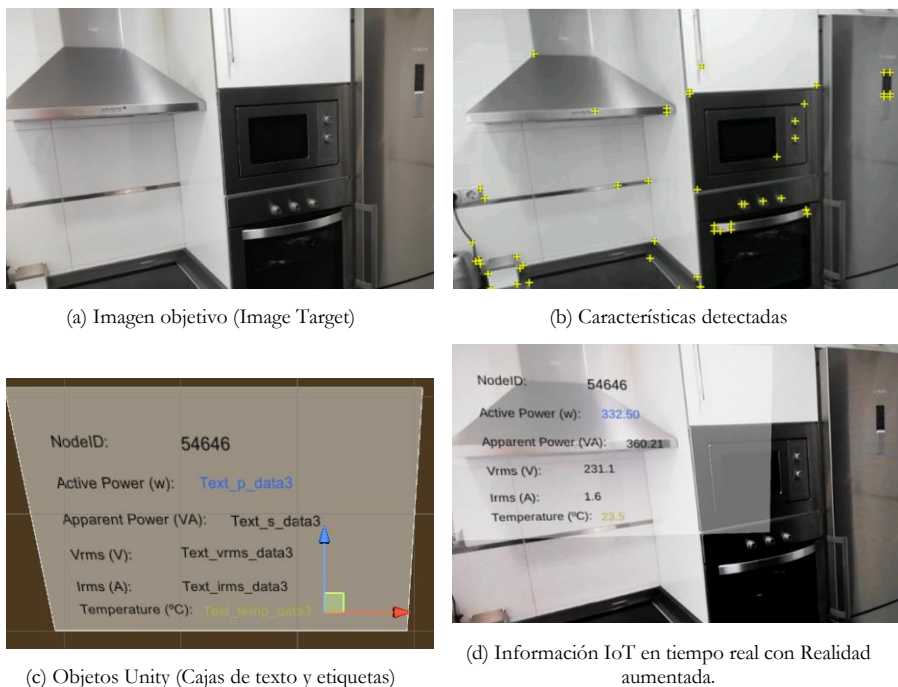


Figura 3-15. Conceptos sobre Vuforia y Unity.

Por todas estas razones, para desplegar esta infraestructura PQ AR, se seleccionó esta combinación de las tecnologías Unity y Vuforia.

3.5.1 Entrenamiento y reconocimiento de imágenes objetivo

El objetivo principal de esta aplicación de AR es presentar datos de mediciones de consumo de energía eléctrica cuando un electrodoméstico está a la vista de la cámara de un teléfono inteligente o tableta. De esta manera, el usuario puede ver en la pantalla un objeto virtual que contiene las últimas mediciones de PQ (obtenidas por el sensor IoT PQ) superpuestas en el marco asociado a la imagen objetivo en el entorno real.

Este tipo de aplicación tiene, básicamente, dos partes importantes inevitables: entrenamiento y reconocimiento. Durante la primera parte, el sistema aprende qué imágenes u objetos 3D deben reconocerse, y durante la segunda, el sistema debe reconocer dichos objetos a través de una cámara para mostrar la información de consumo de energía.

Para comenzar, es necesario cargar la imagen objetivo que la aplicación debe reconocer en el entorno real para combinarlo con la información de consumo energético. Esto se lleva a cabo a través del Vuforia Target Manager, una herramienta web que nos permite crear y administrar bases de datos de objetivos y muestra la imagen objetivo y sus puntos de características identificados por los algoritmos de detección. Estas características se representan con puntos amarillos (ver Figura 3-16), que se comparan, en tiempo de ejecución, con las características de la imagen captada por la cámara. Para saber si la imagen objetivo se puede identificar fácilmente, el administrador de objetivos de Vuforia asigna a esta imagen una calificación de estrellas (entre 1 y 5 estrellas). Cuanto mayor sea la calificación de estrellas mejor será la identificación. La Figura 3-16 muestra la imagen objetivo de una cocina con un alto grado de detectabilidad (4 estrellas).

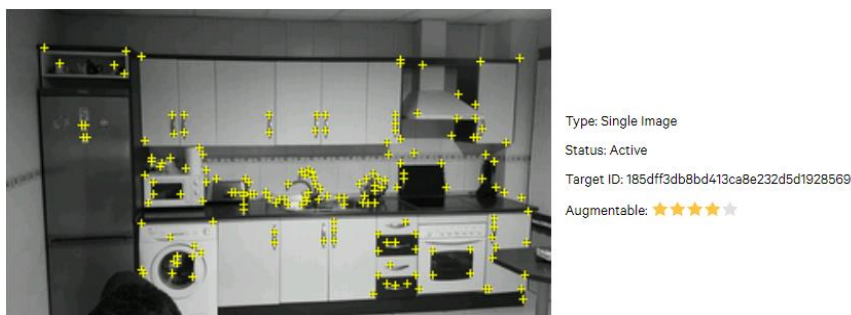


Figura 3-16. Imagen objetivo de una cocina y sus puntos característicos.

El rastreo (*tracking*) es el término usado para referirse al constante seguimiento o monitoreo de la escena real en busca de alguna imagen objetivo. Si los objetos virtuales aparecen deformados o en planos equivocados se le conoce como Localización del rastreo (*Location tracking*) o Simple Rastreo (*Simply Tracking*). El primer caso se produce por la mala transformación de coordenadas de la imagen objetivo respecto a la cámara, y el segundo caso por la mala clasificación de los patrones. Por lo tanto, las imágenes objetivo deben contener información suficiente para clasificar sus patrones en esta etapa de entrenamiento.

Las imágenes objetivo se pueden almacenar en bases de datos locales y en la Nube. Se recomienda la base de datos local cuando el conjunto de imágenes es inferior a 100, donde la base de datos se almacena junto con la aplicación en los dispositivos móviles. Por supuesto, esta solución identificará los objetivos de la imagen mucho más rápido. Sin embargo, si se deben identificar miles de imágenes objetivo, se necesita la solución de base de datos en la Nube. En este caso, las imágenes objetivo se almacenarán en el servicio Vuforia Cloud Recognition.

3.5.2 Flujo de trabajo de la aplicación AR

Una vez que se ha escaneado todo el escenario de interés (*tracking*) y se ha localizado alguna imagen objetivo, el sistema está listo para superponer la información virtual del consumo de energía. Todo el flujo de trabajo se describe a través del diagrama de flujo que se muestra en la Figura 3-17.

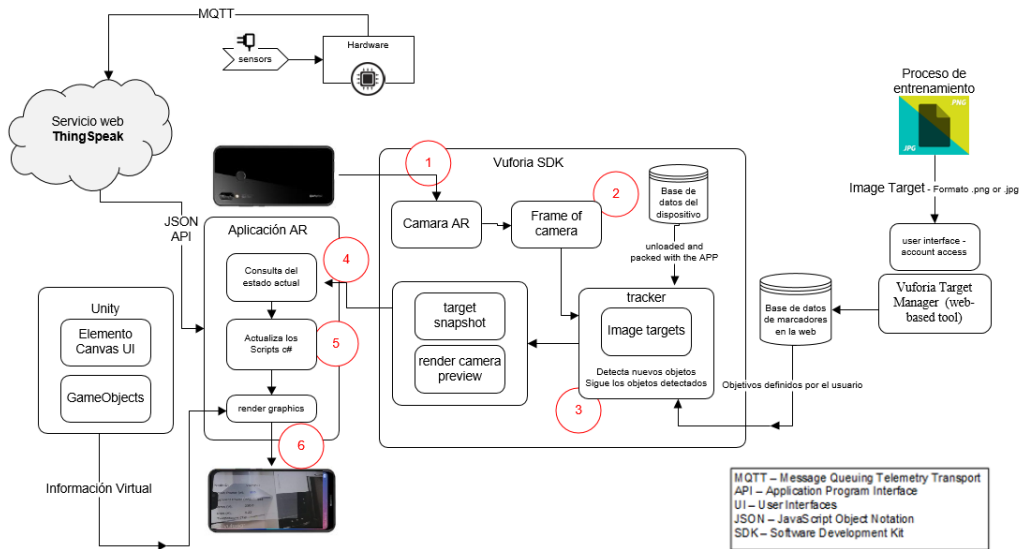


Figura 3-17 Flujo de trabajo de la aplicación.

Proceso:

1. La cámara de un teléfono inteligente captura una imagen (*frame*) dentro de la región de interés.
2. El sistema extrae las características de la imagen.
3. Las características obtenidas se comparan con las características almacenadas previamente durante el proceso de entrenamiento.
4. Si las características coinciden con algunas de las características almacenadas, el sistema obtiene la identificación del canal ThingSpeak asociado con ellas.
5. El sistema accede al canal de la plataforma en la Nube ThingSpeak para leer la información de energía asociada con la imagen objetivo mediante la API.
6. La aplicación AR superpone, en tiempo de ejecución, la información de consumo de energía eléctrica con la imagen capturada por el teléfono inteligente sobre el mundo real.

La Figura 3-18 muestra cómo se superpone la información del consumo de energía eléctrica sobre la imagen objetivo cuando el usuario enfoca su teléfono inteligente en la campana extractora de una cocina. Es interesante resaltar que la visualización de esta información se puede mejorar utilizando diferentes efectos visuales auxiliares.

En este caso, se utiliza un rectángulo de color semitransparente para facilitar la visualización de la información de forma general y, por otro lado, para ayudar a los usuarios a observar datos esenciales y sus cambios se aplican diferentes colores a los objetos de texto según el

valor de los parámetros energéticos y de temperatura. Además, los usuarios siempre pueden hacer clic en los datos para visualizarlos a través de un gráfico en ThingSpeak; de esta manera, podrán ver un conjunto de datos más grande (no solo el último) mostrado de forma gráfica.

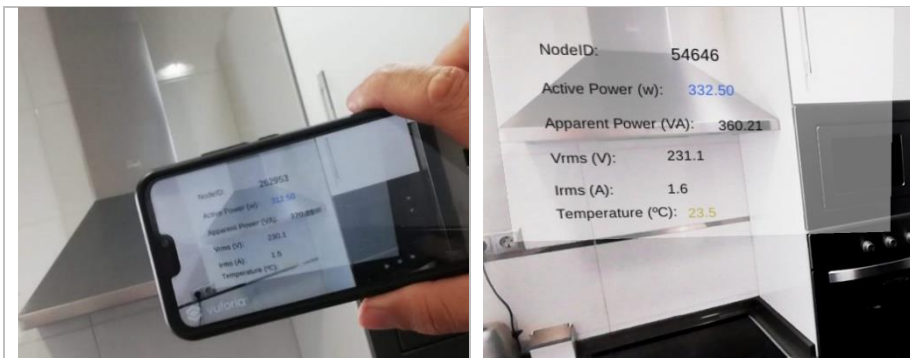


Figura 3-18 La información virtual se muestra en la pantalla del teléfono inteligente cuando se enfoca la campana extractora.

4 Resultados y discusión

En este capítulo se describirán los resultados de las pruebas realizadas con el dispositivo electrónico IoT PQ en una instalación real. Posteriormente se analizará la plataforma en la nube IoT y se expondrán los resultados y pruebas realizadas. Por último, se analizarán los resultados de las pruebas realizadas con la aplicación de realidad aumentada.

4.1. Prueba del dispositivo IoT PQ en una instalación real

Este apartado recoge una serie de medidas realizadas con el sensor IoT sobre algunas cargas típicas presentes en el interior de cualquier vivienda tipo. Se pretende monitorizar las gráficas de consumo de energía eléctrica cuando están conectados algunos equipos domésticos como microondas, lavadora y frigorífico, entre otros, y se ha realizado un cálculo estadístico de los valores medidos por el sensor.

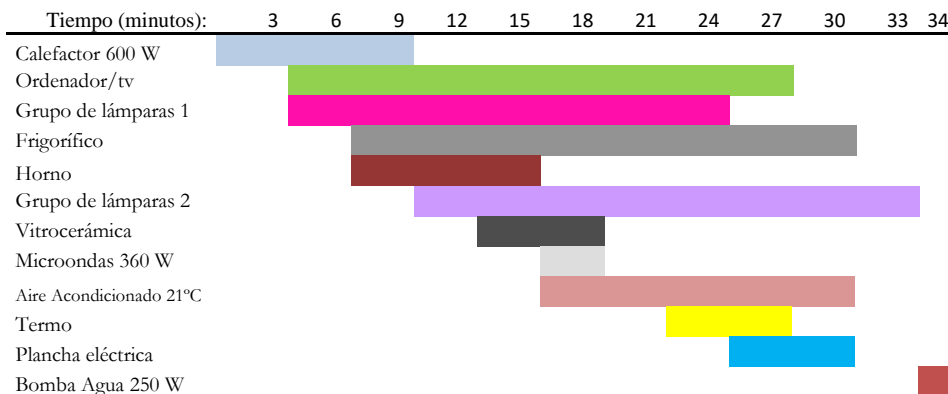
4.1.1. Prueba 1

Para la realización de esta primera prueba se tomaron una serie de medidas en varios electrodomésticos presentes habitualmente en cualquier hogar típico.

El patrón utilizado para monitorizar las variaciones en consumo es el mostrado en la Tabla 4-1, donde cada una de las columnas numéricas representa un periodo de tres minutos y cada fila las cargas que se fueron conectaron progresivamente.

En la primera fila se muestra el final del periodo, en minutos, desde el comienzo del experimento.

Tabla 4-1. Patrón de conexión/desconexión de las cargas empleadas en el experimento.



En la prueba se recogieron 211 muestras. El grupo de lámparas 1 está formado por 2 lámparas en el salón y 1 en la cocina. El grupo de lámparas 2 está formado por 2 lámparas, una en cada dormitorio. Todas las lámparas eran CFL de 80 W. El horno se conectó en el nivel 7 (100 °C). El microondas se conectó con el mando selector indicando una potencia de 360 W. El conjunto ordenador/TV consta de un ordenador personal, un monitor TFT y una televisión LED de 32". El frigorífico era un LG, modelo GR3221 con etiqueta energética B y potencia según el fabricante de 105-150 w.

El intervalo de conexión/desconexión de cada carga fué de 3 min, con una duración del experimento de 36 min. El patrón se eligió de forma que se pudiera mostrar el efecto de conectar individualmente algunas de las cargas presentes usualmente en una vivienda cualquiera.

El software utilizado en el sensor IoT envía a la Nube los datos de consumo registrados en intervalos de 15 segundos. De esta forma se puede graficar el perfil de consumo eléctrico de la vivienda, así como el perfil de cada uno de los receptores en cuestión.

Para el análisis realizado se han usado los datos de la potencia activa obtenidas del equipo IoT y subidas a la nube, ya que el objetivo es la visualización del histórico o evolución temporal de la potencia consumida por las cargas.

En la Figura 4-1 (a) podemos observar la potencia consumida por dichas cargas.

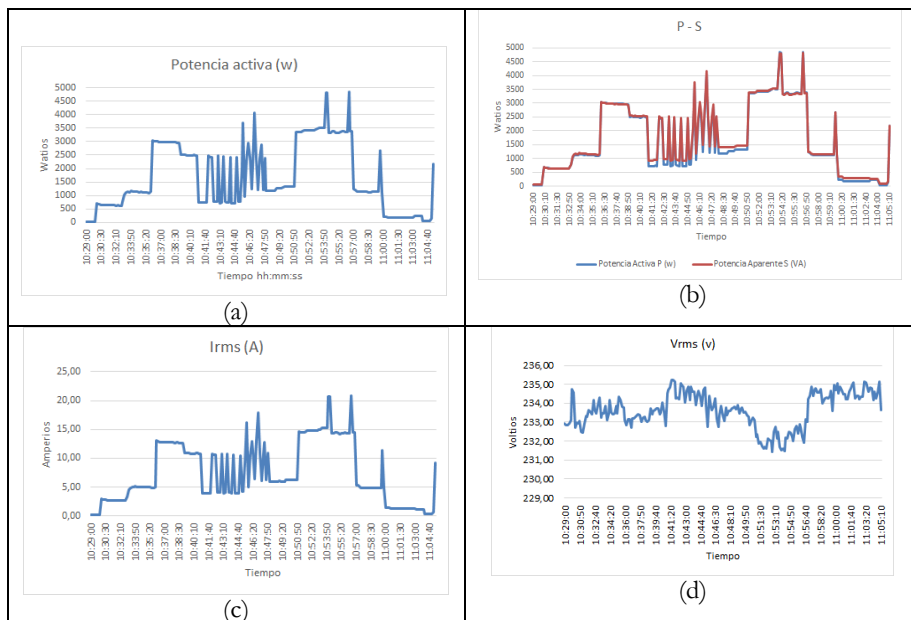


Figura 4-1. (a y b) Evolución temporal de la potencia activa y aparente. (c y d) Evolución temporal del valor eficaz de la tensión y de la corriente eléctrica en la prueba 1.

4.1.2. Prueba 2

Para esta otra prueba se han utilizado dos sensores IoT o nodos de medición en una vivienda típica. El primer sensor (nodo 6) se colocó de manera que midiera la potencia total consumida en la vivienda y el segundo sensor (nodo 10) se conectó para medir la potencia de algunos de los electrodomésticos. Con esta disposición podemos ver tanto la potencia agregada como la potencia de algunos de los electrodomésticos individuales. De este modo, se puede desglosar el consumo eléctrico, consiguiendo así saber qué receptor, en qué momento y cuanta energía está consumiendo. Esta prueba nos ofrece información sobre como se consume la energía en dicha vivienda. Podemos conocer cuando se enciende o apaga un electrodoméstico en particular si conocemos su patrón de consumo.

En esta prueba comparativa de medición realizada con varios electrodomésticos se han utilizado varias formas de mostrar los datos para intentar convencer a las personas cambiar su actitud respecto a la conservación de la energía.

En primer lugar, se realiza un periodo de medición “in situ” tanto de los consumos de la vivienda a nivel global como de los consumos de los diferentes receptores con el sensor IoT o nodo 10. En segundo lugar, se realiza un periodo de análisis de los datos obtenidos, el cual consiste principalmente en identificar anomalías durante la medición, relacionar cada curva de consumo con su correspondiente receptor, identificar patrones de consumo, comprobar si la curva de consumo global de la vivienda coincide con la facilitada por la distribuidora, etc. Contamos, por tanto, con un conjunto de datos que recoge la información de la potencia energética agregada y consumida por algunos electrodomésticos de una vivienda. Tras el

periodo de medida realizado, 24 horas, se han obtenido numerosos resultados. Una representación de la potencia agregada o total del nodo 6 se puede observar en la Figura 4-2, mientras que en la Figura 4-3 podemos ver, en azul, de nuevo la potencia agregada, en amarillo, el consumo del termo eléctrico y en rojo, el consumo de la TV/PC y lámparas. En el eje x está representado el tiempo, durante un día completo, desde las 04:00h de la madrugada.

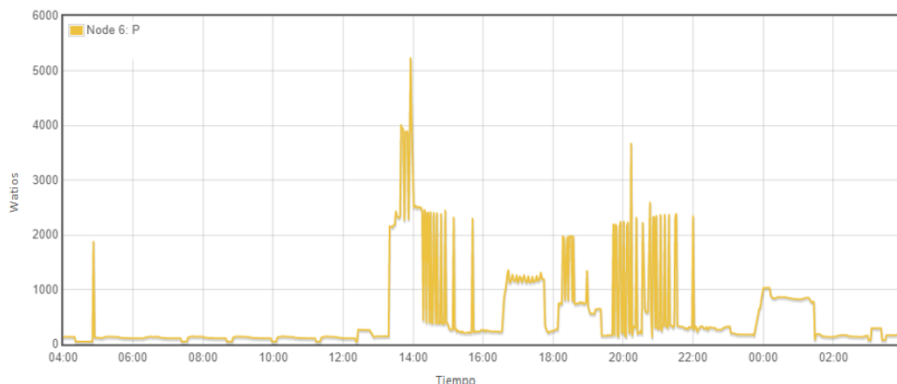


Figura 4-2. Potencia (W) agregada medida por el sensor del nodo 6 en la prueba 2.

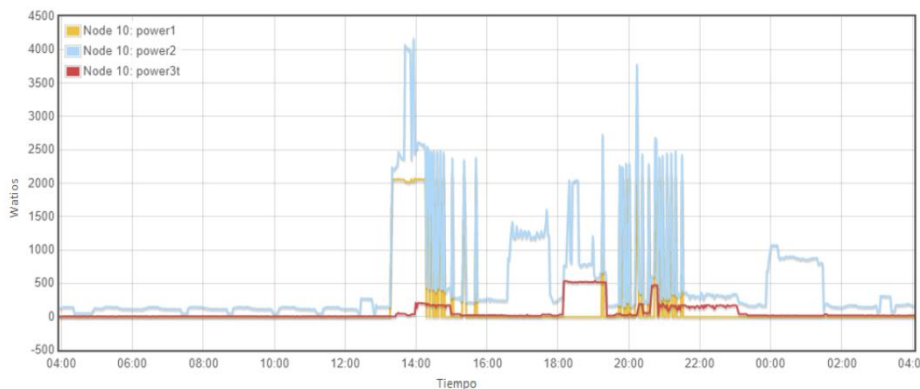


Figura 4-3. Potencia (W) desagregada medida por el sensor del nodo 10 en la prueba 2.

Tras el periodo de recopilación de esta información y de medición es recomendable realizar un análisis detallado de los datos obtenidos. Este análisis nos permitirá conocer realmente los hábitos de consumo de los ocupantes de la vivienda, el funcionamiento detallado de todos los receptores, detectar posibles anomalías y zonas o periodos del día de mayor consumo.

Una vez se ha realizado el análisis correspondiente de los datos recopilados y medidos, se pueden proponer diferentes medidas de ahorro y eficiencia energética y comprobar su viabilidad económica. En este caso se podrían proponer las siguientes medidas de mejora: Ajustar el contrato eléctrico (tarifa y potencia contratada), cambiar los electrodomésticos a otros energéticamente más eficiente, cambiar todas las lámparas a LED y cambiar los hábitos de consumo.

En la siguiente figura se pueden observar los patrones de la potencia activa consumida por algunos electrodomésticos como son el microondas, la lavadora y la vitrocerámica:

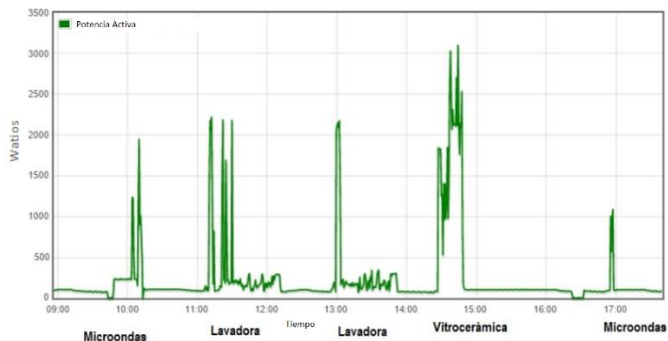


Figura 4-4. Patrones de consumo de algunos electrodomésticos.

Así, si nos centramos en la gráfica anterior podemos observar el patrón de algunos electrodomésticos y si se conocieran de antemano sus patrones de consumo, se podría detectar en una señal de consumo agregada en un alto porcentaje. De este modo, con un solo sensor, se podría desglosar el consumo eléctrico, consiguiendo así saber qué receptor, en qué momento y cuanta energía está consumiendo.

El frigorífico es el electrodoméstico con mayor consumo anual de las viviendas. Según el IDAE (Instituto para la diversificación y el ahorro de la energía) [87], aproximadamente, representa el 20% del consumo total en una vivienda típica. Por lo que resulta imprescindible medir el consumo de este electrodoméstico en particular.

A continuación, podemos observar el patrón de consumo característico del frigorífico:

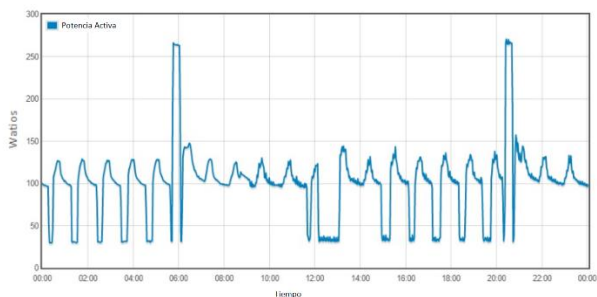


Figura 4-5. Patrón de consumo del frigorífico

También, según el IDAE, la lavadora representa un 7% del consumo total de todos los electrodomésticos. Por tanto, también es necesario medir el consumo de dicho receptor. Aquí se puede observar el consumo de potencia activa de la lavadora. Se aprecia que el patrón de

consumo varía dependiendo de la temperatura de lavado. En la Figura 4-6a podemos observar el patrón de consumo de la lavadora, en un programa de una hora, durante dos lavados consecutivos, el primero entre las 11:00h y las 12:00h y el segundo entre las 13:00h y las 14:00h. En la Figura 4-6 a y b se aprecia el consumo de potencia activa cuando se programa un lavado de productos sintéticos a 40°C y 60°C respectivamente.

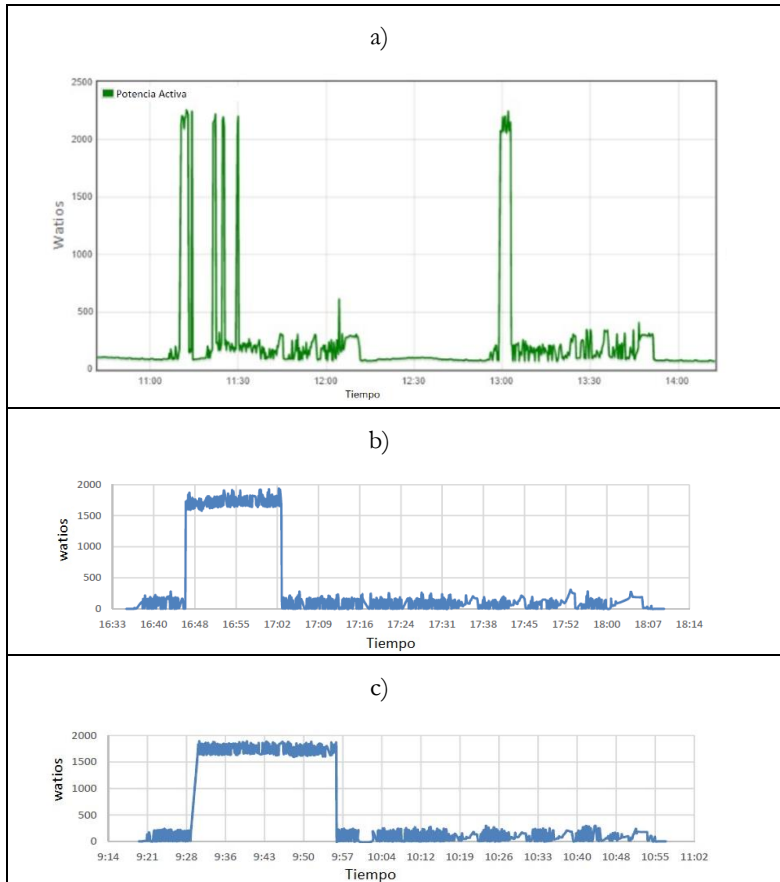


Figura 4-6. Patrón de consumo de una Lavadora en condiciones reales de funcionamiento, a) sintético frío. b) Sintético 40°C y c) Sintético 60°C.

En la siguiente gráfica podemos observar el patrón de la vitrocerámica, conectando una placa primero y dos simultáneamente, para posteriormente proceder a desconectarlas completamente:

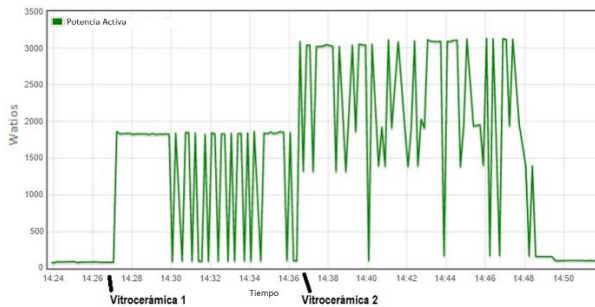
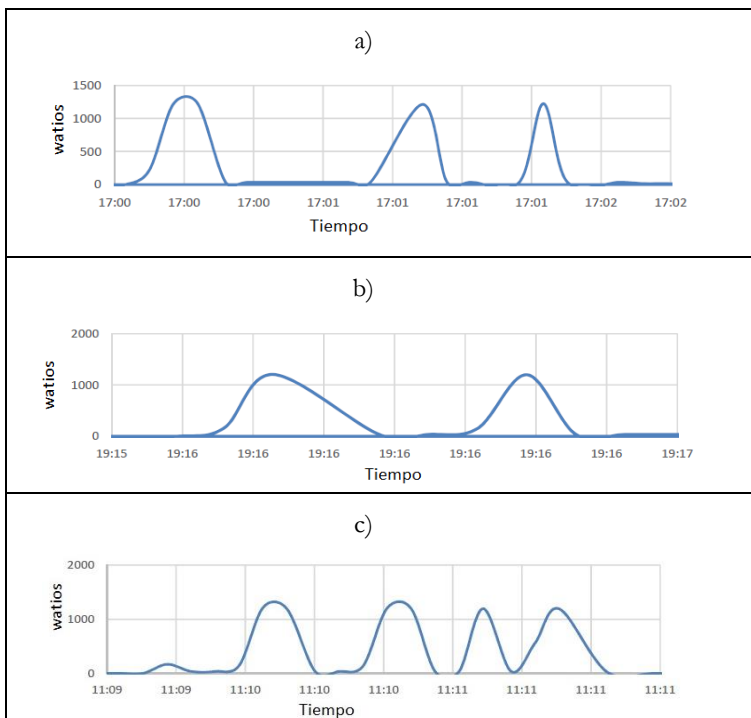


Figura 4-7. Patrón de consumo de la vitrocerámica

En las siguientes figuras se muestran los perfiles de consumo de energía obtenidas según los diferentes programas o posiciones de que disponen algunos de los receptores de la vivienda. El software procesado por el sensor IoT, en este caso, registró los datos de consumo cada seis segundos. De esta forma, mediante el análisis de estas gráficas, podemos conocer e identificar el comportamiento de cada uno de los receptores, así como su correspondiente consumo energético.



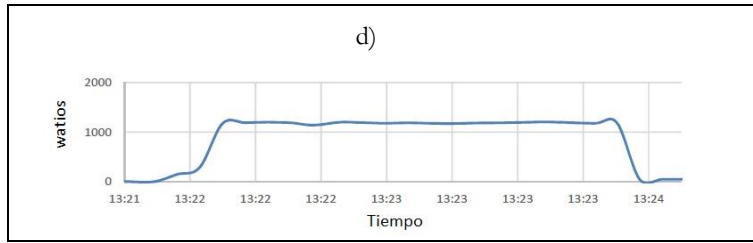


Figura 4-8. Medida y análisis del consumo de energía eléctrica en un microondas en condiciones reales de funcionamiento, a) 200 W, b) 270 W, c)360 W y d)700 W

En la Figura 4-8 se puede observar el consumo en vatios del microondas utilizado para las pruebas con realidad aumentada. Dependiendo de la potencia a la que se programe se obtiene un patrón de consumo diferente. La prueba se realizó durante dos minutos y se obtuvieron las gráficas a 200 W, 270 W, 360 W y 700 W respectivamente.

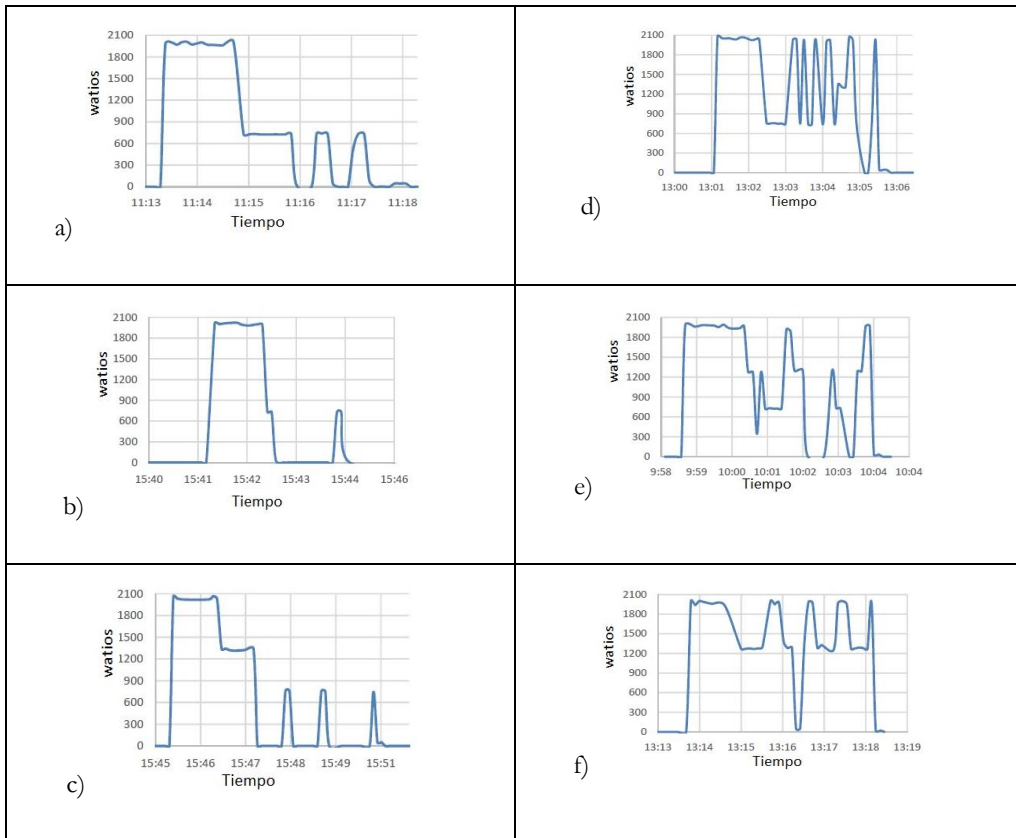


Figura 4-9. Medida y Análisis del consumo de energía eléctrica de una plancha en condiciones reales de funcionamiento, a) Algodón, b) Lana, c) Sintéticas y d) Agodón con vapor e) Lana con vapor y f) Sintéticas con vapor.

De igual forma, en la Figura 4-9 a) podemos observar el consumo de una plancha eléctrica en el programa de algodón/lino durante 3 minutos con un consumo medio de 847 W. En la Figura 4-9 b) se observa el patrón de consumo cuando se selecciona el programa de lana/seda durante el mismo periodo de tiempo y con un consumo medio de 874 W. En la c) se seleccionaron prendas sintéticas y el consumo medio fue de 652 W. En d), e) y f) se seleccionaron los mismos tipos de prendas, pero con vapor, obteniéndose un consumo medio de 1350 W, 1240 W y 1430W respectivamente.

4.1.3. Discusión de los resultados

Finalmente analizamos los resultados obtenidos durante el periodo de medición de los consumos eléctricos de la vivienda. Iberdrola distribución facilita los consumos energéticos horarios a cada usuario, por tanto, un primer análisis es realizar una comparativa entre los valores obtenidos mediante el sensor IoT calibrado y los descargados desde la página web de la distribuidora. De esta forma, se puede comprobar la exactitud de los datos facilitados por Iberdrola.

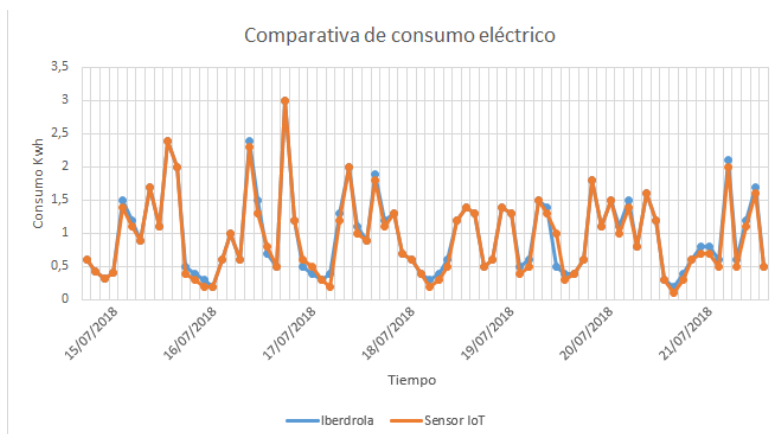


Figura 4-10 Comparativa del consumo de la vivienda del 15 al 21 de julio de 2018.

4.2. Resultados de la plataforma IoT

En este apartado se muestran las mediciones realizadas con los sensores IoT utilizados en el lugar de prueba y, a través de un análisis de los valores y graficas obtenidas se realiza el análisis de los resultados. Además, se incluye la realización de análisis de la seguridad del sistema.

4.2.1. Resultados y pruebas en ThingSpeak

Para evaluar el sensor IoT PQ en sí, así como su integración con la Nube, se describe un experimento que incluye dos sensores IoT PQ. Estos sensores se conectaron a una campana extractora de humos y a un microondas, respectivamente, para obtener su información

energética en tiempo real. Por tanto, los dispositivos IoT se programaron para obtener datos de sus sensores (información sobre corriente y tensión) y enviarlos a la plataforma ThingSpeak cada 15 s.

Para ser más precisos, cada dispositivo IoT PQ pudo obtener ocho parámetros: Vrms, Irms, potencia activa, potencia aparente, factor de potencia, temperatura ambiente y los huecos de tensión. Esta información se envió a los servidores ThingSpeak utilizando el concepto de canal bajo el paradigma de publicación/suscripción. Dentro de un canal, tal y como se comentó en el apartado 2.4, se puede agregar un máximo de ocho campos por publicación.

En nuestro caso de estudio, cada dispositivo IoT PQ publica los parámetros mencionados anteriormente relacionados con varios electrodomésticos en dos canales diferentes. La Figura 4-11 muestra la información energética obtenida por un dispositivo IoT PQ conectado a un horno. Estas gráficas se han obtenido de un postprocesamiento de datos procedentes de la Nube.

La Figura 4-11a muestra el valor Vrms, que tiene un promedio de 233 V durante el intervalo medido. La Figura 4-11b muestra el Irms que varía de 0 a 5,8 A dependiendo de la potencia seleccionada en el electrodoméstico. La Figura 4-11c es el factor de potencia, y está cerca de uno, que es el valor esperado cuando las cargas están conectadas. Antes de las 08:34, el factor de potencia es cercano a cero ya que no había cargas conectadas (Irms = 0). Finalmente, la Figura 4-11d muestra la potencia activa consumida por dicho electrodoméstico.

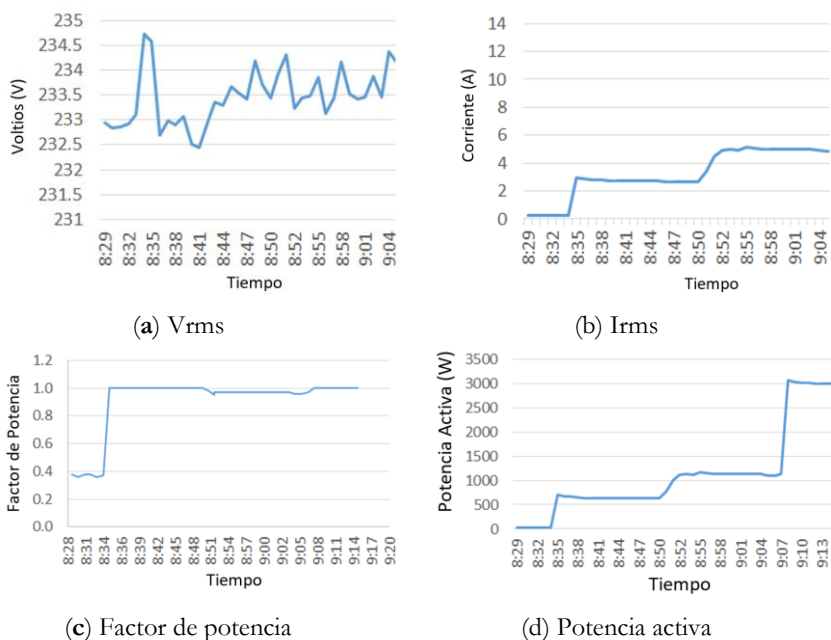


Figura 4-11. Información sobre el consumo de energía de un horno almacenada en la plataforma en la Nube ThingSpeak.

La Figura 4-12 ha sido tomada directamente del canal de ThingSpeak usado para este experimento [50] usando un motor de búsqueda en un PC. La Figura 4-12 muestra los valores eficaces, así como la marca de tiempo de los datos cargados. La Figura 4-12 a y b, representan la tensión de alimentación de los electrodomésticos y la corriente que circula a través de ellos. La ventaja es que se puede acceder a esta información desde cualquier lugar y desde cualquier dispositivo que posea conexión a Internet.

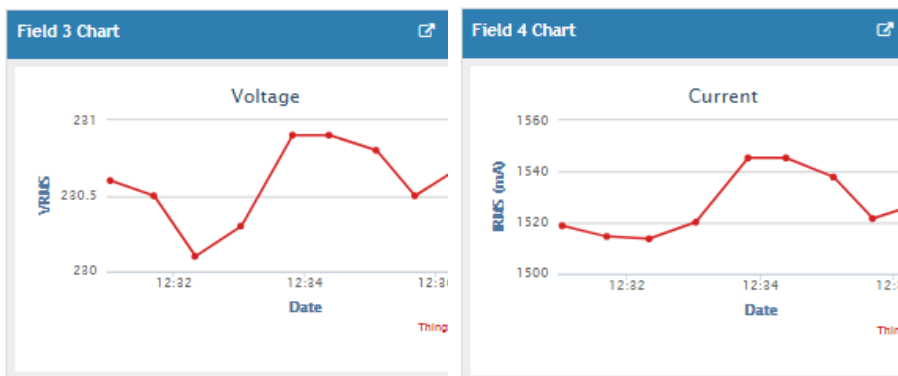


Figura 4-12. a) VRMS b) IRMS cargado en ThingSpeak de un microondas.

4.2.2. Análisis de la seguridad del sistema

La información que gestiona este sistema IoT está dentro del ámbito personal, domestico y privado, por lo que las pruebas y el análisis de la seguridad del sistema resulta interesante por motivos de privacidad.

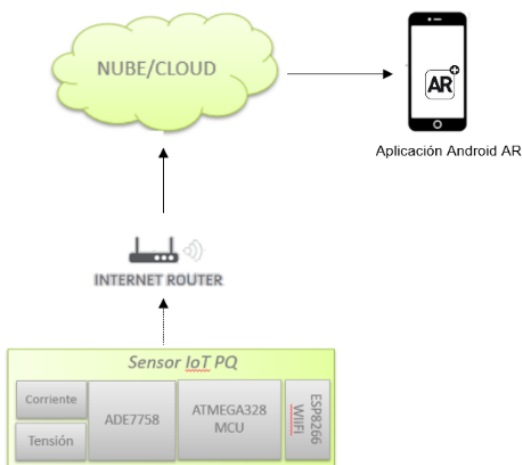


Figura 4-13 Estructura de red del sistema AR PQ IoT

Si se analiza la estructura del sistema mostrada en la Figura 4-13, se observan dos aspectos básicos que debemos tener en cuenta ya que podrían ser fuente de ataques, estos son:

- Las comunicaciones entre los diferentes elementos del sistema son un punto crítico, ya que, mientras se transmite la información, si no se realiza de forma adecuada, se corre el peligro de ser escuchados o interceptados por parte de un posible atacante, que podría obtener contraseñas, datos o valores de algunos de los campos de medición de energía.
- Almacenamiento de datos en la Nube: Se debería de tener especial cuidado con el almacenamiento de los ocho parámetros de energía que se suben a la Nube después de ser recopilados por el sistema IoT, así como de las claves de acceso a los canales de ThingSpeak.

Según esta topología, el servidor ThingSpeak se podría considerar el centro de nuestro sistema IoT, de hecho, este servidor resulta ser el encargado de aportar los algoritmos y servicios de seguridad requeridos por nuestro sistema, ya que aquí es donde se almacenan los valores recopilados y obtenidos por el sensor IoT.

Para ello, el primer servicio de seguridad que nos encontramos es el de control de acceso a la información o datos, mediante las llamadas *Apikeys*, que son cadenas de caracteres generadas aleatoriamente por ThingSpeak y que se asignan a cada canal. Con ellas se puede acceder, para leer o escribir, a los campos de un determinado canal de los que hemos definido en el servidor ThingSpeak. Estas *Apikeys* son privadas y hay que indicárselas por código al servidor cuando realizamos cualquier acción sobre nuestros canales.

También, esta plataforma IoT nos ofrece la posibilidad de realizar todas las conexiones de forma segura utilizando la capa de seguridad SSL, que ofrece un cifrado extremo a extremo de todo el tráfico web transmitido, por lo que proporciona confidencialidad. De manera que todas las peticiones que se realicen en el servidor para añadir, actualizar, modificar, obtener graficas, etc. estarán seguras bajo este protocolo. El inconveniente es que el MCU ATMEGA328 que hemos utilizado en nuestro prototipo, no tiene suficiente capacidad de procesado como para implementar esta capa de seguridad SSL, por lo que no podremos utilizarla. Vamos a observar sus consecuencias, y como se podrían subsanar.

Después de haber analizado los puntos críticos, vamos a realizar algunos ataques al sistema IoT, para tratar de auditar su seguridad, estudiar las vulnerabilidades y buscar soluciones. Para realizar estos ataques utilizaremos la distribución para auditoria de redes WifiSlax [78] en su versión 2020, y las herramientas Wireshark [79] y Ettercap [80].

En el primer ataque, nos aprovecharemos de la debilidad de la ausencia de cifrado extremo a extremo. Para ello tendremos que logearnos en la red en la que se encuentra el sensor IoT, por tanto, el atacante debe conocer la contraseña de acceso a la red WiFi, y nos hacemos pasar por el router mediante un envenenamiento de ARP con la herramienta Ettercap, como se observa en la Figura 4-14.

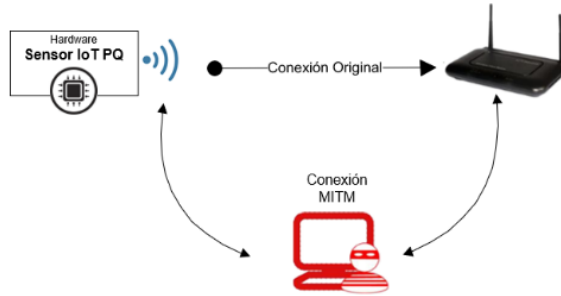


Figura 4-14 Ataque MITM (hombre en medio) por envenenamiento de ARP

Con Ettercap se buscaron todos los dispositivos conectados a la red wifi, seleccionando la víctima del ataque que en este caso era nuestra placa electrónica del sensor IoT PQ. Una vez que estamos situados en medio de la comunicación entre el sensor y el router, pasamos a analizar el tráfico que se genera mediante Wireshark que es un analizador de protocolos. Ahora podemos observar los mensajes que el sensor está subiendo al servidor Thingspeak, que incluyen la Apikey de escritura del canal que se está actualizando, así como los valores de los parámetros eléctricos medidos. Como se observa en la Figura 4-15, el atacante podría obtener el apikey del canal de Tingspeak para su posterior manipulación, así como los valores almacenados en los campos, tales como el valor VRMS, el IRMS, la potencia activa, etc.

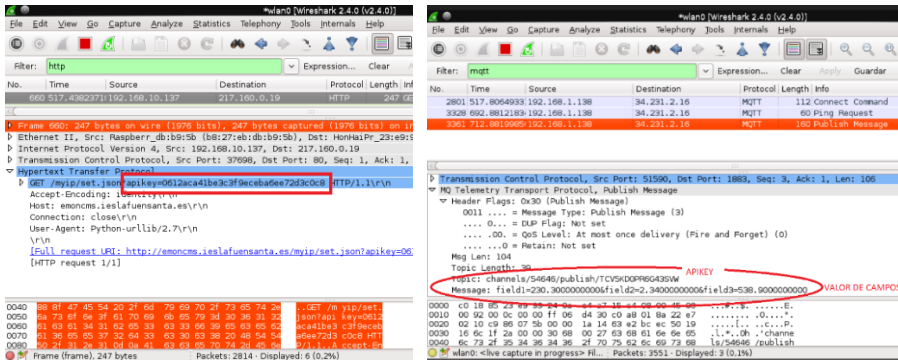


Figura 4-15 Wireshark, ataque al Sensor IoT (a) Protocolo HTTP (b) Protocolo MQTT

Por tanto, ya que no podemos implementar la capa de seguridad SSL en las comunicaciones del sensor IoT, ya que, así, aunque el atacante interceptara el tráfico con el router, estaría cifrado, por lo que su contenido sería ilegible, la única solución que nos queda sería cuidar la seguridad de la red a la que el sensor IoT está conectado, ya que, el atacante debe conocer la contraseña de acceso de la wifi y estar conectado a ella. Si la seguridad es buena, como por ejemplo WPA2, no se podrá llevar a cabo el ataque. Además, se recomienda adoptar las medidas de seguridad adicionales típicas como el filtrado de acceso por direcciones MAC, o el cambio periódico de las contraseñas.

4.3. Resultados del sistema de Realidad Aumentada.

El objetivo del trabajo es describir la arquitectura del sistema propuesto, y aunque el sistema puede instalarse en cualquier zona residencial, ya que el ahorro de electricidad es un objetivo en todos los hogares, en este trabajo, el estudio de caso se ha desarrollado en una residencia para personas con síndrome de Down en el área de Córdoba, dirigida por una ONG. La razón de ello es la importante necesidad que tienen esas ONG de ahorrar dinero mediante el ahorro del consumo de energía. Reciben una financiación pública limitada, y básicamente son apoyadas por la financiación privada, que es preferible utilizar en programas específicos para las personas más que en gastos de servicios energéticos. Esta ONG está tratando de reducir el consumo de energía, así como de cumplir con los objetivos H2020 y reducir sus emisiones de CO₂ con diferentes iniciativas a través de la instalación de este sistema desarrollado.

El usuario objetivo en este caso es el equipo de mantenimiento, ya que tienen conocimientos básicos para entender las variables eléctricas consideradas. De hecho, este equipo está actualmente a cargo de los trabajos de reparación eléctrica cuando es necesario, por lo que esta información dada a través de la AR será útil para cumplir con el compromiso de ahorro de energía.

Por tanto, este estudio se realizó en la cocina de un hogar en Córdoba. Una vez que el sensor IoT PQ y el sistema AR se construyeron para crear una forma diferente de mostrar al usuario la información energética de sus dispositivos, se probó en condiciones reales. Se instalaron dos sensores para monitorizar una campana extractora y un microondas.

Para evaluar el sistema AR desde tres puntos de vista diferentes se analizan tres escenarios: (1) selección de las imágenes objetivo más adecuadas, (2) evaluación del sistema cuando se detectan las imágenes objetivo en entornos reales, y (3) evaluación del sistema cuando se detectan las imágenes objetivo en imágenes impresas.

Para ello, Vuforia ofrece a los desarrolladores un artefacto ó también llamado prefab (**ARCamera**) especial para ser utilizado en el entorno de Unity que contiene las propiedades y especificaciones para que la cámara del dispositivo móvil pueda funcionar como una cámara de Realidad Aumentada, con algoritmos que permiten implementar las funciones para escanear la realidad en busca de marcadores o imágenes objetivo, la detección de marcadores y su reconocimiento en función del ángulo de incidencia y la distancia con respecto al objeto.

Dentro del entorno de trabajo de Unity hemos trabajado con escenas, correspondiéndose cada una de ellas al conjunto formado por la cámara del dispositivo móvil (ARCamera), la imagen marcador o imagen objetivo (UserDefinedTarget, que en este caso se crea en tiempo real) y el GameObjet u Objetos virtuales creados para mostrar los datos de consumo de energía eléctrica y el comportamiento de todos estos elementos. En nuestra aplicación AR estos GameObjet serán quienes contengan la información sobre el consumo de energía eléctrica, además de los algoritmos para salir de la aplicación y hacer zoom sobre los objetos y los datos representados.

La imagen objetivo se ha utilizado como el marcador, es decir, la imagen que reconocerá la cámara AR y que desencadenará el algoritmo necesario para mostrar el contenido virtual en la pantalla.

4.3.1. Selección de imágenes objetivo

En cualquier sistema AR es muy importante crear las imágenes objetivo adecuadas que luego deben reconocerse y sobre las cuales se superpondrá la información virtual relacionada con ellos. Uno de los parámetros más influyentes es la luz. Si se obtiene una imagen objetivo en condiciones de iluminación desfavorables, la detección y el seguimiento del objetivo pueden verse significativamente afectados. Por lo tanto, es importante asegurarse de que haya suficiente luz para que los detalles de la escena sean bien visibles en la vista de la cámara. La Figura 4-16 muestra la relación proporcional entre la clasificación asignada a la imagen objetivo del microondas cuando se toma bajo diferentes condiciones de luz. Como se puede observar, cuando la luminosidad es de aproximadamente el 40%, el sistema detecta menos características (solo se asigna una calificación de 1 estrella) que cuando la luminosidad es de aproximadamente el 90% (se asignan 3 estrellas).

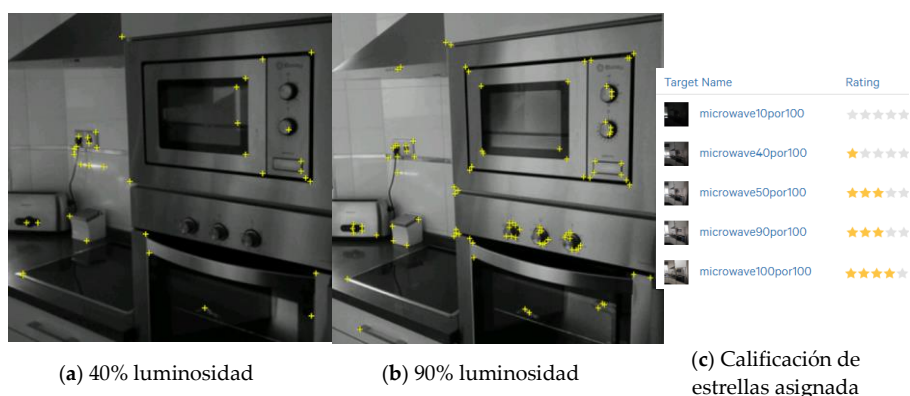


Figura 4-16. La relación entre las características detectadas y las condiciones de luz.

Es importante resaltar que dos atributos más que deben tenerse en cuenta para lograr una calificación alta son (1) las imágenes deben ser ricas en detalles y (2) el hecho de que no deben contener patrones repetitivos.

4.3.2. Entorno real

Para evaluar el rendimiento correcto de todo el sistema AR de energía se diseñó e implementó una aplicación en Android. La aplicación *energy AR* se probó en un móvil inteligente con el siguiente hardware: Huawei P20 Little, CPU Kirin 659, 4 GB de RAM, Android v.9.

Como se puede observar en la Figura 4-17, cada vez que el usuario enfoca su cámara en una campana extractora o un microondas, la aplicación AR los reconoce y se muestra una ventana emergente con toda la información de energía consumida por ellos.



Figura 4-17. Información de energía aumentada que se muestra en la pantalla del teléfono inteligente.

La aplicación AR fue diseñada para mostrar el valor de los parámetros de energía usando diferentes colores dependiendo de su valor; de esta manera, los usuarios podrán interpretar la información más rápido y de una manera más intuitiva. Por ejemplo, cuando el valor de la potencia activa está por debajo de 25 W, el color es blanco, mientras que es azul si está por encima de 100 W, verde si está por encima de 1000 W y, finalmente, rojo si está por encima de 3000 W.

Finalmente, también es importante mencionar que, una vez que la cámara enfoca un electrodoméstico, por ejemplo, el microondas, la información de energía se actualiza en tiempo real cada 15 s por sí sola. De esta manera, un usuario no tiene que enfocar la cámara en otro punto y volver al microondas para actualizar la información.

4.3.3. Entorno impreso

La aplicación AR también nos permite llevar a cabo el proceso de AR enfocando la cámara del teléfono inteligente sin estar físicamente en el lugar, tan solo enfocando la imagen objetivo impresa. En esta prueba se analizó la relación entre la distancia y el ángulo de incidencia de la cámara con respecto a la imagen impresa para detectarla correctamente.

La Figura 4-18a muestra que aquellas imágenes impresas cuyos tamaños están entre 6 cm y 25 cm, la distancia a la cual la aplicación de AR móvil detecta el objetivo de la imagen aumenta casi linealmente, siendo inviables para nuestra aplicación AR aquellas con tamaños más pequeños. Sin embargo, los tamaños más grandes serían adecuados e incluso deseables si se necesitan distancias de detección más grandes. Por otro lado, la Figura 4-18b muestra la relación entre el ángulo de incidencia de la cámara del dispositivo móvil con respecto a la tasa de detección de la imagen. Estos resultados sugieren que es posible una buena detección de ángulos entre -50 y 50 grados, lo cual es perfectamente adecuado para los fines de nuestra aplicación.

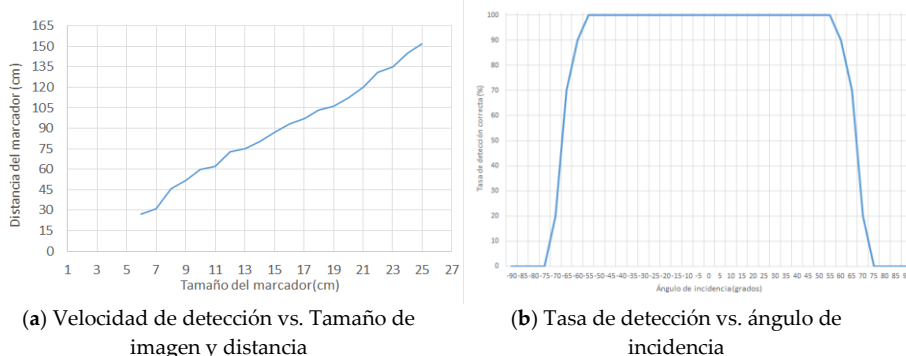


Figura 4-18. Detección exitosa del objetivo de la imagen según los parámetros de tamaño y ángulo

4.3.4. Rendimiento del sistema

Es importante garantizar la respuesta de la aplicación AR dentro unos límites de tiempo razonables. En este caso de estudio, la información energética generada por los electrodomésticos cambia continuamente y, por lo tanto, las actualizaciones deben reflejarse en el teléfono inteligente del usuario final lo antes posible. En esta prueba se evaluó la aplicación AR para analizar el tiempo de diferentes variables (ver Figura 4-19) utilizando la herramienta Unity Profile [72]:

- (1) El proceso de renderizado AR muestra el tiempo que tarda la CPU en realizar procesos de renderizado, lotes, renderizado de cámara, triángulos y vértices renderizados.
- (2) El tiempo de ejecución de los scripts. Tiempo utilizado por la CPU para ejecutar los scripts de código.
- (3) Tiempo de respuesta. El tiempo requerido para que la aplicación AR reciba la actualización de los datos actualizados en la Nube ThingSpeak. Esto incluye las siguientes acciones: (1) escanear un objetivo de imagen, (2) reconocer un componente de IoT, (3) contactar con el servicio en la Nube y (4) devolver los datos relevantes, y (5) mostrar la información energética.

El eje vertical del gráfico de la Figura 4-19. Uso de la CPU de la aplicación por marco (ms).representa el tiempo requerido para que el procesador del dispositivo móvil procese un cambio detectado por el sistema de monitoreo. Como se puede apreciar, este período varía de 0 ms a 20 ms. El eje horizontal representa los cuadros capturados por la cámara. En la Figura 4-19, la gráfica correspondiente a scripts (color azul) representa el tiempo necesario para ejecutar los scripts, y la gráfica rendering muestra el tiempo que se tarda en procesar el marco a través de Internet móvil 4G. El gráfico tiempo de respuesta (amarillo) representa el tiempo de respuesta necesario para llevar a cabo un ciclo completo.

Veamos un caso específico, concretamente, los tiempos de consumo de cada una de estas variables PQ cuando se captura y analiza el cuadro número 4 (ver Figura 4-19). En este caso, el tiempo necesario para procesarlo es de 2.27 ms, y el tiempo necesario para ejecutar los scripts es de 7.97 ms. Se puede observar que la mayor parte del tiempo para este cuadro se dedica a las operaciones de los scripts (casi tres veces más). También se puede observar que el tiempo total de ejecución del ciclo es de 18.83 ms, este último parámetro es el más importante desde el punto de vista del tiempo de respuesta. El tiempo de respuesta promedio

es de 16.45 ms. Estos resultados demuestran que el uso de Vuforia Image Target, con resultados de decodificación inmediatos, combinados con un dispositivo IoT, representa una excelente opción en términos de tiempo de respuesta. Esto podría caracterizarse como muy razonable en términos de interactividad.

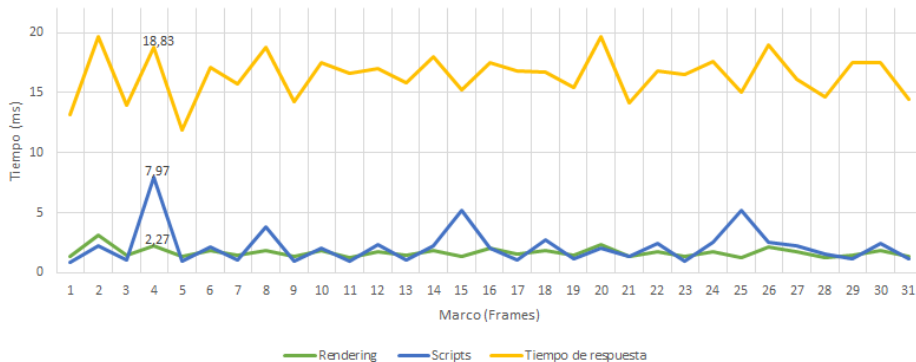


Figura 4-19. Uso de la CPU de la aplicación por marco (ms).

4.3.5. Análisis de seguridad a la aplicación de Realidad Aumentada

Hemos instalado nuestra aplicación AR en un dispositivo móvil Android y ahora lo conectamos a una red wifi, que podría no ser segura y donde alguien podría capturar tramas para monitorizar el tráfico, o podrían realizar un ataque MITM (hombre en medio) como el comentado en el apartado 4.2.2. El objetivo es siempre el mismo, capturar el tráfico generado entre el dispositivo móvil e Internet. En este caso trataremos de capturar el tráfico generado entre el dispositivo móvil y el router.

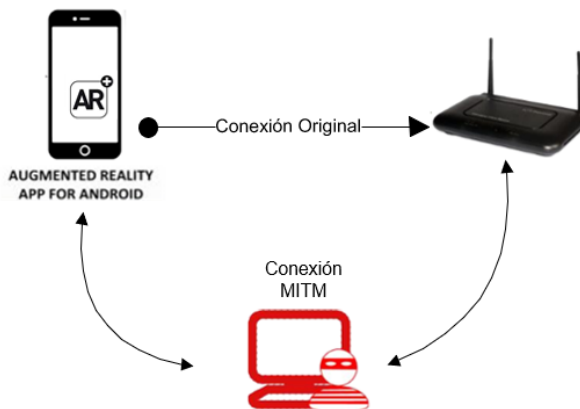


Figura 4-20 Ataque MITM (hombre en medio) por envenenamiento de ARP en la aplicación AR

Para realizar el análisis de seguridad, volvemos a realizar el mismo ataque con Ettercap, seleccionando, esta vez, como víctima, la dirección ip de nuestro móvil android conectado a la wifi. Una vez lanzado el ataque, solo tenemos que analizar el tráfico de la red que se está capturando por tramas mediante el analizador Wireshark, ya que nos encontramos en medio de la comunicación entre el móvil y el router.

En la Figura 4-21 podemos observar los resultados obtenidos, en este caso, podemos ver una trama con los mensajes intercambiados entre el dispositivo móvil y el router hasta el servidor en la Nube Thingspeak.

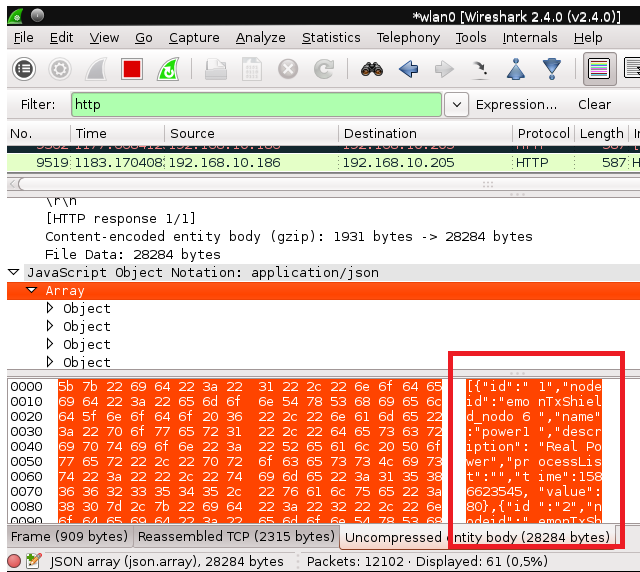


Figura 4-21 Wireshark, análisis MITM a APP AR

ThingSpeak ofrece los servicios necesarios para poder leer los datos del canal, por lo que, desde nuestra APP realizamos una petición de los datos en formato JSON, que son recibidos y se muestran con AR en la aplicación móvil. En este caso, según la Figura 4-21, la trama capturada se corresponde con la respuesta devuelta por ThingSpeak en formato JSON, donde podemos ver, en el recuadro marcado en rojo, los campos de los que consta y algunos de los datos o valores actuales de consumo, como la potencia activa que ese momento era de 80 w.

Para solucionar el problema de seguridad en este tipo de intercambio de comunicaciones entre nuestra aplicación AR y el router o ThingSpeak se podría utilizar el protocolo SSL definiendolo en el código de la aplicación AR.

Así se solucionarían los problemas de seguridad en las transmisiones de información entre la aplicación AR y el servidor en la Nube a través del router.

4.3.6. Evaluación de impacto y usabilidad

Finalmente, para evaluar cuantitativamente el impacto del sistema AR de energía en los hábitos de los usuarios (personal de mantenimiento) y su usabilidad, se utilizaron dos cuestionarios para evaluar ambos aspectos. Por un lado, un cuestionario de impacto nos ayuda

a comprender los impactos que el sistema ha producido en los usuarios, proporcionando una comprensión precisa de las implicaciones del ahorro de energía esperado. Por otro lado, la satisfacción es quizás el aspecto más importante de la usabilidad porque, no importa cuán eficiente sea el sistema, si a los usuarios no les gusta, no lo usarán. Todos los usuarios de esta aplicación pertenecen al personal de la empresa a cargo del mantenimiento de la ONG, con conocimientos básicos de electricidad y conscientes de la importancia de las iniciativas de ahorro de energía. Concretamente, se entrevistó a 16 personas. Los resultados y el análisis de ambos cuestionarios se describen en las siguientes subsecciones.

4.3.7. Cuestionario de impacto

El impacto del sistema en los usuarios se evaluó a través de un pequeño cuestionario compuesto por cinco preguntas, donde cada pregunta se podía evaluar de 1 a 5 puntos, con 1 totalmente en desacuerdo y 5 totalmente de acuerdo. Las preguntas se escribieron para conocer el impacto de este sistema en el hábito del usuario, incluidas las preguntas sobre su conciencia y privacidad. Concretamente, las preguntas se enumeran a continuación.

1. ¿Crees que la aplicación de energía AR puede influir en tu hábito para reducir el consumo de energía?
2. ¿Cree que la aplicación AR de energía aumentaría la comprensibilidad de su entorno energético?
3. ¿Crees que la aplicación Energy AR traerá beneficios significativos a tu vida diaria?
4. ¿Crees que la aplicación Energy AR amenazaría tu privacidad?
5. ¿Cuál es su opinión general sobre la aplicación prototipo?

Para recibir comentarios del equipo de mantenimiento, los resultados de la prueba se procesaron a través de estadísticas como la media y la desviación estándar (Std). Se muestran en la Tabla 4-2. En promedio, la mayoría de las preguntas fueron respondidas positivamente (más de 4 de 5), excepto la pregunta 4, en la que la puntuación es 3,06. Centrándose en los resultados, los usuarios entrevistados consideran que el sistema influirá positivamente en sus hábitos para reducir el consumo de energía. Además, el sistema AR de energía también les ayudará a comprender mejor su entorno energético. Finalmente, la calificación de la pregunta 3 también revela un impacto positivo en la vida de los usuarios. Sin embargo, la pregunta sobre la privacidad revela un cierto grado de preocupación; No es una puntuación muy negativa, pero indica que se deben mejorar los aspectos de privacidad. La desviación estándar es baja, lo que significa que las respuestas están cerca de la media, a excepción de la pregunta sobre privacidad, en la que los usuarios no están de acuerdo como en el resto de las preguntas. En términos generales, como muestra la pregunta 5, los usuarios están contentos con el sistema de energía AR propuesto y con el impacto positivo que tendrá en su rutina de trabajo.

Tabla 4-2. Resultados del cuestionario de impacto (n = 16).

	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5
Media	4,56	4,25	4,19	3,06	4,19
Media normalizada	89,06	81,25	79,68	51,56	79,69
Desviación estándar	0,63	0,86	0,98	1,34	0,75

4.3.8. Cuestionario de usabilidad

La satisfacción de los usuarios con el sistema AR de energía se midió a través del cuestionario de escala de usabilidad del sistema (SUS) [74], que es el cuestionario más utilizado para medir las percepciones de usabilidad. Este cuestionario proporciona una herramienta confiable para medir la usabilidad y su confiabilidad ha sido probada en cientos de publicaciones. Este método se ha empleado recientemente con éxito en la evaluación de aplicaciones AR [75–77].

Según los autores de [77], una buena puntuación SUS para cada individuo debe ser superior a 68 (puntuación $SUS > 68$). Como se muestra en la Tabla 4-3, la puntuación SUS calculada para el experimento realizado es 80 y su desviación estándar es 0,72. Esto significa que la puntuación SUS no solo está por encima del promedio, sino que también está muy cerca de 80,3, y de acuerdo con la puntuación SUS, cuando la puntuación es 80,3 o superior, el sistema obtiene el grado A, lo que significa que las personas aman su sistema y lo recomendarían a sus amigos. Vale la pena resaltar el valor de la desviación estándar, que muestra que todos los usuarios entrevistados tienen el mismo sentimiento.

Tabla 4-3. Resultados de usabilidad del Sistema (System usability scale SUS) ($n = 16$).

Puntuación SUS	Desviación Std
80	0,72

5 Conclusiones y trabajo futuro

Este último capítulo incluye algunas de las conclusiones a las que hemos ido llegando en el transcurso de la tesis, muy especialmente en los capítulos tres y cuatro. A estas conclusiones se le sumaran otras de síntesis general, en relación a la aplicación de AR desarrollada y al sistema electrónico IoT propuesto para el experimento, y por último, se hará referencia a algunas posibles líneas de investigación.

5.1. Conclusiones

La AR es una tecnología que está cada vez más presente en muchas áreas de nuestra vida. Nos ayuda a crear una interfaz más natural entre los humanos y el mundo físico, minimizando la cantidad de dispositivos hardware que debemos llevar con nosotros. Primero, los ordenadores se utilizaron como medio para visualizar los datos generados por los sensores para verificar el estado del mundo físico; hoy en día, los teléfonos móviles inteligentes están en todas partes y, en un futuro muy cercano, se usarán gafas para monitorizar el mundo que nos rodea, incluso con tecnología directamente integrada en nuestros ojos.

En esta tesis se ha presentado un sistema de monitoreo de energía basado en AR para visualizar en tiempo real los parámetros de calidad de energía y el consumo de energía de los electrodomésticos de una manera fácil; tan fácil, que los usuarios finales solo tienen que enfocar directamente con sus teléfonos inteligentes al electrodoméstico que les interesa para conocer su comportamiento energético.

Desde un punto de vista arquitectónico, el sistema presenta un dispositivo de energía IoT desarrollado para obtener la información energética de los electrodomésticos, luego, esta información se carga en la Nube (plataforma IoT) y, finalmente, la integración de esta información con la aplicación de AR cuando la imagen capturada por la cámara del teléfono inteligente coincide con una imagen objetivo previamente almacenada.

Las pruebas realizadas muestran que el sistema detecta fácilmente las imágenes objetivo, tanto en un entorno real como impreso y, lo más importante, el tiempo de respuesta para detectar y superponer la información de energía en el cuadro capturado es insignificante. Además, se entregaron dos cuestionarios al personal de mantenimiento para evaluar el impacto del sistema en sus hábitos y su percepción de usabilidad. Los resultados de ambos cuestionarios muestran un impacto positivo en ambas perspectivas.

Actualmente, estamos trabajando en el desarrollo de algoritmos e interfaces gráficas para ayudar a los usuarios finales a comprender el significado de la información energética que se les presenta. Esta es probablemente la mejor manera de hacer que los usuarios sean conscientes del consumo de su energía.

5.2. Trabajo futuro

Las operaciones ininterrumpidas y la continuidad de las actividades son requisitos clave para cualquier edificio altamente automatizado ubicado bajo el paradigma de la Industria 4.0, para el cual la Calidad de la Energía juega un papel extremadamente importante. La Calidad de la Energía es un dominio complejo, que cubre más de una docena de áreas problemáticas. La detección temprana y el análisis de esas perturbaciones de la Calidad de la Energía son esenciales para mejorar la calidad del servicio y aumentar la productividad del sistema. En la actualidad, la mayoría de los edificios de uso intensivo de energía sufren en cierto grado de mala Calidad de la Energía, adoptando soluciones parciales para cada problema. Sin embargo, no existe una solución única. Se ha prestado relativamente poca atención a la calidad de la energía.

La ventaja del sistema presentado es que los datos proporcionados por los sensores también podrían ser indicativos del rendimiento del equipo en cuanto a eficiencia y estándares de Calidad de la Energía. Con el actual prototipo de medidor de Internet de las cosas, el usuario podrá detectar no sólo la mayoría de las perturbaciones de la Calidad de la Energía en estado estable, sino también eventos como la caída de tensión, mientras que también monitoriza el consumo de energía.

Hasta donde sabemos, no existe ningún sistema de IoT dedicado al monitoreo de la Calidad de la Energía. Esto es muy adecuado para la submedición de instalaciones industriales o comerciales. A través de la plataforma de IoT basada en la Nube, se puede acceder a la información, analizarla, almacenarla y visualizarla a través de diferentes dispositivos de una manera fácil de usar, evitando la necesidad de una inversión significativa en la infraestructura de software propietario que normalmente se requiere para otros sistemas de medición.

En el futuro se puede trabajar para personalizar las estadísticas de calidad de la energía que sean pertinentes para un electrodoméstico o sistema en particular, a fin de prever mejor el estado general de las instalaciones. De hecho, se puede agregar una malla de sensores de calidad de la energía de Internet de las cosas y sus datos de medición brutos para correlacionarlos y ayudar a identificar las fuentes de perturbaciones mediante estrategias de aprendizaje automático. Esos sensores también pueden incorporarse al electrodoméstico para una mayor integración y vigilancia. Esto podría impulsar una mayor comprensión de la electricidad que se consume actualmente, por ejemplo, mediante la comparación entre el consumo de dispositivos idénticos, la vigilancia de las tendencias y las condiciones, o incluso más, permitiendo una programación optimizada del mantenimiento centrada en el mantenimiento preventivo sólo cuando sea necesario. Además, la detección de perturbaciones de la calidad de la energía permite anticiparse a las fallas con alertas en etapas tempranas basadas en flujos de datos en tiempo real. Esos datos pueden utilizarse para rastrear y diagnosticar continuamente la capacidad de los dispositivos para soportar las fluctuaciones del suministro eléctrico, identificar y gestionar de manera proactiva y a distancia los problemas de fiabilidad, estableciendo si la responsabilidad es del sistema de distribución o por incidentes

dentro de las instalaciones de los clientes, impulsando así la capacidad de actuar y reaccionar en tiempo real, o casi en tiempo real, para el uso eficaz y eficiente de la electricidad.

En el futuro se podría hacer que el prototipo sea más inteligente desde dos puntos de vista. Podrían diseñarse y ejecutarse algoritmos dentro del prototipo para ayudar a seleccionar sólo la información pertinente desde el punto de vista de la energía. En un nivel más alto, en el lado de la Nube, se podría explotar toda la información recibida para descubrir posibles perturbaciones y comportamientos anómalos.

6 Bibliografía

1. Ouf, M.M.; Issa, M.H. Energy consumption analysis of school buildings in Manitoba, Canada. *Int. J. Sustain. Built Environ.* 2017, 6, 359–371.
2. Marinakis, V.; Doukas, H. An Advanced IoT-based System for Intelligent Energy Management in Buildings. *Sensors* 2018, 18, 610.
3. Moreno-Muñoz, A. *Power Quality: Mitigation Technologies in a Distributed Environment*; Springer: London, UK, 2007.
4. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality; IEEE Std 1159-2009 (Revision of IEEE Std 1159-1995); IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2009; pp. 1-81.
5. Gulachenski, E.M. The low cost alternative to UPS. In *Proceedings of the Electro/International*, Boston, MA, USA, 21–23 June 1995; pp. 97–107.
6. Moreno-Munoz, A.; Pallares, V.; Galisteo, P.; Gonzalez-de-la-Rosa, J.J. Study of voltage sag in a highly automated plant. In *Proceedings of the MELECON 2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, Malaga, Spain, 16–19 May 2006; pp. 1060–1063.
7. CENELEC Std. EN 50160: 2010 Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks; 2010.
8. International Electrotechnical Commission, IEC 61000-4-30:2015, *Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 4-30: Testing and Measurement Techniques—Power Quality Measurement Methods*.
9. International Electrotechnical Commission, IEC 61000-4-7:2002+A1:2008, *Electromagnetic Compatibility (EMC). Part 4-7: Testing and Measurement Techniques—General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto*.
10. IEEE Standards Association IEEE P2413-Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things; New York, USA, 2016.

11. Voas, J. NIST Special Publication 800-183. Networks of 'Things'. 2016. Available online: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/sp/800-183/final> (accessed on 30 July 2018).
12. Thingworx. Available online: <https://www.thingworx.com/> (accessed on 30 July 2018).
13. Kaa IoT Development Platform. Available online: <https://www.kaaproject.org/> (acceso 30 de noviembre de 2019).
14. Predix. Available online: <https://www.predix.io/registration/> (accessed on 30 January 2017).
15. Oracle Cloud. Available online: <https://cloud.oracle.com/iot> (accessed on 30 January 2017).
16. Microsoft Azure. Available online: <https://www.microsoft.com/en-us/cloud-platform/internet-of-things-azure-iot-suite> (accessed on 30 July 2018).
17. Abubakar, I.; Khalid, S.N.; Mustafa, M.W.; Shareef, H.; Mustapha, M. Application of load monitoring in appliances' energy management—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 67, 235–245.
18. Salesforce. Available online: <http://www.salesforce.com/iot-cloud/> (accessed on 30 July 2018).
19. Amini, M.H.; Frye, J.; Ilić, M.D.; Karabasoglu, O. Smart residential energy scheduling utilizing two stage Mixed Integer Linear Programming. In *Proceedings of the 2015 North American Power Symposium (NAPS)*, Charlotte, NC, USA, 4–6 Octpber 2015; pp. 1–6.
20. Viswanath, S.K.; Yuen, C.; Tushar, W.; Li, W.T.; Wen, C.K.; Hu, K.; Chen, C.; Liu, X. System design of the internet of things for residential smart grid. *IEEE Wirel. Commun.* 2016, 23, 90–98.
21. Cisco IoT. Available online: <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/internet-of-things/overview.html> (accessed on 30 July 2018).
22. Tushar, W.; Yuen, C.; Chai, B.; Huang, S.; Wood, K.L.; Kerk, S.G.; Yang, Z. Smart Grid Testbed for Demand Focused Energy Management in End User Environments. *IEEE Wirel. Commun.* 2016, 23, 70–80.
23. Bayram, I.S.; Ustun, T.S. A survey on behind the meter energy management systems in smart grid. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 72, 1208–1232.
24. Bahrami, S.; Amini, M.H.; Shafie-khah, M.; Catalao, J.P. A Decentralized Electricity Market Scheme Enabling Demand Response Deployment. *IEEE Trans. Power Syst.* 2018, 33, 4218–4227.
25. Palacios-Garcia, E.J.; Rodriguez-Diaz, E.; Anvari-Moghaddam, A.; Moreno-Munoz, A. Using smart meters data for energy management operations and power quality monitoring in a microgrid. In *Proceedings of the 2017 IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Edinburgh, UK, 19–21 June 2017; pp. 1725–1731.
26. Abu, M.M.; Sănduleac, M.; Stănescu, C. Syncretic Use of Smart Meters for Power Quality Monitoring in Emerging Networks. *IEEE Trans. Smart Grid* 2017, 8, 485–492.

27. Morales-Velazquez, L.; de Jesus Romero-Troncoso, R.; Herrera-Ruiz, G.; Morinigo-Sotelo, D.; Osornio-Rios, R.A. Smart sensor network for power quality monitoring in electrical installations. *Measurement* 2017, 103,133–142.
28. Guimarães, A.M.F. Smart energy monitoring system with ADE7758 IC. In *Proceedings of the 2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, Pisa, Italy, 27–30 May 2015; pp. 1–5.
29. Thongkhao, Y.; Pora, W. A low-cost Wi-Fi smart plug with on-off and Energy Metering functions. In *Proceedings of the 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, Chiang Mai, Thailand , 28 June–1 July 2016; pp. 1–5.
30. Tsunoda, Y.; Tsuchiya, C.; Segawa, Y.; Sawaya, H.; Hasegawa, M.; Ishigaki, S.; Ishibashi, K. A Small-Size Energy-Harvesting Electric Power Sensor for Implementing Existing Electrical Appliances Into HEMS. *IEEE Sens. J.* 2016, 16, 457–463.
31. Spanò, E.; Niccolini, L.; Di Pascoli, S.; Iannacconeluca, G. Last-Meter Smart Grid Embedded in an Internet-of-Things Platform. *IEEE Trans. Smart Grid* 2015, 6, 468–476.
32. ThingsBoard. Available online: <https://thingsboard.io/docs/> (accessed on 30 July 2018).
33. Open IoT. Available online: http://www.openiot.eu/?page_id=70 (accessed on 30 July 2018).
34. Kotsampopoulos, P.; Rigas, A.; Kirchhof, J.; Messinis, G.; Dimeas, A.; Hatziargyriou, N.; Rogakos, V.; Andreadis, K. EMC Issues in the Interaction Between Smart Meters and Power-Electronic Interfaces. *IEEE Trans. Power Deliv.* 2017, 32, 822–831.
35. Thinger. Available online: <http://docs.thinger.io/> (accessed on 30 July 2018).
36. Carriots. Available online: <https://www.carriots.com/> (accessed on 30 July 2018).
37. Particle. Available online: <https://docs.particle.io/> (accessed on 30 July 2018).
38. Getting Started with ThingSpeak. Available online: <https://es.mathworks.com/help/thingspeak/getting-started-with-thingspeak.html> (accessed on 30 January 2017).
39. Subhani, S.C.V.; Coben, J.F.G. A Literature Survey on Power Quality Disturbances in the Frequency Range of 2–150 kHz. In *Proceedings of the International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14)*, Málaga, Spain, 4–6 April 2017.
40. ATmega328P-PU Datasheet. Available online: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf (accessed on 30 January 2017).
41. ADE7758 Datasheet. Available online: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7758.pdf> (accessed on 30 January 2017).

42. ESP8266EX Datasheet. Available online: http://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf (accessed on 30 January 2017).
43. DS1307ZN I2C Real-Time Clock Datasheet. Available online: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1307.pdf> (accessed on 30 January 2017).
44. Alfieri, L.; Bracale, A.; Larsson, A. New power quality indices for the assessment of waveform distortions from 0 to 150 kHz in power systems with renewable generation and modern non-linear loads. *Energies* 2017, 10, 1633.
45. ix 3001 California Instrument. Available online: <http://www.programmablepower.com/ac-power-source/i-iX-Series-II/Specifications.htm> (accessed on 30 July 2018).
46. Amazon AWS. Available online: <https://aws.amazon.com/es/> (accessed on 30 July 2018).
47. JWG C4/C6.29 Power Quality Aspects of Solar Power—Progress Report. Available online: <http://c4.cigre.org/WG-Area/JWG-C4-C6.29-Power-Quality-Aspects-of-Solar-Power> (accessed on 30 July 2018).
48. MQTT Version 3.1.1. Available online: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html> (accessed on 30 January 2017).
49. SEMI F47-0706. Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity. 2006. Available online: <http://ams.semi.org/ebusiness/standards/SEMISTandardDetail.aspx?ProductID=211&DownloadID=594> (accessed on 30 July 2018).
50. PQ Sensor. Available online: <https://thingspeak.com/channels/438573> (accessed on 30 July 2018).
51. Information Technology Industry Council. ITI (CBEMA) Curve Application Note; Technology Committee 3 (TC3) of the ITI Council: Washington DC, USA, 2000.
52. Grant Wilson, I.A. Energy data visualization requires additional approaches to continue to be relevant in a world with greater low-carbon generation. *Front. Energy Res.* 2016, 4, 33.
53. Hopf, H.; Müller, E. Providing energy data and information for sustainable manufacturing systems by Energy Cards. *Robot. Comput. Integr. Manuf.* 2015, 36, 76–83.
54. Chou, C.-C.; Chiang, C.-T.; Wu, P.-Y.; Chu, C.-P.; Lin, C.-Y. Spatiotemporal analysis and visualization of power consumption data integrated with building information models for energy savings. *Resour. Conserv. Recycl.* 2017, 123, 219–229.
55. Chatzopoulos, D.; Bermejo, C.; Huang, Z.; Hui, P. Mobile augmented reality survey: From where we are to where we go. *IEEE Access* 2017, 5, 6917–6950.
56. Ong, S.K.; Nee, A.Y.C. *Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing*; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013; ISBN 1447138732.

57. Suzuki, L.R.; Brown, K.; Pipes, S.; Ibbotson, J. Smart building management through augmented reality. In Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PERCOM WORKSHOPS), Budapest, Hungary, 24–28 March 2014; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2014; pp. 105–110.
58. Regenbrecht, H.; Baratoff, G.; Wilke, W. Augmented reality projects in the automotive and aerospace industries. *IEEE Comput. Graph. Appl.* 2005, 25, 48–56.
59. Ribeiro, T.R.; dos Reis, P.R.J.; Júnior, G.B.; de Paiva, A.C.; Silva, A.C.; Maia, I.M.O.; Araújo, A.S. Agito: Virtual reality environment for power systems substations operators training. In Proceedings of the International Conference on Augmented and Virtual Reality, Crete, Greece, 22–27 June 2014; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014; pp. 113–123.
60. dos Reis, P.R.J.; Junior, D.L.G.; de Araújo, A.S.; Junior, G.B.; Silva, A.C.; de Paiva, A.C. Visualization of power systems based on panoramic augmented environments. In Proceedings of the International Conference on Augmented and Virtual Reality, Crete, Greece, 22–27 June 2014; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014; pp. 175–184.
61. Fraga-Lamas, P.; Fernández-Caramés, T.M.; Blanco-Novoa, Ó.; Vilar-Montesinos, M.A. A review on industrial augmented reality systems for the industry 4.0 shipyard. *IEEE Access* 2018, 6, 13358–13375.
62. Sage, M. Creating augmented reality experiences for enterprise: Good practices, lessons learned, and technological insights. *IEEE Consum. Electron. Mag.* 2017, 6, 42–44.
63. Parise, S.; Guinan, P.J.; Kafka, R. Solving the crisis of immediacy: How digital technology can transform the customer experience. *Bus. Horiz.* 2016, 59, 411–420.
64. Isley, S.C.; Ketcham, R.; Arent, D.J. Using augmented reality to inform consumer choice and lower carbon footprints. *Environ. Res. Lett.* 2017, 12, 64002.
65. Angrisani, L.; Bonavolontà, F.; Liccardo, A.; Schiano Lo Moriello, R.; Serino, F. Smart Power Meters in Augmented Reality Environment for Electricity Consumption Awareness. *Energies* 2018, 11, 2303.
66. Andreas Kamilaris, Jodi Neovino, Sekhar Kondepudi and Balaji Kalluri. A case study on the individual energy use of personal computers in an office setting and assessment of various feedback types towards energy savings. *Energy Build.* 2015, 104, 73–86.
67. Alonso-Rosa, M.; Gil-de-Castro, A.; Medina-Gracia, R.; Moreno-Munoz, A.; Cañete-Carmona, E. Novel Internet of Things Platform for In-Building Power Quality Submetering. *Appl. Sci.* 2018, 8, 1320.
68. Vuforia Developer Portal | License Manager. Available online: <https://developer.vuforia.com/> (accessed on 14 June 2019).
69. Herramientas de desarrollo libres para aplicaciones de Realidad Aumentada con Android. Análisis comparativo entre ellas. Disponible online: <https://cutt.ly/GgRLWoG> (accessed on 14 June 2019)

70. Unity User Manual. Available online: <https://docs.unity3d.com/Manual/index.html> (accessed on 17 June 2019).
71. IoT Analytics—ThingSpeak Internet of Things. Available online: <https://thingspeak.com/> (accessed on 16 January 2019).
72. Unity Profile Tool. Available online: <https://docs.unity3d.com/Manual/Profiler.html> (accessed on 27 June 2019).
73. Brooke, J. System usability scale (sus): A quick-and-dirty method of system evaluation user information. In *Usability Evaluation in Industry*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1996; Volume 189, pp. 4–7.
74. Che Hashim, N.; Abd Majid, N.A.; Arshad, H.; Khalid Obeidy, W. User Satisfaction for an Augmented Reality Application to Support Productive Vocabulary Using Speech Recognition. *Adv. Multimed.* 2018, 2018, 9753979, doi:10.1155/2018/9753979.
75. Xue, H., Sharma, P.; Wild, F. User Satisfaction in Augmented Reality-Based Training Using Microsoft HoloLens. *Computers* 2019, 8, 9.
76. Helin, K.; Kuula, T.; Vizzi, C.; Karjalainen, J.; Vovk, A. User experience of augmented reality system for astronaut’s manual work support. *Front. Robot. AI* 2018, 5, 106.
77. Sauro, J. Measuring Usability With the system Usability Scale (SUS). In *Measurement Usability; MeasuringU*: Denver, CO, USA, 2011; pp. 1–5.
78. Live wifislax. Available online: <https://www.wifislax.com/> (accessed on 08 May 2020).
79. Wireshark Foundation. (2016). Wireshark. 10/05/2016, de Wireshark Foundation Sitio web: www.wireshark.org
80. Ettercap Project. (2015). Ettercap. 10/05/2016, de Ettercap Project Sitio web: <http://ettercap.github.io/ettercap>
81. Sriparasa, S. S., 2013. JavaScript and JSON essentials. s.l.:Packt Publishing
82. Endesa, <https://www.endesa.com/es/conoce-la-energia/blog/contadores-electricos>
83. S. B. y. O. B. Pradyumna Gokhale, “Introduction to iot,” no. 5, Enero 2018.
84. ARToolKit. Sitio web: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>
85. azuma ronald t. (1997) a survey of augmented reality (August 1997)
86. A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, Paul MILGRAM Fumio KISHINO 1994/12/25
87. IDAE, [guia práctica de la energía, https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11406_Guia_Practica_Energia_3ed_A2010_509f8287.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11406_Guia_Practica_Energia_3ed_A2010_509f8287.pdf).
88. Public Cloud Services Comparison Tool, <https://www.cloudcomparisontool.com/>
89. Wifimanager, <https://github.com/tzapu/WiFiManager>
90. Product Selection Table of Energy Metering ICs <https://www.analog.com/en/parametricsearch/10577#/>
91. An Open Hardware Design for Internet of Things Power Quality and Energy Saving Solutions <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/3/627>

92. *ThingSpeak* is an open source “Internet of Things” application and API to store and retrieve data from things <https://github.com/search?q=thingspeak>
93. PTC <https://www.ptc.com/es>

Anexo A: Publicaciones

- [An IoT Based Mobile Augmented Reality Application for Energy Visualization in Buildings Environments](https://www.mdpi.com/2076-3417/10/2/600) (<https://www.mdpi.com/2076-3417/10/2/600>) Alonso-Rosa, M.; Gil-de-Castro, A.; Moreno-Munoz, A.; Garrido-Zafra, J.; Gutierrez-Ballesteros, E.; Cañete-Carmona, E. An IoT Based Mobile Augmented Reality Application for Energy Visualization in Buildings Environments. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 600.
- [Novel Internet of Things Platform for In-Building Power Quality Submetering](https://www.mdpi.com/2076-3417/8/8/1320) (<https://www.mdpi.com/2076-3417/8/8/1320>) Alonso-Rosa, M.; Gil-de-Castro, A.; Medina-Gracia, R.; Moreno-Munoz, A.; Cañete-Carmona, E. Novel Internet of Things Platform for In-Building Power Quality Submetering. *Appl. Sci.* **2018**, *8*, 1320.
- [An IoT Low-Cost Voltage Sag Detector](https://ieeexplore.ieee.org/document/8472001) (<https://ieeexplore.ieee.org/document/8472001>) [Ricardo Medina-Gracia](#) ; [Aurora Gil-de-Castro](#) ; [Manuel Alonso-Rosa](#) ; [Eduardo Canete-Carmona](#) ; [Antonio Moreno-Munoz](#) ; [David Matabuena](#) 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN) Year: 2018 | Conference Paper | Publisher: IEEE

Anexo B: Proyectos derivados

- Proyecto de investigación (PIV-024/16) i-energy " Monitorización del consumo eléctrico de los centros educativos".
- El Internet de las cosas en las empresas Cordobesas.
<https://sites.google.com/ieslafuensanta.es/iot/>
- Realidad Aumentada en el IoT
<https://sites.google.com/ieslafuensanta.es/realidadaugmentadaeneliot/>
- El Internet de las Cosas (IoT) en la Lucha Contra el COVID-19 y la Realidad Aumentada
<https://cutt.ly/9jBUhyw>