



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Proyecto de Wi-SUN para red IoT

Autor: Jaime de Clemente Fernández-Picazo

Director: Dr. Leonard F. Register

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Proyecto de Wi-SUN para red IoT  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.  
El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido  
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Jaime de Clemente Fernández-Picazo Fecha: 5/ 07/ 2023

Autorizada la entrega del proyecto  
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Dr. Leonard F. Register





# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Proyecto de Wi-SUN para red IoT

Autor: Jaime de Clemente Fernández-Picazo

Director: Dr. Leonard F. Register

Madrid

# Agradecimientos

A mis padres,

que me han educado en el esfuerzo y el mérito y no han escatimado nunca en mi formación.

A mis hermanos y amigos,

que me han acompañado durante estos años en los mejores momentos y en los más duros.

A mis abuelos, maestros,

que me enseñaron desde pequeño el valor del conocimiento.

Al Señor,

que desde Su Casa en lo Alto me ha dado el tesón y la fuerza que me faltaba en mis momentos de flaqueza.

A todos ellos, porque sin ellos no estaría aquí ni habría acabado esta gran fase que es la universidad.



# PROYECTO DE WI-SUN PARA RED IOT

**Autor: de Clemente Fernández-Picazo, Jaime.**

Director: Register, Leonard F.

Entidad Colaboradora: Texas Instruments Incorporated (TI)

## RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto contiene una propuesta de diseño para el desarrollo de una red inteligente conectada usando nodos inalámbricos. Para la conexión de estos nodos se utiliza el protocolo Wi-SUN para crear una red de malla. Con el fin de probar este desarrollo, se expone como caso de uso una red de cargadores eléctricos.

**Palabras clave:** Wi-SUN, red de malla, red inteligente (Smart Grid), Internet de las Cosas (IoT), protocolos inalámbricos

### 1. Introducción

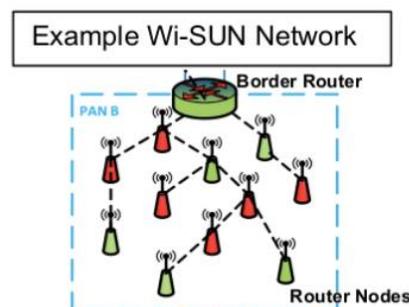
El presente documento describe el proyecto, desarrollado en asociación con Texas Instruments (TI), para crear una red inteligente (Smart Grid) a través de una red de área (Field Area Network, FAN) utilizando el protocolo Wi-SUN. El documento define el proyecto y presenta el trabajo realizado a lo largo del curso actual. Como se ha dicho, el proyecto consiste en el estudio de la creación de una red inteligente sobre una red Wi-SUN. Para demostrar los resultados del diseño se probará en un prototipo de red de puntos de carga de vehículos eléctricos. Los diferentes nodos en dicha red se conectarán a través de una red Wi-SUN que enviará los datos recogidos sobre la carga en cada punto a una interfaz de usuario donde el administrador podrá verlos.

Este documento consiste en la presentación del problema que ha llevado al desarrollo del proyecto, incluyendo las especificaciones de diseño y los antecedentes del mismo. Después de motivar el proyecto se procederá a una explicación detallada de la solución alcanzada para su solución y su implementación. Para ello, se habrán de explicar también las tecnologías utilizadas en el desarrollo. El documento explorará también los métodos de testeo y evaluación utilizados para comprobar el correcto funcionamiento del modelo, así como las consideraciones de tiempo y coste que el proyecto ha tenido.

Finalmente, el documento resumirá los aspectos éticos y de seguridad y proveerá de recomendaciones para el desarrollo futuro de una solución más completa.

## 2. Definición del proyecto

Este proyecto llega en un contexto de rápido desarrollo de las tecnologías y, en particular, del Internet de las Cosas (IoT) que, por diversos motivos –entre los que merece especial mención la concienciación existente respecto al respeto al medio ambiente y la ecología–, tratan de conseguir ciudades más eficientes. Así, las soluciones IoT proponen mejorar esta eficiencia incorporando a la red dispositivos ‘inteligentes’ que reporten diferentes datos de su estado o ambiente. Dada la amplitud que tienen que cubrir habitualmente estos protocolos, se han venido desarrollando soluciones de mediano alcance como las redes de área de campo o FAN (Field Area Networks), así como soluciones eficientes energéticamente para, dada la inmensa cantidad de dispositivos conectados, reducir el uso de energía o minimizarlo. Dentro de éstas, más recientemente han ganado popularidad los protocolos que utilizan redes de malla (Mesh Networks) por su escalabilidad y su robustez. Entre ellos cobra cada vez una mayor relevancia para el diseño de estas soluciones el protocolo Wi-SUN.



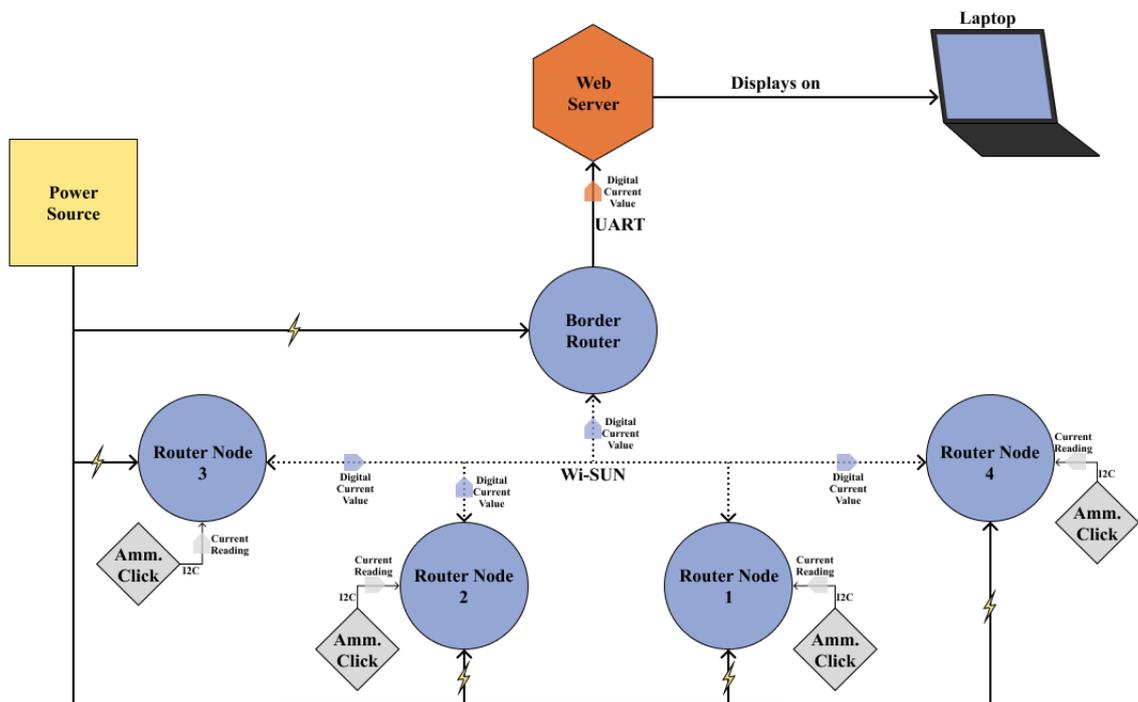
*Ilustración 1: Ejemplo de red Wi-SUN<sup>[1]</sup>*

Este protocolo combina todas las cualidades descritas en el párrafo anterior: es muy eficiente energéticamente, utiliza una red de malla, lo que le permite una gran capacidad de escalado, le aporta mayor robustez y le permite alcanzar grandes distancias. Es por ello que este proyecto estudia la aplicación de este protocolo como óptimo para este tipo de soluciones.

## 3. Descripción del sistema

Como se ha venido explicando, el proyecto explicará la aplicación del protocolo Wi-SUN a una solución para una red IoT. Sin embargo, no será sino probando que se podrá ver realmente la utilidad de este protocolo. Por esa razón, la solución se ha implementado en un caso de uso. El caso de uso en cuestión es una de las posibles situaciones en las que una red de este tipo podría ser útil: una red de puntos de carga de vehículos eléctricos.

De esta manera, los diferentes puntos de carga enviarían datos a un *router* central que los enviaría a un servidor web que, al final del proceso, se los mostraría a un administrador en una interfaz de usuario. Dadas las limitaciones presupuestarias y de tiempo que se imponen al desarrollo de este proyecto, resulta palmario que una solución como la descrita no se puede desarrollar al completo. Es por eso que se han aplicado los principios descritos para crear un prototipo que, aunque incluye la funcionalidad descrita, es más acorde a lo posible para un proyecto de estas características. El esquema seguido en la solución descrita puede verse bajo estas líneas.



*Ilustración 2: Esquema del prototipo implementado (Elaboración propia)*

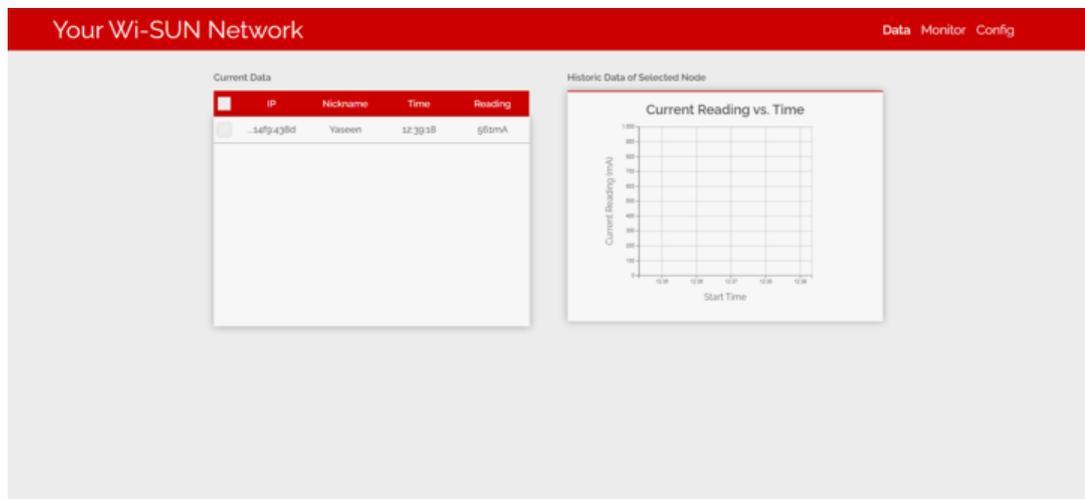
Así, el desarrollo del prototipo se puede dividir en tres partes diferenciadas: la comunicación de los sensores de corriente con los nodos, la de los nodos entre sí y a su vez

con el *router* central (la red Wi-SUN propiamente dicha) y la comunicación de este último con el servidor web y el funcionamiento del mismo.

#### 4. Resultados

Como se ha dicho, el sistema se divide en tres subsistemas. A modo de resumen, los resultados obtenidos son positivos y se consigue la conectividad entre todas las partes de la red. Más concretamente:

- El Sistema de medición de corriente la mide de manera correcta –definido como dentro de un rango de 0,5A por parte de Texas Instruments– siempre de que las corrientes introducidas estén por debajo de unos 700mA.
- La red Wi-SUN transmite correctamente los datos al router central, que los transmite al servidor web.
- El servidor y la interfaz de usuario se conectan de manera satisfactoria, mostrando los últimos datos disponibles de cada nodo. Un ejemplo del resultado final cuando hay un solo nodo conectado a la red y se envía una corriente de 500mA puede verse bajo estas líneas.



*Ilustración 3: Interfaz de usuario con un nodo conectado y mandando información*

#### 5. Conclusiones

En suma, este documento provee con una visión completa de la motivación del problema así como de su implementación en un prototipo. A través de la correcta integración entre los tres subsistemas descritos se ha alcanzado una solución de diseño funcional con la transmisión de datos punto a punto.

Aunque la solución presentada es funcional y trabaja de manera correcta, se pueden llevar a cabo mejoras para pulir el funcionamiento del prototipo. Estas incluyen una medición más precisa de la corriente, un *hardware* más robusto o un testeo más profundo. Sin embargo, como se ha dicho esto no es más que un prototipo cuyo fin no era otro que la comprobación de la funcionalidad del protocolo Wi-SUN en una solución IoT por lo que, dadas las limitaciones que se imponen al proyecto, se considera cumplido el objetivo y se deja el pulido de los detalles a una implementación real del sistema.

## 6. Referencias

- [1] Texas Instruments. “Wi-SUN products.” Texas Instruments.  
<https://www.ti.com/wireless-connectivity/wi-sun/overview.html#:~:text=Key%20Wi%2DSUN%20advantages&text=Wi%2DSUN%C2%AE%20technology%20supports,products%20enabling%20multi%2Dvendor%20interoperability>

# **WI-SUN PROJECT FOR SMART GRID**

**Author: de Clemente Fernández-Picazo, Jaime.**

Supervisor: Register, Leonard F.

Collaborating Entity: Texas Instruments Incorporated (TI)

## **ABSTRACT**

This Project contains a design proposal for the development of a smart grid using wireless nodes. In order to connect this nodes the Wi-SUN protocol is used to create a mesh network. To try out the performance of this solution, a use case comprising a net of Electric Vehicle (EV) charging stations is presented.

**Keywords:** Wi-SUN, mesh network, Smart Grid, Internet of Things (IoT), wireless devices

## **1. Introduction**

This document describes the Wi-SUN FAN Smart Grid project developed in association with Texas Instruments. It defines the project and presents the cumulation of work performed over the course of the present year. The project consists of the study of the creation of a Smart Grid over a Wi-SUN network. To showcase the results of the project, a prototype for a net of Electric Vehicle (EV) chargers will be presented. The different nodes in the network will be connected over a Wi-SUN network that can send charging information to a web server where users can view the data.

This document consists of a statement of the design problem which includes design specifications and background information. Proceeding after the design problem, is an in depth summary of the final design solution and its implementation. The document will also explore testing and evaluation methods used to evaluate performance, as well as any project time and cost considerations. Finally, the document will assess the safety and ethical aspects of the design and provide recommendations for future development.

## 2. Project Definition

This Project is done in a time where there exists a fast technological development and, in particular, of Internet of Things (IoT) which, for various reasons –among which awareness and respect for the environment and ecology could be specially mentioned–, are trying to increase the efficiency of cities. IoT solutions advance towards increasing this efficiency by incorporating into the net ‘intelligent’ devices capable of reporting data about their state and that of their environment. Given the amplitude that this protocols need to cover, experts have been designing medium-range solutions such as Field Area Networks (FANs) as well as energetically efficient solutions such that, even with the huge amount of devices connected, the use of energy is reduced or minimized. Inside these, more recently mesh network protocols have been gaining popularity thanks to their ease of scalability and their robustness. Among these the Wi-SUN protocol is coming to gain more and more relevance to implement these solutions.

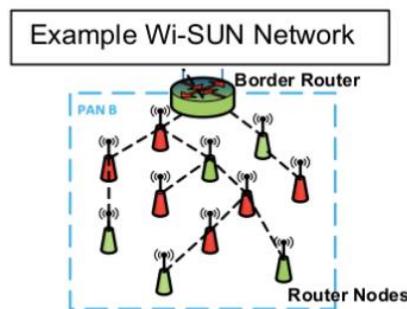


Figure 4: Wi-SUN network example <sup>[1]</sup>

This protocol, thus, combines all the qualities described in the previous paragraph: it is very efficient in terms of energy and it uses a mesh network, which allows it great scaling capabilities, gives it a greater robustness and enables it to reach large distances. It is for these reasons that this project studies the application of this protocol as optimal for these type of solutions.

## 3. System Description

As it has been already explained, the project will explain the application of the Wi-SUN protocol to an IoT solution. Nevertheless, it will only be by trying it out that one will really be able to certify the utility of said protocol. For this reason, the solution has been implemented into a use case. This use case is one of the possible situations in which this type of network could be useful: a network of EV charging stations.

In this case, the different charging points will send data to a central router which will itself forward them to a web server which, in the end of the process, could show them to an administrator via a user interface. Given the cost and time constraints imposed to this project, it seems obvious that a solution as the one described cannot be developed to its full extent. It is for this reason that the principles described have been applied to create a prototype that, despite it including the functionality specified above, is more in line with the possibilities of a project of these characteristics. The outline followed for the implementation can be seen below these lines.

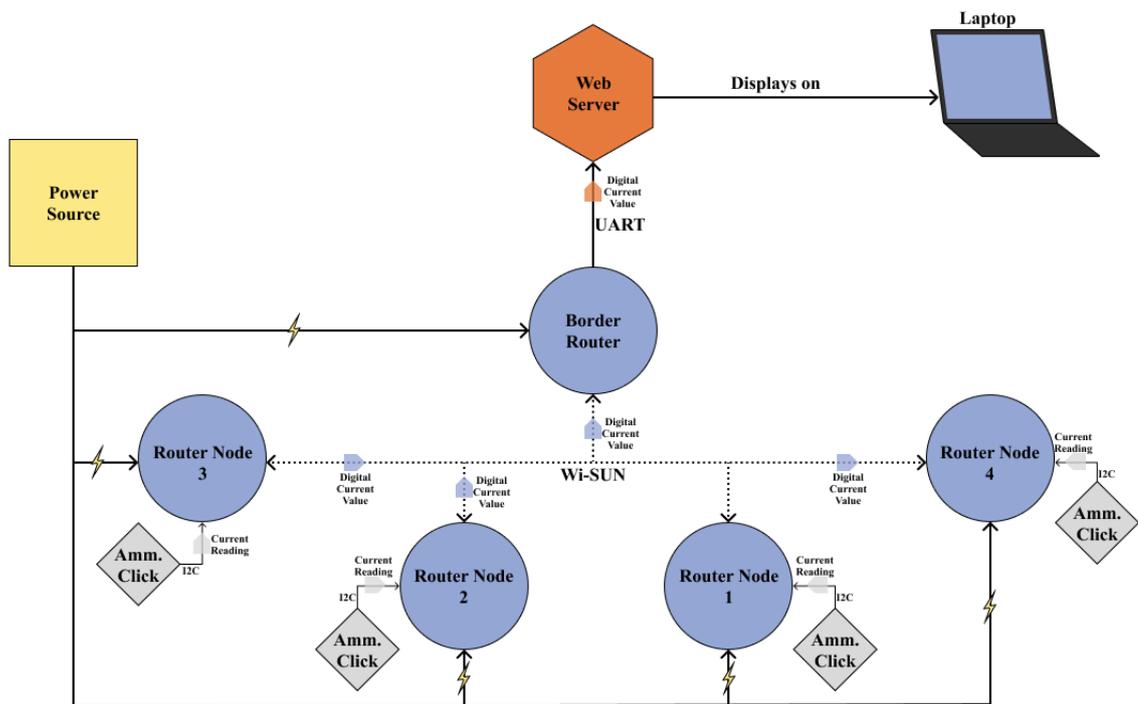


Figure 5: Prototype Block Diagram (Own elaboration)

From the image above can be drawn the system subdivision into three subsystems: the communication between the ammeter clicks and the nodes, the communication amongst the latter and with the border router (the Wi-SUN network), and that of this one with the web server together with its internal functioning.

#### 4. Results

As stated above, the system is divided into three subsystems. In a nutshell, the gathered results are positive and connectivity is achieved throughout all the parts of the network. More precisely:

- The ammeter system measures current values correctly –correctly being defined in the range of 0.5A by Texas Instrumens– as long as the introduced currents stay in a range below 700mA.
- The Wi-SUN network correctly transmits data to the border router, which then sends them to the web server.
- The web server and the user interface are successfully connected, showing the latest data available from each node. An example displaying the final result when there is one single node in the network and a 500mA current is sent can be seen below.

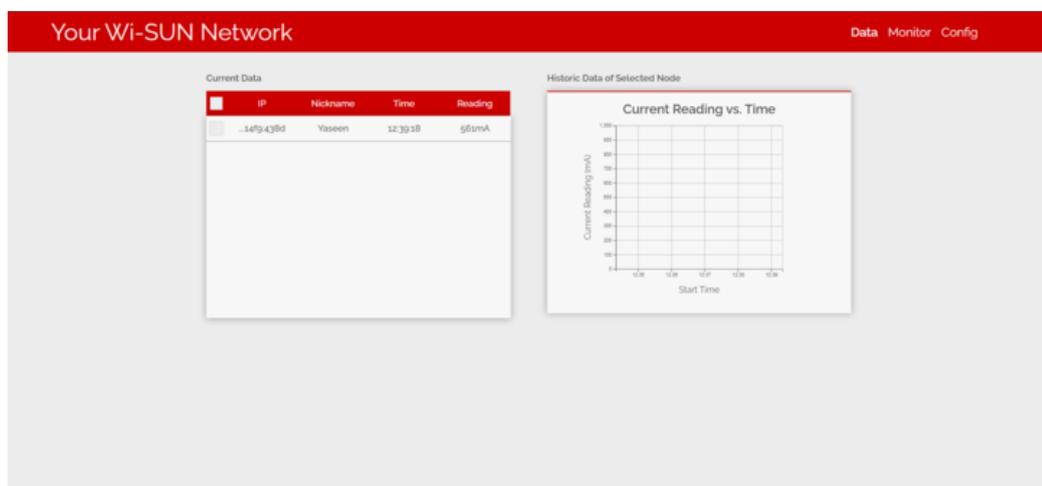


Figure 6: User Interface with one connected node sending information

## 5. Conclusions

Overall, this report provided an in depth look at the design problem which included unique design specifications. Through the successful integration of three subsystems (ammeter, Wi-SUN network and web server), a successful design solution was achieved as end-to-end operation was demonstrated by the transmission of current data.

While the design solution is deemed successful, improvements can still be made to further enhance the prototype. These include having a more precise measurement of current, more robust hardware and further testing. The prototype presented is, however, that, a prototype with the goal of trying out the Wi-SUN protocol to implement an IoT solution so, given the constraints imposed to this project, the goal is deemed achieved and the implementation of these details is left to a real, scaled implementation of such system.

## 6. References

- [1] Texas Instruments. "Wi-SUN products." Texas Instruments.  
<https://www.ti.com/wireless-connectivity/wi-sun/overview.html#:~:text=Key%20Wi%2DSUN%20advantages&text=Wi%2DSUN%C2%AE%20technology%20supports,products%20enabling%20multi%2Dvendor%20interoperability>

## Índice de la memoria

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>5</b>
1.1 Motivación del proyecto .....	5
1.1.1 Internet de las Cosas (IoT): qué es y por qué es importante .....	5
1.2 Descripción del proyecto.....	7
1.2.1 Qué son las redes de malla .....	8
1.2.2 Field Area Networks (FANs).....	10
1.3 Descripción del trabajo .....	12
1.4 Ecuaciones.....	13
1.5 Tablas .....	14
1.6 Código fuente de programas .....	14
<b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías .....</b>	<b>15</b>
2.1 Tecnologías de software.....	15
2.1.1 Wi-SUN (Wireless Smart Utility Network).....	16
2.1.2 CoAP (Constrained Application Protocol) .....	18
2.1.3 IPv6 (Internet Protocol Version 6).....	20
2.1.4 Otras tecnologías .....	21
2.2 Dispositivos de hardware .....	23
2.2.1 LaunchPads TI CC1312R7.....	23
2.2.2 Sensores de corriente MikroE.....	24
<b>Capítulo 3. Estado de la Cuestión .....</b>	<b>25</b>
3.1 trabajos y ensayos .....	25
3.2 Patentes .....	29
3.3 Impacto en el diseño y la toma de decisiones .....	32
<b>Capítulo 4. Definición del Trabajo .....</b>	<b>34</b>
4.1 Justificación.....	34
4.2 Objetivos .....	35
4.2.1 Especificaciones de Diseño.....	36
4.3 Planificación y Estimación Económica.....	38
4.3.1 Planificación .....	38
4.3.2 Estimación económica.....	39

<b>Capítulo 5. Sistema/Modelo Desarrollado</b> .....	<b>44</b>
5.1 Análisis del sistema.....	44
5.1.1 Sistema de medición de corriente.....	45
5.1.2 Red Wi-SUN.....	47
5.1.3 Sistema de servidor web.....	48
5.1.4 Integración de los Sistemas.....	49
5.2 Implementación.....	49
5.2.1 Decisiones de Diseño.....	50
5.2.2 Obstáculos de Diseño.....	50
<b>Capítulo 6. Análisis de Resultados</b> .....	<b>51</b>
6.1 Lectura de corriente.....	52
6.1.1 Método.....	52
6.1.2 Resultados.....	54
6.1.3 Análisis.....	56
6.1.4 Recomendaciones y/o medidas adoptadas.....	58
6.2 Red Wi-SUN.....	59
6.2.1 Método.....	60
6.2.2 Resultados.....	63
6.2.3 Análisis.....	63
6.2.4 Recomendaciones y/o medidas adoptadas.....	63
6.3 Interfaz de Usuario.....	64
6.3.1 Método.....	65
6.3.2 Resultados.....	65
6.3.3 Recomendaciones y/o medidas adoptadas.....	66
<b>Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros</b> .....	<b>68</b>
<b>Capítulo 8. Bibliografía</b> .....	<b>70</b>
<b>ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS</b> .....	<b>72</b>
<b>ANEXO II: ESQUEMA DEL MEDIDOR DE CORRIENTE</b> .....	<b>78</b>
<b>ANEXO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ DE USUARIO</b> ....	<b>79</b>

---

## *Índice de figuras*

Ilustración 1: Ejemplo de red Wi-SUN <sup>[1]</sup> .....	10
Ilustración 2: Esquema del prototipo implementado (Elaboración propia).....	11
Ilustración 3: Interfaz de usuario con un nodo conectado y mandando información.....	12
Figure 4: Wi-SUN network example <sup>[1]</sup> .....	15
Figure 5: Prototype Block Diagram (Own elaboration) .....	16
Figure 6: User Interface with one connected node sending information.....	17
Ilustración 7: Esquema del prototipo diseñado (fuente: elaboración propia) .....	13
Ilustración 8: Comunicaciones CoAP <sup>[10]</sup> .....	18
Ilustración 9: Pila de Wi-SUN FAN de Texas Instruments.....	29
Ilustración 10: Diagrama de bloques del sistema .....	44
Ilustración 11: Diagrama de bloques del sistema de medición de corriente.....	46
Ilustración 12: Esquema del servidor web <sup>[8]</sup> .....	48
Ilustración 13: Diagrama de flujo de extremo a extremo .....	49
Ilustración 14: Registro de la interfaz de red.....	61
Ilustración 15: Guiones del Spinel Host .....	62
Ilustración 16: Registros del servidor .....	62

## *Índice de tablas*

Tabla 2: Especificaciones del sistema .....	37
Tabla 3: Resumen de la primera compra .....	40
Tabla 4: Resumen de la segunda compra .....	41
Tabla 5: Mapeo de pines del LaunchPad .....	46
Tabla 6: Resultados para un suministro de corriente de 500mA .....	54
Tabla 7: Resultados para un suministro de corriente de 200mA .....	55
Tabla 8: Resultados para un suministro de corriente de 800mA .....	55
Tabla 9: Resultados de la medición de corriente en serie simple de 10k $\Omega$ .....	56

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se realiza una introducción de este proyecto, describiendo su motivación a fin de despertar el interés del lector por el mismo.

### **1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO**

El presente proyecto ha sido realizado en un contexto como el actual, en el que se da un desarrollo exponencial de las tecnologías. En concreto, en los últimos años se han desarrollado especialmente las tecnologías inalámbricas y a través de Internet. Esto, unido a la mercantilización de la tecnología, permitió, en un primer momento, la incorporación de una gran cantidad de usuarios a la red. Más recientemente, se han unido a esta tendencia de incorporación a Internet dispositivos contenidos en objetos presentes en el día a día de la mayoría de nosotros. Este fenómeno ha venido en llamarse Internet de las cosas (Internet of Things o IoT) y ha aumentado de manera increíble la cantidad de dispositivos en la red. De hecho, ya en 2008 el número de dispositivos conectados superaron al número de personas en el mundo y hoy en día hay más de 21,5 mil millones de dispositivos conectados a la red <sup>[1]</sup>. Dada la importancia de este tipo de tecnología en este trabajo, merece la pena describirlo en profundidad, a lo que se dedica el siguiente punto.

#### **1.1.1 INTERNET DE LAS COSAS (IOT): QUÉ ES Y POR QUÉ ES IMPORTANTE**

Se ha hablado a lo largo del apartado anterior sobre el Internet de las cosas (más comúnmente llamado simplemente IoT, por sus siglas en inglés). Sin embargo, aunque se ha hecho una pequeña introducción, para comprender su importancia y la razón de ser de este proyecto resulta importante realizar una descripción más detallada de las tecnologías que se envuelven bajo este término y de su utilidad.

El término Internet de las cosas se acuñó allá por el año 1999 por un trabajador de Procter & Gamble, Kevin Ashton, en su presentación con este título <sup>[1]</sup>. Más tarde, éste se convertiría en el fundador del Laboratorio Auto-ID del Instituto Tecnológico de

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

Massachussets (MIT, por sus siglas en inglés), dedicado precisamente a estas tecnologías  
[2]. Pero, ¿qué es y por qué es tan importante?

El IoT es la tecnología envolvente a dispositivos contenedores de sensores y actuadores que se comunican, entre ellos y con otros dispositivos, a través de redes cableadas o inalámbricas, lo que permite al mundo estar monitoreado [3]. De hecho, la mayoría de nosotros somos usuarios de estas tecnologías, en muchos casos sin saberlo. Sin ir más lejos, hoy en día muchos de nuestros electrodomésticos y la domótica que controla nuestra casa cumple con esta definición y podría, por tanto, ser considerada como IoT. No es esta la única aplicación, sin embargo, que tienen este tipo de tecnologías, sino que ayudan a un número inimaginable de tareas desde la salud, con dispositivos que pueden insertarse en el cuerpo humano o llevarse puestos para monitorear su estado, pasando por la automoción, para su mantenimiento o diseño, hasta las ciudades en general, para gestión del tráfico, monitorización medioambiental, gestión de recursos, etc [3].

De hecho, es un mercado que está llamado a crecer enormemente. El citado estudio de McKinsey cuantifica el impacto económico de este sector en 12,5 billones de dólares para 2030, con un 41% de esa cantidad reservada al mercado de la optimización de las operaciones, que es precisamente de lo que trata el prototipo de este proyecto.

Por si esta ingente cantidad de dinero no fuera suficiente para hacer a casi cualquiera mostrar interés por este tipo de tecnologías, el IoT tiene, además, muchas otras ventajas como el aumento de la productividad y la eficiencia gracias a la automatización de procesos que, anteriormente, tenían que hacer humanos; el ahorro energético, con su consecuente beneficio para el medio ambiente. Ambas ventajas anteriores unidas nos llevan también a la creación de procesos sostenibles. De hecho, según el Foro Económico Mundial, el 75% de los proyectos IoT se centran en mejorar la eficiencia energética de las ciudades, las energías sostenibles y el consumo responsable, estimándose para el año 2030 un ahorro del consumo energético por encima de los mil millones de MWh [4].

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.*

---

En cualquier caso, está claro que no podían ser todo ventajas. El desarrollo de este tipo de tecnologías conlleva un serie de desventajas, como pueden ser la falta de seguridad (al traspasarse una ingente cantidad de datos a través de la red, se hacen disponibles muchos más puntos y datos susceptibles de ataques cibernéticos), necesidad de inversión, reducción de la intimidad, aumento de la brecha tecnológica o falta de estandarización de los dispositivos y protocolos que, en algunos casos, crea falta de compatibilidad <sup>[5]</sup>. De todas formas, y lejos de querer restar relevancia al gran impacto que pueden tener estos inconvenientes, se puede argumentar que muchos de ellos surgen del gran desarrollo que están teniendo estas tecnologías y podrían achacarse, sencillamente, a problemas de crecimiento que, muy probablemente, se podrán ir puliendo conforme vaya creciendo la adopción de estas tecnologías y su importancia.

Con todo, ahora que el lector ha podido comprender de qué se trata y la importancia que tiene el IoT, resulta necesario que comprenda lo que hace este proyecto para enmarcarse dentro de estas tecnologías. Para ello, en el siguiente apartado se realiza una introducción al proyecto en sí, así como al trabajo realizado en su desarrollo.

## ***1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO***

El proyecto que nos incumbe trata, en línea con lo explicado, de encontrar una solución para hacer más eficiente la gestión de procesos y, en concreto, de procesos que se desarrollen en redes de tamaños medianos y grandes, normalmente enmarcadas en el contexto de una ciudad. Son innumerables los trabajos que se han hecho a este respecto, así como los protocolos que se utilizan para este tipo de soluciones. Sin embargo, aunque he de admitir, humildemente, que quizá mi solución no sea perfecta y animo al ávido lector que esté devorando estas páginas a mejorarla, pues toda mejora en este campo se traduce en una mejora para el desarrollo, la solución que presenta este proyecto trata de maximizar las ventajas presentadas mientras minimiza los inconvenientes, haciendo uso de las últimas tecnologías para tratar de ser lo más eficiente posible.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

De esta manera, la solución presentada crea una red inteligente de malla utilizando un protocolo que, precisamente por aumentar las ventajas y disminuir los inconvenientes explicados, podría convertirse en el estándar para este tipo de aplicaciones. Este protocolo, llamado Wi-SUN (Wireless Smart Utility Network) es un protocolo, como su nombre indica, para la creación de redes inalámbricas inteligentes. Además, este protocolo es útil para su implementación en situaciones donde las redes deben extenderse distancias medias, creando redes de área de campo (Field Area Networks, FANs). Sin embargo, en este párrafo, aunque corto, se han presentado una gran cantidad de conceptos que han de ser explicados como paso previo a comprender la implementación realizada. Aunque el protocolo Wi-SUN se explicará en el siguiente capítulo sobre la Descripción de las Tecnologías, para su comprensión es necesaria la explicación previa del concepto anterior, las redes de malla. Por otro lado, resulta también relevante comprender los diferentes tipos de redes y qué son las redes de área de campo o FANs.

### **1.2.1 QUÉ SON LAS REDES DE MALLA**

Aunque resulte probable que el lector se haya encontrado ya con este término, es muy posible que permanezca sin saber realmente lo que es. Por ello, me parece relevante como paso previo a la definición del proyecto su explicación detallada que, por sí solo, conforma una de las bases del proyecto.

Las redes de malla son colecciones de dispositivos que dan conexión a Internet, diferenciándose de las redes individuales en que estas últimas suelen estar compuestas por múltiples dispositivos que se conectan a uno solo mientras que, en las primeras, todos los dispositivos de la red proveen conectividad y están interconectados, normalmente, con una gran cantidad de otros dispositivos de la red<sup>[6]</sup>. Este tipo de redes generan una serie de beneficios, como pueden ser:

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

---

- Mayor alcance: Dado que cada dispositivo es una fuente de conectividad, resulta sencillo seguir añadiendo componentes a la red que, pasando por otros de los dispositivos, puedan alcanzar su ‘centro’. En una red normal, la conectividad tiene el alcance que tenga el nodo que conecte a todos los demás. En una red de malla, sin embargo, se pueden añadir dispositivos dentro del rango de alcance de cualquiera de los nodos ya conectados, lo que amplía significativamente el rango disponible.
- Escalabilidad: La característica anterior lleva de manera directa a esta. La propia conectividad de todos los nodos de la red hace que se puedan añadir sin problema un gran número de dispositivos.
- Robustez o resiliencia: Esta conectividad de la que venimos hablando hace también posible que la red sea mucho más robusta. En una red normal, la caída de un nodo, sobre todo el central, provoca la caída de la conectividad de toda la red. En una red de malla, al estar cada dispositivo conectado a varios, la caída de uno de ellos no tiene por qué significar la pérdida de conexión o de datos de los demás, pues éstos serán enviados por otra ruta. Es por esto que se suele hablar también de redes auto sanables, ya que ante la caída de uno de los nodos se enviarán los datos por otra ruta sin perder la información de los que estaban conectados a él <sup>[6]</sup>.

Resulta obvio que todas estas características son beneficiosas para las tecnologías IoT –y, quizá, para la mayoría de redes– y, en concreto, para las que se aplican a soluciones para ciudades inteligentes. Dado el tamaño de la ciudad, el mayor alcance es beneficioso de primeras. Si todos los nodos tuviesen que estar conectados a un mismo nodo central, éste quizá no tuviese el alcance suficiente para cubrir toda una ciudad. La escalabilidad favorece a la eficiencia de estas redes, dado que para añadir más nodos no se debe aumentar la capacidad o duplicar infraestructuras. Finalmente, la robustez es beneficiosa para cualquier tipo de red, ya que en ninguna se quieren perder datos, por lo que un aumento en esta cualidad resulta siempre positivo. Este tipo de redes, sin embargo, no están exentas de inconvenientes, como pueden ser un mayor tráfico por cada nodo

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

---

(mientras en otras redes este tráfico sólo debe ser soportado por el nodo central) y mayores riesgos de seguridad, ya que cada nodo es un potencial punto de entrada de ataques <sup>[6]</sup>. De todas formas, estos inconvenientes se están mejorando con el propio desarrollo de estas incipientes tecnologías y, de hecho, Wi-SUN, el protocolo utilizado en este proyecto, mejora el segundo de estos inconvenientes.

### **1.2.2 FIELD AREA NETWORKS (FANS)**

Las Redes de Área de Campo (FANs, por sus siglas en inglés, Field Area Networks) son sistemas de comunicación diseñados para proporcionar conectividad y control en entornos de campo o industriales. Es decir, entran dentro de una categoría intermedia de redes, más pequeñas que las Wide Area Networks (WAN) y, al mismo tiempo, más grandes que las Local Area Networks (LANs). Estas redes se utilizan en una variedad de aplicaciones, como infraestructuras de servicios públicos, petróleo y gas, industrias manufactureras y agrícolas, entre otros sectores.

Una FAN se compone de dispositivos de red interconectados, sensores, actuadores y sistemas de control. Estos componentes trabajan juntos para crear una infraestructura de comunicación robusta y confiable en áreas remotas o extensas, donde la conectividad tradicional puede ser limitada o inexistente. Además, una de las características clave de las FANs es su capacidad para soportar la comunicación en tiempo real, lo que permite la monitorización y el control en tiempo real de los sistemas y procesos. Esto es especialmente importante en entornos críticos, como la gestión de la energía eléctrica, el control de la producción industrial o la supervisión de redes de distribución de agua.

Las FANs utilizan una variedad de tecnologías de comunicación, dependiendo de los requisitos específicos de la aplicación. Algunas de las tecnologías comunes utilizadas incluyen redes inalámbricas como Wi-Fi, Zigbee o Bluetooth, o físicas como Ethernet en aquellos casos donde la infraestructura física pudiese llegar a permitirlo, así como

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

---

tecnologías de redes de área amplia como Wi-SUN, que es para lo que se utiliza en este proyecto.

En cuanto a su arquitectura, las FANs suelen seguir un modelo de red de malla, donde los dispositivos se comunican entre sí de forma inalámbrica o cableada, formando una red interconectada. Esto, como hemos mencionado en el apartado anterior, proporciona redundancia y resiliencia, ya que los dispositivos pueden encontrar múltiples rutas para transmitir datos y mantener la conectividad en caso de fallos en un enlace o dispositivo específico. Este es también precisamente el caso del proyecto actual, donde se presenta una FAN de Wi-SUN para crear una red de malla.

Las FANs también deben ser capaces de manejar grandes volúmenes de datos generados por sensores y dispositivos conectados. Esto implica la necesidad de protocolos de comunicación eficientes y sistemas de gestión de datos adecuados, que permitan el procesamiento y almacenamiento de información de manera eficiente.

Otro aspecto importante de las FANs es la seguridad. Dado que se utilizan en entornos críticos y a menudo están expuestas a amenazas potenciales, es fundamental implementar medidas de seguridad sólidas para proteger la integridad y confidencialidad de los datos transmitidos. Esto implica el uso de protocolos de cifrado, autenticación de dispositivos y sistemas de detección y respuesta a incidentes, entre otros mecanismos de seguridad.

En resumen, las Redes de Área de Campo (FANs) son sistemas de comunicación diseñados para proporcionar conectividad y control en entornos de campo o industriales. Utilizan una variedad de tecnologías de comunicación y siguen un modelo de red de malla para garantizar una mayor robustez a través de la redundancia.

Tras haber comprendido estos puntos fundamentales para el desarrollo del proyecto, pasemos ahora a lo que se ha hecho para comprobar toda esta teoría, al prototipo de red construido.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

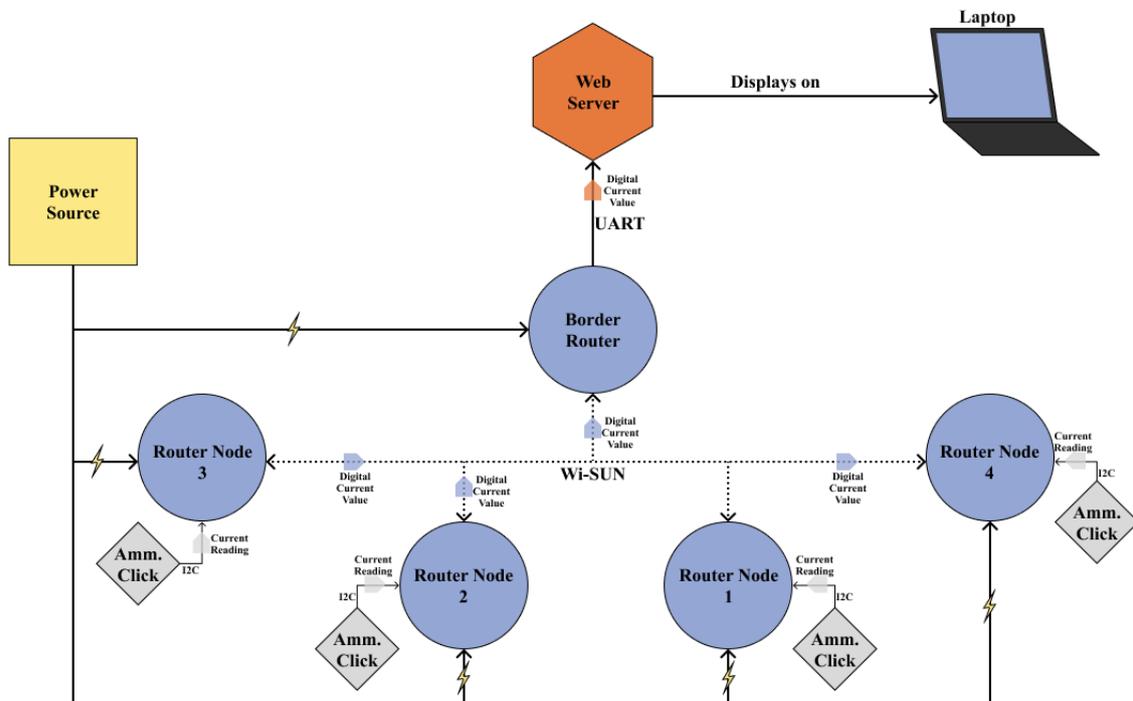
---

### ***1.3 DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO***

Aparte de llevar a cabo un estudio de las tecnologías mencionadas y de las soluciones que éstas presentan, resultaba necesaria para la compleción de este trabajo realizar un caso práctico a fin de comprobar el funcionamiento de todo lo descrito y estudiado. Como se ha mencionado, estas tecnologías se presentan como útiles para una gran cantidad de campos y son, por lo tanto, aplicables a una ingente cantidad de casos.

He elegido para su aplicación, sin embargo, uno que creo que va acorde con el grado que se está finalizando –aunque resulta patente que todo este proyecto está, en su conjunto, relacionado con el mismo (y de hecho por eso mismo se hace)– y que, además, está en boga, los coches eléctricos. En concreto, el prototipo que se va a realizar sería la interconexión de una red de puntos de carga de vehículos eléctricos. El diseño concreto de este prototipo puede verse en el esquema que se presenta bajo estas líneas.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.*



*Ilustración 7: Esquema del prototipo diseñado (fuente: elaboración propia)*

Como puede verse, cada nodo representaría, en una aplicación real, un punto de carga. Cada punto de carga mediría datos, en este caso la corriente, y se lo mandaría a través, en su caso, de otros nodos de la red, al router central al que está conectado el servidor web que almacena los datos, que serán después mostrados al administrador o al usuario que corresponda en una interfaz de usuario.

En la implementación de esta red, cada nodo tendrá incorporado un sensor de corriente que medirá, como es obvio, la corriente que está pasando por él. Esta medida de corriente, originalmente en analógico, será digitalizada para ser transmitida a través de la red Wi-SUN hasta que llegue al nodo central, que la almacenará en el servidor web y, finalmente, será mostrada en un interfaz de usuario.

Puede verse, así, que la implementación presentada se asemeja considerablemente a la estructura que tendría una aplicación real pero está, sin embargo, escalada a un menor

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

---

tamaño. Una solución real tendría, para empezar, una gran cantidad de nodos, además de medir corrientes mucho mayores de lo que pueden medir los sensores utilizados.

Finalmente, los datos que querría ver el administrador en su interfaz serían, quizá, mucho más completos que una medición de corriente, que es lo que se presenta. En cualquier caso, es también normal y se entiende que, dadas las limitaciones en tiempo y coste de este proyecto, no se pueda llevar a cabo una solución tan completa. Por otro lado, la funcionalidad que aquí se quiere presentar es la de Wi-SUN como protocolo útil para soluciones IoT para redes que se implementen en distancias medias o grandes, como puede ser una ciudad por lo que, para el fin que tiene este proyecto, el prototipo presentado es lo suficientemente completo.

Habiendo ya comprendido la motivación que ha llevado a la realización del presente proyecto, así como al trabajo realizado para llevarlo a cabo, resulta ahora necesario comprender las tecnologías y protocolos que se han utilizado en el desarrollo del mismo.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

## **Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS**

A lo largo de este capítulo se realizará un análisis exhaustivo de las tecnologías que han sido utilizadas para el desarrollo de este proyecto. Resulta clara que existe una división inicial sencilla entre estas tecnologías, las físicas, el hardware utilizado en el prototipo, y, por otro lado, el software que lo interconecta. Está claro, sin embargo, que las tecnologías de software son, en este proyecto, significativamente más relevantes que sus homólogas físicas, siendo estas últimas simplemente un medio para poder demostrar la utilidad o la aplicación de las primeras. Sin embargo, esto no quita importancia a la explicación de las características de todas por igual, lo que permitirá una comprensión completa del proyecto.

Pasemos, pues, primero a la explicación de los protocolos y demás lenguajes utilizados en el proceso, el software que vertebra la realización de este proyecto

### **2.1 TECNOLOGÍAS DE SOFTWARE**

Para el desarrollo de este proyecto se ha tenido que hacer uso de una gran cantidad de tecnologías software, sobre todo en las partes que se refieren a la red y el servidor web. Aparte, obviamente, del protocolo Wi-SUN, es relevante también entender los protocolos que funcionan por debajo en esta solución, como son IPv6 y CoAP.

Como se ha dicho al inicio, este proyecto se desarrolló en asociación con Texas Instruments, por lo que resulta obvio que, en la medida de lo posible, se utilicen sus tecnologías. De hecho, la implementación de Wi-SUN utilizada es la de TI, que presenta la tecnología necesaria para crear FANs de Wi-SUN basadas en CoAP e IPv6. Esta tecnología no se ha utilizado solamente por ser desarrollada por Texas Instruments, aunque sí era requisito de la asociación, sino que también, como se discutirá más tarde, utiliza las mejores opciones para este tipo de soluciones. En otro orden de cosas, también se ha utilizado la tecnología de TI para programar el hardware que se explicará más abajo,

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

utilizando su Code Composer Studio (CCS) para descargar el código necesario, escrito en C, en los dispositivos hardware que se explicarán más adelante. Finalmente, la propia implementación de Wi-SUN de Texas Instruments contaba también con una parte referida a la comunicación del router central con un ordenador para acabar mostrada en una interfaz de usuario, que estaba desarrollada utilizando el framework ReactJS en Typescript.

En resumen, existen una serie de tecnologías de TI de código abierto destinadas a la creación de redes Wi-SUN<sup>[7]</sup> que sirven para conformar la base del prototipo que se ha propuesto. Resulta obvio que todas estas han tenido que ser desarrolladas durante el proyecto, pues sólo proveían de una tecnología para conectar la red, pero no de la infraestructura necesaria para enviar datos a través de la misma. En cualquier caso, se presenta un resumen de estas tecnologías para la comprensión del lector previa a la entrada en capítulos venideros sobre cómo se han utilizado para el desarrollo del prototipo.

### **2.1.1 WI-SUN (WIRELESS SMART UTILITY NETWORK)**

Wi-SUN (del inglés, Wireless Smart Utility Network) es una tecnología de comunicación inalámbrica diseñada para aplicaciones de redes de área amplia (WANs) o de campo (FANs) en entornos industriales o metropolitanos. Wi-SUN se basa en el estándar IEEE 802.15.4g y utiliza la banda de frecuencia sub-GHz, lo que permite una mayor cobertura y penetración de la señal en comparación con las redes inalámbricas tradicionales. En concreto, Wi-SUN utiliza diferentes frecuencias según la geografía en la que se implemente para cumplir con requisitos legales. Así, utiliza el rango de 902 a 928 MHz en América, el de 863 a 876 MHz en Europa y el de 920 a 928 MHz en Japón<sup>[8]</sup>.

En el año 2011, los primeros implementadores de esta incipiente tecnología se unieron para formar la Wi-SUN Alliance, que es una organización sin fines de lucro compuesta, hoy en día por más de 300 empresas y organizaciones que trabajan en conjunto para promover y desarrollar el ecosistema de Wi-SUN. La alianza se dedica a garantizar la interoperabilidad, la seguridad y la escalabilidad de las soluciones Wi-SUN, así como a

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

fomentar la adopción de esta tecnología en diversos sectores para la creación de ciudades y utilidades inteligentes <sup>[9]</sup>.

Wi-SUN se relaciona con CoAP (Constrained Application Protocol) e IPv6 (Internet Protocol version 6) en cuanto a su capacidad para soportar estos protocolos en su infraestructura de red. CoAP es un protocolo de aplicación diseñado para su uso en dispositivos con recursos limitados, como sensores y actuadores en el Internet de las Cosas (IoT). Wi-SUN, al ser una tecnología de comunicación inalámbrica para aplicaciones industriales y de servicios públicos, puede utilizar CoAP como protocolo de aplicación para habilitar la comunicación eficiente y escalable entre los dispositivos conectados. IPv6, por otro lado, es la última versión del protocolo de Internet y ofrece un espacio de direcciones IP más amplio y características mejoradas en comparación con IPv4. Wi-SUN, al adoptar IPv6 como parte de su infraestructura de red, puede aprovechar las ventajas de una conectividad escalable y global, permitiendo la interoperabilidad y la integración con otras redes y sistemas que también utilizan IPv6. Estos protocolos por separado se explicarán en mayor profundidad en los siguiente apartados.

La integración de CoAP e IPv6 en el contexto de Wi-SUN permite una comunicación eficiente, segura y escalable entre los dispositivos en entornos industriales y de servicios públicos. CoAP proporciona un protocolo de aplicación ligero y adecuado para dispositivos con recursos limitados, mientras que IPv6 ofrece un espacio de direcciones IP ampliado y mejoras en la seguridad y el enrutamiento.

En resumen, Wi-SUN es una tecnología de comunicación inalámbrica utilizada en aplicaciones de redes de área amplia en entornos industriales y de servicios públicos. La Wi-SUN Alliance se encarga de promover y desarrollar el ecosistema de Wi-SUN. Wi-SUN puede utilizar CoAP e IPv6 en su infraestructura de red para habilitar la comunicación eficiente y escalable entre dispositivos IoT en entornos industriales y de servicios públicos. CoAP ofrece un protocolo de aplicación ligero, mientras que IPv6

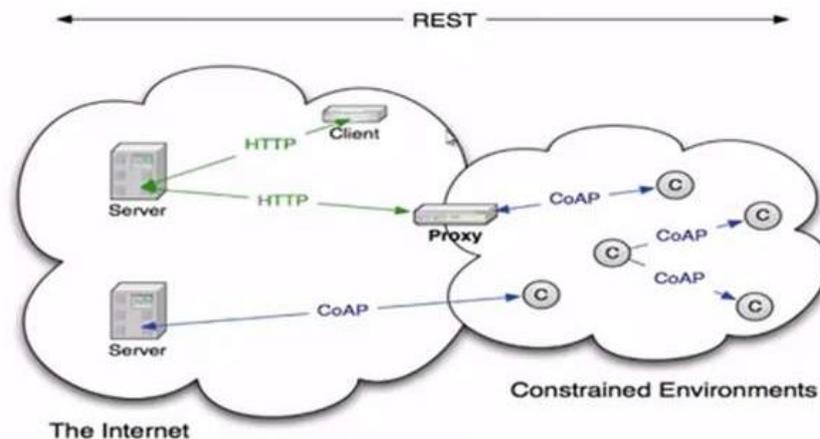
*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.*

proporciona un espacio de direcciones IP ampliado y mejoras en la seguridad y el enrutamiento. La integración de estos protocolos en el contexto de Wi-SUN garantiza una conectividad robusta y segura en el ámbito de las aplicaciones industriales y de servicios públicos. Pasemos ahora a comprender estos otros protocolos.

### 2.1.2 CoAP (CONSTRAINED APPLICATION PROTOCOL)

CoAP (de sus siglas en inglés, Constrained Application Protocol) es un protocolo de aplicación diseñado para su uso en dispositivos con recursos limitados, como sensores y actuadores en el contexto del Internet de las Cosas (IoT). Fue desarrollado por el grupo de trabajo CoRE (Constrained RESTful Environments) de la IETF (Internet Engineering Task Force) con el objetivo de proporcionar una alternativa ligera al protocolo HTTP (Hypertext Transfer Protocol) en entornos con restricciones de ancho de banda, energía y memoria <sup>[10]</sup>.

CoAP se basa en la arquitectura REST (Representational State Transfer), que es un estilo de arquitectura comúnmente utilizado en la World Wide Web. Al igual que HTTP, CoAP sigue el modelo cliente-servidor, donde los dispositivos CoAP actúan como clientes que envían solicitudes a servidores CoAP y reciben respuestas correspondientes <sup>[10]</sup>.



*Ilustración 8: Comunicaciones CoAP<sup>[10]</sup>*

Una de las principales características de CoAP es su eficiencia en términos de uso de recursos. Utiliza un formato de mensaje compacto basado en UDP (User Datagram

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

Protocol) para minimizar la sobrecarga de protocolo. Además, CoAP proporciona métodos de solicitud y respuestas con un conjunto limitado de opciones, lo que ayuda a reducir el tamaño de los mensajes y el consumo de ancho de banda <sup>[10]</sup>.

CoAP también incluye un conjunto de características diseñadas específicamente para el IoT, como el soporte para descubrimiento de recursos, observación de recursos y notificaciones asincrónicas. Estas características permiten a los dispositivos descubrir y comunicarse entre sí de manera eficiente, lo que es fundamental en escenarios de IoT donde la interoperabilidad y la comunicación efectiva son necesarias.

Otra característica importante de CoAP es su capacidad de mapeo con el protocolo HTTP. Esto significa que los servicios basados en CoAP pueden ser accesibles a través de HTTP utilizando un proxy o un gateway de traducción. Esto facilita la integración de dispositivos CoAP en aplicaciones y sistemas existentes basados en HTTP.

CoAP también aborda consideraciones de seguridad mediante el soporte de mecanismos de autenticación y cifrado de extremo a extremo. Utiliza la capa de transporte DTLS (Datagram Transport Layer Security) para proporcionar confidencialidad, integridad y autenticación de mensajes.

En resumen, CoAP es un protocolo de aplicación diseñado para dispositivos con recursos limitados en el contexto del IoT. Ofrece eficiencia en el uso de recursos, soporte para características específicas de IoT y capacidad de mapeo con HTTP. CoAP es adecuado para entornos donde los recursos son escasos y la comunicación eficiente es fundamental. Con su arquitectura basada en REST y mecanismos de seguridad integrados, CoAP es una opción sólida para habilitar la comunicación y la interacción en el mundo del IoT.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

### **2.1.3 IPv6 (INTERNET PROTOCOL VERSION 6)**

IPv6 (Internet Protocol version 6) es la última versión del protocolo de Internet, diseñado para reemplazar a IPv4 (Internet Protocol version 4), que ha sido ampliamente utilizado desde los primeros días de Internet. IPv6 fue desarrollado para hacer frente a la creciente demanda de direcciones IP, la expansión de la Internet de las Cosas (IoT) y para mejorar la seguridad y la eficiencia de la red.

Una de las características más destacadas de IPv6 es su espacio de direcciones mucho mayor en comparación con IPv4. Mientras que IPv4 utiliza direcciones de 32 bits, lo que proporciona aproximadamente 4,3 mil millones de direcciones únicas, IPv6 utiliza direcciones de 128 bits, lo que resulta en un espacio de direcciones teóricamente inagotable, con alrededor de 340 sextillones de direcciones únicas. Esto permite una asignación más amplia de direcciones IP a medida que más dispositivos se conectan a Internet. Además, IPv6 ofrece varias ventajas técnicas y funcionales como puede ser la autoconfiguración de direcciones, donde los dispositivos pueden generar automáticamente sus propias direcciones IP utilizando la información de la red local sin necesidad de configuración manual <sup>[11]</sup>. Esto facilita la implementación y el mantenimiento de redes IPv6. IPv6 también mejora la calidad de servicio (QoS) mediante la inclusión de encabezados de flujo, que permiten la priorización y el manejo de tráfico en tiempo real, como el tráfico de voz y vídeo.

Otra característica importante de IPv6 es la mejora de la seguridad en comparación con IPv4. Esto se logra a través de la incorporación de características como la autenticación y la integridad de los datos a nivel de protocolo, así como el soporte nativo para el cifrado de extremo a extremo mediante el uso de IPsec (IP Security). Esto ayuda a proteger las comunicaciones y los datos transmitidos en la red.

IPv6 también simplifica el enrutamiento en Internet mediante la incorporación de enrutamiento jerárquico y direcciones anycast. El enrutamiento jerárquico permite una

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

---

estructura de enrutamiento más eficiente y escalable, mientras que las direcciones anycast permiten que un grupo de dispositivos comparta la misma dirección IP, mejorando la eficiencia y la distribución de los recursos de red <sup>[11]</sup>.

Para garantizar una transición gradual de IPv4 a IPv6, se han desarrollado diferentes mecanismos, como la transición dual stack, donde los dispositivos y las redes son compatibles con ambos protocolos, y los túneles IPv6 sobre IPv4, que permiten la comunicación entre redes IPv6 a través de redes IPv4 <sup>[12]</sup>.

En resumen, IPv6 es la última versión del protocolo de Internet diseñado para abordar la creciente demanda de direcciones IP, mejorar la seguridad y la eficiencia de la red, y facilitar la expansión de la IoT. Con su espacio de direcciones ampliado, autoconfiguración, mejoras en calidad de servicio, seguridad y enrutamiento, IPv6 se ha convertido en la base para la próxima generación de Internet, brindando una conectividad global y escalable para una amplia variedad de dispositivos y aplicaciones.

#### **2.1.4 OTRAS TECNOLOGÍAS**

Aunque las mencionadas son las tecnologías más relevantes para el Proyecto en general, se ha requerido el uso de otras más concretas para el desarrollo del prototipo. Estas incluyen:

##### ***2.1.4.1 Texas Instruments Code Composer Studio (TI CCS)***

Es la herramienta de edición utilizada para escribir el código necesario para su descarga, más tarde, en los LaunchPads. Provee, además, de la infraestructura necesaria para la implementación del código desarrollado en los dispositivos. Cabe mencionar que, al ser los Launchpads precisamente de Texas Instruments, era necesario el uso de esta tecnología para la interacción con los mismos.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

#### **2.1.4.2 ReactJs**

ReactJS es una biblioteca de JavaScript de código abierto utilizada para construir interfaces de usuario interactivas y dinámicas. Fue desarrollada por Facebook y, durante los últimos años, se ha convertido en una de las opción popular entre los desarrolladores web debido a su eficiencia y facilidad de uso.

Una de las características clave de ReactJS, que comparte con otros de los frameworks que también triunfan en el mercado, es su enfoque en la construcción de componentes reutilizables. Éstos son bloques de construcción independientes que encapsulan la lógica y la interfaz de usuario de una parte específica de una aplicación. Esto permite a los desarrolladores crear interfaces complejas al combinar y reutilizar componentes más pequeños, lo que resulta en un código más sencillo en cuanto a su mantenimiento. Además, utiliza una sintaxis llamada JSX (JavaScript XML) que permite escribir código HTML dentro de JavaScript. Esto facilita la creación de componentes con una estructura similar a la de las etiquetas HTML, lo que mejora la legibilidad y la comprensión del código.

Un aspecto destacado de ReactJS es su virtual DOM (Document Object Model). El virtual DOM es una representación liviana de la estructura de la interfaz de usuario de una aplicación. ReactJS compara automáticamente el virtual DOM con el DOM real y actualiza solo los elementos que han cambiado, lo que resulta en un rendimiento más eficiente y una respuesta más rápida de la interfaz de usuario.

Otra característica importante de ReactJS es su capacidad de gestionar el estado de la aplicación de manera eficiente. El estado representa la información que puede cambiar a lo largo del tiempo y afectar la visualización de los componentes. ReactJS proporciona un mecanismo para administrar el estado de manera sencilla y predecible, lo que facilita la actualización de la interfaz de usuario en respuesta a los cambios de estado.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

ReactJS también cuenta con una amplia comunidad de desarrolladores y una gran cantidad de bibliotecas y herramientas complementarias. Esto facilita la ampliación de las capacidades de ReactJS y su integración con otras tecnologías y marcos de trabajo.

En el caso de este proyecto, se ha utilizado ReactJS con Typescript en lugar de Javascript. La razón básica para este hecho es sencilla, la base sobre la que se trabajaba estaba hecha en este programa. Sin embargo, existen beneficios de usar una sobre la otra, como puede ser que la variante tipada (Typescript) ayude a la seguridad y el orden del código.

## **2.2 DISPOSITIVOS DE HARDWARE**

Aparte de las tecnologías software mencionadas, se han usado también para el desarrollo del prototipo tecnologías software, que conformaban los nodos y el router central de la red Wi-SUN, así como los sensores necesarios para medir la corriente en cada nodo. Veamos, pues, especificaciones importantes de cada una de estas partes.

### **2.2.1 LAUNCHPADS TI CC1312R7**

Estos dispositivos se eligieron, de entre los dispositivos disponibles en el catálogo de Texas Instruments –que, al ser socio y proporcionar una guía en el desarrollo del proyecto, era la mejor opción entre las diferentes marcas–, por su capacidad para funcionar tanto como nodo de la red como de router central –lo cual resultaba de gran ayuda para probar diferentes arquitecturas–, así como por su capacidad de trabajar con la implementación sobre CoAP, que era deseable por los motivos presentados arriba.

Se trata de un dispositivo con una memoria FLASH de 314KB y una RAM de 26KB, lo que, funcionando como router frontera, le permite soportar una red de, aproximadamente, hasta 300 nodos <sup>[8]</sup>. Esto resulta, obviamente, significativamente superior a la cantidad de nodos a utilizar en la implementación descrita, pero puede ser de utilidad para aquel que quiera implementar una red real, que tendrá una cantidad mayor de nodos. Sin embargo,

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

esto no quiere decir que este número de nodos sea el máximo, pues se pueden utilizar varios nodos frontera para escalar el tamaño de la red.

### **2.2.2 SENSORES DE CORRIENTE MIKROE**

Los sensores de corriente utilizados son de la compañía Mikro Electronica (MIKROE-2377) y son capaces de medir corrientes entre 1mA y 1A, lo que los inhabilita para un uso más allá de este prototipo por su bajo rango de mediciones.

Además, para la integración entre las dos partes, se necesita un puente que una las patillas de la tabla de Texas Instruments con el amperímetro de MikroE. Este interfaz de unión lo proporciona también Mikro Electronica, su BoosterPack2 (MIKROE-2381). Este puente está desarrollado especialmente para esta función y podría, si fuese necesario, soportar dos sensores diferentes sobre un mismo LaunchPad.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

## **Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

En este capítulo se realiza un análisis de los trabajos y soluciones presentes en el ámbito del proyecto que se presenta. Esta búsqueda de cuestiones ya desarrolladas es beneficiosa por una gran cantidad de razones. La primera de ellas, para estimular la reflexión en el proyecto y la búsqueda de soluciones al mismo. También, para entender cómo el planteamiento inicial del proyecto se relaciona y se integra con las últimas tecnologías presentes aplicables al mismo. Finalmente, para identificar posibles partes o procesos de estos trabajos que puedan ser aplicables al presente, a fin de mejorar su diseño. De hecho, de tres patentes encontradas, dos de ellas mejoraron de manera directa la comprensión de Wi-SUN y de las redes de malla y sus características.

Leyendo y estudiando otras patentes o trabajos que estén relacionados con la solución presentada, es uno capaz, además, de aplicar directamente los conocimientos adquiridos sobre protocolos y tecnologías al prototipo presentado.

Para la presentación de las conclusiones de esta búsqueda, primero se presentará los trabajos realizados y, más tarde, las patentes relevantes, para acabar mencionando cómo afectan estos descubrimientos al desarrollo de este proyecto y las conclusiones que se sacan de todos los trabajos presentados.

### **3.1 TRABAJOS Y ENSAYOS**

La búsqueda de trabajos y ensayos relacionados con este proyecto se realizó a través de dos librerías especializadas en este tipo de cuestiones, Compendex e Inspec. Para realizar la búsqueda, los principales términos por los que se buscó fue “Wi-SUN FAN” y “Wi-SUN network”. Los resultados son los que siguen.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

El primer artículo aplicable encontrado se tenía por título “A routing protocol toward reliable mobile communication in Wi-SUN FAN”, publicado en la 18ª Conferencia Anual de Comunicaciones y Redes (Consumer Communications and Networking Conference, CCNC). Esta publicación se relaciona de manera directa con el proyecto ya que se centra en el diseño del protocolo de ruteo para nodos móviles usando el estándar Wi-SUN, que utiliza el protocolo de ruteo IPv6 sobre el protocolo de red RPL, para redes multi-salto con bajo consumo de energía y susceptibles de pérdida de paquetes <sup>[13]</sup>. Como bien mencionan, “RPL fue originalmente desarrollada para nodos fijos, como dispositivos inteligentes provistos de sensores” <sup>[13]</sup>, lo que esencialmente está relacionado con este proyecto y, en concreto, con los puntos de carga en la red Wi-SUN FAN pensada para el prototipo explicado. Este artículo provee una solución basada en una Wi-SUN FAN para sostener el ruteo en nodos móviles, así como evaluar la tasa de transmisión de los paquetes de datos desde un nodo móvil hasta el borde de la red utilizando RPL. Esto resulta también aplicable a el sistema que nos incumbe, pues trata de soportar el ruteo entre diferentes estaciones de carga (nodos fijos) que mandan paquetes de datos a intervalos fijos. En este artículo, la simulación consiste en una infraestructura para una ciudad inteligente implementada a lo largo de una carretera, en la que se asume la continuidad de conexión entre el router central y el resto de nodos, lo que en conjunto provee conectividad constante para el nodo móvil <sup>[13]</sup>. A pesar de que en esta investigación solamente el nodo móvil crea y envía datos al router central mientras se mueve de manera constante y a la misma velocidad, se puede aplicar el conocimiento de ruteo dentro de los nodos fijos previstos para el prototipo, que también deben estar enviando y recibiendo datos. Además, de este artículo se puede aprender sobre los diferentes parámetros de la simulación que son requeridos en el diseño del prototipo. Éstos incluyen el tamaño del paquete a enviar y los ratios de envío. En suma, se pueden aplicar métodos similares de ruteo para evaluar el desempeño de la transmisión con RPL en nuestros nodos de la Wi-SUN FAN.

La siguiente pieza del estado de la técnica descubierta es "Enabling LoRaWAN Communication Over Wi-SUN Smart Grid Networks" <sup>[14]</sup>. Este proyecto está motivado e

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

---

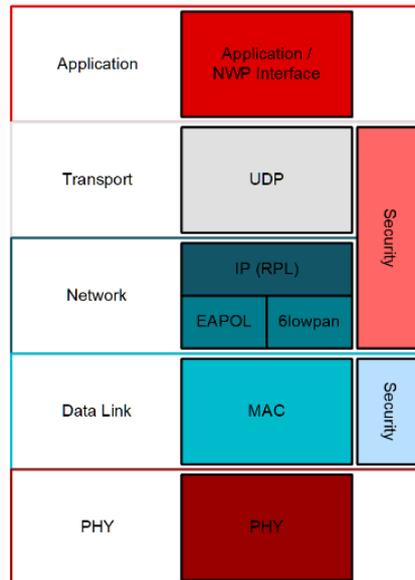
impulsado principalmente por la necesidad de explorar las posibilidades de integración entre diferentes tecnologías de red para ampliar las opciones de uso de dispositivos finales inteligentes, ya que los sistemas IoT y las ciudades inteligentes se están expandiendo. Su trabajo presenta una serie de mejoras realizadas de la comunicación en las Pasarelas LoRaWAN y sus Servidores de Red que permiten instalar estas tecnologías sobre canales de comunicación de Redes Inalámbricas de Baja Tasa, como las Redes Wi-SUN Smart Grid. <sup>[14]</sup>. Exploran cómo las Smart Grids, implantadas por empresas de servicios públicos, están siendo ampliamente desplegadas, gracias a los numerosos beneficios, incluyendo la reducción de costes con la lectura de contadores y el ahorro con el desplazamiento de equipos de servicio, que aportan sus infraestructuras de medición avanzada (AMI). Este estudio sirve para constatar que los principales puntos fuertes de los módulos Wi-SUN son el largo alcance y la seguridad que proporcionan, pero su inconveniente es su elevado consumo de energía, indeseable para dispositivos alimentados por baterías que deben funcionar el mayor número de años posible con el menor mantenimiento necesario. En el caso de este proyecto, la mejora del consumo de energía viene, como se ha dicho, porque la implementación de Wi-SUN elegida, la de Texas Instruments, utiliza por debajo el protocolo CoAP. En su caso, para mejorar el consumo de energía, sugieren integrar LoRaWAN, siglas de Low Power Wide Area Network, un protocolo adecuado para la comunicación a larga distancia con bajo consumo de energía, en una red Wi-SUN. También profundizan en las redes Wi-SUN y explican de qué se componen, lo que realmente podría ayudar a entender la implementación de este proyecto de un FAN Wi-SUN para conectar estaciones de carga de vehículos eléctricos. Puede uno inspirarse en cómo implementar esto estudiando cómo ensamblaron el prototipo de pasarela LoRaWAN/Wi-SUN en una red Wi-SUN, compuesta por un router fronterizo junto con treinta nodos de router. También podríamos seguir el procedimiento de evaluación de la activación de dispositivos y el intercambio de datos, tanto de enlace ascendente como descendente, realizando varias pruebas.

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

---

La última pieza del estado de la técnica encontrada es la documentación del software "TI Wi-SUN FAN Stack" del explorador de recursos de Texas Instruments. Esta documentación proporciona una visión general de la implementación del protocolo Wi-SUN por parte de Texas Instruments. Texas Instruments utilizó el protocolo Wi-SUN (especificado por la Wi-SUN Alliance) para crear una pila Wi-SUN FAN. El propósito de la pila Wi-SUN FAN de TI es proporcionar conectividad a gran escala mediante la creación de redes de área personal (PAN) <sup>[15]</sup>. La pila se compone de 5 capas: Aplicación, Transporte, Red, Enlace de Datos y PHY (Capa Física). La capa de aplicación incluye un servidor junto con la interfaz NWP que permite al servidor comunicarse con la red. La capa de transporte mueve los datos desde la red Wi-SUN a la capa de aplicación. La capa de red es responsable de todas las comunicaciones hacia y desde los nodos. Incluye las tecnologías 6LoWPAN y RPL adaptadas a partir de componentes de código abierto. El protocolo 6LoWPAN optimiza las aplicaciones IPv6 que utiliza cada nodo. El algoritmo RPL enruta los nodos para crear un sistema de enrutamiento de 3 capas. La capa de enlace de datos gestiona la red de nodos e implementa la configuración de salto de frecuencia Wi-SUN que permite una mejor comunicación entre los nodos. La capa física (PHY) consta de modos operativos para cada nodo físico. Nuestro proyecto utilizará esta pila para crear la red de cargadores de vehículos eléctricos Wi-SUN. Texas Instruments nos ha proporcionado los recursos necesarios para implementar la pila en nuestro proyecto.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.*



*Ilustración 9: Pila de Wi-SUN FAN de Texas Instruments*

### 3.2 PATENTES

Se utilizaron dos motores de búsqueda para investigar las patentes actuales aplicables a la solución de diseño del sistema. Estas herramientas de búsqueda fueron Google Patents y la Oficina de Patentes de Estados Unidos. Los términos clave más utilizados en la búsqueda de patentes fueron "Wi-SUN protocol" y "Mesh Network". La primera patente encontrada es un "Mobile meter reading method based on Wi-SUN protocol"<sup>[16]</sup>. Los creadores de esta patente son Hu Zexin y Li Xianhuai. Esta patente era importante para nuestra búsqueda del estado de la técnica porque su solución de diseño se relaciona directamente con el protocolo Wi-SUN que la solución de este proyecto debe utilizar, y esta patente tiene un método existente de implementación que potencialmente podría funcionar para la misma. La patente describe "un método móvil de lectura de contadores basado en el protocolo Wi-SUN"<sup>[16]</sup>. Para explicar mejor la patente, un dispositivo de lectura portátil lee otros contadores eléctricos en una red inteligente de dispositivos. La lectura de los contadores y su conectividad son posibles gracias al protocolo Wi-SUN. El protocolo Wi-

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

---

SUN de esta patente permite la comunicación a larga distancia, la conexión en red a gran escala y una gran escalabilidad <sup>[16]</sup>.

La principal conexión de la patente de lectura móvil de contadores con la red inteligente de cargadores de vehículos eléctricos presentada en este proyecto es la conectividad de los nodos y el intercambio de datos mediante el protocolo Wi-SUN. En la patente se crea una red de área de campo (Field Area Network, FAN) mediante un enrutador de frontera y varios nodos enrutadores. Este concepto es directamente aplicable a nuestra solución de diseño porque nuestra red de malla tendrá un único router fronterizo o central para enviar datos al servidor web. Además, la solución presentada en este proyecto también tiene nodos que está conectado al router frontera para enviar datos. Las variaciones en la implementación actual de nuestro proyecto con respecto a la primera patente incluyen, por ejemplo, que sólo hay un único nodo enrutador. La patente de lectura móvil de contadores describe varios nodos. Es importante señalar que la solución de diseño presentada podría escalar para incorporar más nodos si el tiempo, entre otros factores, lo permitiese. Esta patente específica afirma: "Las características de la red Wi-SUN FAN la hacen especialmente adecuada para sistemas inteligentes de lectura de contadores desarrollados en ubicaciones fijas" <sup>[16]</sup>. En nuestra solución de diseño, la "red Wi-SUN FAN" es la conexión de los nodos de la estación de recarga de VE y son estacionarios. Esta patente específica destaca la importancia de la "comunicación punto a punto" de los nodos (contadores eléctricos) a través del protocolo Wi-SUN <sup>[16]</sup>. En la implementación de nuestra red de nodos, el protocolo Wi-SUN es lo que se utiliza para permitir la comunicación punto a punto de los cargadores de VE. En general, esta patente específica resultó muy útil durante la búsqueda en el estado de la técnica. Hay muchos aspectos que se aplican directamente a la solución presentada. Los hallazgos de estas correlaciones directas en las soluciones de diseño muestran cómo el diseño preliminar se relaciona con la última tecnología que se debe implementar. Además, esta patente ejemplifica que hay diseños existentes que funcionarán muy bien para el presente proyecto.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.*

---

La segunda patente encontrada es un "Dispositivo de respuesta personal en red mallada"

[17]. El inventor de esta patente es Bao Tran. Esta patente consiste en un sistema de monitorización de múltiples nodos que forman una red de malla inalámbrica para comunicarse entre sí y luego enviar una señal al personal de emergencia en caso necesario [17]. Esta patente fue importante en la búsqueda del estado de la técnica porque ayudó a estimular el pensamiento sobre soluciones para la solución de diseño. Esta patente resultó muy fácil de leer y de entender, especialmente para aquellos, como el autor en ese momento, que todavía estaba aprendiendo sobre el proyecto y mejorando las ideas actuales. El factor más importante de esta patente fue su enfoque de una red mallada de nodos inalámbricos. En esta patente, los datos saltan de un nodo inalámbrico a otro [17]. Los datos concretos utilizados en la red de malla de la patente son las constantes vitales de un ser humano. Por otro lado, si algún dato recogido en la red de malla indica que una persona puede necesitar ayuda, se envía una señal para notificarlo al personal correspondiente [17]. No existe una tecnología específica que se corresponda con la tecnología que se debe utilizar, pero esta patente se corresponde con una solución de alto nivel.

En la solución de diseño se necesita una red mallada de nodos inalámbricos. Nuestros nodos deben comunicarse mediante un protocolo de Internet inalámbrico. La patente no especifica la comunicación inalámbrica, pero se podrían rellenar los huecos utilizando el protocolo Wi-SUN. Dado que esta patente específica tenía una solución de alto nivel, se pueden identificar aspectos que se corresponden con este proyecto y "rellenar los huecos" de donde se podrían utilizar las especificaciones requeridas de Wi-SUN, router fronterizo/nodos. Esta patente también hace hincapié en la conectividad de los nodos para transmitir datos entre ellos. Nuestra red mallada de nodos EV debe enviar datos de tensión entre los nodos y, finalmente, a un servidor web. En general, la aplicación de esta patente ayudó a pensar en cómo la solución o, de manera práctica, el prototipo, se uniría y se convertiría en una red inalámbrica de nodos conectados.

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

Por último, la tercera patente encontrada durante la búsqueda del estado de la técnica fue "Methods and Nodes for Enabling Context-Awareness in CoAP" (Métodos y nodos para permitir el conocimiento del contexto en CoAP) <sup>[18]</sup>. Se trata de una red de nodos conectados mediante el protocolo de Internet Constrained Application Protocol (CoAP) para emprender acciones autónomas con el fin de ajustar las operaciones de la red <sup>[18]</sup>. El conocimiento del contexto consiste en la supervisión y evaluación de datos <sup>[18]</sup>. Esta patente es importante para la búsqueda del estado de la técnica porque ayuda a identificar cómo se relacionan los requisitos de diseño con la tecnología más reciente. Además del protocolo Wi-SUN que utilizan los nodos de nuestra red de malla, el diseño también debe utilizar el CoAP para transmitir paquetes de datos entre nodos. Es por ello que este protocolo ha sido explicado también en el capítulo anterior sobre la Descripción de las Tecnologías utilizadas. Antes de explorar esta patente, los conocimientos sobre CoAP eran limitados. Sin embargo, tras leer esta patente, se identificó un uso claro de la red CoAP. En nuestra red de malla, los nodos deben realizar una comunicación de datos de extremo a extremo. La red Wi-SUN se utiliza para conectar los nodos, pero CoAP también se utiliza para transmitir datos. Leyendo esta patente, se pudo determinar las similitudes y diferencias de ambos protocolos. Esta patente ayudó a entender cómo encaja el CoAP en todo el ecosistema de nuestra red conectada en malla.

### ***3.3 IMPACTO EN EL DISEÑO Y LA TOMA DE DECISIONES***

Aunque Wi-SUN es una tecnología de uso relativamente reciente en el ámbito del IoT, se ha podido descubrir a lo largo de esta búsqueda que existen ejemplos similares al proyecto que se presenta. Los artículos y patentes investigados ilustran sobre tecnologías alternativas que se podría considerar integrar. Además, sirve también para identificar mejoras al diseño y nuevas ideas para su implementación.

El primer artículo detalla un modelo muy parecido al de Wi-SUN que se pretende implantar en este proyecto, en el que el nodo frontera dirige la red y recoge datos de otros nodos utilizando IPv6 como protocolo de encaminamiento en la capa de red. Su simulación

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

de la red proporciona una buena base para el rendimiento esperado de la red, especialmente en lo que se refiere al tamaño de los paquetes de datos y la velocidad de transmisión.

El segundo artículo trata de la integración de LoRaWAN en una red Wi-SUN incorporando aspectos de rendimiento de menor potencia para que los dispositivos inteligentes alimentados por batería duren más. Aunque lo más probable es que no se utilice LoRaWAN específicamente porque las estaciones de carga de vehículos eléctricos suelen estar conectadas a la red eléctrica y no alimentadas por batería, ayudó a entender las ventajas y desventajas de los distintos protocolos de red y cómo se podrían añadir otros protocolos para adaptarlos a las necesidades de este proyecto.

Las patentes investigadas dan una base sobre la que trabajar. La patente sobre medición móvil con Wi-SUN refleja casi directamente el objetivo final del prototipo. La segunda patente, relativa a la supervisión de las mediciones de datos de la red y la alerta al personal de emergencia en condiciones críticas, también da la idea de integrar quizá algún tipo de sistema de supervisión y notificación con los datos recogidos.

En resumen, a pesar de que Wi-SUN es una tecnología relativamente nueva, se han podido identificar varios proyectos y patentes que han ayudado a entender mejor cómo enfocar el proyecto tanto con una nueva perspectiva como con una base sólida sobre la que trabajar. También ha servido para ganar expectativas sobre el rendimiento de nuestro prototipo y una comprensión más profunda de cómo IPv6 y CoAP se integran en la red Wi-SUN. Sobre la base de esta búsqueda y sus resultados, se pueden estudiar o entender más correctamente los protocolos, las funciones de red, las tecnologías utilizadas y, en suma, el proyecto en general.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

## **Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO**

A lo largo de los capítulos anteriores se ha llevado a cabo una introducción al proyecto, motivándolo y explicando las razones que llevan a su desarrollo; una descripción de las tecnologías en las que se basa para solucionar el problema del apartado anterior y, finalmente, una explicación de la situación técnica actual, del trabajo que se está haciendo actualmente en este ámbito y de las decisiones que se han tomado sobre el proyecto gracias a estos descubrimientos. En el capítulo actual, en cambio, se podría decir que entramos en materia: se justifica la realización del proyecto, los objetivos que pretende alcanzar, la metodología de trabajo seguida y, finalmente, las consideraciones temporales y económicas que han afectado a su compleción.

### **4.1 JUSTIFICACIÓN**

Como se ha adelantado en el capítulo anterior, las tecnologías utilizadas son muy nuevas pero, dada su rápida implementación, no deja de sorprender la cantidad de información que se puede encontrar sobre ellas, lo que puede dar pie a pensar que ya está todo hecho. Sin embargo, siempre quedan partes por cubrir. Así, mientras las patentes presentadas en el capítulo anterior son útiles como base para la realización del proyecto, no presentan en realidad una solución funcional o no son aplicables en su conjunto a la solución presentada en este proyecto.

La primera de las patentes, como se ha mencionado, presenta un solo nodo para enviar datos, cosa que se diferencia de base con el proyecto que nos incumbe. La segunda se corresponde con una solución de concepto de alto nivel, sin entrar a considerar protocolos o tecnologías que ésta podría utilizar. Finalmente, la tercera trata simplemente de una implementación de CoAP, protocolo utilizado como base en este proyecto.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

En cuanto a los artículos y trabajos presentados, ninguno es aplicable –si bien son parecidos– a la totalidad de este proyecto. Tanto el primero como el segundo resultan de gran utilidad para entender las FAN con Wi-SUN, pero utilizan por debajo protocolos diferentes, mientras que este proyecto utiliza CoAP por ser una mejor solución al ahorro energético que deberían perseguir este tipo de soluciones. El tercero es simplemente la implementación de la FAN Wi-SUN por parte de Texas Instruments que, como se ha mencionado en múltiples ocasiones, es la base de este proyecto.

## **4.2 OBJETIVOS**

El objetivo de la solución y, en concreto, del prototipo de carga de vehículos eléctricos basado en Wi-SUN FAN es crear un sistema de red inteligente interconectada para proporcionar eficiencia, conectividad y fiabilidad en las ciudades. Tener dispositivos conectados en una red inteligente en una ciudad inteligente apoya la transición social y el avance de las ciudades que se conectan a través de dispositivos IoT (Internet de las cosas), lo que permite el intercambio de datos entre dispositivos y sistemas. Para ello se han utilizado sensores de corriente MIKRO para medir la corriente (en miliamperios) que se conectan a los LaunchPads TI CC1312R7. Estos datos se enviaron a un servidor web con funciones solicitadas para mostrar el funcionamiento de extremo a extremo. Los datos que las launchpads enviaban al servidor web se mostraban en una interfaz de usuario (UI) única. (Este resumen del diseño sirve para comprender los objetivos que se presentan más adelante. Para una mejor explicación del diseño concreto, refiérase al capítulo siguiente)

Las funciones solicitadas en la interfaz de usuario eran ver cómo estaban conectados los nodos del router al router fronterizo, la dirección IP de cada nodo del router y la corriente medida desde el clic del amperímetro.

Las tendencias recientes han demostrado que las zonas urbanas están cada vez más conectadas con el objetivo de proporcionar un mayor intercambio de datos y adaptar lo que antes eran sistemas individuales a grandes sistemas conectados. En la solución de diseño

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

específica que se aplicará, los cargadores de VE son los nodos que se implementarán en la red inteligente en una configuración de malla. Se espera que estos cargadores de VE, que representan los nodos de la estación se agrupen de forma que puedan controlarse en una única unidad lógica. Tener una sola unidad lógica demuestra la idea reciente de tener sistemas conectados para comunicarse entre sí e intercambiar grandes cantidades de datos. Además, el sistema requiere la capacidad de controlar el tráfico de datos CoAP (Constrained Application Protocol) por estación de recarga de VE. Otra característica clave es que los nodos CoAP puedan enviar datos periódicamente sin ser interrogados. Estos datos se envían al sistema y, a continuación, se reciben en un servidor web para que un usuario pueda observarlos y, potencialmente, utilizarlos.

Más allá de los aspectos técnicos del problema de diseño, este proyecto es importante para la sociedad, ya que las ciudades intentan ser más "inteligentes". La idea de tener una ciudad inteligente permite conexiones seguras y protegidas, lo que es crucial hoy en día, cuando las sociedades se orientan cada vez más hacia los datos y fomentan los avances tecnológicos de vanguardia. La recopilación de datos permite a las distintas partes interesadas utilizarlos en su propio beneficio. Las posibles partes interesadas en un sistema conectado de cargadores de VE son los conductores de VE, las empresas energéticas, los usuarios de energía, los usuarios de datos y muchos más. Independientemente de quién tenga interés en los sistemas de redes inteligentes, es importante proporcionar la máxima utilidad y beneficio para todos.

#### **4.2.1 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO**

Este proyecto incluye especificaciones de diseño únicas y específicas que deben cumplirse para garantizar la correcta funcionalidad e implementación del diseño. La tabla siguiente describe en profundidad las especificaciones de diseño del sistema.

##### **Tabla 1: Especificaciones del sistema**

**ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.**

Tabla 1: Especificaciones del sistema

<i>Especificación</i>	<i>Descripción</i>
<i>El ancho de banda del sistema debe ser menor que el de los protocolos que utilizará</i>	<p><i>Como en cualquier otro sistema que transporte información, la cantidad de ésta enviada debe ser menor que la aceptada por el canal por el que será transportada. En este caso, se utilizan dos protocolos principales, Wi-SUN para la comunicación entre los nodos y el router fronterizo, y Wi-Fi cuando la Plataforma Linux se comunica con el ordenador final.</i></p> <p><i>Como consecuencia, el diseño debe transmitir con dos anchos de banda diferentes en distintas partes del sistema. Cuando los nodos se comunican entre sí y con el router central deben emitir una cantidad de información aceptada por el protocolo Wi-SUN. Del mismo modo, cuando la plataforma Linux se comunica con el ordenador debe cumplir las especificaciones Wi-Fi.</i></p>
<i>Pérdida mínima de información</i>	<i>La cantidad de información que se pierde en el proceso debe ser mínima o, como mucho, el porcentaje especificado por los protocolos utilizados. Sin embargo, se establecerá un límite mejor una vez recibidos los componentes y realizadas algunas pruebas.</i>
<i>Conseguir una representación correcta de los valores del amperímetro</i>	<i>Hay que tener en cuenta la cantidad de información necesaria para representar correctamente los valores del amperímetro. Al ser continuos, los valores de entrada serán muestreados para ser enviados a través de la red. Otra especificación a tener en cuenta será, por tanto, la cantidad de información a muestrear para que la información se represente correctamente.</i>

**ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.**

<p><i>La corriente medida por el sensor de corriente debe encontrarse dentro de un rango.</i></p>	<p><i>El patrocinador del proyecto, Texas Instruments, dio instrucciones para que el amperímetro midiera la corriente (es decir, los datos que se transmitían de extremo a extremo) desde el MIKROE click on board para que estuviera dentro de un valor numérico "aproximado". Esto significaba que el valor mostrado en la interfaz de usuario no tenía que ser exacto. Utilizando una fuente de alimentación, se puede determinar una corriente exacta. Este era el valor esperado. El valor de corriente transmitido era el valor medido. El valor medido se consideraba exacto si estaba dentro de un rango de medio amperio del valor esperado.</i></p>
<p><i>Uso óptimo de la energía de nuestro sistema</i></p>	<p><i>También habrá que probar el consumo de energía del sistema. Así se encontrará un equilibrio que garantice la viabilidad del sistema al tiempo que minimiza el coste de la energía consumida.</i></p>

### **4.3 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA**

#### **4.3.1 PLANIFICACIÓN**

Como es obvio, la planificación del trabajo se realizó, de manera preliminar, como paso previo al desarrollo del mismo. Si bien es cierto que la implementación ha podido variar ligeramente en tiempo, la conclusión es que los puntos aquí descritos han sido cumplidos. La planificación para el desarrollo del producto a lo largo del curso era:

- I. Definición del sistema: Octubre
  - a. Tarea 1: Encontrar un problema y cómo resolverlo
  - b. Tarea 2: Realizar un estudio del estado de la cuestión
- II. Diseño del sistema: Noviembre-Diciembre

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

---

- a. Tarea 1: Solución de diseño
  - b. Tarea 2: Definir hardware y software requeridos
  - c. Tarea 3: Comprar hardware necesario
    - i. Definir lista concreta de productos requeridos
    - ii. Pedir permiso y confirmación al director
    - iii. Recoger hardware y conectar a la red
- III. Sistema de medición de corriente: Enero-Febrero
- a. Tarea 1: Recoger datos de corriente
    - i. Desarrollo del software necesario en C para leer la corriente del sensor de corriente
  - b. Tarea 2: Comunicar datos de corriente al nodo
- IV. Red Wi-SUN: Febrero-Marzo
- a. Tarea 1: Enviar datos al router central
  - b. Tarea 2: Enviar datos al servidor web desde el host spinel
  - c. Tarea 3: Comprobar seguridad de red
- V. Servidor web: Marzo-Abril
- a. Tarea 1: recibir datos del host
  - b. Tarea 2: Diseñar servidor web de la interfaz de usuario para mostrar datos
- VI. Conectar, testear y terminar: Mayo

### **4.3.2 ESTIMACIÓN ECONÓMICA**

En este apartado se realiza un análisis de los gastos incurridos en el desarrollo del prototipo presentado en este proyecto como guía del posible presupuesto que una implementación real pudiese tener. Cabe advertir, sin embargo, que estas estimaciones han de ser tomadas, simplemente, de manera orientativa pues, si bien es cierto que determinados componentes sí serán utilizados incluso en otras implementaciones –como son las tecnologías software y, seguramente, los LaunchPads de TI–, éstas pueden variar tremendamente en forma y objetivo, lo que hace que varíen también y presupuesto.

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

Para la realización de este proyecto, la Universidad de Texas en Austin –donde ha sido desarrollado– dotaba con un presupuesto de 500 dólares para todo el año. Por este motivo, se tuvo que llevar a cabo una planificación y control de los diferentes gastos para no exceder el presupuesto mientras se conseguían todos los componentes necesarios para el sistema. El prototipo de este proyecto incluía una parte de hardware para crear una red Wi-SUN operativa. Dado que se utilizó el software de Texas Instruments para hacer funcionar la conexión, se tenía previsto utilizar también su hardware. En concreto, se decidió que los nodos de la red fueran los launchpads CC1312R7 de TI, que tienen la particularidad de que pueden utilizarse tanto como router fronterizo como nodo normal en una red Wi-SUN.

Como la información que se envía a través de la red es real, fue necesario adquirir también amperímetros. Los elegidos fueron los MIKROE-2377, que necesitan el BoosterPack MIKROE-2381 para conectarse a los LaunchPads mencionados.

Al principio, se decidió comprar la cantidad imprescindible para empezar a formar la red, así que se adquirieron dos de cada (es necesario que haya al menos dos nodos –el router fronterizo y un nodo router– para que una red Wi-SUN funcione). Las facturas fueron las siguientes:

*Tabla 2: Resumen de la primera compra*

<i>Componente</i>	<i>Precio Unitario</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio Total</i>
<i>Launchpad CC1312R7</i>	<i>47,99\$</i>	<i>2</i>	<i>95,98\$</i>
		<i>Aranceles/Impuestos</i>	<i>9,60\$</i>
		<i>Gastos de envío</i>	<i>6,99\$</i>
		<i>Precio final</i>	<i>112,57\$</i>
<i>Sensores MIKROE- 2377</i>	<del><i>24,00\$</i></del> <i>22,80\$</i>	<i>2</i>	<i>45,60\$</i>

**ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.**

<i>BoosterPack</i>	<del>7,00\$</del> 6,65\$	2	13,30\$
<i>MIKROE-2381</i>			
		<i>Gastos de envío</i>	16,00\$
		<i>Precio final</i>	74,90\$
<i>Precio final a pagar</i>			187,37\$

Después de haber gastado esto, el presupuesto se redujo a 312,63 dólares. Al conocer mejor el proyecto, se decidió invertir en otros componentes. Dado que se iba a construir una red, y que Wi-SUN utiliza una red mallada, no tendría sentido tener sólo dos nodos en la red. Por eso se decidió comprar dos más de los LaunchPads especificados anteriormente y dos amperímetros más. Aunque se reflexionó sobre la cantidad de éstos a comprar (ya que cada uno adicional consumiría una parte considerable del presupuesto), finalmente se compraron dos de ellos, lo que permitiría tener una red más grande pero sin agotar completamente el presupuesto con vistas a que pudiesen surgir necesidades o imprevistos futuros.

Como ningún otro proveedor tenía en stock los LaunchPads especificados, se compraron los nuevos directamente a Texas Instruments (TI), que los ofrece a 39,99 dólares cada uno, lo que hace un total de 79,98 dólares sin impuestos, aranceles ni envío. Estaba previsto comprar los amperímetros y los BoosterPacks al mismo proveedor (MIKROE), con los mismos precios. Los dos clicks se venden por 24,00 \$ y conectores por 7,00 \$. Tienen un coste de envío de 16,00 \$, por lo que su precio real sumaría 78,00 \$. El precio final de compra (sin impuestos ni envío de los LaunchPads) sería de 157,98 dólares. Se esperaba que esta compra dejara el presupuesto restante en 154,64 dólares. Una vez realizada la compra, los precios finales fueron los siguientes:

*Tabla 3: Resumen de la segunda compra*

<i>Componente</i>	<i>Precio Unitario</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio Total</i>
-------------------	------------------------	-----------------	---------------------

**ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.**

<i>Launchpad CC1312R7</i>	<i>39,99\$</i>	<i>2</i>	<i>79,98\$</i>
		<i>Aranceles/Impuestos</i>	<i>0,00\$</i>
		<i>Gastos de envío</i>	<i>12,00\$</i>
		<i>Precio final</i>	<i>91,98\$</i>
<i>Sensores MIKROE- 2377</i>	<i><del>24,00\$</del> 22,80\$</i>	<i>2</i>	<i>45,60\$</i>
<i>BoosterPack MIKROE-2381</i>	<i><del>7,00\$</del> 6,65\$</i>	<i>2</i>	<i>13,30\$</i>
		<i>Gastos de envío</i>	<i>16,00\$</i>
		<i>Precio final</i>	<i>74,90\$</i>
<i>Precio final a pagar</i>			<i>166,88\$</i>

En consecuencia, esta compra, que fue la última en realizarse, hizo que nuestro presupuesto inicial pasara de 312,63 a 145,75 dólares.

Además, se debatió la compra de antenas para mejorar el alcance de la red. Se decidió que esta compra no sería necesaria ya que, en conversaciones con los enlaces de TI, se indicó que esperara para realizarla hasta que la red estuviera conectada y se realizaran más pruebas. Tras hacerlo, se llegó a la conclusión de que el alcance de los LP sin antenas adicionales era suficiente para el caso de uso considerado, por lo que nunca se compraron. Sin embargo, estos componentes se han encontrado por tan sólo 2,60 dólares para las frecuencias necesarias, por lo que la compra podría haberse hecho aún dejando algo de dinero extra.

En otro orden de cosas, todas las tecnologías software utilizadas son de código abierto, por lo que no es necesario el gasto presupuestario para la utilización de ninguna de ellas.

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

---

Con todo, se espere que en el presente resumen se llegue a una conclusión: es posible construir una red Wi-SUN por un precio razonable. Este prototipo ha sido construido con un presupuesto de alrededor de 300\$. Resulta obvio que una implementación real subiría significativamente de presupuesto en hardware, pero las bases –los LaunchPads para funcionar como nodos, así como el software–, son directamente aplicables a cualquier tipo de implementación, por lo que se considera que esta implementación sería más barata y reportaría más beneficio que otras que se pudiesen encontrar.



*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

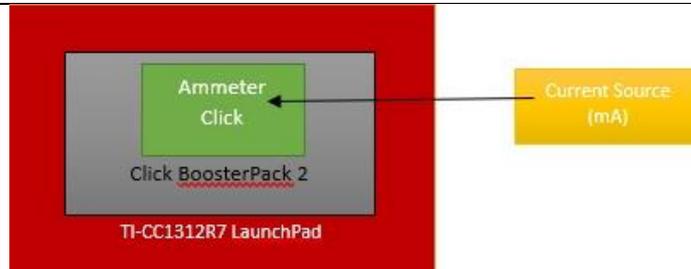
---

### **5.1.1 SISTEMA DE MEDICIÓN DE CORRIENTE**

El primer subsistema importante de la solución de diseño mostrada es el sistema de medición de corriente. Su objetivo es tomar la corriente de entrada de una fuente de alimentación y mostrar digitalmente el valor medido en miliamperios. El sistema amperimétrico puede tomar de 0 mA a 700 mA (las razones para ello se explican en el capítulo de resultados) de corriente de una fuente de corriente y mostrar digitalmente con precisión el valor medido. Los componentes de hardware del sistema consisten en el sensor de corriente MIKROE, el click BoosterPack 2 y el LaunchPad TI CC1312R7. Para el sistema amperimétrico se utilizan cuatro nodos, cada uno de los cuales –a excepción del router central, que no necesita medir corrientes– consta de un launchpad y un sensor. El software requerido para este sistema es un código escrito en C en el que se inicializa y lee la corriente recogida por la placa click.

Al examinar el software escrito, es importante tener en cuenta que se ha desarrollado en el SDK (kit de desarrollo de software) de TI. El proyecto para el que está escrito el código se llama "ns\_coap\_node\_LP\_CC1312R7\_tirtos7\_ticlang". El protocolo necesario utilizado por el amperímetro para leer la corriente medida es SPI (Standard Peripheral Interface). El amperímetro se conecta al Launchpad TI CC1312R7 a través del Click BoosterPack 2. Dado que el sensor de corriente está fabricado por MIKROE y el Launchpad está fabricado por Texas Instruments, el BoosterPack 2 es necesario para que los dos componentes de hardware puedan compartir el mismo mapeado de pines al medir la corriente. La siguiente figura muestra un diagrama de bloques de alto nivel del sistema del amperímetro.

**ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.**



*Ilustración 11: Diagrama de bloques del sistema de medición de corriente*

Dado que se utilizó SPI para medir la corriente, había pines GPIO requeridos y fijos que necesitaban ser utilizados para medir la misma. Estos pines siguieron el protocolo estándar para SPI. La siguiente tabla muestra los pines utilizados, así como su propósito para el subsistema.

*Tabla 4: Mapeo de pines del LaunchPad*

<i>Número de pin en el LaunchPad</i>	<i>Nombre de la clavija</i>	<i>Propósito</i>
10	<i>CONFIG_GPIO_SPI_MASTER_SCLK</i>	<i>Reloj SPI</i>
8	<i>CONFIG_GPIO_SPI_MASTER_MISO</i>	<i>Master in slave out. Se utiliza para transmitir datos</i>
9	<i>CONFIG_GPIO_SPI_MASTER_MOSI</i>	<i>Master out slave in. Se utiliza para transmitir datos</i>
<i>13 (Corresponde a "Btn-1" en LaunchPad)</i>	<i>CONFIG_GPIO_SPI_MASTER_SS</i>	<i>Selección de chip. Se utiliza para determinar el dispositivo correcto para transmitir datos a/desde</i>

Una vez establecida la asignación correcta de pines, el amperímetro pudo medir la corriente con precisión. El esquema del amperímetro puede encontrarse en el Anexo II. Es importante señalar que, a fin de iniciar la medición de la corriente, el usuario debe pulsar y soltar "Btn-1" en el Launchpad. Esto se debe al mapeo del pin GPIO al botón, que es necesario para que el pin de selección de chip funcione correctamente.

Además, la fuente de corriente se conectaba al amperímetro a través de dos terminales atornillables. El convertidor de analógico a digital del amperímetro convertía el valor

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

---

análogo en un valor digital que podía mostrarse en la interfaz de usuario deseada. A continuación, la corriente medida se enviaba al servidor web. Una vez que se había medido y enviado al servidor web un valor de corriente preciso (es decir, en un rango "aproximado" según las especificaciones de diseño), el sistema de amperímetro se consideraba totalmente funcional y listo para su integración con los demás subsistemas.

### **5.1.2 RED WI-SUN**

El sistema de red Wi-SUN se encarga de comunicar los datos del amperímetro al ordenador central. Esto se hace a través de una red de nodos que se comunican utilizando el protocolo Wi-SUN, que consiste tanto en nodos router como en un router central o de frontera. Después, el router fronterizo se comunica con el ordenador central utilizando el controlador WFAN. Por último, el servidor del ordenador central obtiene los datos de la interfaz de red para poder crear, supervisar y configurar la red.

El protocolo Wi-SUN utiliza una red de nodos para comunicar información de forma rápida y eficaz. La red en malla utiliza nodos enrutadores y enrutadores fronterizos para comunicar información. Los nodos enrutadores recopilan activamente datos que se envían por la red de nodos hasta llegar al enrutador fronterizo. Este proceso tiene lugar simultáneamente con los procesos del nodo enrutador, por lo que los nodos enrutadores pueden enviar los paquetes de otro nodo al mismo tiempo que recogen los datos del amperímetro. Estas tecnologías han sido explicadas en mayor profundidad en el capítulo correspondiente a la Descripción de las Tecnologías.

Cuando los datos llegan a un router fronterizo, el controlador WFAN es capaz de recibir los datos recogidos en el ordenador central. El controlador WFAN es una interfaz de red IPv6 para la red Wi-SUN. Así, es capaz de traducir los datos que el router fronterizo recibe al ordenador central.

**ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.**

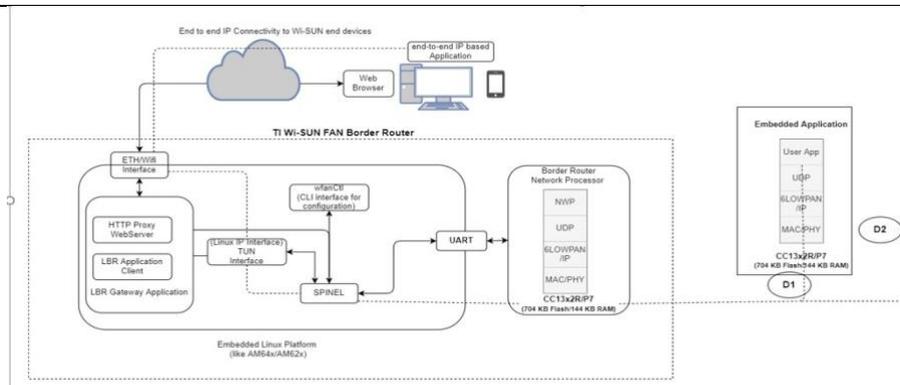


Ilustración 12: Esquema del servidor web<sup>[8]</sup>

Una vez que los datos llegan al ordenador central, el servidor puede verlos. El servidor utiliza una interfaz spinel que se ejecuta en Linux para tomar los datos recibidos. La interfaz spinel viene de serie (cortesía de TI) con una variedad de comandos utilizados para configurar, monitorizar y construir la red, así es como el servidor se comunica con la red. En la siguiente sección, el sistema de interfaz de usuario utilizará un servidor para emitir estos comandos a la entrada del usuario.

### 5.1.3 SISTEMA DE SERVIDOR WEB

La tercera parte del proyecto es el sistema de interfaz de usuario. Se encarga, por supuesto, de mostrar los datos, recogidos por los nodos y pasados por el servidor web, en la pantalla del usuario. El diseño consta de tres pestañas: “Config”, “Monitor” y “Data”.

Las dos primeras pestañas mencionadas se encargan de tratar con la red Wi-SUN y son proporcionadas por TI. La pestaña “Config” crea la red, mientras que la pestaña “Monitor” muestra información sobre ella. La última pestaña, “Data”, es donde se mostrarán los datos medidos y es la parte añadida en el proyecto. Incluye una tabla con las direcciones IP de los nodos conectados, sus apodos y la información relevante sobre sus lecturas actuales, es decir, la hora a la que registraron el último valor así como este valor en mA. Esta tabla está configurada para refrescarse cada segundo, de modo que, si hay un nuevo valor disponible, se mostrará automáticamente en la pantalla.

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

Dado que la red Wi-SUN se ejecuta sobre un proyecto base creado por TI, la UI reutiliza este y lo amplía, lo que significa que las partes añadidas deben ser compatibles con las que ya existían. Dado que la Interfaz de Usuario de TI se diseñó utilizando ReactJS y Typescript, serán estos lenguajes de programación los que se utilicen para el desarrollo, como ya se ha mencionado en capítulos anteriores.

#### **5.1.4 INTEGRACIÓN DE LOS SISTEMAS**

Una vez que los tres subsistemas funcionaron por separado, la fase final del diseño consistió en integrarlos para demostrar su funcionamiento de extremo a extremo. El siguiente diagrama de flujo muestra el funcionamiento deseado de extremo a extremo.



*Ilustración 13: Diagrama de flujo de extremo a extremo*

Para la solución de diseño final, el valor de corriente medido se envió al servidor web a través de Wi-SUN y el valor de corriente medido se mostró en una interfaz de usuario personalizada. Tras una integración satisfactoria, el grupo determinó que la solución de diseño había sido un éxito.

## **5.2 IMPLEMENTACIÓN**

Desde la introducción inicial al proyecto propuesto hasta la solución de diseño final, hubo varios cambios por los que pasó la solución para lograr el producto final. Se tuvieron que examinar muchos tradeoffs como el tiempo, las restricciones presupuestarias y los conocimientos limitados a la hora de ejecutar el proyecto.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

### **5.2.1 DECISIONES DE DISEÑO**

Todas las soluciones de diseño se realizaron con las especificaciones de diseño ofrecidas por Texas Instruments. Se comenzó inicialmente con sólo dos launchpads. Uno actuaba como enrutador fronterizo y el otro como nodo enrutador. Cuando se empezó a comprender lo que realmente significaba ser una red mallada, se llegó a la conclusión de que iban a ser necesarios más launchpads para alcanzar el objetivo de una red mallada. Esto llevó a la compra de más launchpads para que pudiera haber más nodos en la red y crear un prototipo más exacto de lo que realmente se implementaría en un entorno exterior a gran escala. En el diagrama de bloques del sistema hay cuatro nodos enrutadores, pero la solución de diseño final solo incluye tres nodos enrutadores.

### **5.2.2 OBSTÁCULOS DE DISEÑO**

Uno de los mayores obstáculos a los que hubo que hacer frente fueron los limitados conocimientos al principio del proyecto. No se conocía Wi-SUN, las redes de malla, la interfaz de usuario que ofrecía Texas Instruments ni cómo funcionaban las tecnologías necesarias. Hubo, para poder avanzar en el proyecto, que leer una gran cantidad de documentación para ponerse al día sobre las especificaciones deseadas del sistema. También se organizaron una gran cantidad de reuniones con los representantes de Texas Instruments para recibir ayuda. Además, hubo mucho ensayo y error y depuración en los aspectos de software del proyecto. Como contrapartida, esto provocó limitaciones de tiempo que hicieron que la solución global del proyecto tardara más en conseguirse. Hubo que desviarse ligeramente de la planificación original pero, llegado el momento, se ha conseguido un prototipo funcional.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

## **Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Si en el anterior capítulo se ha llevado a cabo un análisis de la solución a implementar y de la manera de hacerlo, en este estamos un paso más allá, habiendo completado la implementación y comprobando los resultados.

Resulta obvio que los dos capítulos, el anterior y el presente, no han ocurrido de manera absolutamente separada ni indistinta, sino que se podría decir que se ha pasado de uno al otro y viceversa, mejorando el proyecto según resultados preliminares y obteniendo los nuevos resultados de los cambios implementados. Sin embargo, al igual que en el capítulo anterior se ha mostrado el diseño final a implementar, con todos estos cambios ya implementados, en éste se presentan los resultados de dicha implementación –y no de las intermedias que han llevado hasta la última–.

Como se comentará más adelante en el capítulo sobre las Conclusiones y los Trabajos Futuros a realizar, no se pretende decir que esta implementación sea perfecta, sino simplemente que, dadas las circunstancias temporales y económicas, es la mejor a la que el autor ha podido llegar.

En cuanto a la estructura de este capítulo, se estructurará de manera primera en los tres subsistemas mencionados en el capítulo anterior, los nodos individuales y su lectura de corriente, la red Wi-SUN y su conexión y, finalmente, el servidor web y la interfaz de usuario. Dentro de cada uno de estos apartados, se presentará primeramente el método utilizado para comprobar los resultados para luego pasar a presentar los propios resultados y finalizar haciendo un análisis de los mismos que incluya, en su caso, pequeñas recomendaciones o medidas adoptadas para mejorarlos.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

Con todo, pasemos ahora a estudiar el primero de los subsistemas, la lectura de la corriente.

## **6.1 LECTURA DE CORRIENTE**

El sistema de amperímetros consta de componentes de hardware y software. En este subsistema, el hardware incluye el LaunchPad TI CC1312R7, un sensor de corriente MikroElektronika que mide de 1mA a 1A, y un complemento MikroBUS para interconectar el amperímetro con el launchpad. El software incluye código escrito en C que utiliza el periférico SPI (Serial Peripheral Interface) para comunicar la corriente medida en el amperímetro al launchpad. Con todos estos componentes combinados, cuyo funcionamiento ha sido explicado en el capítulo dedicado a este fin, el objetivo final de este subsistema es medir con precisión la corriente que luego se introduce en los dos subsistemas restantes.

### **6.1.1 MÉTODO**

Se utilizaron tres métodos principales para medir la corriente. El primero fue utilizar una fuente de corriente fija. El segundo método fue crear un circuito en serie simple utilizando un ordenador portátil como fuente de tensión, cables, una resistencia de 10K, y el amperímetro interconectado con el launchpad, dando como resultado una corriente constante que permitió realizar pruebas de forma móvil (es decir, no tener que ir al laboratorio cada vez que había necesidad de probar el sistema de medición de corriente). El tercer método de prueba consistió en sustituir la resistencia de 10K por un potenciómetro deslizante para medir corrientes variables. En todos los métodos de prueba, se utilizó un simple bucle “for” (escrito en C) para medir la corriente 10 veces. Había un retardo de tres segundos entre cada medición. El valor medido se mostraba a través de una ventana de terminal mediante UART (Receptor/Transceptor Asíncrono Universal) para permitir al usuario ver físicamente el valor medido. Esto significa que cada vez que se probaba el amperímetro, se probaba diez veces.

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

Para el primer método de prueba y evaluación de la precisión de la medición de corriente (utilizando un suministro de corriente en el laboratorio), el amperímetro tiene dos cables conectados a través de terminales de rosca. Los cables se conectaron a la fuente de corriente para que el usuario pudiera introducir una corriente variable mediante un dial. En el suministro de corriente, el valor digital de los amperios se muestra en el suministro.

Esto se utilizó para verificar la exactitud de los valores mostrados en la UART desde el amperímetro. Se procedió entonces a realizar 10 mediciones que fueron mostradas en una ventana de terminal. El suministro de corriente se ajustó a 500mA (0,5A). Más tarde se disminuyó la corriente a 200mA y, a continuación, se aumentó el suministro de corriente a 800mA. Los resultados de estas pruebas (y de los otros dos métodos) están en la sección correspondiente a los resultados más abajo.

Para el segundo método (el circuito móvil), se conectó un Launchpad CC1312R7 de TI a un ordenador portátil. A continuación, la alimentación de 3,3 V y la masa del Launchpad se conectaron a una simple protoboard. A continuación, se conectó una resistencia de 10K $\Omega$  entre la alimentación y la masa. Esto creó un circuito en serie simple. A continuación, se utilizó un multímetro para medir la resistencia y determinar la corriente a la que debería aproximarse el valor del amperímetro. Al inicio del bucle “for”, el circuito comenzó con una corriente alta de 580mA (0,58A) y luego se saturó a 380mA (0,38A).

Para el tercer método de prueba, que era casi idéntico al anterior (el circuito móvil), la resistencia de 10K $\Omega$  se sustituyó por un potenciómetro deslizante para crear una resistencia variable que dio lugar a diversas corrientes. Es importante señalar que fue difícil medir la corriente exacta producida por el potenciómetro deslizante porque no era el más profesional, lo que resulta en una menor precisión. Además, era muy difícil sondear puntos específicos con los recursos disponibles. El método de prueba del potenciómetro deslizante se utilizó para demostrar que el amperímetro podía medir corrientes cambiantes. Se movía el potenciómetro de corredera y se enviaba esa corriente, y luego se volvía a mover, dando como resultado una corriente diferente.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.*

Una última nota importante es que la medición de la prueba de referencia era de 0mA. Cuando el clic del amperímetro se desconectaba de una fuente de corriente, se verificaba que se estaban midiendo 0mA. Esto ayudó a asegurar que no se estaban recibiendo datos incorrectos.

## 6.1.2 RESULTADOS

En este apartado se presentarán en tablas los resultados de las pruebas realizadas con los tres métodos mencionados. Más adelante, en el siguiente apartado, estos resultados serán comentados.

Primero, se muestran los resultados del primer método de prueba (banco de pruebas de alimentación de corriente) presentado en el apartado anterior.

*Tabla 5: Resultados para un suministro de corriente de 500mA*

<i>Nº de ensayo</i>	<i>Resultado esperado (mA)</i>	<i>Resultado real (mA)</i>
1	500	541
2	500	541
3	500	541
4	500	541
5	500	541
6	500	541
7	500	541
8	500	541
9	500	541
10	500	234

**ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.**

*Tabla 6: Resultados para un suministro de corriente de 200mA*

<i>Nº de ensayo</i>	<i>Resultado esperado (mA)</i>	<i>Resultado real (mA)</i>
1	200	213
2	200	204
3	200	213
4	200	189
5	200	187
6	200	213
7	200	211
8	200	183
9	200	213
10	200	234

*Tabla 7: Resultados para un suministro de corriente de 800mA*

<i>Nº de ensayo</i>	<i>Resultado esperado (mA)</i>	<i>Resultado real (mA)</i>
1	800	183
2	800	643
3	800	721
4	800	423
5	800	454
6	800	716
7	800	183
8	800	478

**ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.**

9	800	189
10	800	436

Para continuar, se muestran bajo estas líneas los resultados del segundo método de prueba (circuito simple con resistencia de 10K).

*Tabla 8: Resultados de la medición de corriente en serie simple de 10kΩ*

<i>Nº de ensayo</i>	<i>Resultado esperado (mA)</i>	<i>Resultado real (mA)</i>
1	580	593
2	540	512
3	380	372
4	380	397
5	380	372
6	380	372
7	380	372
8	380	397
9	380	397
10	380	397

Para el tercer método de prueba (el potenciómetro deslizante), no se realizaron mediciones concretas. Pudimos observar que cuando deslizábamos el potenciómetro deslizante, aparecían corrientes variables. Pudimos ver que había un límite inferior de corriente y un límite superior de corriente.

### 6.1.3 ANÁLISIS

En la primera ronda de pruebas del primer método (medición de 500 mA), el amperímetro fue capaz de medir con precisión la corriente 9 de cada 10 veces, por lo que en este caso

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

funcionó el 90% de las veces. En las pruebas 1 a 9, el sensor de corriente estuvo a sólo 41mA de la corriente objetivo. En la prueba 10, la corriente medida era demasiado baja y estaba fuera de un rango factible para la precisión. El umbral de precisión para una corriente medida es medio amperio por encima o por debajo de la corriente deseada. La razón por la que se tiene este rango de precisión es que se sabe que los datos recogidos tienen ruido. No habían sido implementados ninguna clase de filtros de hardware ni de software, por eso no se podía esperar una medición precisa. Además, Texas Instruments dijo que la lectura de corriente no tenía que ser completamente precisa ya que lo que se estaba desarrollando era un prototipo –siendo preciso mejorar este hecho de cara a una implementación final y no en esta intermedia–, y que sólo se necesitaban rangos "aproximados". Podemos ver el porcentaje de error de las mediciones siguiendo el siguiente cálculo:

$$\text{Porcentaje de error} = \left| \frac{(\text{Valor experimental} - \text{Valor teórico})}{\text{Valor teórico}} \right| \times 100$$

Donde, el valor experimental es el valor medio de la corriente medida con precisión en los 10 ensayos, el valor teórico es el valor medio esperado en los 10 ensayos y el porcentaje de error es el error del sensor de corriente. Por ejemplo, introduciendo valores de la medición con el primer método pero con la segunda prueba (poniendo 500mA) podemos ver:

$$8.2\% = \left| \frac{(541 - 500)}{500} \right| \times 100$$

El sensor de corriente tiene, por tanto, un porcentaje de error del 8,2% para esta lectura en concreto. Este mismo proceso se puede repetir para determinar el porcentaje de error en las otras rondas de pruebas.

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

---

En la segunda ronda de pruebas para el primer método, el amperímetro midió con precisión 10 de cada 10 veces, con lo que el sensor funcionó el 100% de las veces. Siguiendo las mismas pautas anteriores, cada valor medido estaba dentro del rango de medio amperio.

En la tercera ronda de pruebas del primer método, el clic del amperímetro no midió con precisión ninguna de las 10 veces que se utilizó, lo que significa que el amperímetro funcionó el 0% de las veces. Es evidente que cada valor de corriente medido no estaba dentro del umbral de medio amperio, lo que significa que el amperímetro no midió con precisión en ninguno de los ensayos.

Para el segundo método de prueba (el circuito simple de 10K en serie), el amperímetro midió con precisión 10 de cada 10 veces, lo que resulta en una precisión del 100%. De nuevo debido al ruido no filtrado, ninguna de las lecturas de corriente fue precisa, pero son lo suficientemente exactas o, al menos, direccionales, para entrar dentro del umbral recomendado por Texas Instruments.

Por último, en el tercer método de prueba (el potenciómetro deslizante) no se midieron corrientes. Este método de prueba se utilizó más bien para recopilar datos cualitativos sobre el amperímetro basándose en la tendencia general de ver corrientes cambiantes para determinar que el amperímetro funcionaba correctamente, así como para probar el modelo al completo, con el fin de poder cambiar la corriente y comprobar el cambio en las siguientes fases del sistema.

#### **6.1.4 RECOMENDACIONES Y/O MEDIDAS ADOPTADAS**

Cuando el usuario desea medir la corriente utilizando el amperímetro, es importante tener en cuenta que debe pulsar y soltar BTN-1 en el launchpad. Esto permite que se active la selección de chip, necesaria para que la comunicación SPI funcione correctamente. Esto debe hacerse en cada medición, o el usuario verá un valor de 0mA, por lo que el usuario

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

---

podría pensar que el sensor no está funcionando correctamente. Para más información, Consulte el Anexo II para ver el esquema de la placa de conexión que resulta en el enrutamiento del chip select a BTN-1.

Basándonos en los datos medidos, se puede determinar que la fuente de corriente conectada al amperímetro debe permanecer por debajo de 700mA (0,7mA). Como se puede ver en la sección de resultados del sistema amperímetro, cuando la corriente excedió los 700mA y se intentó probar 800mA, ninguna de las lecturas fue precisa. Para obtener lecturas de corriente precisas, el usuario debería mantener el suministro de corriente por debajo de 700mA. En los datos recogidos, la corriente que se mantuvo por debajo de 700mA se leyó con precisión. Aunque no es seguro y puede deberse a otros factores, es posible que esta pérdida de precisión se deba a la aproximación al límite superior de lectura del amperímetro, lo que puede hacer que pierda capacidad de medir de manera exacta en este rango de corriente.

## **6.2 RED WI-SUN**

Este sistema conecta la red Wi-SUN con el cliente en el ordenador central. Este sistema puede dividirse en dos subsistemas, la interfaz Wi-SUN y el servidor. La interfaz Wi-SUN es el controlador que conecta el borde de la red Wi-SUN con el host. El controlador proporciona una interfaz de red IPv6 nativa al router fronterizo Wi-SUN FAN. El servidor se empareja con la interfaz de red para proporcionar al ordenador host la capacidad de configurar, monitorizar y construir fácilmente la red. A través del servidor, los usuarios pueden acceder a información importante sobre la red y enviar o recibir comandos hacia, o desde, la red. Resulta relevante mencionar, como ya se ha hecho en apartados anteriores, que la base de esta implementación es tecnología de código abierto de Texas Instruments, a la que más tarde se han añadido las funcionalidades concretas necesarias para hacer funcionar este prototipo.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

### 6.2.1 MÉTODO

Para probar el servidor web, se dividieron las pruebas en orden del recorrido que hacen los datos a través de la red. En primer lugar, los datos se envían a la interfaz de red, luego a los scripts del host spinel, hasta que finalmente llegan al servidor.

La prueba de la interfaz de red se realizó principalmente probando las otras dos partes y asegurándose de que la interfaz de red recibía correctamente los datos (Ilustración 14).

Para probar la conexión entre la interfaz de red y los scripts del host spinel, se utilizó la interfaz de línea de comandos Wi-SUN Spinel de Texas Instruments (Ilustración 15). En este caso se probaron diferentes cargas de trabajo para la red. Para probar la fiabilidad de los comandos de red, se enviaron estos comandos a la red a diferentes velocidades.

También, se trataron de comprobar las limitaciones de la red enviando paquetes de datos a través de la red a diferentes tamaños y velocidades. A continuación se comprobó la conexión del servidor a la red. Esto se hizo de forma similar enviando comandos desde el servidor y obteniendo respuestas de la red Wi-SUN. Estas respuestas se visualizaron en la consola de la aplicación web (Ilustración 16).

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

```
wfantund[137]: State change: "uninitialized" → "offline"  
wfantund[137]: NCP is running "TIWISUNFAN/1.0.1; RELEASE;  
Mar 24 2023 19:23:48"  
wfantund[137]: Driver is running "0.08.00d (/db713a0-dirty  
; Feb 7 2023 12:51:59)"  
wfantund[137]: Resetting interface(s) . . .  
wfantund[137]: Finished initializing NCP  
wfantund[137]: [-NCP-]: Interface is not up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Stack is not up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Interface is not up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Stack is not up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Interface is not up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Stack is not up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Interface is not up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Stack is not up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Interface is not up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Stack is not up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Interface is up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Stack is not up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Interface is up  
wfantund[137]: [-NCP-]: Stack is up  
wfantund[137]: State change: "offline" → "associated"  
wfantund[137]: Spine\NCP\Task.cpp:86: Requirement Failed (I  
S_EVENT_FROM_NCP(event) && GetInstance(this)→mInboundHead  
er == mLastHeader)  
wfantund[137]: Spine\NCP\TaskSendCommand.cpp:351: Requireme  
nt Failed ((mRetVal) == 0)  
wfantund[137]: SendCommand task encountered an error: 7 (0  
x00000007)
```

*Ilustración 14: Registro de la interfaz de red*

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

```
1000 bytes from 2020:abcd::212:4b00:14f9:422f: icmp_seq=3089 hlim=64 time=194ms
ping ff05::2 5000
spinel-cli > ping ff05::2 5000
spinel-cli > ping ff05::2 2000
spinel-cli > ping ff05::2 1500
spinel-cli > ping ff05::2 1100
spinel-cli >
1100 bytes from 2020:abcd::212:4b00:14f9:422f: icmp_seq=21983 hlim=64 time=212ms
ping ff05::2 1200
spinel-cli > ping ff05::2 1200
spinel-cli > ping ff05::2 1150
spinel-cli >
1150 bytes from 2020:abcd::212:4b00:14f9:422f: icmp_seq=34640 hlim=64 time=221ms
ping ff05::2 1168
spinel-cli >
1168 bytes from 2020:abcd::212:4b00:14f9:422f: icmp_seq=38264 hlim=64 time=225ms
ping ff05::2 1180
spinel-cli >
1180 bytes from 2020:abcd::212:4b00:14f9:422f: icmp_seq=42416 hlim=64 time=226ms
ping ff05::2 1199
spinel-cli > ping ff05::2 1190
spinel-cli > ping ff05::2 1191
spinel-cli > ping ff05::2 1192
spinel-cli > ping ff05::2 1185
spinel-cli > ping ff05::2 1182
spinel-cli > ping ff05::2 1181
spinel-cli >
1181 bytes from 2020:abcd::212:4b00:14f9:422f: icmp_seq=888 hlim=64 time=231ms
ping ff05::2 1182
spinel-cli > |
```

*Ilustración 15: Guiones del Spinel Host*

```
[2023.03.31 16:42:18 - info] <BORDER ROUTER> TOPOLOGY CHANGED
[2023.03.31 16:43:44 - info] <HTTP> 127.0.0.1 GET /getCurrent?ipAddr=2020:abcd::212:4b00:14f9:403e
received get response from 2020:abcd::212:4b00:14f9:403e 2.05 <Buffer 00 00>
undefined
[2023.03.31 16:43:45 - info] <HTTP> 127.0.0.1 GET /getCurrent?ipAddr=2020:abcd::212:4b00:14f9:403e
[2023.03.31 16:43:46 - info] <HTTP> 127.0.0.1 GET /getCurrent?ipAddr=2020:abcd::212:4b00:14f9:403e
[2023.03.31 16:43:47 - info] <HTTP> 127.0.0.1 GET /getCurrent?ipAddr=2020:abcd::212:4b00:14f9:403e
received get response from 2020:abcd::212:4b00:14f9:403e 2.05 <Buffer 00 00>
undefined
[2023.03.31 16:43:48 - info] <HTTP> 127.0.0.1 GET /getCurrent?ipAddr=2020:abcd::212:4b00:14f9:403e
[2023.03.31 16:43:48 - info] <HTTP> 127.0.0.1 GET /getHistoricCurrents?ipAddr=2020:abcd::212:4b00:14f9:403e
received get response from 2020:abcd::212:4b00:14f9:403e 2.05 <Buffer 00 00>
undefined
received get response from 2020:abcd::212:4b00:14f9:403e 2.05 <Buffer 00 00>
undefined
received get response from 2020:abcd::212:4b00:14f9:403e 2.05 <Buffer 00 00>
undefined
[2023.03.31 16:43:49 - info] <HTTP> 127.0.0.1 GET /getCurrent?ipAddr=2020:abcd::212:4b00:14f9:403e
received get response from 2020:abcd::212:4b00:14f9:403e 2.05 <Buffer 00 00>
undefined
[2023.03.31 16:43:50 - info] <HTTP> 127.0.0.1 GET /getCurrent?ipAddr=2020:abcd::212:4b00:14f9:403e
received get response from 2020:abcd::212:4b00:14f9:403e 2.05 <Buffer 00 00>
undefined
[2023.03.31 16:43:51 - info] <HTTP> 127.0.0.1 GET /getCurrent?ipAddr=2020:abcd::212:4b00:14f9:403e
received get response from 2020:abcd::212:4b00:14f9:403e 2.05 <Buffer 00 00>
undefined
[2023.03.31 16:43:52 - info] <HTTP> 127.0.0.1 GET /getCurrent?ipAddr=2020:abcd::212:4b00:14f9:403e
```

*Ilustración 16: Registros del servidor*

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

## **6.2.2 RESULTADOS**

La interfaz de red dio las respuestas correspondientes a los comandos emitidos por el host spinel. Como muestra la Ilustración 15, los comandos de inicio de la red, apilamiento e interfaz tuvieron éxito. Los datos también se transfirieron correctamente a través de la red. En el script de spinel host, visualizamos la comunicación con la interfaz de red y vimos cómo se ejecutaba cada comando. Al probar la transferencia de datos, la red tuvo problemas para enviar aquellos paquetes cuyo tamaño pasase por encima de 1181 bytes. Para las pruebas del servidor, se comenzó con comandos para poner en marcha el servidor, que tuvieron éxito. Después, se enviaron peticiones para obtener lecturas de los nodos periódicamente. Estas peticiones generaron respuestas de la red Wi-SUN dentro del alcance de las lecturas y en línea con las que se habían medido en los propios nodos, que se desarrollan en el apartado anterior dedicado a este otro subsistema.

## **6.2.3 ANÁLISIS**

La interfaz de red funcionó correctamente ya que reflejaba con precisión cada comando que se enviaba desde el servidor a la red Wi-SUN. Los scripts spinel host también funcionaron bien ya que cada petición emitida desde el servidor llegaba de manera correcta a la red. Sin embargo, como se ha mencionado, se encontraron limitaciones en la transferencia de datos. La red debe funcionar con un límite de tamaño de paquetes nunca superior de 1181 bytes. En cuanto a la parte del servidor, las pruebas que se hicieron dieron cierta discrepancia en las lecturas actuales frente a los valores reales pero, como se ha mencionado ésta está en línea con la medida en el apartado anterior, por lo que se puede comprobar que las mediciones que llegan a los nodos individuales llegan correctamente hasta el router central y, por lo tanto, al servidor.

## **6.2.4 RECOMENDACIONES Y/O MEDIDAS ADOPTADAS**

La interfaz de red no tuvo ningún problema, así que no habría por qué añadir demasiada discusión al respecto. En cuanto a los scripts del host spinel, nos encontramos, como se ha

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

dicho, con un límite superior de 1181 bytes. Aunque esto no debería ser un problema en la implementación presentada del prototipo de red de puntos de carga –ya que sólo se están leyendo corrientes de hasta 4 dígitos (0 a 1000mA), que pueden ser transmitidos con precisión a través de 2 bytes de información– es relevante tenerlo en cuenta para implementaciones futuras en las que la cantidad de datos enviada fuese mayor.

### **6.3 INTERFAZ DE USUARIO**

El subsistema dedicado a la interfaz de usuario está basado en el utilizado para monitorizar una red Wi-SUN proporcionado por TI. En este último hay dos pestañas, “Config” y “Monitor”. La primera se utiliza para configurar la red Wi-SUN, gestionar sus ajustes básicos e iniciar la red. La pestaña “Monitor” ofrece información sobre la red una vez que ha convergido. Esto incluye información sobre los nodos que están conectados, la topología (cómo están conectados) y la posibilidad de comprobar la conectividad encendiendo y apagando sus LEDs. Además de estas dos pestañas, se ha añadido una más, la de “Data”, que se encarga de mostrar los datos actuales recogidos de los nodos. Incluía, en un primer diseño, una tabla con la lectura actual de cada uno de los nodos conectados así como cuándo se recogieron esos datos, una tabla con los grupos multicast y un panel capaz de mostrar los registros históricos del nodo seleccionado en la primera tabla. Finalmente, esta implementación se dejó, por múltiples razones, en la tabla con las lecturas de corriente. La eliminación de la tabla con los grupos multicast se hizo por recomendación de TI, que consideraba esta función como irrelevante en un prototipo y de difícil implementación. Los registros históricos de los nodos sí se consideraban relevantes para ver la evolución en las mediciones. Sin embargo, por razones de tiempo se excluyó de la interfaz de usuario, aunque sí se implementó en el servidor, que cuenta con una base de datos donde se van almacenando estos datos.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

### **6.3.1 MÉTODO**

El método utilizado para probar esta parte del sistema es sencillo. Básicamente, se trata de comprobar que la información pasa correctamente desde el servidor web, que es el paso previo del sistema, y que, por tanto, se renderiza correctamente en la pantalla del usuario. Hay múltiples pasos por los que pasa la información cuando viaja desde el lado del servidor (backend) hasta el lado del cliente (frontend). En primer lugar, el servidor debe poner a disposición del cliente algunos endpoints para que éste pueda acceder a la información en a través de peticiones HTTP. En segundo lugar, el cliente debe realizar las peticiones pertinentes para obtener la información y procesarla para que tenga el formato necesario. Por último, la información obtenida debe mostrarse en la forma correcta en la Interfaz de Usuario del lado del cliente. En cada uno de estos pasos podemos comprobar que la información se envía correctamente imprimiendo los resultados en la consola. En el último paso, la impresión no sería necesaria, ya que los resultados se mostrarán finalmente en la pantalla.

Además, se podría evaluar hasta qué punto la interfaz de usuario creada es similar al diseño que se creó previamente. Por supuesto, siempre hay algunos cambios en el diseño proyectado, pero deberían ser más visuales que funcionales. Obviamente, la parte de la interfaz de usuario que se nos ha entregado no debe probarse, ya que TI la creó antes del inicio de este proyecto y podemos suponer que ya hicieron las pruebas pertinentes. Sin embargo, en la parte nueva, la pestaña “Data”, se pueden observar algunas pruebas para asegurarnos de que todo funciona correctamente. Para comprobar tanto el diseño, realizado con el software para el diseño de prototipos Figma, como la implementación final de la Interfaz de Usuario, refiérase al Anexo III.

### **6.3.2 RESULTADOS**

Los valores mostrados en la Interfaz de Usuario eran, efectivamente, los que se estaban recibiendo en el lado backend. Además, las lecturas históricas de los diferentes nodos

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

también se recibían correctamente desde la Base de Datos en la parte del servidor a la parte del cliente. Esto significa que la conexión entre ambas partes funcionaba correctamente. Además, como todo el proceso, desde la lectura de la corriente hasta su visualización, está controlado por los diferentes subsistemas del proyecto, no hay riesgo de que se envíen valores no válidos (como letras o símbolos en lugar de las lecturas numéricas de la corriente). Por esta razón, no tiene sentido probar lo que los métodos creados mostrarían en estos casos. Sin embargo, este punto sí que puede ser una prueba necesaria e interesante en un sistema más complejo.

Además, durante las pruebas se llegó a la conclusión, tal y como se explica en la parte del Sistema de Lectura de Corriente de este documento, de que los nodos siempre estaban enviando valores pero los únicos válidos eran los que se enviaban cuando se pulsaba el botón de los Launchpads. Esto daba lugar a la introducción de valores de 0 constantes en las lecturas de corriente que podían inducir a error al usuario haciéndole pensar que los nodos no tenían corriente mientras que, en realidad, no estaban enviando las lecturas reales porque su amperímetro no estaba siendo utilizado cuando no se pulsaba el botón. Por este motivo, se añadieron filtros para eliminar los valores cero engañosos tanto en la tabla con las últimas lecturas como en los valores históricos.

### **6.3.3 RECOMENDACIONES Y/O MEDIDAS ADOPTADAS**

De cara a una implementación real del prototipo, habría una serie de medidas que podría ser interesante llevar a cabo. La primera de ellas es un testeo más en profundidad del funcionamiento de este sistema. Cada implementación deberá, como es obvio, cambiar la implementación de la interfaz de usuario para adaptarla a sus necesidades. Por ello, el usuario que llevase a cabo esta implementación debería realizar pruebas de su funcionamiento.

Por otro lado, se ha mencionado que el diseño no se terminó por razones de tiempo. Por esta razón, una recomendación obvia sería añadir este último paso, implementando la tabla

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

---

que pudiese mostrar los valores históricos medidos por los nodos. Como se ha mencionado, se ha implementado la infraestructura necesaria para tener una base de datos en la parte de servidor web que guarda los datos históricos de todos los nodos. Además, se han hecho visibles los endpoints necesarios para que se pueda solicitar esta información para el nodo seleccionado. Finalmente, se ha llevado esta información hasta la parte de frontend. Con todo, faltaría solamente el diseño del gráfico y la funcionalidad para dibujar y mostrar el gráfico del nodo que se haya seleccionado para realizar una implementación acorde con lo inicialmente deseado. Cabe mencionar que, aunque este paso pueda parecer sencillo y pueda resultar llamativo que esto no se haya implementado, no se ha hecho dada la complejidad interna de la interfaz propuesta por Texas Instruments, a la que se han añadido las funcionalidades que se han comentado, pero se ha sido incapaz de depurar suficientemente los errores como para llegar a dibujar dicho gráfico.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

## **Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

Para concluir esta memoria, se presentan ahora las conclusiones que se han sacado del trabajo realizado, así como posibles mejoras a futuro que, durante el desarrollo del proyecto, han surgido y que las limitaciones en cuanto a tiempo, presupuesto y personal del proyecto que ahora concluye no han permitido realizar.

Primero, la primera mejora que se podría implementar va destinada a mejorar el prototipo de diseño, aplicando un filtrado por software del valor de corriente medido. Esto permitiría una medición más exacta y precisa del valor de la corriente. Con más tiempo, se podría haber implementado este filtrado, pero dadas las limitaciones de tiempo, se decidió avanzar con valores de rango "aproximados". Por otro lado, al no resultar tan relevante la implementación física y eléctrica del prototipo como la red que incluía, que conforma el fin real del proyecto, se consideraba suficiente una medida que, aunque no fuese exacta, fuese enviada de manera correcta a través de dicha red.

Para continuar, dado que, como ya se ha mencionado, la solución de diseño final es un prototipo, es importante mirar al futuro y al panorama general del proyecto. Cuando se lleve a escala, la corriente que se mida no procederá de una fuente de corriente pequeña, sino de una estación de carga de vehículos eléctricos muy grande. Estas corrientes son mucho mayores que las corrientes que estamos tratando, por lo que será necesario tener el hardware adecuado para permitir la medición de estas grandes corrientes. Además, dado que Wi-SUN se utiliza en grandes áreas al aire libre, será necesario realizar pruebas más exhaustivas para garantizar que no haya pérdida de datos entre los nodos. También habrá muchas más interferencias en exteriores, por lo que es importante escalar el prototipo para tener en cuenta las interferencias de edificios, rascacielos y otros obstáculos. Se ha discutido la incorporación en este plano de antenas para incrementar la distancia posible entre los nodos. En esta conclusión se llega a la misma que se llega en el capítulo sobre el diseño del prototipo, que es la que recomendaba Texas Instruments: no es necesaria para

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

---

una implementación como la actual, pero es posible que lo sea para una implementación real. Si se hiciese esta incorporación, sí sería necesario, obviamente, hacer más análisis de los resultados y pruebas de funcionamiento.

Finalmente, para concluir, en general este informe ha proporcionado una visión en profundidad del problema de diseño que incluía especificaciones de diseño únicas. A través de la integración exitosa de tres subsistemas (nodos individuales, red Wi-SUN y servidor web e interfaz de usuario), se ha logrado una solución de diseño funcional, ya que el funcionamiento de extremo a extremo se ha demostrado mediante la transmisión de datos reales. Durante el trabajo realizado, ha habido múltiples muchas curvas de aprendizaje y se ha tenido que llegar a soluciones según iban surgiendo contratiempos. Las curvas de aprendizaje se afrontaron al principio, cuando se empezó a comprender las especificaciones de diseño deseadas y a aprender sobre las tecnologías que se han ido utilizando. Después de probar y evaluar los tres subsistemas, hube que hacer frente también a decisiones sobre el diseño final que implicaban tiempo y recursos disponibles.

Aunque la solución de diseño se considere satisfactoria, se puede comprobar en este mismo capítulo que aún pueden introducirse mejoras para perfeccionar aún más el prototipo. Llegando al final de este trabajo, no se puede sino animar al lector que haya estudiado este proyecto a llevar a cabo las mejoras mencionadas y otras muchas que se le hayan ocurrido y que el autor no haya sido capaz de encontrar satisfactoriamente.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

## Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fire Industry Association (FIA). “A history of the Internet of Things”, Octubre 2021.  
<https://www.fia.uk.com/news/history-of-iot.html>.
- [2] Auto-ID Laboratory. Massachusetts Institute of Technology.  
<https://autoid.mit.edu/projects>.
- [3] McKinsey & Company. “What is the Internet of Things?”. Agosto, 2022.  
<https://www.mckinsey.com/featured-insights/mckinsey-explainers/what-is-the-internet-of-things> .
- [4] Ferrovial. “Internet de las cosas (IoT)”. <https://www.ferrovial.com/es/recursos/internet-de-las-cosas/>.
- [5] DispatchTrack. “Ventajas y desventajas del ‘internet de las cosas’ (IoT)”.  
<https://www.beetrack.com/es/blog/ventajas-y-desventajas-internet-de-las-cosas-iot>.
- [6] Higgins, M. “What is a mesh network, and how does it work?”, NordVPN, Marzo 2023.  
<https://nordvpn.com/es/blog/what-is-mesh-network/>.
- [7] Texas Instruments, TI Wi-SUN FAN, <https://github.com/TexasInstruments/ti-wisunfantund>, Octubre 2022.
- [8] Simensen, E. “Application Report: Wi-SUN Software Product Brief v.1.0.0”, Texas Instruemnts, Julio 2021.  
[https://www.ti.com/lit/an/swra714/swra714.pdf?ts=1666029270901&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/an/swra714/swra714.pdf?ts=1666029270901&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F).
- [9] Wi-SUN Alliance. <https://wi-sun.org>.
- [10] Bassi, A. “Introducción al protocolo CoAP”, Goto IoT, Julio 2021.  
[https://www.gotoiot.com/pages/articles/coap\\_intro/index.html](https://www.gotoiot.com/pages/articles/coap_intro/index.html).
- [11] IBM, “Rutas y direcciones ampliadas de IPv6”, Abril 2021.  
<https://www.ibm.com/docs/es/aix/7.2?topic=6-ipv6-expanded-routing-addressing>.
- [12] Molina, A. “Mecanismos de transición entre IPv4 e IPv6”, OpenWebinars, Julio 2018.  
<https://openwebinars.net/blog/mecanismos-transicion-ipv4-ipv6/>.
- [13] Robby Wayong, Ryota Okumura, Keiichi Mizutani, Hiroshi Harada, “A Routing Protocol toward Reliable Mobile Communication in Wi-SUN FAN”, 2021 IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC) art. no. 9369584

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

- [14] G. Scaramella, G. C. Heck, L. Lippmann Junior, R. A. Hexsel, T. Santana y V. B. Gomes, "Enabling LoRaWAN Communication Over Wi-SUN Smart Grid Networks", ICC 2022 - IEEE International Conference on Communications, 2022, pp. 4842-4847, doi: 10.1109/ICC45855.2022.9838959.
- [15] "TI Wi-SUN FAN Stack", *Ti devtools*, [https://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=A\\_ADg-OA11kmNpV7sMfCNnZA.com.ti.S\\_IMPLELINK\\_CC13XX\\_CC26XX\\_SDK\\_BSEc4rl\\_LATEST&search=wisun](https://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=A_ADg-OA11kmNpV7sMfCNnZA.com.ti.S_IMPLELINK_CC13XX_CC26XX_SDK_BSEc4rl_LATEST&search=wisun). [Consultado: 04-Nov-2022].
- [16] H. Zexin, L. Xianhuai, "Mobile meter reading method based on wisun protocol," Patent WO2022105093A1, Noviembre, 2020.
- [17] B. Tran. "Mesh network personal emergency response appliance," U.S. Patent 7733224B4, June 08, 2008.
- [18] R.D. Girolamo, Q. Ly, X. Li, C. Wang, S.A. Rahman, Z. Chen, V.K. Choyi, L. Dong, "Methods and nodes for enabling context-awareness in CoAP," U.S. Patent 10708885B2, July 07, 2020
- [19] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, "Los ODS en acción". <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

## **ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS**

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) u Objetivos Globales, fueron adoptados por las Naciones Unidas en 2015 como una iniciativa global para abordar desafíos como la pobreza, la protección del medio ambiente y la promoción de la paz y la prosperidad en el mundo antes de 2030 <sup>[19]</sup>.

Se trata de 17 objetivos interconectados, que reconocen que las acciones en un área pueden afectar los resultados en otras. Además, promueven un enfoque equilibrado que considera la sostenibilidad social, económica y ambiental. A través de los ODS, los países se han comprometido a priorizar el avance de aquellos que están rezagados, asegurando que nadie se quede atrás en el camino hacia el desarrollo sostenible.

El proyecto analizado, contribuye a la realización de los siguientes ODS:

- 1. Hambre cero:** Se busca lograr la seguridad alimentaria y una nutrición adecuada para todos, promoviendo la agricultura sostenible, apoyando a pequeños agricultores y asegurando el acceso igualitario a alimentos suficientes, nutritivos y seguros, además de a las tecnologías necesarias para su obtención. En este sentido, la tecnología Wi-SUN contribuye especialmente a este objetivo mediante una gestión más inteligente y eficiente de los recursos naturales, ya que, al permitir una comunicación efectiva entre dispositivos y sistemas, se pueden implementar estrategias de conservación y uso responsable de los recursos, lo que permitiría una mejor distribución de la energía, entre otros recursos, contribuyendo a erradicar el hambre en el mundo.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.*

---

Por otro lado, las redes Wi-SUN pueden utilizarse para favorecer una agricultura más sostenible. Si bien es cierto que el prototipo propuesto no va encaminado en esta dirección, se pueden pensar múltiples soluciones para favorecer a este fin, desde el riego inteligente hasta la detección de enfermedades en los cultivos, lo que también puede repercutir en la reducción de las pobreza alimentaria.

Los beneficios expuestos, también son de utilidad de cara al objetivo de producción y consumo responsables, que busca promover patrones de consumo y producción sostenibles, reduciendo el desperdicio de recursos.

- 2. Salud y bienestar:** El objetivo es garantizar una cobertura sanitaria universal, acabando con las muertes evitables y prematuras, así como las epidemias, y promover el bienestar para todas las edades, mejorando el acceso a servicios de salud de calidad y la prevención de enfermedades, en condiciones de igualdad tanto nacional como internacionalmente. La tecnología Wi-SUN puede permitir un monitoreo preciso de la situación sanitaria, así como la prestación de servicios sanitarios en lugares remotos, gracias a la posibilidad de recopilar datos en tiempo real por los distintos componentes de la red y la comunicación entre los mismos. Ello facilita el acceso a atención médica y el diagnóstico y seguimiento continuo e inmediato de enfermedades.
- 3. Educación de calidad:** Trata de mejorar la infraestructura educativa de forma que se asegure una educación inclusiva, equitativa y de calidad, especialmente durante los primeros años escolares. La tecnología Wi-SUN puede contribuir a la educación de calidad al permitir la implementación de soluciones IoT en el aula y promover la eficiencia energética. Estas aplicaciones pueden facilitar el acceso a recursos educativos, mejorar la interactividad y promover prácticas más sostenibles.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

- 4. Agua limpia y saneamiento:** Se busca garantizar la disponibilidad y gestión sostenible del agua potable, segura y asequible a nivel universal, asegurando el acceso equitativo a servicios básicos de saneamiento. La tecnología Wi-SUN puede usarse para promover la eficiencia energética de las plantas de tratamiento y posibilitar el monitoreo eficiente del agua, contribuyendo a la detección temprana de problemas en infraestructuras, y proporcionando información en tiempo real. En consecuencia, la aplicación de dicha tecnología mejora la gestión del agua, reduce el desperdicio y garantiza el acceso equitativo a servicios de agua y saneamiento adecuados.
  
- 5. Energía asequible y no contaminante:** El objetivo es ampliar la infraestructura para asegurar el acceso a una energía asequible y sostenible para todos, promoviendo la eficiencia energética y la adopción de fuentes de energía renovables. Wi-SUN en el IoT puede contribuir a la transición hacia fuentes de energía más limpias y renovables al facilitar la monitorización y gestión inteligente de la generación, distribución y consumo de energía. Esto puede fomentar el acceso a una energía asequible y sostenible, así como la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, gracias a una mayor eficiencia energética, como consecuencia del bajo consumo de energía de la comunicación inalámbrica.

Además, el prototipo presentado, al representar una red de carga de vehículos eléctricos, promueve el uso no contaminante de la energía, así como el fomento de las energías renovables.
  
- 6. Trabajo decente y crecimiento económico:** Se busca promover un crecimiento económico a través de una mayor productividad y la innovación tecnológica, garantizando la inclusividad y la sostenibilidad, y asegurando un trabajo decente, y el emprendimiento. Actualmente, las tecnologías se convierten en la base de la mayor parte de las profesiones y la tendencia al teletrabajo es cada vez mayor. La implementación de la tecnología Wi-SUN facilita esta tendencia, posibilitando la

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.*

---

mejora de las condiciones laborales de los trabajadores, que podrán ser monitoreadas en tiempo real gracias a dicha tecnología y favorece, consecuentemente, el crecimiento económico sostenible de los países. Además, esta tecnología permite una mayor eficiencia de los procesos, proporcionando comunicación inalámbrica confiable y de bajo consumo de energía. Esto es especialmente relevante en aplicaciones como la gestión de la energía eléctrica, donde la optimización del consumo y la reducción del desperdicio pueden contribuir a una mayor eficiencia energética, lo que permitiría reducir los costes de las empresas, favoreciendo su eficiencia y aumentando las posibilidades de inversión en la mano de obra y la creación de puestos de trabajo.

7. **Industria, innovación e infraestructura:** El objetivo es desarrollar infraestructuras resilientes y transporte masivo y fomentar la innovación y la adopción de nuevas tecnologías y energías renovables. La tecnología Wi-SUN puede impulsar la innovación y la mejora de la infraestructura al permitir la conectividad de dispositivos en diversos entornos, como la gestión inteligente de redes eléctricas, sistemas de transporte eficientes y ciudades inteligentes. Esto puede impulsar el crecimiento económico sostenible y la mejora de la calidad de vida.
8. **Ciudades y comunidades sostenibles:** El objetivo es lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, mejorando el acceso a viviendas adecuadas, transporte sostenible y espacios públicos. La tecnología Wi-SUN contribuye a la creación de ciudades inteligentes al proporcionar una infraestructura de red sólida y segura para conectar y gestionar diversos dispositivos y sistemas en el entorno urbano. Esta infraestructura facilita la interoperabilidad, la eficacia energética, la sostenibilidad y la conectividad, lo que permite el desarrollo de aspectos como la iluminación de las ciudades o sistemas de estacionamiento inteligente, además de, como se ha expuesto, puntos de carga de

***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.***

---

vehículos eléctricos. Al facilitar la gestión inteligente de los recursos y servicios urbanos, esta tecnología promueve el desarrollo sostenible y la mejora del bienestar en entornos urbanos.

- 9. Acción por el clima:** El objetivo es tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, mediante la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y la sensibilización de la población mundial al respecto, así como facilitar la adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en los distintos países. Además, de los numerosos beneficios para el medioambiente descritos a través de los objetivos anteriores, la tecnología analizada puede ayudar a reducir el cambio climático al contribuir a una mayor eficiencia energética y permitir el control de emisiones y la gestión inteligente de recursos naturales. Asimismo, dicha tecnología contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y a la adaptación a los impactos del cambio climático.
- 10. Alianzas para lograr los objetivos:** El objetivo es lograr un compromiso universal a través de alianzas entre los diferentes países y la cooperación mundial. Especialmente se busca conseguir la cooperación entre el norte y el sur para conseguir las metas planteadas en los planes nacionales. Para ello, se plantea el fomento del comercio internacional y el incremento de las exportaciones de países en desarrollo. El objetivo consiste en crear un comercio universal, abierto, equitativo y justo. Como se ha explicado en el capítulo en el que se describe, los actores más importantes que utilizan Wi-SUN crearon en 2011 la Wi-SUN Alliance, con el fin de desarrollar un foro para la colaboración alrededor de las ciudades inteligentes y establecer estándares de uso. Este grupo tiene hoy más de 300 miembros a lo largo y ancho del planeta, en más de 45 países y con más de 100 millones de dispositivos <sup>[9]</sup>.

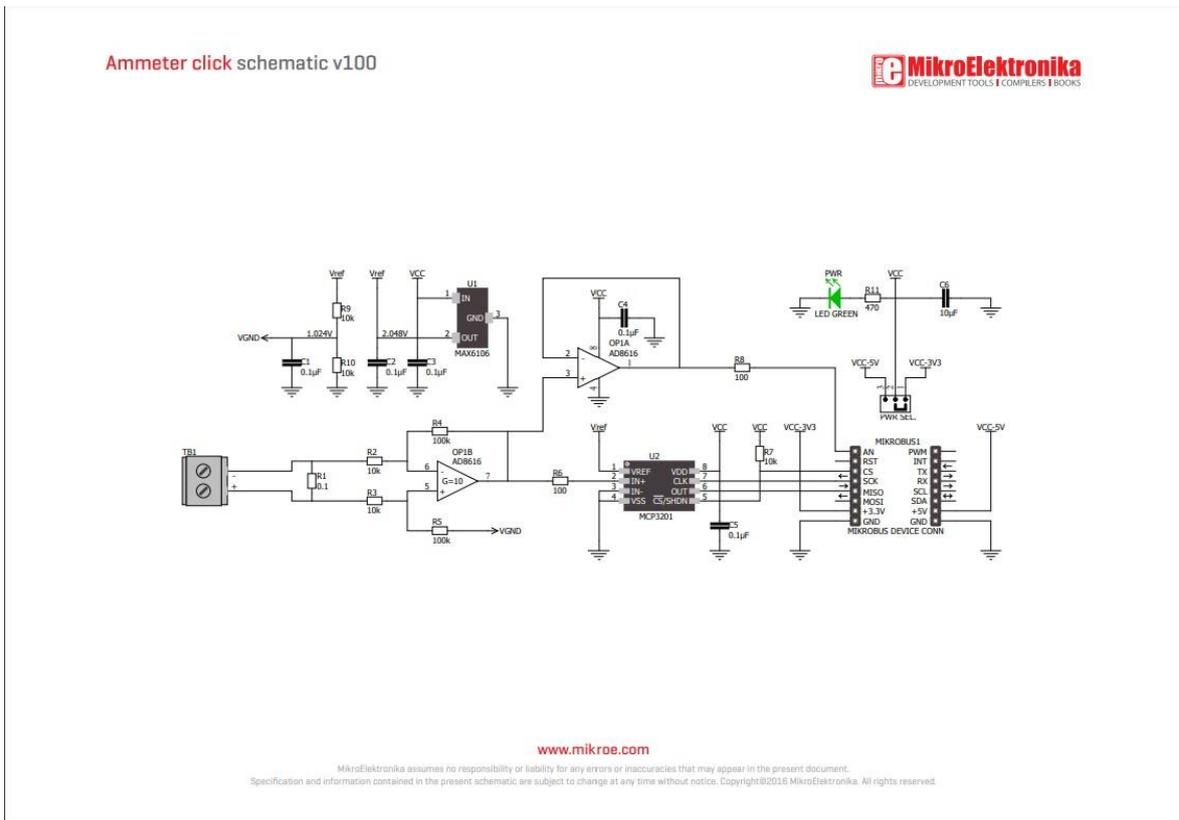
***ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR  
HERE.***

---

En conclusión, la tecnología Wi-SUN contribuye a la consecución de varios, o la mayoría, de los ODS, al permitir una gestión más eficiente de los recursos tanto energéticos como naturales, facilitar la recopilación de datos, de forma que se incremente el control ambiental y se reduzcan las emisiones contaminantes, y promover una planificación urbana sostenible. Al utilizar esta tecnología en redes de servicios públicos y ciudades inteligentes, se pueden lograr avances significativos en la protección del medioambiente, en la erradicación de desigualdades entre las personas y países y en la búsqueda de una mayor sostenibilidad, fundamentos comunes de los ODS.

*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.*

# ANEXO II: ESQUEMA DEL MEDIDOR DE CORRIENTE



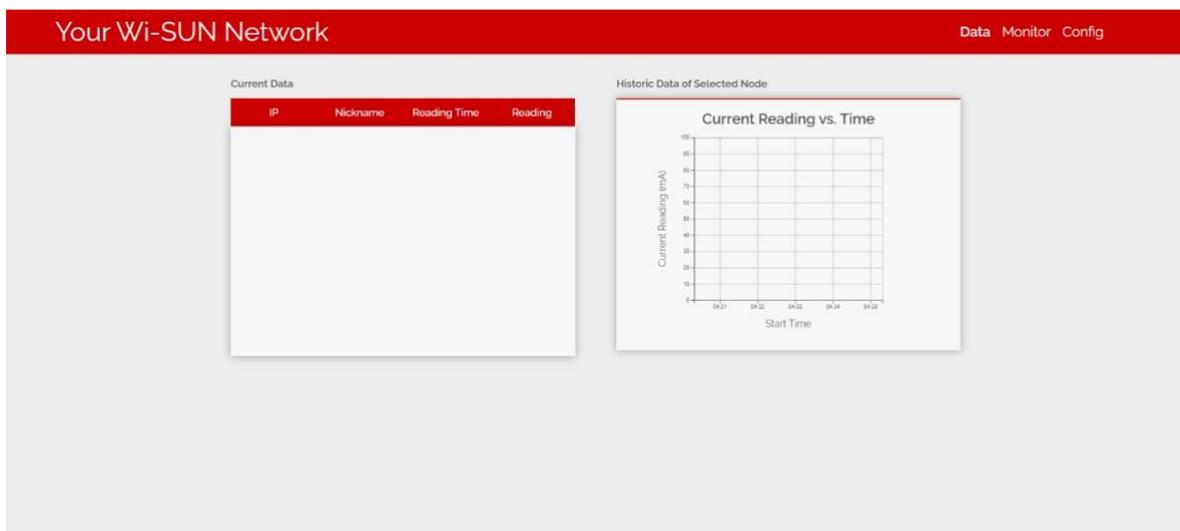
*ERROR! USE THE HOME TAB TO APPLY TÍTULO 1 TO THE TEXT THAT YOU WANT TO APPEAR HERE.*

# ANEXO III: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LA INTERFAZ DE USUARIO

**DISEÑO DE LAS ADICIONES DE LA INTERFAZ DE USUARIO SOBRE LA BASE PROPORCIONADA POR TEXAS INSTRUMENTS:**



**IMPLEMENTACIÓN DE LA ADICIÓN DE LA INTERFAZ DE USUARIO:**



**NOTAS:**

La supresión de la agrupación multicast fue sugerida por TI.

La gráfica de datos históricos está diseñada pero no implementada su funcionalidad.