

Trabajo de fin de grado

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

**DISEÑO DE UN ANALIZADOR DE REDES
TRIFÁSICAS MEDIANTE LA APLICACIÓN
DE HERRAMIENTAS IoT Y COMUNICACIÓN
WI-FI**

MEMORIA

Autor/a: Álvaro Velasco López

Director/a: Andreas Sumper

Convocatoria: Septiembre 2023



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

Durant els darrers anys, la importància de conèixer i saber quantificar el consum energètic per poder prendre mesures al voltant de millorar l'eficiència i optimitzar xarxes i instal·lacions s'ha convertit en un factor clau, en part a causa de les polítiques climàtiques, però també sota un context merament econòmic, aconseguint grans estalvis de recursos per a empreses i particulars.

Un instrument clau per assolir aquests aspectes és l'analitzador de xarxes. El seu ampli espectre d'aplicacions, juntament amb unes característiques de funcionament específiques, fa d'aquest aparell una eina essencial en el control i la supervisió del consum, juntament amb una prevenció intel·ligent d'incidències i avaries.

Aquesta memòria té com a objectiu documentar el procés d'obtenció d'un d'aquests dispositius, des de la seva concepció inicial, passant pel disseny de cadascun dels sistemes que incorpora fins arribar a les proves de validació. Per assolir aquests objectius, s'ha planificat l'estratègia de treball, seguint pràctiques d'enginyeria i desenvolupament de producte.

Resumen

Durante los últimos años, la importancia de conocer y saber cuantificar el consumo energético para poder tomar medidas en torno a mejorar la eficiencia y optimizar redes e instalaciones se ha convertido en un factor clave, en parte debido a las políticas climáticas, pero también bajo un contexto meramente económico, logrando grandes ahorros de recursos para empresas y particulares.

Un instrumento clave para lograr estos aspectos es el analizador de redes. Su amplio espectro de aplicaciones, junto con unas características de funcionamiento específicas, hace de este aparato una herramienta esencial en el control y supervisión del consumo, junto con una prevención inteligente de incidencias y averías.

Esta memoria tiene como objetivo documentar el proceso de obtención de uno de estos dispositivos, desde su concepción inicial, pasando por el diseño de cada uno de los sistemas que incorpora hasta llegar a las pruebas de validación. Para lograr estos objetivos, se ha debido planificar la estrategia de trabajo, siguiendo prácticas de ingeniería y desarrollo de producto.

Abstract

During recent years, the importance of knowing and being able to quantify energy consumption in order to take measures to improve efficiency and optimize networks and facilities, has become a key factor, partly due to climate policies, but also under a purely economic context, achieving great resource savings for companies and individuals.

A key instrument to achieve these aspects is the network analyser. Its wide spectrum of applications, along with specific operating characteristics, makes this device an essential tool in the control and supervision of consumption, alongside with intelligent prevention of incidents and breakdowns.

This report aims to document the process of obtaining one of these devices, from its initial conception, through the design of each of the systems it incorporates until reaching the validation tests. To achieve these objectives, the work strategy had to be planned, following engineering and product development practices.

Contenido

RESUM	3
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
CONTENIDO	7
GLOSARIO Y NOMENCLATURA	9
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABLAS	14
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. Contexto y justificación	16
1.2. Motivación.....	16
1.3. Alcance del trabajo	17
1.4. Objetivos del trabajo	18
2. MARCO TEÓRICO DEL PROYECTO	19
2.1. Fundamentos teóricos	19
2.1.1. Los analizadores de redes eléctricas	19
2.1.2. La red eléctrica. El sistema monofásico y trifásico	20
2.1.3. Medidas eléctricas. Parámetros de funcionamiento	24
2.2. Antecedentes	26
2.3. Estado de la cuestión.....	27
2.4. Estado del arte	28
3. METODOLOGÍA	30
3.1. Criterios de diseño	30
3.2. Estudio y selección de componentes.....	33
3.2.1. Microcontrolador y placa de desarrollo.....	33
3.2.2. Sensores de tensión	35
3.2.3. Sensores de corriente	37
3.2.4. Otros periféricos.....	43
3.2.5. Selección final	45
3.3. Propuesta de diseño	46
3.3.1. Diseño de Hardware	47
3.3.2. Diseño de Software.....	49
3.3.3. Diseño de la interfaz gráfica	52

4. PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	57
4.1. Calibración de los sensores.....	57
4.1.1. Calibración de los sensores de voltaje.....	57
4.1.2. Calibración de los sensores de corriente.....	59
4.2. Validación del prototipo.....	61
4.3. Análisis preliminar de los resultados.....	68
5. PLANIFICACIÓN	69
6. ESTUDIO ECONÓMICO	71
7. ESTUDIO AMBIENTAL	73
8. ESTUDIO SOCIAL Y DE IGUALDAD DE GÉNERO	74
9. CONCLUSIONES	75
9.1. Futuras actualizaciones.....	76
10. AGRADECIMIENTOS	77
11. BIBLIOGRAFÍA	78

Glosario y Nomenclatura

A – Amperios

ADC – *Analog to Digital Converter*

AMQP – *Advanced Message Queuing Protocol*

AO – Amplificador Operacional

CT – *Current Transformer*

DIY – *Do It Yourself*

GPIO – *General Purpose Input Output*

HTTP – *Hyper Text Transfer Protocol*

ICP – Interruptor de Control de Potencia

IDE – *Integrated Development Environment*

IoT – *Internet of Things*

I²C – *Inter Integrated Circuit*

kW – kilovatio

kWh – kilovatio hora

LCD – *Liquid Crystal Display*

mA – miliamperio

MQTT - *Message Queuing Telemetry Transport*

mV – milivoltio

OLED - *Organic Light Emitting Diode*

PLC - *Power Line Communications*

RMS – *Root Mean Square*

SPI - *Serial Peripheral Interface*

UART - *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*

USB – *Universal Serial Bus*

V – Volts

VA – Voltamperios

var – voltamperios reactivos

V_{cc} – *Voltage Common Collector*

W - Vatios

Lista de figuras

Figura 1. Ejemplo de analizador de redes.	19
Figura 2. Onda senoidal de corriente.	20
Figura 3. Cable de distribución de red monofásica.....	21
Figura 4. Tramos de potencias normalizadas.....	21
Figura 5. Sistema trifásico simétrico y equilibrado (de tensiones).	22
Figura 6. Tensiones simples y compuestas del sistema trifásico simétrico y equilibrado.	23
Figura 7. Conexiones triángulo (izquierda) y estrella (derecha).....	23
Figura 8. Triángulo de potencias para cargas lineales sin distorsión armónica.	26
Figura 9. Aparatos de medición de magnitudes eléctricas.	28
Figura 10. Ejemplo de analizador de redes con interfaz gráfica.	29
Figura 11. <i>Pinout</i> del ESP32 Dev Kit C.	35
Figura 12. Ejemplos de esquemáticos de divisores de tensión.	36
Figura 13. Módulo sensor de voltaje ZMPT101b.....	37
Figura 14. Esquema del fenómeno físico de la transformación.	38
Figura 15. Sensor de corriente SCT-013.....	39
Figura 16. Sensor de corriente ZM-CT.....	39
Figura 17. Principio del efecto Hall.	40
Figura 18. Sensor de corriente ACS712.....	41
Figura 19. Sensor de corriente WCS1800.....	41
Figura 20. Resistencia Shunt.....	42
Figura 21. Principio de funcionamiento de la bobina Rogowski.....	42
Figura 22. Sensor de corriente de bobina Rogowski.	43

Figura 23. Pantalla LCD 16x2.	44
Figura 24. Pulsador digital.	44
Figura 25. Cables puente.	45
Figura 26. Placa de prototipaje o <i>protoboard</i>	45
Figura 27. Adaptador de señal de corriente.	46
Figura 28. Gráfica representativa de la adaptación de la señal.	47
Figura 29. Esquemático del módulo ZMPT101b.	48
Figura 30. Esquemático del circuito de acondicionamiento de corriente.	49
Figura 31. Esquemático del regulador de voltaje RT9193-30PB.	49
Figura 32. Interfaz Arduino IDE.	50
Figura 33. Diagrama de bloques del algoritmo de cálculo de la tensión eficaz.	51
Figura 34. Diagrama de flujo del algoritmo de cálculo de la corriente eficaz.	52
Figura 35. <i>Display</i> del voltaje de fase.	52
Figura 36. <i>Display</i> del voltaje de línea.	53
Figura 37. <i>Display</i> de la corriente de fase.	53
Figura 38. <i>Display</i> la corriente de línea.	53
Figura 39. <i>Display</i> de la potencia activa.	53
Figura 40. <i>Display</i> de la potencia reactiva.	54
Figura 41. <i>Display</i> de la potencia aparente.	54
Figura 42. <i>Display</i> del factor de potencia.	54
Figura 43. <i>Display</i> del temporizador global.	54
Figura 44. Descripción gráfica del servicio de ThingSpeak.	55
Figura 45. Diseño de las gráficas en dominio temporal de los parámetros de estudio. ...	56
Figura 46. Indicadores tipo manómetro.	56

Figura 47. Código para la visualización de la forma de onda de tensión de entrada.....	57
Figura 48. Tensión de entrada sin calibrar.	58
Figura 49. Tensión de entrada corregida.....	58
Figura 50. Multímetro de referencia.....	59
Figura 51. Montaje de la prueba de calibración de los sensores de corriente.	60
Figura 52. Multímetro y pinzas amperimétricas.	60
Figura 53. Valores de las intensidades de los sensores de corriente.	61
Figura 54. Montaje de la prueba con el secador.....	62
Figura 55. Valores de tensión y corriente del multímetro.....	62
Figura 56. Características del multímetro utilizado.	63
Figura 57. Muestras de tensión del sensor en la prueba del secador.....	63
Figura 58. Comportamiento errático de la tensión en la prueba del secador.....	64
Figura 59. Muestras de corriente del sensor en la prueba con el secador.....	64
Figura 60. Comportamiento errático de la corriente en la prueba del secador.	65
Figura 61. Ventilador FD-40MB.....	66
Figura 62. Valores de referencia en la prueba del ventilador.....	66
Figura 63. Tensión y corriente durante la prueba.	67
Figura 64. Error relativo de las muestras de tensión.	67
Figura 65. Error relativo de las muestras de corriente.	68
Figura 66. Diagrama de Gantt.	69

Lista de tablas

Tabla 1. Valores cuantitativos deseados de los criterios 2 y 3.....	32
Tabla 2. Horas invertidas en el proyecto por actividad.	70
Tabla 3. Gastos de materiales fungibles.....	71

1. Introducción

1.1. Contexto y justificación

Este proyecto ha sido concebido principalmente con la idea de diseñar e implementar un analizador de redes trifásicas. Esta idea surge como una respuesta a la creciente demanda de herramientas avanzadas para el monitoreo y análisis preciso de sistemas eléctricos con el objetivo de optimizar el funcionamiento y el consumo energético.

Los analizadores de redes son dispositivos extremadamente útiles para el control y la detección de incidencias en la red. Gracias a los innovadores mecanismos que incorporan, junto con técnicas de tratamiento de datos en tiempo real e interfaces de comunicación inalámbricas, que hacen de las tareas de supervisión y evaluación del estado de cualquier instalación una actividad mucho más accesible.

De este modo, se ha trabajado en la investigación, concepción y prototipaje de un analizador de redes que incorpora todo tipo de herramientas IoT para facilitar a los usuarios, de un modo intuitivo, un instrumento con el que realizar todas estas tareas descritas, mientras paralelamente se absorben conocimientos en relación con la gestión energética durante su uso.

Dichos componentes IoT permiten la interconexión de dispositivos mediante redes privadas o a través de Internet, por lo que gracias a la constante evolución y mejora que presenta esta última y todas las posibilidades que ofrece, se logran soluciones tecnológicas altamente versátiles, pero sobre todo que tienen la capacidad de llegar a miles de personas, contribuyendo al desarrollo colectivo.

Así pues, en este proyecto se analiza la situación actual, se detectan los puntos de mejora y se implementan el conjunto de conocimientos y habilidades de ingeniería adquiridos para el diseño y montaje de un prototipo no comercializable de un analizador de redes trifásicas.

1.2. Motivación

La realización del presente proyecto surge de la idea de conseguir un sistema de monitoreo del consumo energético que se pueda aplicar de manera didáctica, con el objetivo principal de estudiar la gestión energética en términos de eficiencia de cualquier instalación, y de una manera versátil que proporcione a los usuarios una solución simple pero eficaz.

El conocimiento del consumo energético es fundamental, ya que permite la identificación de oportunidades de ahorro y eficiencia energética. Además, un analizador de redes brinda a los usuarios la posibilidad de monitorear y controlar su consumo en tiempo real. Esto promueve una mayor conciencia sobre el uso de la energía y fomenta prácticas más sostenibles, permitiendo reducir costes y minimizar el impacto ambiental.

Por otra parte, las soluciones existentes con características similares a las que se plantean en este proyecto son, en ciertas ocasiones, de una complejidad y coste elevados, por lo que se ha tratado de encontrar un punto medio entre ambos aspectos, garantizando un resultado competitivo y funcional.

Por último, a nivel personal, se han tratado de conciliar los conocimientos obtenidos durante la realización de los estudios del grado con la gestión de un proyecto de esta magnitud, considerando todas las fases, desde la idea y el planteamiento hasta la obtención de los resultados, buscando siempre un cierto grado de innovación y profesionalidad.

1.3. Alcance del trabajo

Con la ejecución del presente proyecto pretende abordar los siguientes aspectos:

- Estudio sobre los analizadores de redes en la actualidad, basándose en su principio de funcionamiento y características esenciales.
- Caracterización de los parámetros de interés involucrados en el análisis de redes.
- Investigación acerca de los componentes que va a integrar el prototipo diseñado, analizando sus propiedades y especificaciones para seleccionar aquellos que mejor se adapten a los requerimientos establecidos.
- Diseño del prototipo, tanto a nivel *Hardware* como *Software*.
- Diseño de la interfaz gráfica en línea que permite la visualización y tratamiento de datos de manera remota.
- Realización de pruebas de calibración y puesta en marcha para corroborar los resultados, y detectar posibles puntos de mejora.
- Elaboración de estudios económico, ambiental y social e igualdad de género.
- Extracción de conclusiones y posibles futuras implementaciones.

1.4. Objetivos del trabajo

El objetivo principal del proyecto es la obtención de un analizador de redes trifásicas, incluyendo el uso de sensores para la toma de medidas eléctricas, y otros periféricos para la gestión de los datos y la realización de cálculos de parámetros de consumo energético. Adicionalmente, se pretende incorporar una interfaz gráfica inalámbrica para la visualización y tratamiento de datos de manera remota.

Para acometer este objetivo principal, se pretenden atacar los siguientes aspectos más específicos:

- Diseñar un prototipo no comercializable con las características más similares posibles a un analizador convencional.
- Implementar herramientas IoT para facilitar los sistemas de medición y cálculo.
- Incorporar elementos que permitan la aplicación del objeto del proyecto en actividades de carácter didáctico.
- Realizar pruebas de funcionamiento para la comprensión y cuantificación del consumo energético de diferentes dispositivos.

2. Marco teórico del proyecto

2.1. Fundamentos teóricos

Dado que el propósito principal de este proyecto se fundamenta en el diseño e implementación de un analizador de redes capaz de monitorear el consumo energético, en este apartado se explican los principales aspectos del marco teórico que se deben tener en cuenta para la comprensión y el contexto del presente proyecto.

2.1.1. Los analizadores de redes eléctricas

Un analizador de redes eléctricas, en ocasiones conocido también como analizador de calidad eléctrica, es un instrumento multifunción capaz de analizar las propiedades de la red eléctrica a la cual se conecta a partir de las mediciones de tensión y corriente, para procesarlas y proporcionar información sobre otros indicadores relacionados con el consumo energético y el control de los parámetros de dispersión.



Figura 1. Ejemplo de analizador de redes.

Entre los parámetros más comunes de monitorización y tratamiento de datos se encuentran las medidas de potencia (activa, reactiva y aparente), los factores de potencia y el consumo energético. Incorporan uno o varios *Softwares* para el procesamiento de datos, y son capaces de exportar o mostrar dichos parámetros de forma directa o indirecta a través de un navegador web o un *display* físico incorporado en el mismo dispositivo.

Su amplia flexibilidad de operativa y la gran variedad de diseños y aplicaciones que existen actualmente, hacen del analizador de redes un artefacto de uso muy común tanto en aplicaciones industriales y residenciales como en el ámbito didáctico.

2.1.2. La red eléctrica. El sistema monofásico y trifásico

2.1.2.1. El sistema monofásico

En ingeniería eléctrica, un sistema monofásico es un sistema de producción, distribución y consumo de energía eléctrica formado por una única corriente alterna o fase, y por lo tanto una sola fuente de tensión alterna. La corriente eléctrica fluye en una sola dirección y revierte esta misma en un ciclo completo de onda sinusoidal.

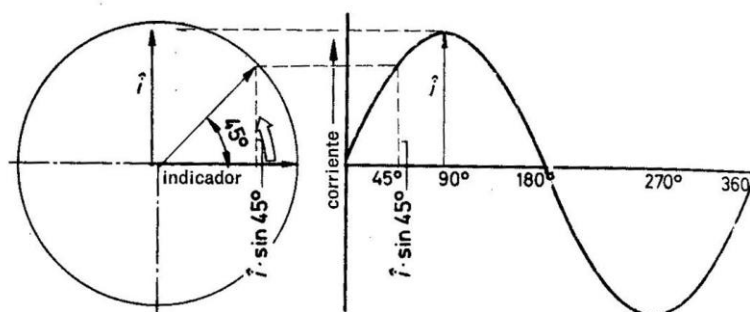


Figura 2. Onda senoidal de corriente.

Esta corriente se transmite a través de un solo cable (llamado cable de fase, normalmente designado con el color negro o marrón) que alimenta la carga a la cual se conecta la red. En el mismo circuito, existe otro cable denominado neutro (normalmente designado con el color azul), el cual es el encargado de devolver la corriente a su fuente al existir una diferencia de potencial entre ambos extremos.

Paralelamente, por motivos de seguridad en las instalaciones eléctricas, existe un tercer cable conocido como toma a tierra (normalmente designado con los colores verde y amarillo simultáneamente), encargado de derivar la corriente en caso de fuga o incidencia. Se le asigna este nombre porque está conectado a una malla de cobre que se encuentra en el suelo de la instalación, y su principal función es garantizar un camino de baja resistencia que sea suficiente desviar la corriente en esta dirección para proteger tanto a los usuarios como a los dispositivos conectados.



Figura 3. Cable de distribución de red monofásica.

Este es un sistema común en aplicaciones de baja potencia y uso doméstico, generalmente utilizado para la alimentación de electrodomésticos, iluminación y aparatos electrónicos en los hogares.

En Europa, y concretamente en España, los valores normalizados de tensión que se distribuyen a través de esta red oscilan entre los 220 y los 230 voltios, y con una frecuencia de 50 Hz. Por lo tanto, hablamos de que en general las potencias máximas contratadas para las instalaciones monofásicas rondan entre los 13,86 kW (220 V) y los 14,49 kW (230 V). Por otro lado, en función de la intensidad que pueda soportar cada instalación, se instala un interruptor denominado ICP (Interruptor de Control de Potencia) encargado de establecer una relación de potencias normalizadas a contratar para cada tipo de instalación. La intensidad del ICP se mide en amperios (A).

ICP	Monofásica
5.0 A	1.15 kW
7.5 A	1.72 kW
10 A	2.3 kW
15 A	3.45 kW
20 A	4.6 kW
25 A	5.75 kW
30 A	6.9 kW
35 A	8.05 kW
40 A	9.2 kW
45 A	10.35 kW
50 A	11.5 kW
63 A	14.49 kW

Figura 4. Tramos de potencias normalizadas.

2.1.2.2. El sistema trifásico

En contraposición con el sistema monofásico, el sistema trifásico es un sistema de producción, distribución y consumo de energía eléctrica formado por tres corrientes alternas monofásicas (y por ende tres tensiones) que circulan paralelamente en el mismo circuito, desfasadas entre sí.

Cuando estas corrientes y tensiones están desfasadas entre ellas con un valor de 120° (o $\frac{2\pi}{3}$ rad), y presentan igual frecuencia y amplitud (y por consiguiente valor eficaz), se denomina sistema trifásico simétrico y equilibrado. Si alguna de las condiciones anteriores no se cumple (corrientes diferentes o distintos desfases entre ellas), el sistema de tensiones está desequilibrado o más comúnmente llamado un sistema desbalanceado.

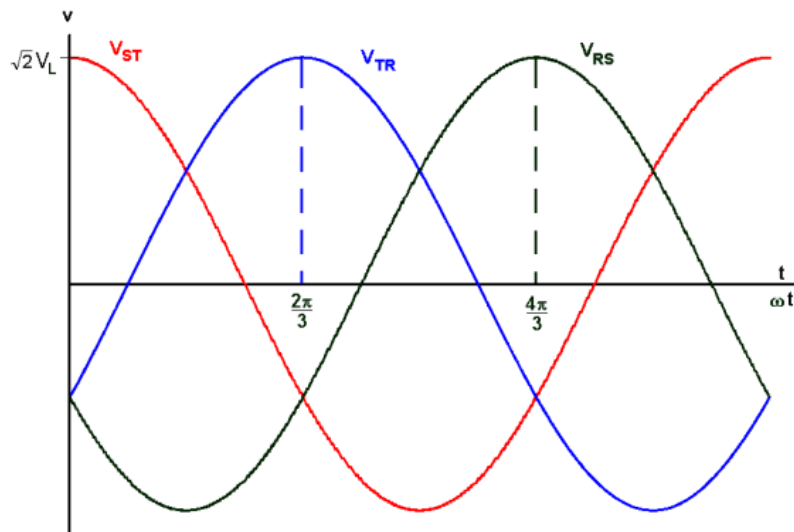


Figura 5. Sistema trifásico simétrico y equilibrado (de tensiones).

La importancia de este sistema radica en que permiten transmitir con menos hilos conductores (la mitad) la misma potencia que tres sistemas monofásicos por separado, obteniendo así un sistema trifásico independiente. Si además este circuito presenta el mismo punto de retorno para cada una de las tres fases, se obtiene un sistema trifásico a cuatro hilos, obteniendo este último el nombre de neutro.

Las tensiones fase-neutro, tensiones de fase o tensiones simples entre cada una de las tres fases y el neutro se denominan con la letra V, mientras que entre fase-fase, tensiones compuestas o tensiones de línea se denominan con la letra U. Siguiendo con el concepto de sistema equilibrado, se pueden relacionar las tensiones anteriores de la siguiente manera.

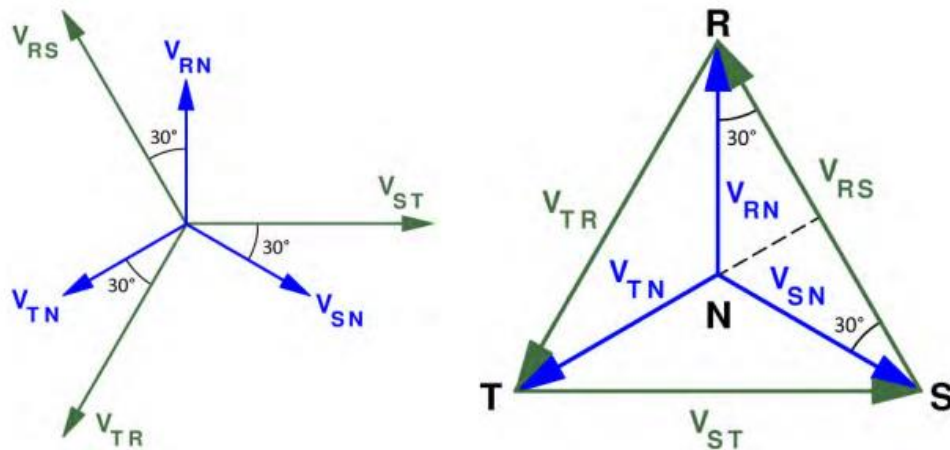


Figura 6. Tensiones simples y compuestas del sistema trifásico simétrico y equilibrado.

Dentro de este sistema existen dos tipos de conexiones principales: la conexión en estrella o Y, en la que las cargas se unen en un mismo punto; y la conexión en triángulo, en la que cada extremo de una carga está conectado a las otras dos. Para esta última configuración, no existe el neutro.

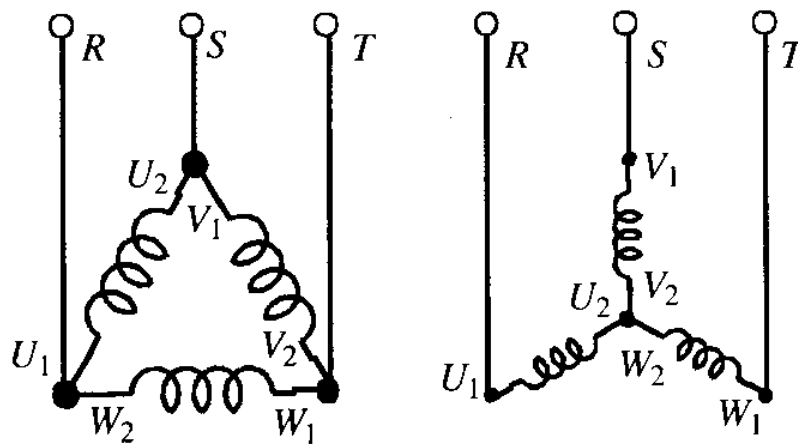


Figura 7. Conexiones triángulo (izquierda) y estrella (derecha).

En función de la configuración usada, existen dos relaciones entre tensiones y corrientes (manteniendo la simetría y equilibrio de la red):

- Estrella: $U = \sqrt{3} \cdot V$ mientras que $I_L = I_F$
- Triángulo: $U = V$ mientras que $I_L = \sqrt{3} \cdot I_F$

Normalmente, cuando se da información de una instalación trifásica se proporcionan sus datos (tensión e intensidad) de línea. Así, si nos dicen que una instalación trifásica es de 400 V, esto significa que sus tensiones de línea (o tensiones compuestas) tienen un valor eficaz de 400 V. Si la instalación dispone del conductor neutro (sistema trifásico a 4 hilos)

se suelen indicar los valores eficaces de las tensiones compuestas y simples separados por una barra. En España, la tensión normalizada para las instalaciones de baja tensión es 400/230 V, lo que significa que estas instalaciones tienen 400 V de tensión de línea y 230 V de tensión simple o fase-neutro.

En definitiva, el sistema trifásico es un sistema usado principalmente en la industria, dado las mayores capacidades de carga que este permite. Se utiliza en fábricas, plantas de producción y procesamiento, donde se requiere una gran cantidad de energía eléctrica para operar maquinaria y equipos pesados. También se utiliza como red de distribución a la salida de las centrales generadoras de energía eléctrica, así como en los sistemas de tracción de trenes y tranvías, que requieren de una gran potencia para su movimiento.

2.1.3. Medidas eléctricas. Parámetros de funcionamiento

Para el análisis y procesamiento que debe desempeñar el analizador de redes, es necesario que sea capaz de interpretar las señales de entrada que recibe en los diferentes componentes de lectura, realizar las conversiones pertinentes y posteriormente calcular los parámetros deseados. De este modo, en este apartado se citan las principales variables que intervienen en el funcionamiento del medidor.

Tensión y corriente eficaces (o RMS)

El valor eficaz o RMS de una magnitud eléctrica en alterna consiste en un método para denotar la forma de onda periódica de la misma como una equivalente que representa el valor en continua que produce el mismo efecto de calentamiento o disipación de potencia en el circuito. Su definición parte de la necesidad de corregir las expresiones usadas en los cálculos de magnitudes en continua para mantener su analogía, dado que en alterna la utilización de los valores instantáneos de potencia consumida por una resistencia no son convenientes.

Para corregir dicho comportamiento, se definen las expresiones de tensión y corriente eficaces partiendo de la potencia media en un periodo:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} [u(t)]^2 dt} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} [i(t)]^2 dt} \quad (\text{Ec. 2})$$

Potencia activa

Para el cálculo de las potencias, se debe tener en cuenta que el analizador es capaz de leer las medidas de tensión y corriente, por lo que se pueden obtener los valores de las diferentes potencias a partir de dichas lecturas. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, para las magnitudes en alterna se debe definir el concepto de potencia promedio en un periodo, obtenida a partir del producto de la tensión por la intensidad. Se denomina con la letra P y su unidad es el Watt (W).

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = \frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} u(t) \cdot i(t) dt \quad (\text{Ec. 3})$$

Potencia aparente

La potencia aparente es la suma (vectorial) de la potencia que disipa dicho circuito y se transforma en calor o trabajo con la potencia utilizada para la formación de los campos eléctrico y magnético de sus componentes, es decir, representa la potencia total desarrollada en un circuito.

En módulo, permite su cálculo a partir del producto de los valores eficaces de tensión y corriente en alterna. Se denomina con la letra S y su unidad es el voltamperio (VA).

$$S = U_{ef} \cdot I_{ef} \quad (\text{Ec. 4})$$

Potencia reactiva

A nivel físico, la potencia reactiva representa el buen aprovechamiento de la transmisión eléctrica. En otras palabras, indica la parte del producto entre tensión y corriente que se suministra a un circuito para la formación de campos eléctrico y magnético. Sin embargo, no está ligada a una energía consumida y su interés radica en que muestra si la potencia activa del circuito implica mayores pérdidas por efecto Joule de las necesarias. En función de la carga que se aplica, puede ser inductiva (si se trata de una bobina) o capacitiva (si se trata de un condensador). Se representa con la letra Q y su unidad es el voltamperio reactivo (var).

A nivel matemático, se puede calcular conociendo las potencias activa y aparente, relacionándolas entre sí a través del triángulo de potencias. Sin embargo, esta suposición solamente es correcta en caso de tener cargas lineales, es decir, para ondas perfectamente senoidales, y sin distorsión armónica.

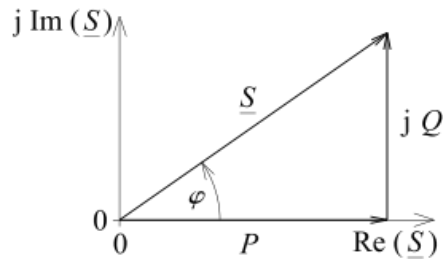


Figura 8. Triángulo de potencias para cargas lineales sin distorsión armónica.

De este modo, en el presente proyecto se aplica la expresión del triángulo de potencias para los cálculos internos del analizador, suponiendo siempre cargas lineales sin distorsión armónica, incurriendo en un error de concepto, pero simplificando la operativa del dispositivo. Finalmente, la expresión utilizada se puede obtener mediante la relación de los lados del triángulo rectángulo.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (\text{Ec. 5})$$

Factor de potencia

Dada la suposición previa, el factor de potencia representa la relación entre la potencia activa (P) y la aparente (S), y da una medida de la capacidad de una carga de absorber potencia activa, es decir, es un indicador de la eficiencia con la que se está aprovechando la energía suministrada a una carga determinada.

$$FP = \frac{P}{S} \quad (\text{Ec. 6})$$

2.2. Antecedentes

La creciente demanda de energía eléctrica en las últimas décadas ha generado una mayor complejidad en la gestión y control de las redes eléctricas trifásicas. Estas redes son fundamentales para la distribución de energía en una amplia gama de aplicaciones, desde sistemas industriales hasta infraestructuras urbanas y residenciales. Para garantizar la eficiencia y la calidad de la energía suministrada, es esencial contar con herramientas avanzadas para el monitoreo y el análisis de las redes trifásicas.

Históricamente, la medición y el análisis de las redes trifásicas han sido un desafío técnico, dado que los sistemas de medición tradicionales han proporcionado información limitada y a menudo requieren equipos costosos y difíciles de operar. Sin embargo, con el avance de la tecnología de sensores y la electrónica de potencia, se ha vuelto posible diseñar analizadores de redes trifásicas más precisos, compactos y asequibles.

Además, no solamente se produce una mejora continua en los componentes físicos que conforman estos dispositivos, sino que también existe una evolución constante a nivel informático que permite desarrollar algoritmos de cálculo y obtención de datos altamente eficientes y que no solo permiten una medición precisa de los parámetros eléctricos clave, sino que también facilitan la identificación de áreas problemáticas, la optimización de la carga y la detección de posibles fallas o desequilibrios en la red, todo ello en tiempo real.

Por otro lado, el material didáctico que existe actualmente en el mercado es escaso y poco asequible para los particulares, y debido a la gran necesidad que existe de conocer el impacto del gasto energético que producen nuestros sistemas de consumo, y de dar a conocer a los usuarios que se encuentran en formación sobre aspectos tan importantes como este, se decidió llevar a cabo el desarrollo del presente proyecto.

2.3. Estado de la cuestión

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los propósitos principales del proyecto es el diseño y prototipaje de un analizador de redes trifásicas que, si bien pretende ser sencillo y de uso intuitivo, pueda ser aplicado de manera didáctica en usuarios que tengan interés de conocer el funcionamiento de estos dispositivos, y aplicar los conocimientos previos en electrotecnia y electrónica para entender y desarrollar nuevas habilidades en el ámbito del control del consumo de energía.

En muchas ocasiones, el equipo disponible para realizar estas tareas es limitado, y se suele llevar a cabo el control del estado de las redes con otros instrumentos de uso común que, de manera complementaria entre ellos, ofrecen una visión global del estado de una instalación.

Es así el caso de aparatos de medida como los multímetros, los osciloscopios, los vatímetros, etc.



Figura 9. Aparatos de medición de magnitudes eléctricas.

Sin embargo, en menor medida se aplican los analizadores de redes debido a su elevado coste y su menor disponibilidad. Es por ello que, para prevenir de estas situaciones, se ha llevado a cabo la ejecución de este proyecto, con el objetivo de obtener un prototipo de bajo coste, con variedad de funciones y aplicaciones, y con un alto grado de fiabilidad en las medidas.

2.4. Estado del arte

En la actualidad existen tecnologías muy avanzadas en estos dispositivos para la medición, análisis y caracterización de redes eléctricas. Los analizadores de redes son herramientas esenciales en la industria eléctrica para evaluar y optimizar el rendimiento de sistemas eléctricos.

Los analizadores de redes modernos son capaces de realizar mediciones extremadamente precisas de parámetros eléctricos como la tensión, la corriente, la potencia activa, la potencia reactiva, la frecuencia, entre otros. Además, pueden proporcionar datos en tiempo real para el monitoreo continuo del sistema eléctrico, permitiendo a los usuarios ser conscientes en todo momento de lo que ocurre en una red eléctrica o en una instalación.

Junto con la capacidad de lectura y procesamiento de datos, y la detección de eventos inusuales o incidencias (sobretensiones, interrupciones del suministro, etc.), incluyen interfaces gráficas interactivas en las que se puede visualizar desde valores, hasta formas de onda y diagramas de todo tipo (temporales, polares, entre otros).



Figura 10. Ejemplo de analizador de redes con interfaz gráfica.

Adicionalmente, en ocasiones incorporan módulos *Ethernet*, *Wi-Fi* o *Bluetooth*, que les permiten conectarse a servidores y sistemas de gestión de energía para la monitorización remota y la recopilación de datos, así como protocolos de comunicación estándar de la industria (AMQP, HTTP, MQTT, ...).

3. Metodología

En esta sección se detalla el procedimiento que se ha seguido para la concepción del objeto del proyecto, estableciendo las estrategias y enfoques necesarios para alcanzar los objetivos descritos con anterioridad. Se describen desde las herramientas utilizadas durante el proceso, justificando la elección de éstas en función de las necesidades y características requeridas, y se proporcionan los diferentes diseños y esquemas que aportan una base sólida al proyecto, para posteriormente llegar a la evaluación de los resultados finales.

3.1. Criterios de diseño

Los criterios de diseño juegan un papel crucial en el desarrollo de cualquier proyecto o proceso creativo. Estos criterios establecen las pautas que deben ser consideradas durante el proceso de diseño con el objetivo de lograr un producto funcional, eficiente y sostenible, manteniendo en todo momento relación con el propósito del proyecto.

De este modo, a continuación se enumeran los diferentes criterios y requisitos que se han tenido en cuenta para las fases de diseño e implementación del dispositivo.

1. **Medidor de 3 fases:** dado el objetivo principal del proyecto, se requiere un aparato que sea capaz de determinar el consumo energético a tiempo real de una red trifásica, por lo que debe ser capaz de medir las magnitudes de cada una de las tres fases, es decir, el dispositivo debe incorporar los componentes mínimos para la toma de medidas de corriente y tensión, cuyos valores se usan para calcular el resto de los parámetros.
2. **Precisión y resolución:** la precisión es un factor importante, ya que una mala precisión puede resultar en mediciones inexactas y errores en la monitorización del consumo de la energía. Es importante que el dispositivo sea capaz de medir con exactitud las magnitudes necesarias, con un margen de error mínimo, y a su vez sea capaz de soportar las fluctuaciones que se puedan producir en la red, para poder determinar las medidas en tiempo real.

Por otro lado, la precisión es un factor que para el presente proyecto viene muy condicionado por los diferentes componentes que se decidan implementar, por lo que el establecimiento de este criterio con un carácter cuantitativo dependerá de la capacidad de cada elemento de realizar las medidas y cálculos pertinentes.

En cuanto a la resolución, cabe destacar que en función del orden de magnitud del parámetro que se analice, ésta debe ser coherente y se debe ajustar a los valores típicos que se suelen proporcionar en la red en la que se aplique.

3. **Rangos de medición:** relacionado con los puntos anteriores, el dispositivo debe ser capaz de medir tensiones y corrientes adecuadas a la red de estudio. Por ejemplo, en una red eléctrica trifásica de 230/400 V y potencia nominal de 3,45 kW, la tensión nominal entre cualquiera de las fases y el neutro es de 230 V, mientras que la tensión entre dos fases cualesquiera es de 400 V. Es importante que el medidor de consumo energético tenga un rango de medición adecuado para cubrir los voltajes que se esperan medir en la red trifásica. El rango de medición debe ser lo suficientemente amplio para cubrir tanto la tensión nominal como cualquier fluctuación o variación en el voltaje que pueda ocurrir en la red eléctrica. En España, el voltaje nominal puede fluctuar en un rango de $\pm 10\%$ de la tensión nominal, lo que significa que el rango de medición del medidor de consumo energético debe ser capaz de cubrir los voltajes que van desde 207 V hasta 253 V para la tensión entre cualquier fase y el neutro, y desde 360 V hasta 440 V para la tensión entre dos fases cualesquiera.

Adicionalmente, dado que la potencia es el producto de la tensión por la corriente, el rango de corriente que el medidor debe ser capaz de medir dependerá de la potencia que se espera medir en la red trifásica. Siguiendo con el ejemplo propuesto, teniendo una red con una potencia nominal de 3,45 kW, la corriente nominal que se espera medir para la tensión nominal de 230 V sería de alrededor de 15 A, y para la tensión de 400 V, alrededor de 8 A.

Así pues, relacionando los puntos 2 y 3, se proporciona una tabla con los valores deseados para cada uno de estos criterios de diseño.

Rango	Resolución	Precisión
Tensión AC		
[0, 99]	10 mV	$\pm 1\% + 5 \text{ V}$
[100-999]	100 mV	$\pm 1\% + 1 \text{ V}$
Corriente AC		

[0, 9]	1 mA	±2%
[10, 99]	10 mA	±4%

Tabla 1. Valores cuantitativos deseados de los criterios 2 y 3.

4. **Conexionado:** el dispositivo debe incorporar los canales necesarios para realizar la conexión de tantos sensores como líneas de estudio se precien. Para este caso, es necesaria la aplicación de tres sensores de tensión y tres sensores de corriente, para posteriormente calcular el consumo energético de cada fase.
5. **Visualización y tratamiento de resultados:** para la fácil interpretación de resultados, el sistema debe incorporar un componente que sea capaz de mostrar en tiempo real las diferentes medidas. Se pretende obtener dicha representación por dos métodos distintos: uno incorporado directamente al aparato que muestre los valores numéricos, tipo pantalla (LCD, OLED, etc.), y otro que permita el acceso remoto a los datos recopilados, para posteriormente mostrarlos en una interfaz web que permita añadir funciones adicionales como gráficas o diagramas.
6. **“Do it yourself” (DIY):** dado que se trata de un instrumento que tiene el fin de ser usado de manera didáctica, el montaje y el ensamblaje de los componentes debe ser sencillo, para que la implementación en aplicaciones prácticas sea simple, pero al mismo tiempo completa y funcional. De este modo, debe permitir futuras modificaciones que puedan surgir de la fase de pruebas y análisis.
7. **Precio:** relacionado con el punto anterior, tanto el coste de la adquisición de cada uno de los elementos, como el tiempo invertido en el montaje y las pruebas analíticas de funcionamiento deben ser mínimos, sin interferir en todos los puntos mencionados anteriormente de manera negativa.
8. **Seguridad:** debido a las altas corrientes y voltajes que pueden suponer tanto la manipulación del dispositivo como su conexión a cargas y circuitos, es importante que el medidor de consumo energético tenga un buen aislamiento eléctrico para proteger a los usuarios y los dispositivos conectados de posibles descargas eléctricas. Por lo tanto, el diseño debe tener en cuenta la separación adecuada de los componentes electrónicos y los elementos de alta tensión, así como la utilización de materiales adecuados. Adicionalmente, los componentes electrónicos pueden generar calor cuando están en funcionamiento, lo que puede afectar la precisión y el rendimiento del medidor, así como la seguridad de los

usuarios. Por lo tanto, el diseño debe garantizar que los componentes estén protegidos contra el sobrecalentamiento, por ejemplo, mediante la utilización de materiales disipadores de calor y la implementación de sistemas de ventilación adecuados.

9. **Tamaño y peso:** el tamaño y el peso del medidor de consumo de energía de una red trifásica pueden ser factores importantes en su diseño y selección. En general, un tamaño y peso reducido puede ser preferible para facilitar la instalación y el uso en lugares con espacio limitado. Además, optimizar estos parámetros también puede ser útil para disminuir los costos de fabricación y el precio de venta.

Sin embargo, también pueden limitar la capacidad de medición y la precisión del dispositivo. Por ejemplo, algunos sensores de corriente pueden tener un tamaño reducido, pero su rango de medición puede ser limitado, lo que limita la precisión del medidor. Además, los componentes electrónicos en el medidor necesitan espacio para disipar el calor, lo que puede afectar el tamaño.

Adicionalmente, para su fácil manipulación, debe cumplir con unas condiciones de ergonomía que permitan al usuario realizar las conexiones de manera que no resulte una tarea engorrosa, optimizando el espacio disponible, por lo que tanto las dimensiones como la forma y el peso deben ser adecuados al sistema que se pretenda estudiar.

10. **Movilidad:** por último, el dispositivo debe ser móvil para permitir la conexión en diferentes localizaciones e instalaciones.

3.2. Estudio y selección de componentes

Una vez definidos los criterios de diseño, se ha llevado a cabo un estudio de los diferentes componentes que van a componer el medidor de consumo energético.

3.2.1. Microcontrolador y placa de desarrollo

Para el sistema de control y procesamiento de datos se ha decidido implementar un microcontrolador. Un microcontrolador consiste en un circuito integrado programable capaz de ejecutar órdenes almacenadas en su memoria. Están diseñados para reducir el costo económico y el consumo de energía en comparación a otros sistemas que desarrollan tareas similares (como un PLC, por ejemplo). Además, presenta una serie de ventajas respecto sus contrapartes:

- ✓ Son relativamente económicos en comparación con soluciones personalizadas o sistemas basados en microprocesadores más grandes.
- ✓ Están diseñados para ser eficientes en términos de energía y tienen modos de bajo consumo que son ideales para dispositivos alimentados por batería o energía limitada.
- ✓ Son pequeños y vienen en encapsulados compactos, lo que facilita su integración en dispositivos y sistemas con restricciones de espacio.
- ✓ Existe una amplia variedad de herramientas de desarrollo, compiladores y entornos de programación disponibles para microcontroladores, lo que facilita la creación de *Software* personalizado.
- ✓ Muchos microcontroladores ofrecen capacidades de comunicación, como UART, SPI, I²C, Ethernet y USB, lo que permite la interacción con otros dispositivos y sistemas.

De este modo, su implementación para este proyecto es ideal debido a las necesidades y objetivos planteados inicialmente. De entre los microcontroladores existentes, se ha decidido emplear la gama *Espressif System Platform* (ESP) por sus características muy acordes con el prototipo que se pretende obtener, gracias a su variedad de modelos, la facilidad de su programación, el bajo costo y, sobre todo, la conectividad incorporada que incluye módulos *Wi-Fi* y *Bluetooth* para el control remoto.

ESP32-WROOM-32 y kit de desarrollo Dev Kit C:

El Dev Kit C es una placa de desarrollo basada en el chip ESP32-WROOM-32, con doble núcleo con conectividad *Wi-Fi* (802.11 b/g/n) y *Bluetooth* (*Bluetooth Classic* y *Bluetooth Low Energy*). El kit incluye varios pines GPIO (*General Purpose Input/Output*) que permiten la conexión de sensores, actuadores y otros dispositivos externos. También incluye puertos UART, SPI, I²C, y ADC para interfaces de comunicación y entrada/salida. Es compatible con plataformas de desarrollo como el entorno de programación *Arduino* y el *Espressif IDF* (*IoT Development Framework*).

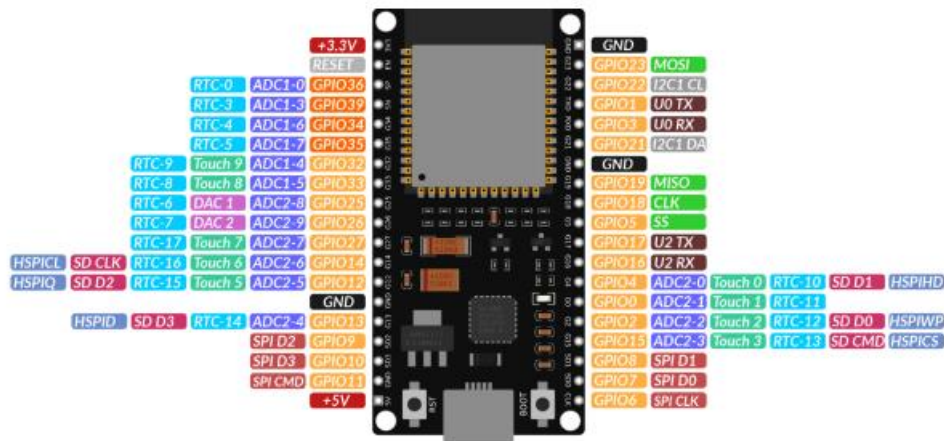


Figura 11. Pinout del ESP32 Dev Kit C.

La mayor de las ventajas que presenta esta placa de desarrollo es la cantidad de convertidores ADC que presenta, dado que para este proyecto son necesarios muchos de estos elementos por el tratamiento con sensores analógicos. Sin embargo, muchos de ellos presentan restricciones de uso, por lo que su selección final debe seguir unos criterios que establece el propio fabricante.

Para más información sobre este kit de desarrollo, se puede leer su hoja de características en [6].

3.2.2. Sensores de tensión

Para la selección de los sensores de tensión, se ha realizado una clasificación en función de su tipología, las características físicas y los métodos de toma de medidas.

1. **Divisor de tensión resistivo (DVR):** también conocido como divisor de tensión, es uno de los sensores de voltaje más simples y ampliamente utilizados en aplicaciones electrónicas de baja potencia para medir voltajes de CC o CA a niveles relativamente bajos.

Se basa en el principio de que la tensión en un punto de una red de resistencias conectadas en serie es proporcional a la resistencia de la rama en la que se encuentra ese punto. Para su implementación, se conectan dos resistencias en serie, y la tensión que se quiere medir se aplica en el extremo de la red de resistencias. La tensión de salida se toma en el punto intermedio entre las dos resistencias. La relación entre la tensión de entrada y la tensión de salida se puede calcular utilizando la Ley de Ohm y la Ley de Divisor de Tensión a partir de los valores de las resistencias utilizadas:

$$V_{salida} = \frac{R_{salida}}{R_{entrada} + R_{salida}} \cdot V_{entrada} \quad (\text{Ec. 7})$$

Esta relación está siempre comprendida entre 0 y 1, por lo que se consigue un valor de tensión menor en la salida adecuada para su medición.

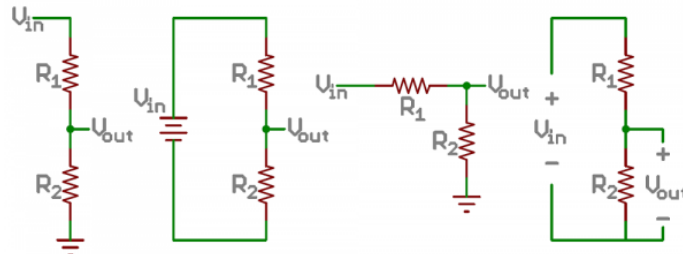


Figura 12. Ejemplos de esquemáticos de divisores de tensión.

Se trata de una solución simple y económica, dado que no requiere de componentes electrónicos más complejos como AO. Sin embargo, su precisión puede ser limitada en función de las resistencias usadas para su construcción por sus tolerancias de fabricación. Además, es importante tener en cuenta que el DVR introduce una carga en el circuito de medición, lo que puede afectar la medición de voltaje, especialmente en circuitos de alta impedancia, por lo que para aplicaciones que requieran una alta precisión o que involucren voltajes más altos es recomendable el uso de otros métodos.

- 2. Transformadores de tensión (VT):** utilizados normalmente para altas tensiones, transforman la tensión de entrada en una tensión más baja siguiendo el principio de la inducción electromagnética, permitiendo medir de manera segura con equipos de medición convencionales.

Proporcionan aislamiento galvánico, lo que significa que separan eléctricamente el sistema de alta tensión del sistema de baja tensión, evitando así descargas eléctricas peligrosas y protegiendo los equipos y dispositivos conectados. Están diseñados para proporcionar mediciones de tensión precisas, y están disponibles en una amplia variedad de relaciones de transformación, lo que les permite adaptarse a una amplia gama de tensiones.

Sin embargo, también tienen algunas desventajas. Para funcionar correctamente requieren de una fuente de alimentación, y en ocasiones necesitan una calibración periódica y un mantenimiento del circuito para garantizar la correcta toma de medidas en el tiempo.

Entre los modelos más conocidos para aplicaciones “DIY” se encuentra el módulo ZMPT101b, que permite realizar medidas de hasta 250 V AC, con una precisión muy alta (desviaciones de un máximo del $\pm 0,2\%$) y un comportamiento no lineal menor al 1%.

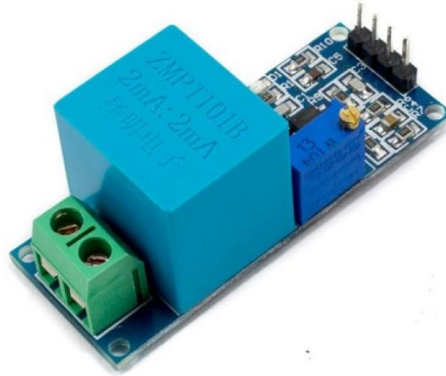


Figura 13. Módulo sensor de voltaje ZMPT101b.

3.2.3. Sensores de corriente

En relación con los sensores de corriente que se usan comúnmente en la actualidad, tanto en aplicaciones a nivel educacional como en sistemas más complejos, se ha realizado la siguiente clasificación, en función de su tipología, las características físicas y los métodos de toma de medidas.

1. **Transformador de corriente (CT):** también conocido como sensor de corriente no invasivo o “clamp-on” en inglés. Este tipo de sensor utiliza un transformador para medir la corriente en un circuito. El CT se conecta alrededor de un conductor y, debido al principio de la inducción electromagnética, transforma la corriente en una señal de menor amplitud que se puede medir con un instrumento de medición o un dispositivo electrónico. Consiste en un núcleo de hierro que rodea al conductor a medir y un bobinado secundario alrededor del núcleo.

Cuando la corriente fluye por el conductor, genera un campo magnético alrededor del conductor, y este campo magnético es recogido por el núcleo de hierro. El núcleo actúa como un transformador de corriente, aumentando la corriente del conductor, y entregando una corriente proporcionalmente menor al bobinado secundario. El bobinado secundario está diseñado para soportar un nivel de voltaje y corriente más bajo, lo que lo hace adecuado para su uso en sistemas de medición.

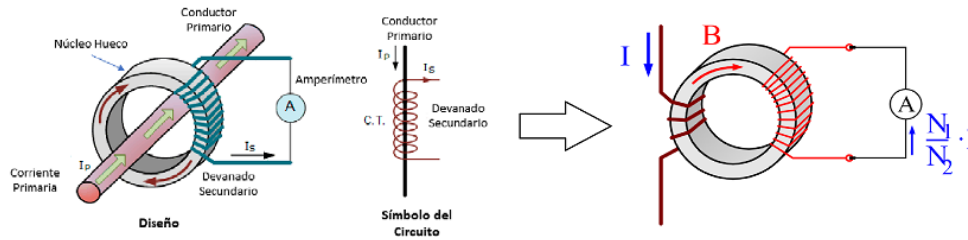


Figura 14. Esquema del fenómeno físico de la transformación.

La salida del sensor CT se mide en términos de corriente, que es proporcional a la corriente que fluye a través del conductor. La relación de transformación (N_1/N_2) se utiliza para calcular la corriente real que fluye a través del conductor a partir de la medición de la corriente en el bobinado secundario.

Los sensores CT tienen la ventaja de que no interrumpen el circuito que están midiendo, lo que los hace ideales para medir la corriente en circuitos de alta tensión o de alta potencia. Además, los sensores CT pueden utilizarse para medir corrientes de hasta varios miles de amperios, lo que los hace ideales para aplicaciones industriales.

Cabe destacar que los sensores CT tienen algunas limitaciones. Por ejemplo, la relación de transformación puede variar con la frecuencia de la corriente y la impedancia del circuito, lo que puede afectar la precisión de las mediciones. Además, los sensores CT requieren de una fuente de alimentación externa para el bobinado secundario, lo que aumenta la complejidad del circuito. Por otro lado, se requiere de otros componentes electrónicos para la lectura de las medidas.

Entre los modelos más comunes se encuentran los siguientes:

- **SCT-013:** disponible en diferentes modelos, cada uno con un rango de corriente específico, que puede ir desde una lectura máxima de 5 A hasta los 100 A. Cabe destacar que en función del rango de medición ofrece una precisión u otra. Cuanto mayor es el rango, menor es la precisión y mayor el margen de error, el cual oscila entre el $\pm 0,2\%$.



Figura 15. Sensor de corriente SCT-013.

- **ZM-CT:** disponible también en diferentes modelos con distintos rangos de medición. Sin embargo, presentan un inconveniente respecto su análogo SCT-013, y es que no disponen de una pinza, por lo que su maniobrabilidad se ve reducida. Su precisión es similar, con una desviación máxima del $\pm 0.2\%$.



Figura 16. Sensor de corriente ZM-CT.

2. **Efecto Hall:** los sensores de efecto Hall miden la corriente utilizando el efecto Hall, que es la generación de una tensión en un material conductor cuando se somete a un campo magnético. Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un conductor expuesto a un campo magnético, se genera una tensión perpendicular a la corriente y al campo magnético. Esta tensión se llama voltaje Hall, y su magnitud es proporcional a la corriente eléctrica que fluye a través del conductor y al campo magnético al que está expuesto.

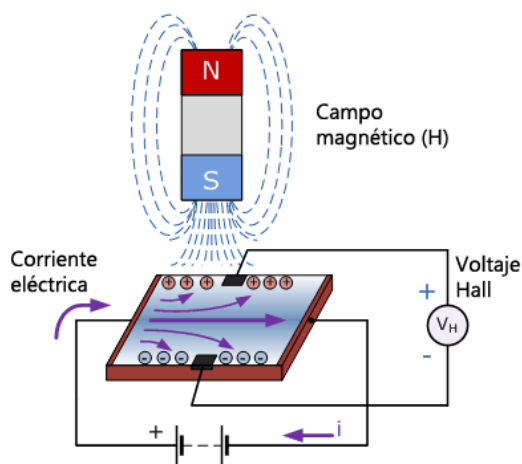


Figura 17. Principio del efecto Hall.

Un sensor de efecto Hall de corriente consta de una pastilla semiconductor y un circuito integrado. El semiconductor es el elemento activo del sensor y contiene un material con propiedades magnéticas. El circuito integrado proporciona la electrónica necesaria para procesar la señal del sensor y convertirla en una señal de salida.

Los sensores de efecto Hall tienen varias ventajas sobre los sensores CT. Por ejemplo, son más pequeños y ligeros, y son menos susceptibles a variaciones en la frecuencia y la impedancia de la corriente que los sensores CT.

Sin embargo, los sensores de efecto Hall también tienen algunas limitaciones. Por ejemplo, son más costosos que los sensores CT, y pueden ser menos precisos en rangos de corriente más altos. Además, pueden ser más susceptibles a interferencias electromagnéticas externas que los sensores CT.

Entre los modelos más comunes se encuentran los siguientes:

- **ACS712:** disponible en distintos modelos con un rango máximo de medición de hasta 30 A, este sensor es capaz de tratar con CA y CC, y ofrece una precisión en las lecturas con una desviación máxima del $\pm 1,5\%$, notablemente superior a los transformadores de corriente. Además, se trata de un sensor de tipo invasivo, por lo que para su conexión es necesario interrumpir el circuito.

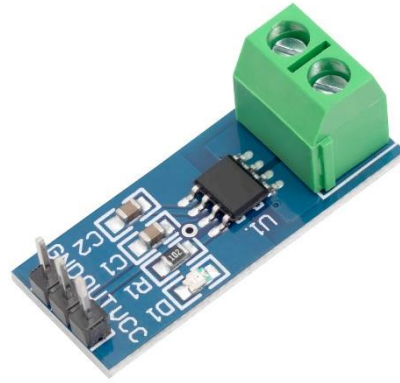


Figura 18. Sensor de corriente ACS712.

- **WCS1800:** disponible en otras gamas con un rango máximo de medición de hasta 200 A (WCS1500), también capaz de trabajar con CA y CC. En comparación con el anterior, éste no es de carácter invasivo y su aplicación no requiere de la interrupción del circuito.

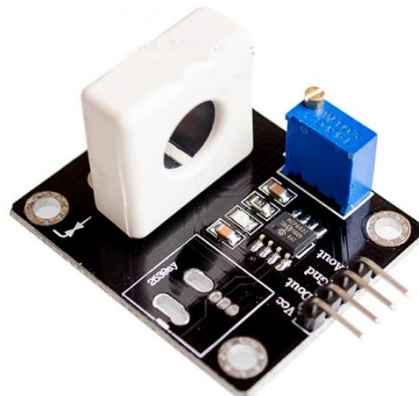


Figura 19. Sensor de corriente WCS1800.

3. **Resistencia Shunt:** este tipo de sensor mide la caída de voltaje a través de una resistencia de valor conocido en serie con el circuito. El valor de la resistencia shunt debe ser lo suficientemente bajo para minimizar la caída de tensión a través de ella y al mismo tiempo lo suficientemente alto para evitar que la corriente que fluye a través del circuito se vea afectada. Por lo tanto, se utilizan resistencias shunt de baja resistencia y alta potencia, lo que las hace costosas en comparación con otros sensores de corriente. Se aplica La ley de Ohm para calcular la corriente a partir de la caída de voltaje medida.

Los sensores de corriente tipo resistencia shunt son muy precisos y pueden medir corrientes de alta intensidad. Son especialmente útiles en aplicaciones de alta frecuencia, ya que no tienen limitaciones de frecuencia. Sin embargo, la caída de tensión a través de la resistencia shunt genera una disipación de potencia que puede ser un problema en aplicaciones de alta corriente, por lo que es importante seleccionar una resistencia shunt con una potencia nominal adecuada para la aplicación específica.

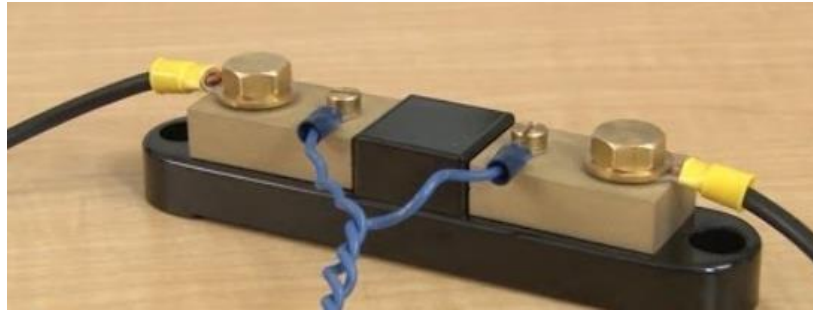


Figura 20. Resistencia Shunt.

4. **Bobina Rogowski:** la bobina Rogowski es una sonda flexible que se utiliza para medir la corriente en conductores de forma no invasiva, de manera parecida a los sensores CT. La bobina se coloca alrededor del conductor y se basa en el principio de la inducción electromagnética para generar una señal proporcional a la corriente que fluye a través del conductor. Cuando la corriente fluye a través del conductor, se produce un campo magnético alrededor del conductor que induce una corriente en la bobina Rogowski. La señal de salida de la bobina se amplifica y se procesa para determinar la corriente que fluye a través del conductor.

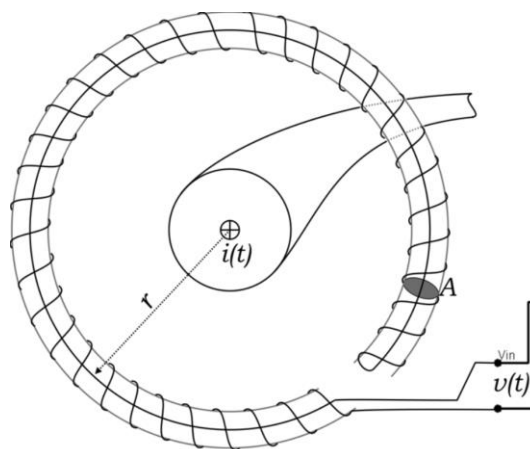


Figura 21. Principio de funcionamiento de la bobina Rogowski.

El diseño de la bobina Rogowski permite que se coloque alrededor de conductores de diferentes tamaños y formas, lo que lo hace adecuado para una amplia gama de aplicaciones. Además, no requiere una fuente de alimentación externa y puede medir corrientes de alta frecuencia con precisión.

Una ventaja clave del sensor de corriente de bobina Rogowski es su capacidad para medir corrientes de pulso corto, lo que puede ser difícil de medir con otros tipos de sensores de corriente. Además, los sensores de corriente de bobina Rogowski son muy precisos y tienen una respuesta lineal en un amplio rango de frecuencias.

Sin embargo, los sensores de corriente de bobina Rogowski pueden ser menos precisos en corrientes de baja frecuencia y también pueden ser más sensibles a los campos magnéticos externos que otros sensores de corriente. Además, la bobina Rogowski es más compleja y costosa de fabricar que otros sensores de corriente, por lo que su precio es mucho más elevado en comparación con los otros tipos.



Figura 22. Sensor de corriente de bobina Rogowski.

Para una explicación más detallada de cada uno de los modelos expuestos, en los anexos se incluyen los distintos *datasheets* de cada sensor, cuyas características de funcionamiento han sido estudiadas para su selección final.

3.2.4. Otros periféricos

Adicionalmente, para la implementación del prototipo se ha decidido incorporar una pantalla LCD de matriz 16x2, ya que contiene los suficientes espacios para caracteres que se pretenden representar; y un pulsador digital para navegar por los distintos modos de visualización.



Figura 23. Pantalla LCD 16x2.



Figura 24. Pulsador digital.

Para las interconexiones entre dispositivos, se ha decidido incorporar cables de prototipaje tipo puente o *jumper*, ya que su fácil manipulación permite realizar modificaciones en caso de fallo o error en el montaje, dado que una soldadura incorrecta podría dañar de forma irreversible los distintos componentes. Además, todos estos hilos conductores se interconectan mediante una *proto board* mini, que gracias a su reducido tamaño y cantidad de agujeros reducida pero suficiente optimiza espacio y peso.

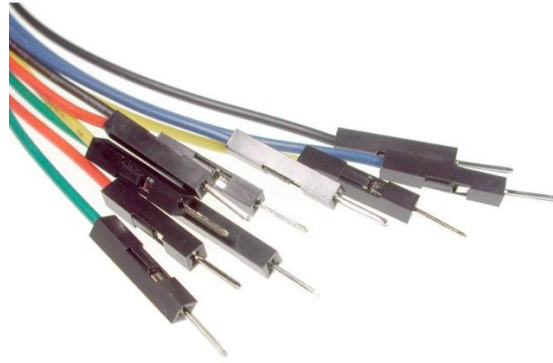


Figura 25. Cables puente.

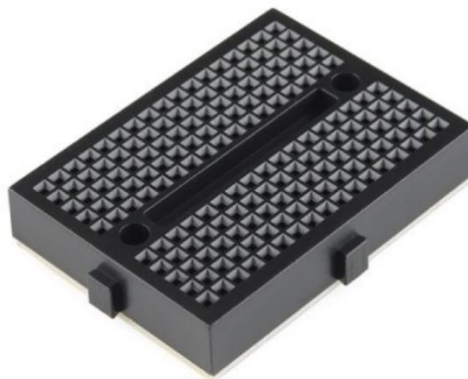


Figura 26. Placa de prototipaje o *protoboard*.

3.2.5. Selección final

Teniendo en cuenta los criterios definidos previamente, se ha optado por la selección de los siguientes componentes por sus características más acordes con las necesidades planteadas.

Módulo ZMPT101b

En relación con el circuito de acondicionamiento de tensión, se ha decidido utilizar el módulo ZMPT101b. Se trata de un sensor de voltaje altamente versátil, y para su precio y tamaño ofrece muy buenas prestaciones en relación con los criterios de diseño de este proyecto, además de una alta disponibilidad en el mercado. Sin embargo, tiene una limitación muy importante: su tensión máxima de entrada no puede superar los 250 V, por lo que es una gran limitante a la hora de realizar las conexiones.

No obstante, para la implementación en el prototipo se ha considerado oportuno, dado que en instalaciones monofásicas no deberían existir problemas (dado el valor máximo típico de 230 V), y en instalaciones trifásicas con acceso al neutro también es aplicable.

Sensor de corriente SCT-013

Para la toma de medidas de corriente, se ha decidido emplear el transformador de corriente SCT-013, dado que sus prestaciones también presentan similitud con los criterios establecidos anteriormente, aunque como su análogo de sensor de voltaje, presenta otra limitación: su conexión se realiza mediante un cable *jack*, por lo que es necesario un adaptador para su incorporación al circuito.

Por suerte, existe en el mercado un adaptador para estos transformadores de corriente del fabricante DFRobot. Este adaptador consiste en un pequeño componente que integra un puerto hembra capaz de permitir una sencilla conexión del *jack* del SCT-013, además de un circuito interno de conversión de señal para la entrada analógica en el pin del microcontrolador. Si bien este conversor aumenta el coste total, facilita mucho la implementación en el prototipo.

Aun así, se debe tener en cuenta que incurre en un error de las medidas del SCT-013 del $\pm 4\%$, valor razonablemente significativo, por lo que es necesaria una correcta calibración. Las demás características pueden encontrarse en [3].

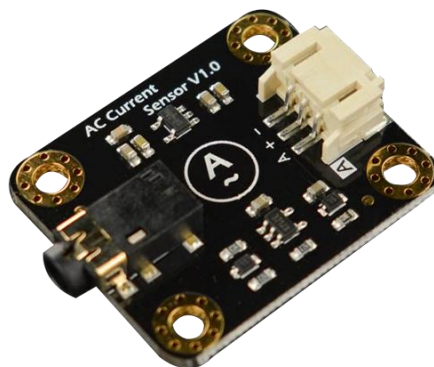


Figura 27. Adaptador de señal de corriente.

3.3. Propuesta de diseño

En este apartado se describen en profundidad los diferentes subsistemas que incorpora el prototipo final, analizando los componentes que los integran y las operativas que llevan a cabo de manera tanto independiente como en conjunto, aportando todo tipo de soportes gráficos que ayudan a la comprensión del funcionamiento.

3.3.1. Diseño de Hardware

3.3.1.1. Circuito medidor de tensión

Para las mediciones de tensión, se han utilizado los sensores ZMPT101B descritos anteriormente. Para acondicionar la señal de voltaje se conecta una entrada a la línea y la otra al neutro, y se reduce la tensión en la salida del transformador. El voltaje en la salida del devanado secundario es una señal de CA que está en fase con el voltaje de entrada. Para convertir esta señal en otra legible por el microcontrolador, se utiliza un divisor de tensión y el AO LM358N que permite agregar un desplazamiento a la señal y un filtrado a la salida. Este *offset* o desplazamiento se utiliza para centrarla en un valor distinto de 0, generando así una onda que oscila entre 0 y un valor máximo. Se determina a partir del valor de V_{cc} con el que se alimenta este módulo, tomando un valor de $V_{cc}/2$. En el caso de este proyecto, el valor de V_{cc} es de 3,3 V dadas las características del microcontrolador, por lo que el *offset* obtiene un valor de 1,65 V aproximadamente.

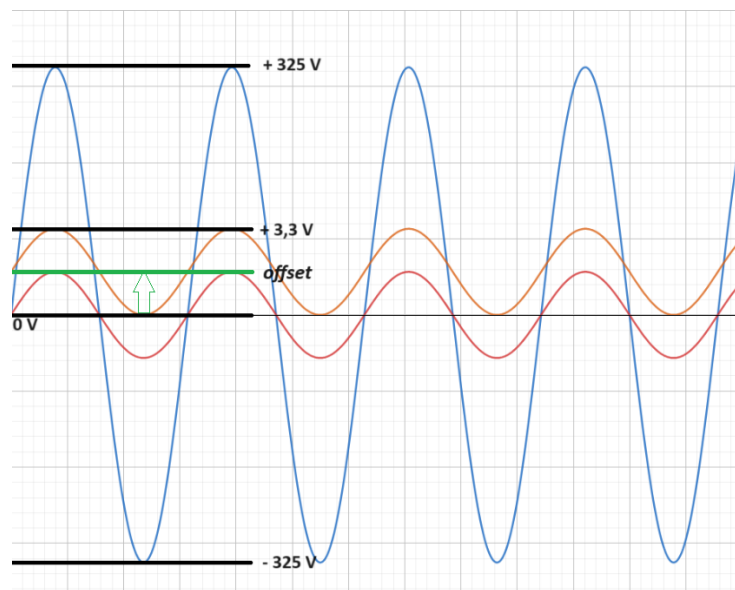


Figura 28. Gráfica representativa de la adaptación de la señal.

Adicionalmente, para regular la amplitud de la señal a la salida del y permitir la calibración, el módulo incorpora un potenciómetro. Este potenciómetro es de gran importancia, y se usa para ajustar la ganancia del AO con el fin de corregir desajustes que se puedan producir en la señal fruto de las tolerancias de fabricación de los distintos componentes del módulo.

El filtrado se realiza para reducir cualquier ruido o fluctuaciones no deseadas. El filtro elimina las componentes de alta frecuencia y proporciona una señal que es proporcional

al valor eficaz del voltaje de entrada. Finalmente, la señal se transmite al ADC de la placa y genera valores entre 0 (0 V) y 4.095 (3,3 V), dado que la resolución de este convertidor es de 12 bits. Estos convertidores ADC se encuentran en los pines GPIO 25, 27 y 32.

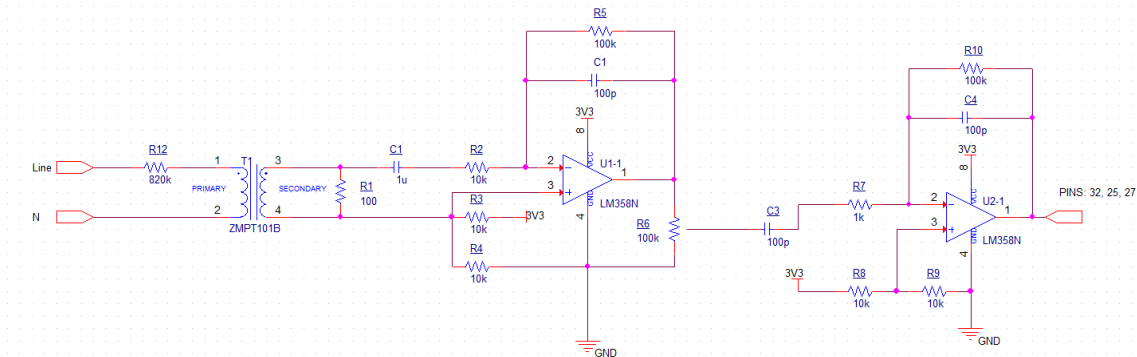


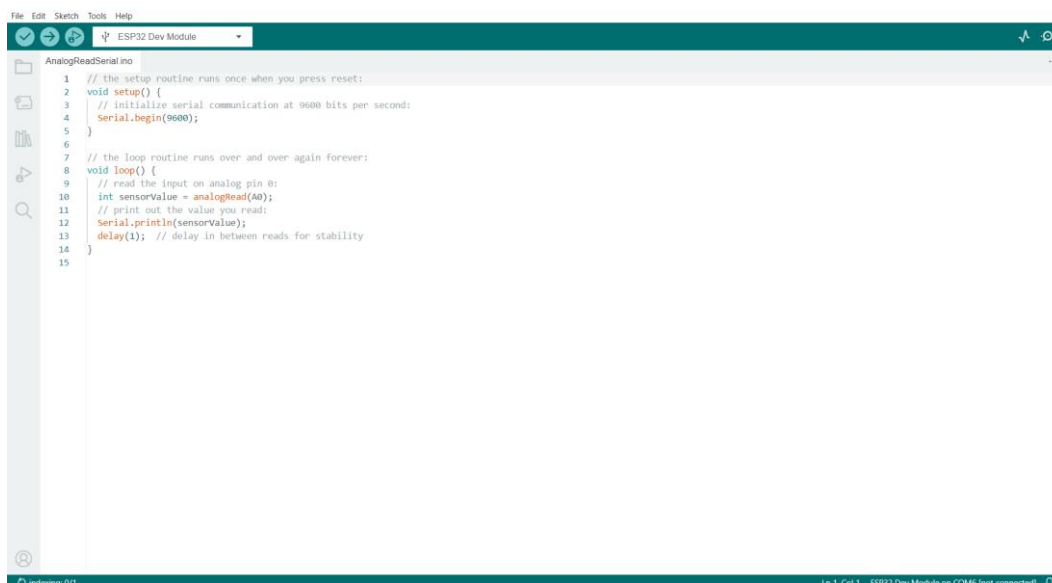
Figura 29. Esquemático del módulo ZMPT101b.

3.3.1.2. Circuito medidor de corriente

Como se ha mencionado anteriormente, para la lectura de las intensidades se ha optado por la aplicación de los transformadores de corriente modelo SCT-013, en gran parte gracias a su flexibilidad de uso y la gran cantidad de rangos de medición que ofrecen sus distintas gamas. Sin embargo, presenta el inconveniente de que su conexión se realiza mediante un cable *jack*, por lo que se requiere el adaptador mencionado anteriormente.

Su funcionamiento es muy similar al del circuito medidor de voltaje, ya que éste también incorpora un transformador en su primer paso. Tras el transformador, la corriente del secundario circula hasta el circuito de acondicionamiento de señal, a través del adaptador de cable *jack* PJ-342. Este circuito incluye el AO LMV321IDBVR, que amplifica la señal a valores legibles por el microcontrolador, y aplica un filtrado para la corrección de la onda. La salida de cada uno de estos módulos sensores de corriente se conectan a las diferentes entradas de los ADC que incorpora la placa del ESP32, concretamente en los pines GPIO 4, 26 y 33.

con el lenguaje de programación que usa (C/C++). Además, incluye infinidad de librerías específicas tanto propias como desarrolladas por otros usuarios que simplifican la programación del *Hardware*.



```
File Edit Sketch Tools Help
ESP32 Dev Module
AnalogReadSerial.ino
1 // the setup routine runs once when you press reset:
2 void setup() {
3   // initialize serial communication at 9600 bits per second:
4   Serial.begin(9600);
5 }
6
7 // the loop routine runs over and over again forever:
8 void loop() {
9   // read the input on analog pin 0:
10  int sensorValue = analogRead(A0);
11  // print out the value you read:
12  Serial.println(sensorValue);
13  delay(1); // delay in between reads for stability
14 }
15
indexing: 0/1
Ln 1, Col 1: ESP32 Dev Module on COM6 (not connected)
```

Figura 32. Interfaz Arduino IDE.

El código desarrollado presenta distintas funciones que se encargan de las lecturas de cada uno de los sensores, el procesamiento de los datos y las conversiones pertinentes y el almacenamiento y envío de datos tanto al *display* físico de la LCD como al servidor vía *Wi-Fi*:

- **getRMSVoltage():** esta función es la encargada de leer, almacenar y convertir los valores proporcionados por cada uno de los sensores de voltaje. En otras palabras, se encarga de muestrear la señal de entrada al sensor un número *sampleRate* de periodos, siendo éstos función de la frecuencia (establecida en 50 Hz por defecto), para posteriormente calcular el valor RMS de la tensión de entrada. Además, internamente incluye la subfunción **getZeroPoint()** para restablecer el punto central de la onda (que debe ser 0), dado que como se ha mencionado anteriormente, el módulo ZMPT101b incluye un circuito que ajusta el *offset* del sensor al valor de $V_{cc}/2$ (en el caso del microcontrolador ESP32-WROOM-32 es V_{cc} es de 3,3 V, es decir, impone un *offset* de 1,65 V aproximadamente).

Para el cálculo del valor eficaz se debe tener en cuenta que, debido a la frecuencia de muestreo, el *Software* no interpreta la señal como una función continua senoidal, sino que lo interpreta como señales discretas cuantificadas según la resolución del convertidor analógico digital, con lo cual se deben

discretizar las expresiones en tiempo continuo mencionadas anteriormente (véase 2.1.3). Siendo T el periodo de la función temporal en continua, y N el número de muestras recogidas en cada periodo, obtenemos las siguientes expresiones:

$$U_{ef}(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_{t_0}^{t_0+T} [u(t)]^2 dt} \Rightarrow U_{ef}(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot [\sum_{k=0}^N u_k^2]} \quad (\text{Ec. x})$$

Cabe mencionar que cuanto mayor sea el valor de *sampleRate* mayor precisión se obtendrá en las medidas, dado que se realizan más ciclos. No obstante, se requiere mayor tiempo de cálculo y carga computacional, por lo que el establecimiento de este parámetro se realiza bajo criterio del usuario. En el siguiente diagrama de flujo se puede observar el proceso que realiza esta función principal.

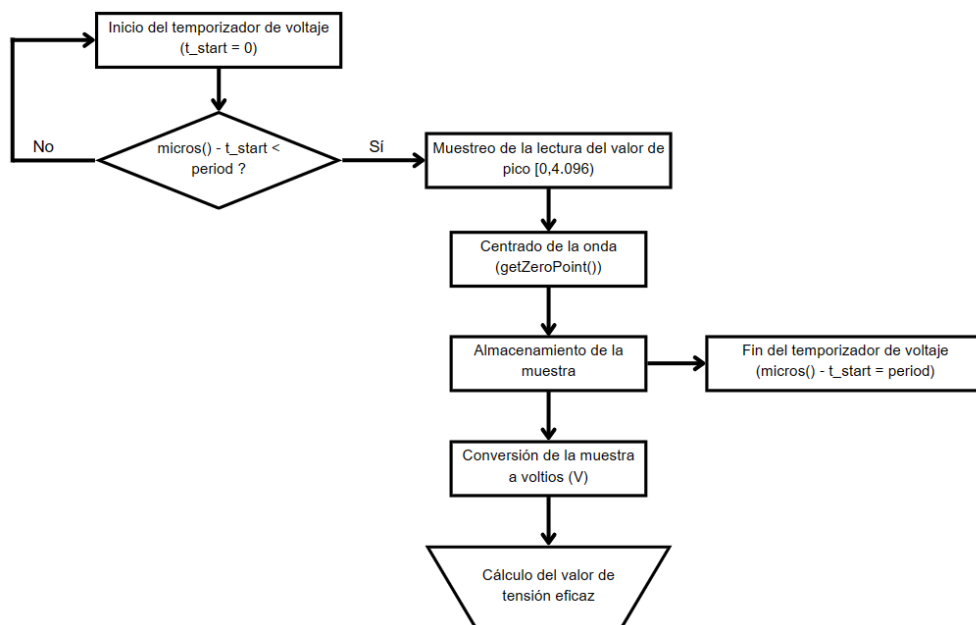


Figura 33. Diagrama de bloques del algoritmo de cálculo de la tensión eficaz.

- **getRMSCurrent():** esta función realiza un recorrido similar a la anterior, con una pequeña diferencia. El microcontrolador trabaja con variaciones de tensión para realizar los cálculos, por lo que las lecturas realizadas por los sensores deben ser convertidas a valores de corriente (A). Esta función incluye también el cálculo del valor eficaz, de igual modo que realiza la función anterior con la expresión discreta, cambiando los valores de tensión por los de corriente. De este modo, su funcionamiento se puede describir según el diagrama de bloques que se presenta

a continuación.

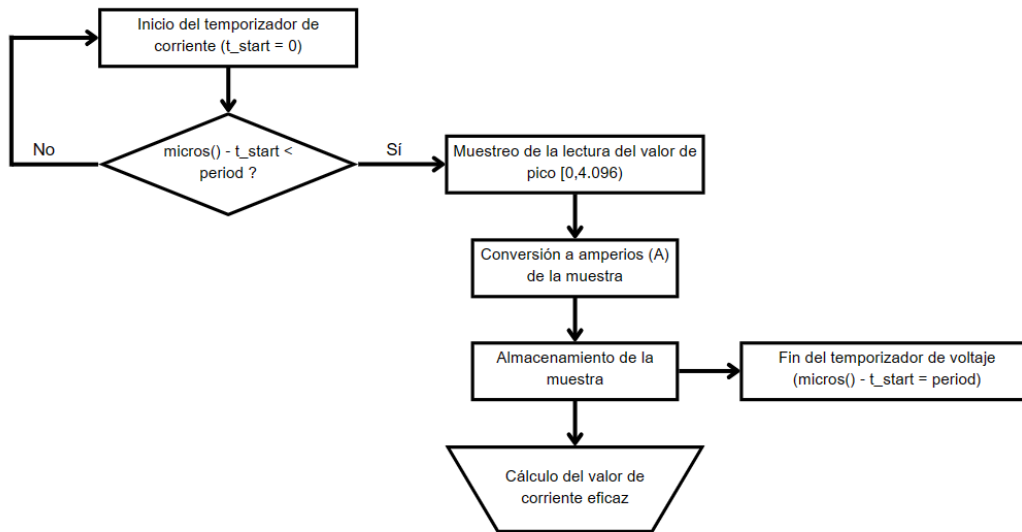


Figura 34. Diagrama de flujo del algoritmo de cálculo de la corriente eficaz.

En el bucle principal `void loop()` se ejecutan todas las funciones previamente definidas, empezando por el primer comando y sucesivamente recorre el código de manera ordenada. Además, en este bucle principal se realizan el resto de los cálculos de los parámetros de estudio, el establecimiento del temporizador y las representaciones de la pantalla LCD.

3.3.3. Diseño de la interfaz gráfica

Para la interfaz gráfica integrada en la pantalla LCD de 16x2 caracteres, se han diseñado 9 *displays* diferentes, que representan las diferentes vistas de los parámetros de estudio. Para los valores de tensión y corriente, se representan los valores eficaces.



Figura 35. *Display* del voltaje de fase.

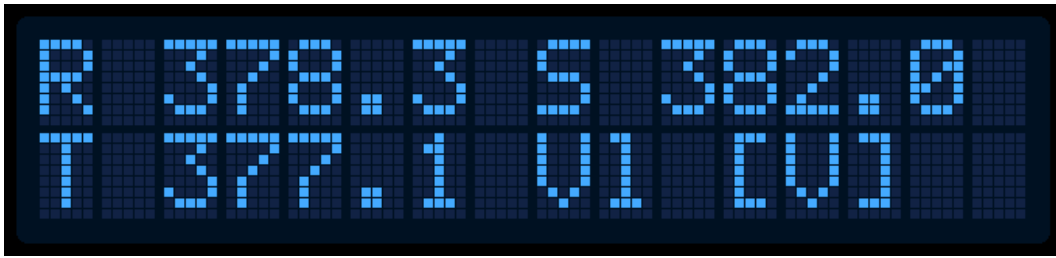


Figura 36. *Display* del voltaje de línea.



Figura 37. *Display* de la corriente de fase.



Figura 38. *Display* la corriente de línea.



Figura 39. *Display* de la potencia activa.



Figura 40. Display de la potencia reactiva.



Figura 41. Display de la potencia aparente.



Figura 42. Display del factor de potencia.



Figura 43. Display del temporizador global.

Para la interfaz gráfica de control remoto, se ha decidido utilizar la herramienta gratuita ThingSpeak de la compañía Mathworks. Esta herramienta nos permite visualizar gráficas en dominio temporal de las variables cuya evolución queramos observar, y realizar envíos de datos vía *Wi-Fi* cada cierto tiempo, predefinido por el usuario.

ThingSpeak es un servicio de plataforma de análisis de IoT que permite agregar, visualizar y analizar flujos de datos en tiempo real en la nube. Con la capacidad de ejecutar código MATLAB en ThingSpeak, pueden realizar análisis y procesamiento en línea de los datos a medida que éstos se registran. ThingSpeak se utiliza a menudo para la creación de prototipos y pruebas de concepto de sistemas de IoT que requieren análisis. Además, permite la exportación de datos en formato .csv para ser utilizados en otros *Softwares* como Microsoft Excel.

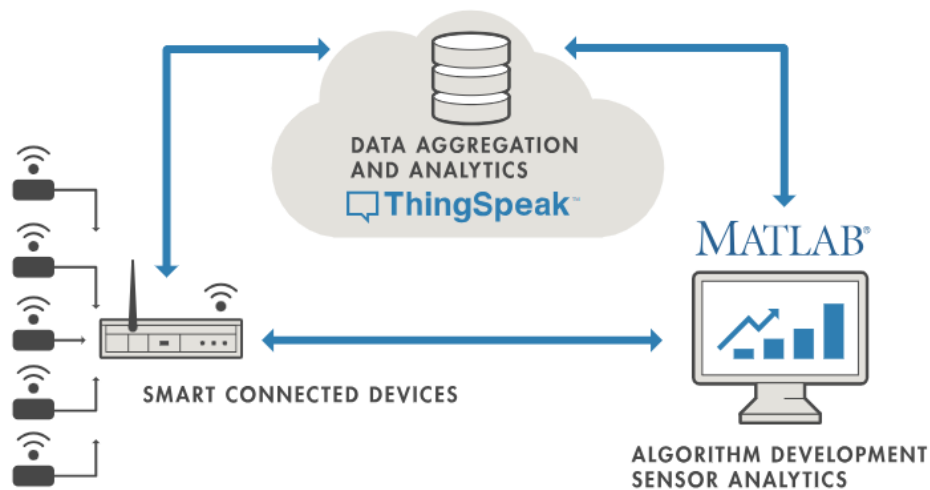


Figura 44. Descripción gráfica del servicio de ThingSpeak.

Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, el kit de desarrollo ESP32-WROOM-32 de AZ Delivery presenta un inconveniente: si durante su funcionamiento se utilizan los conversores ADC2, el módulo *Wi-Fi* no puede activarse. Así pues, la plataforma ThingSpeak se ha utilizado únicamente con la monitorización de los sensores de una fase (conectados a los conversores ADC1 de los pines 32 y 33).

Entre los parámetros de interés para el control remoto se ha realizado una prueba con la tensión de línea, la intensidad de línea, la potencia activa y la energía activa consumida. Adicionalmente, se han añadido dos indicadores tipo manómetro que muestran de una manera más representativa los datos de tensión y corriente.

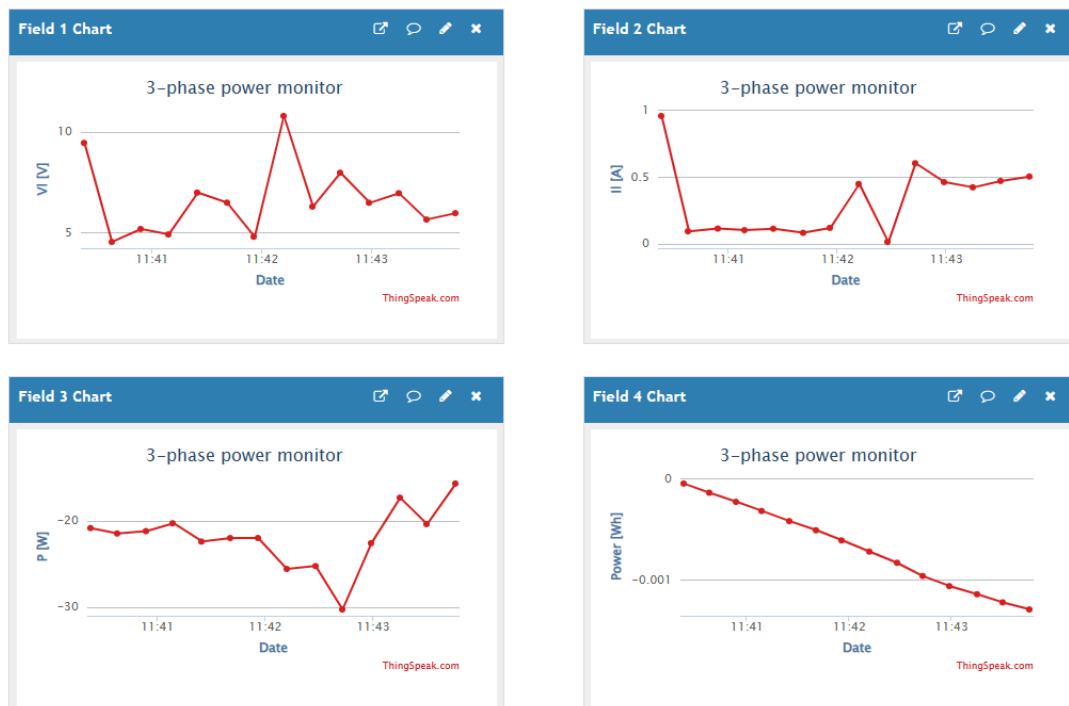


Figura 45. Diseño de las gráficas en dominio temporal de los parámetros de estudio.

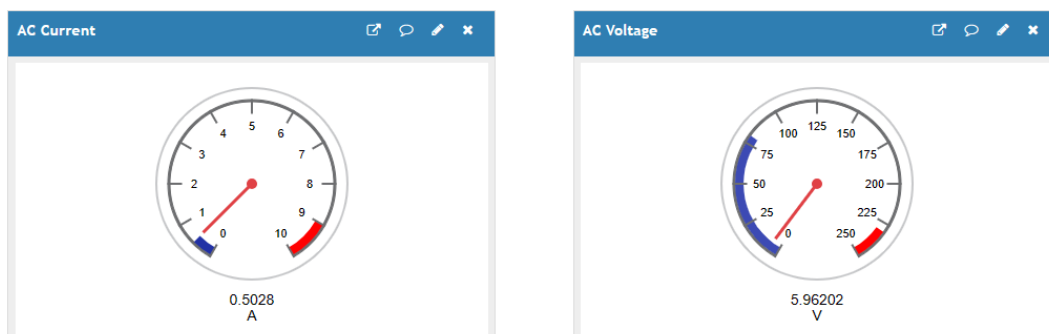


Figura 46. Indicadores tipo manómetro.

4. Pruebas de funcionamiento

4.1. Calibración de los sensores

El primer paso para la puesta en marcha y posterior realización de pruebas de funcionamiento es la calibración de los diferentes sensores tanto de voltaje como de corriente. Para cada uno de éstos es necesario seguir un procedimiento y en este apartado se detalla la manera de realizar la configuración inicial del dispositivo.

4.1.1. Calibración de los sensores de voltaje

Para los sensores de voltaje se ha debido seguir un proceso de tres sencillos pasos para la correcta calibración. En primer lugar, se ejecuta un simple código de Arduino que permite visualizar la forma de onda en el Serial Plotter. Se conecta la entrada del ZMPT101b a la red y se ejecuta el código.

```
1 void setup() {  
2   Serial.begin(9600);  
3  
4 }  
5  
6 void loop() {  
7   Serial.println(analogRead(32));  
8  
9 }
```

Figura 47. Código para la visualización de la forma de onda de tensión de entrada.

Una vez ejecutado, debería aparecer una gráfica con un aspecto similar al siguiente. Se puede apreciar como la onda está saturada superiormente, debido a que el potenciómetro no está correctamente ajustado.

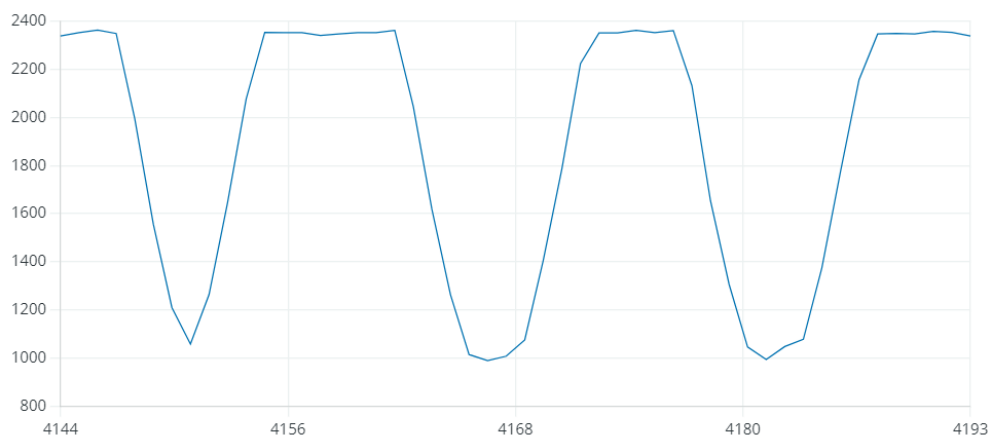


Figura 48. Tensión de entrada sin calibrar.

Para corregir este fenómeno, simplemente se ha girado el pequeño tornillo que éste incluye hasta visualizar una onda casi perfectamente senoidal, correspondiente a la tensión alterna de la red.

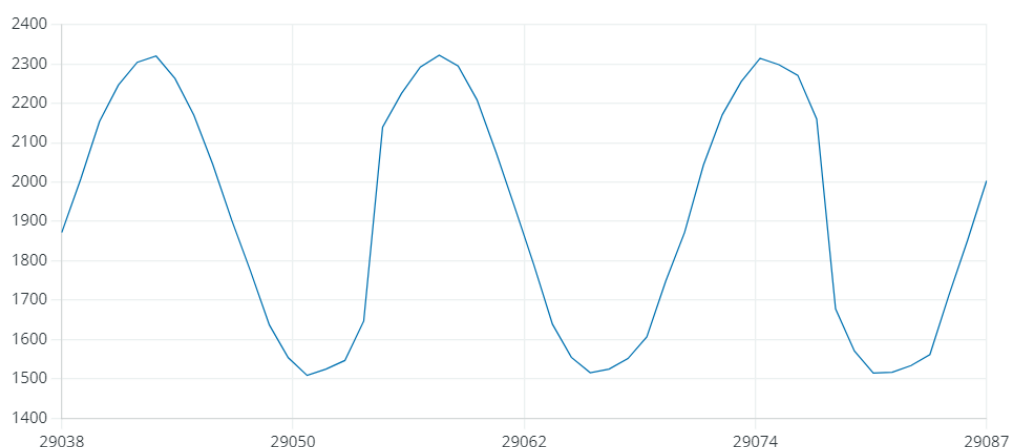


Figura 49. Tensión de entrada corregida.

Una vez la forma de onda es correcta, se procede con el cálculo del valor de sensibilidad, que es un parámetro propio de cada sensor y que permite que las lecturas de tensión se ajusten al valor real tras la conversión de valores comprendidos entre 0 y 4.095 a un valor de voltaje.

Para este cálculo se ejecuta el código **calibrate.ino**, que a partir de un valor de voltaje real medido con un multímetro calcula por medio de un proceso iterativo estos valores ajustando la medida del sensor dentro de unas tolerancias establecidas por el usuario. Como se ha definido en los criterios, se espera obtener lecturas con una desviación

máxima de $\pm 1\% + 1V$, por lo que se ha establecido este valor en 2 V en el programa. La medida de referencia ha sido tomada con un multímetro, con un valor de 233 V. Cabe destacar que este multímetro tiene una resolución de 1 V, y una precisión de $\pm 1\% + 5 V$ para medidas de tensión de entre 0 y 600 V de valor eficaz. No obstante, el valor tomado es razonable para la red doméstica, por lo que se ha considerado correcto para la calibración.

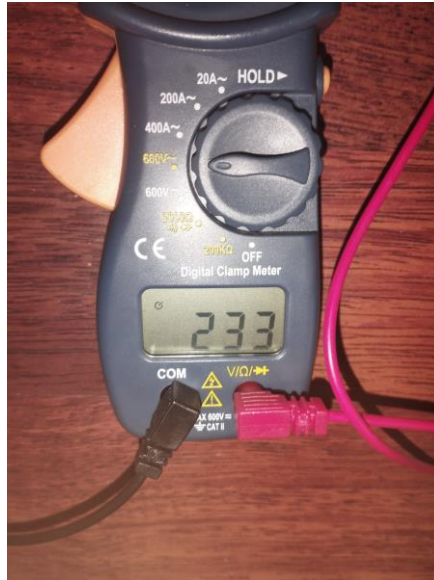


Figura 50. Multímetro de referencia.

Tras la ejecución del programa, se han obtenido los valores de sensibilidad para cada uno de los tres sensores del prototipo:

- Fase R: 993,25.
- Fase S: 915,25.
- Fase T: 998.

Cabe destacar que estos valores son simplemente factores correctores, y sirven únicamente para el ajuste de los valores proporcionados por los sensores a valores de tensión en los cálculos internos del código. Fallos en las lecturas o problemas de descalibro podrían provocar el recálculo de estas constantes.

4.1.2. Calibración de los sensores de corriente

A diferencia de la calibración de los sensores de tensión, en los sensores de corriente no existe ningún potenciómetro. Sin embargo, para ajustar las lecturas es necesario el establecimiento de un parámetro de escala en el código, que actúa como un factor

corrector. El proceso para obtener este valor es simple: se basa en realizar iteraciones de carga del programa cambiando el valor, hasta que las lecturas del sensor se ajustan con las de una referencia indicada por un multímetro.

Para esta calibración, se ha realizado una prueba con una plancha Braun modelo Texstyle 3, con una tensión de alimentación de 220-240 V y un consumo nominal de 2.350 W.



Figura 51. Montaje de la prueba de calibración de los sensores de corriente.

La corriente se ha medido durante la etapa de calentamiento de la plancha, marcando en el multímetro un valor de 7,71 A, como indica la siguiente imagen.

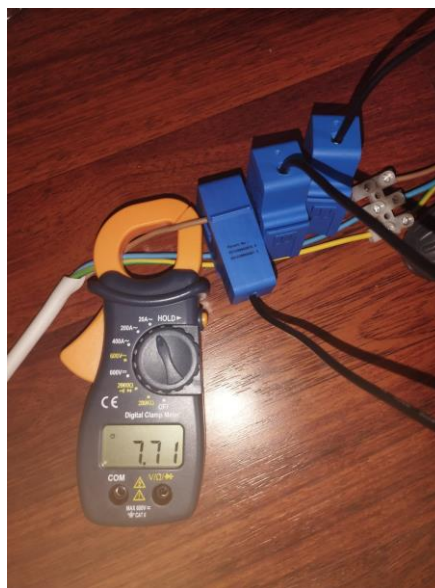


Figura 52. Multímetro y pinzas amperimétricas.

Tras múltiples iteraciones, se ha logrado establecer el factor de corrección en 10 (valor constante), lo que ha dado unos resultados como los que se muestran a continuación.



Figura 53. Valores de las intensidades de los sensores de corriente.

La medida con mayor error porcentual corresponde al sensor de la línea T, con una desviación del 2,464% (en módulo) respecto la medida real, siendo la única medida en superar el criterio de diseño especificado anteriormente. No obstante, dado que un reajuste en el parámetro correcto podría afectar en las medidas de los otros dos sensores, se acepta esta medida y se continúa con este valor.

4.2. Validación del prototipo

Para corroborar el buen funcionamiento tanto del prototipo físico y sus conexiones como el código de toma de datos y cálculos, se han llevado a cabo distintas pruebas simulando situaciones reales.

En primer lugar, para comprobar que los sensores han sido calibrados correctamente, se ha llevado a cabo una prueba de control de los parámetros de lectura de los sensores, es decir, se han monitoreado el voltaje y la corriente.

Para ello, se ha empleado una secadora de pelo modelo ThermoProtect HP8217 de la marca Philips, junto con un sensor de tensión y otro de corriente. Este secador tiene tres velocidades distintas que implican un consumo u otro, con una tensión de alimentación de entre 220 y 240 V, y una potencia nominal de 2.200 W. Para la prueba, se ha utilizado el modo máximo de velocidad. El montaje de la prueba ha sido el siguiente.

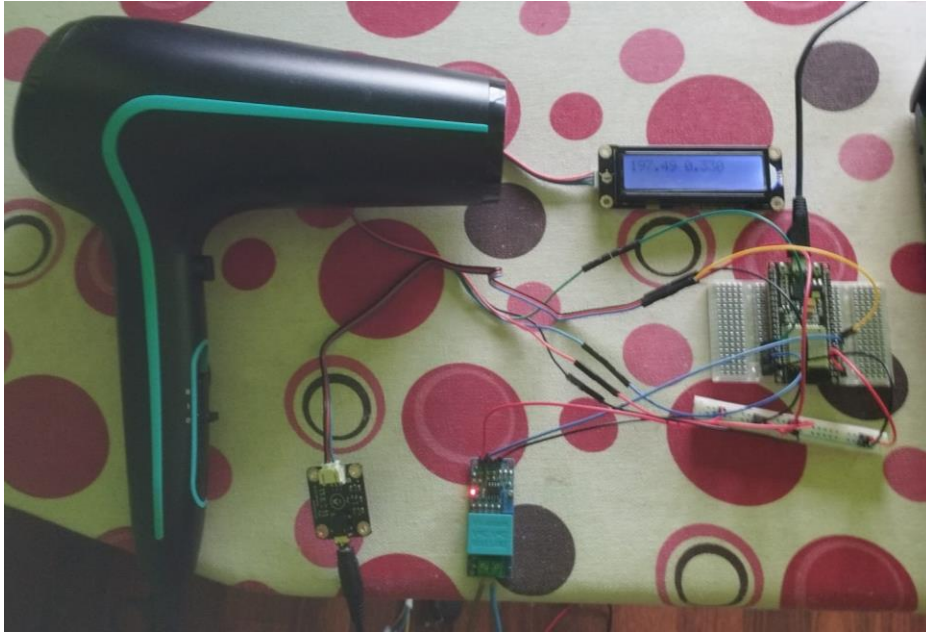


Figura 54. Montaje de la prueba con el secador.

Para simular el caso real, se ha encendido el secador en la configuración mencionada durante 1 minuto, y se han ido guardando los valores de los parámetros cada segundo. Previamente, se ha medido con el multímetro la tensión de alimentación, y se ha situado en modo lectura de amperios para controlar la corriente durante todo el ensayo. El multímetro ha mostrado los valores que se muestran en la siguiente imagen.

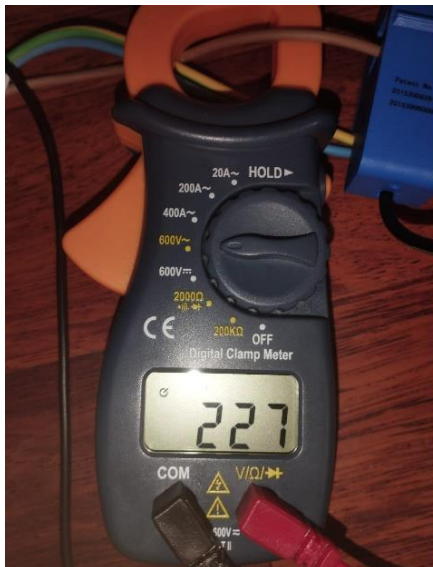


Figura 55. Valores de tensión y corriente del multímetro.

El multímetro utilizado es el Mini Multímetro Digital de la compañía GSC Evolution, cuyas características de medida son:

Voltios DC	600V \pm 1%
Voltios AC	600V \pm 1.2%
Resistencia	200 Ω /20 Ω \pm 1.5%
Intensidad AC	2-20-200-400A

Figura 56. Características del multímetro utilizado.

De este modo, una vez transcurrido el minuto se han recogido los datos y se han estudiado para determinar la desviación que han presentado respecto el valor de referencia del multímetro.

En cuanto la tensión, la siguiente gráfica muestra la evolución de la toma de medidas del sensor a lo largo de los 60 segundos.



Figura 57. Muestras de tensión del sensor en la prueba del secador.



Figura 58. Comportamiento errático de la tensión en la prueba del secador.

Tomando todos los datos y calculando el error relativo medio, el resultado obtenido es del 0,0788% (en valor absoluto), por lo que se puede establecer que se cumple con los criterios de precisión mencionados anteriormente.

En cuanto a la corriente, se ha seguido el mismo procedimiento, y los valores obtenidos se presentan a continuación.

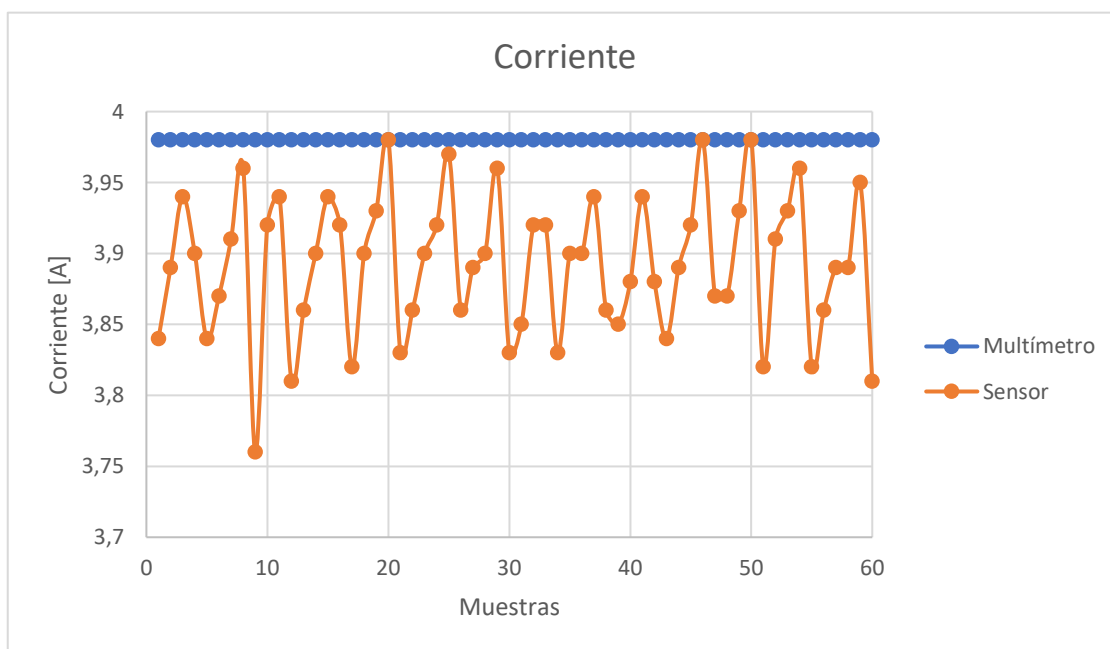


Figura 59. Muestras de corriente del sensor en la prueba con el secador.

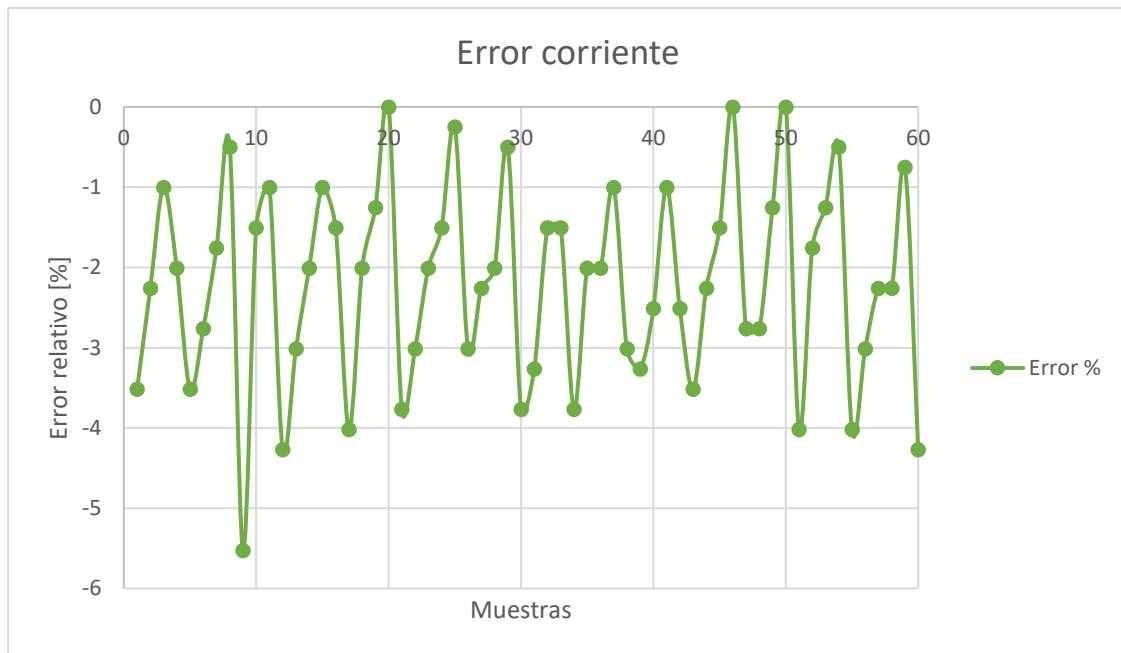


Figura 60. Comportamiento errático de la corriente en la prueba del secador.

Para la corriente, se puede observar como, en general, la mayoría de las medidas son ligeramente inferiores al valor de referencia, lo que es un indicador de que seguramente el sensor no está correctamente calibrado. Por esta razón el error promedio obtenido para la corriente es mayor en comparación con la tensión, siendo éste del 2,203% en valor absoluto, ligeramente superior al especificado en los criterios.

Por otra parte, se ha llevado a cabo otra prueba para verificar que la interfaz de control remoto de ThingSpeak funciona correctamente y los datos se envían para su representación gráfica. En esta ocasión se ha utilizado un ventilador de pie modelo FD-40MB, el cual dispone de tres modos o velocidades de giro. Del mismo modo que para la prueba anterior, se ha utilizado a la máxima velocidad de rotación, pero al tratarse de un objeto que usualmente se usa durante largos periodos de tiempo, se ha mantenido en funcionamiento durante 10 minutos. Este ventilador se alimenta a 220-240 voltios, y consume una potencia nominal de 50 W.



Figura 61. Ventilador FD-40MB.

De este modo, se ha iniciado la prueba y se ha programado en envío de datos cada 14 segundos, intervalo mínimo permitido por la versión gratuita de ThingSpeak. Durante la prueba no se ha registrado ninguna incidencia, y los valores de tensión y voltaje han sido comparados respecto a la referencia del multímetro, que indicaba los valores que se muestran a continuación.

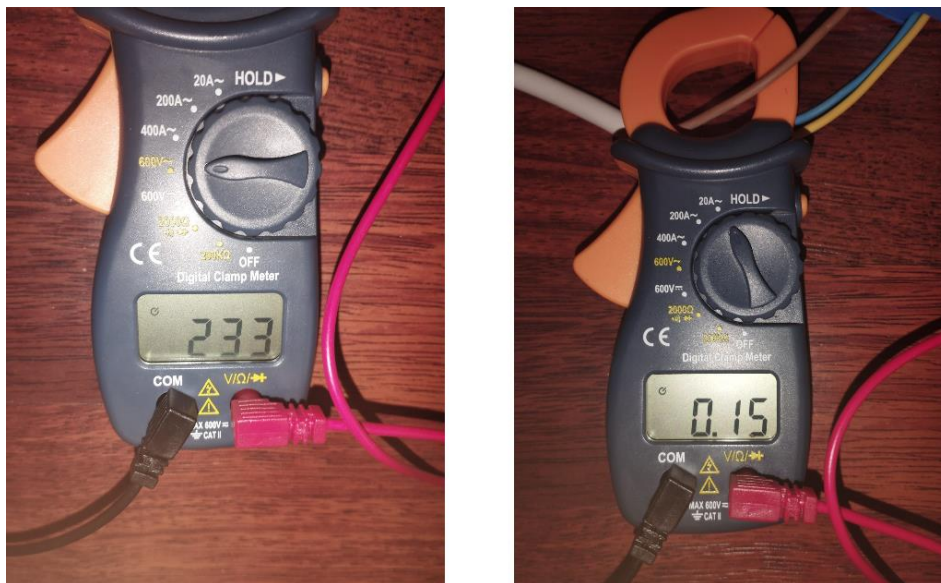


Figura 62. Valores de referencia en la prueba del ventilador.

De este modo, los valores se han ido recogiendo en la plataforma en línea y han dado un aspecto como el que se muestra en las siguientes gráficas.

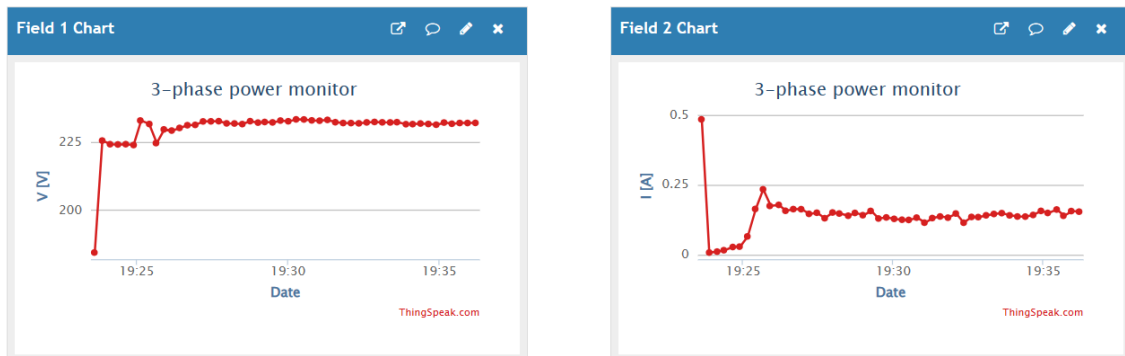


Figura 63. Tensión y corriente durante la prueba.

Si bien se observan anomalías al inicio, estos datos no se han tenido en cuenta en los resultados debido a que son fruto del ruido y las calibraciones que se producen en el instante de la puesta en marcha del dispositivo y la carga del código en el microcontrolador.

Una vez finalizados los 10 minutos, se han exportado los datos en formato .csv para su análisis en Excel. Si representamos de nuevo el error porcentual respecto la medida real de ambos sensores, obtenemos las siguientes gráficas.

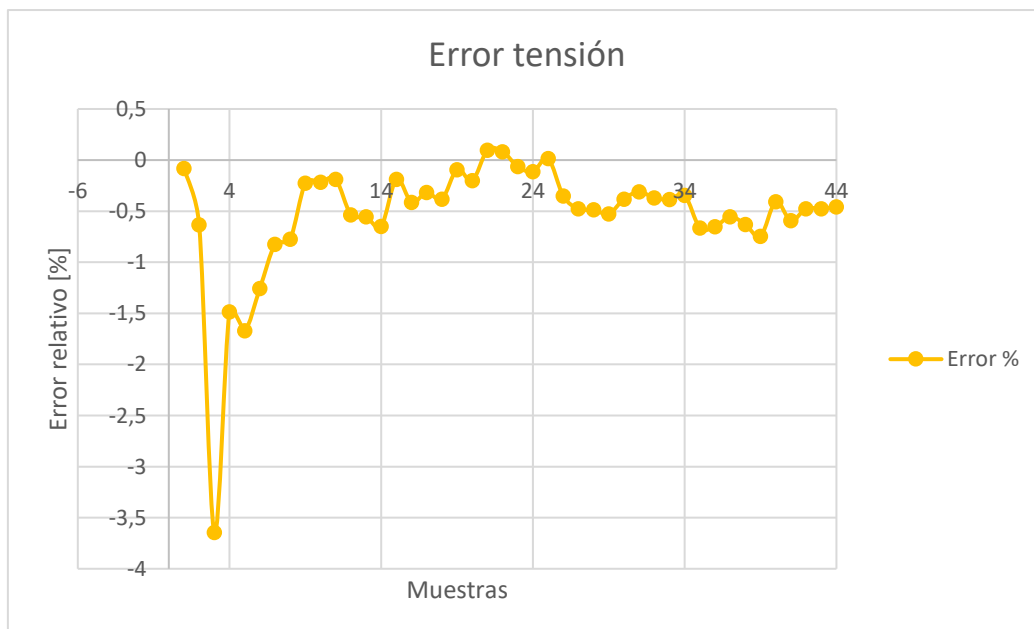


Figura 64. Error relativo de las muestras de tensión.



Figura 65. Error relativo de las muestras de corriente.

Se puede observar como en ambos casos existe una muestra que presenta valores anómalos que no siguen el patrón del resto, que son similares. Teniendo en cuenta todas las muestras se obtienen valores medios del error en módulo del 0,536% para la tensión, cuyo valor encaja dentro de los intervalos del criterio de precisión, y del 3,532% para la corriente, cuyo valor se excede del esperado.

4.3. Análisis preliminar de los resultados

Tras la realización de todas estas pruebas, que han servido para validar el código del programa y los cálculos, así como los ajustes necesarios para el correcto funcionamiento de los sensores, se puede extraer una primera conclusión, y es que con los resultados obtenidos se observa como las medidas de tensión son altamente precisas, por lo que se establece que la selección de los ZMPT101b como sensores de tensión ha sido una buena decisión, ya que se correlacionan los criterios de diseño planteados con los valores de las medidas extraídas en las experiencias reales.

No obstante, para las lecturas de los sensores de corriente SCT-013, se ha determinado que su precisión no se ajusta del todo a los valores previstos. Sin embargo, aún sin cumplir de manera exacta los intervalos esperados, se han logrado resultados relativamente adecuados para un prototipo de estas características.

5. Planificación

Para la ejecución del proyecto, en un inicio se dividió en 4 fases, cada una con unos hitos a conseguir en plazos de tiempo limitados, dado el alcance temporal del proyecto.

Sin embargo, debido a problemas relacionado con la logística de envíos de algunos de los componentes, se tuvo que prorrogar la finalización a septiembre, inicialmente prevista para finales de junio, por lo que se reajustaron algunas de las tareas a realizar.

A continuación, se presenta un diagrama de Gantt, separado por las distintas fases y sus actividades.

PLANIFICACIÓN

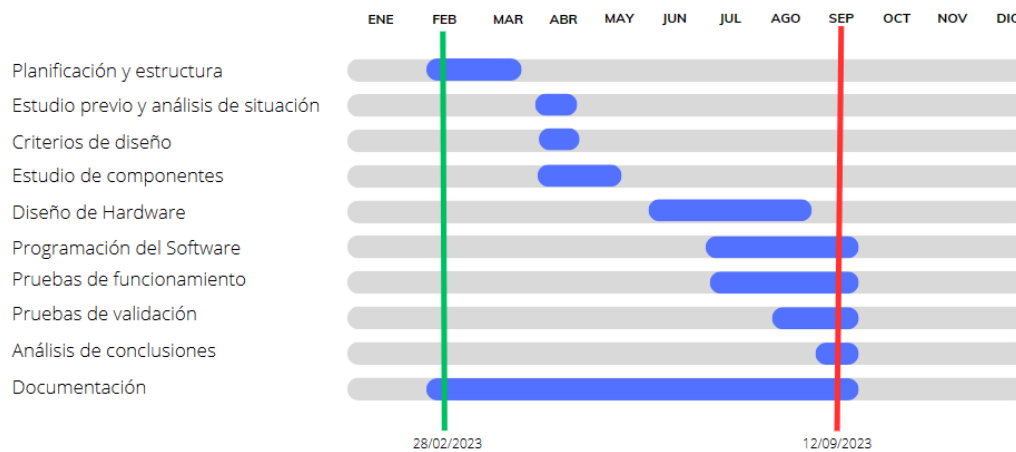


Figura 66. Diagrama de Gantt.

De este modo, se ha incurrido en un total de 300 horas aproximadamente, separadas en las siguientes partidas.

Actividad	Horas invertidas aproximadas
Construcción y prototipaje	30
Programación	100

Pruebas y análisis	70
Búsqueda de información	70
Redacción de memoria	30

Tabla 2. Horas invertidas en el proyecto por actividad.

6. Estudio económico

En este apartado se recoge la información del proyecto que hace referencia a los gastos incurridos en el mismo, así como la estimación aproximada de otras partidas de gasto referentes al coste de ingeniería y herramientas utilizadas.

En referencia al coste de los materiales fungibles para la construcción del prototipo, se incluyen en la siguiente tabla los costes de adquisición de los diferentes componentes:

Concepto	Coste unitario [€/ud.]	Coste total [€]
1x Placa de desarrollo ESP32 Dev Kit C	9,00	9,00
3x Módulo sensor de tensión ZMPT101b	1,00	1,00
3x Módulo sensor de corriente (SCT-013 + Adaptador de señal)	16,37	49,12
4x <i>Protoboard</i> mini	5,90	5,90
1x Juego de 10 cables puente M-H	2,73	2,73
1x Juego de 10 cables puente M-M	2,73	2,73
1x Pulsador digital	1,69	1,69
1x Pantalla LCD RGB 16x2	11,85	11,85
1x Caja estanca ABS 200X120X75	19,00	19,00
1x Mini Multímetro Digital	10,70	10,70
	Subtotal	113,72
	I.V.A 21%	137,60

Tabla 3. Gastos de materiales fungibles.

En cuanto al gasto de ingeniería, si tenemos en cuenta las horas incurridas en el proyecto en cada una de sus fases, que representan un total de 300 horas, y teniendo en cuenta valores estándar de coste hora para actividades de ingeniería, si tenemos en cuenta un valor de 25 €/h para actividades de prototipaje, pruebas de funcionamiento y

programación *Software*, y un valor de 15 €/h para la redacción de documentación técnica, se obtiene un gasto de 5.450 €, que aplicando el 21% de I.V.A 6.594,50 €.

Por último, si tenemos en cuenta los gastos energéticos en tanto en la realización de las pruebas del prototipo, como el consumo generado por el propio ordenador donde se ha realizado el proyecto, se obtiene la siguiente tabla. Se toma el valor medio del precio del kWh a 0,17 € (I.V.A incluido).

Concepto	Tiempo de uso [h]	Consumo [kW]	Coste total [€]
Ensayo con ventilador	0,17	0,05	~ 0
Ensayo con plancha	0,017	2	0,01
Ensayo con secador	0,017	2,2	0,01
Ordenador portátil	300	0,041	2,09
		Subtotal	2,11

Tabla 4. Gastos energéticos.

Así pues, en término económicos, el proyecto ha tenido un coste aproximado total de **6.734,21 €**.

7. Estudio ambiental

Haciendo alusión al propio propósito del proyecto, se debe tener en cuenta el impacto ambiental y el alcance energético que se ha producido durante la realización del mismo. En primer lugar, el simple hecho de haber trabajado tantas horas en un dispositivo electrónico como es un ordenador portátil, el cual consume en función de las tareas simultáneas que éste realiza, se puede contabilizar con un total de 12,3 kWh, como se ha mencionado en el apartado anterior.

Por otro lado, la alimentación del prototipo en conjunto (microcontrolador, sensores, pantalla LCD, etc.) también es un factor para tener en cuenta. Dado que se ha trabajado un total de 130 horas entre programación y pruebas supone un gasto energético, aunque su cuantificación es complicada.

Adicionalmente, como se ha mencionado en el estudio económico, la realización de las pruebas con los electrodomésticos ha generado un gasto de 0,08 kWh.

Por último, es necesario comentar que debido a que la adquisición de los sensores se ha realizado a países extranjeros, se ha contribuido negativamente a la huella de carbono por el transporte de mercancías.

8. Estudio social y de igualdad de género

En consonancia con el contexto del proyecto, se podría concluir que a nivel social el impacto que puede generar es positivo. La divulgación de los conocimientos y prácticas que se han expuesto a lo largo de esta memoria permiten entender tanto desde una perspectiva puramente técnica como económica y social el impacto que puede tener el control y supervisión del consumo energético.

Un aspecto esencial para comprobar que el prototipo desarrollado no discrimina por razones de género, raza o estatus social es que pretende ser usado como herramienta didáctica, por lo que en sí mismo es un objeto que ha sido concebido para que cualquiera pueda utilizarlo de manera sencilla e intuitiva, y permite los ajustes necesarios para adaptarlo a cada usuario que lo utiliza.

Además, su aplicación a nivel real podría solucionar problemáticas para personas con dificultades para acceder a los conocimientos sobre energía eléctrica y gestión inteligente de los recursos, dada su simplicidad y bajo coste.

9. Conclusiones

Tras la realización del proyecto y la obtención de un primer prototipo de tipo no comercializable, se han llegado a una serie de conclusiones respecto a los objetivos y requerimientos planteados en un inicio.

A nivel macroscópico, se puede concluir que el propósito principal del proyecto, que era de conseguir implementar un prototipo de analizador de redes trifásicas con la capacidad de transmitir y gestionar datos de manera tanto física como virtual de manera remota, se ha conseguido de manera relativamente exitosa.

En cuanto al diseño puramente conceptual, tanto de las conexiones entre distintos dispositivos, como interfaces gráficas y del código de cálculo y tratamiento de datos, se ha logrado un resultado similar a dispositivos análogos.

Gracias al estudio de los componentes actuales que se suelen incorporar en proyectos IoT de características parecidas, se ha llegado a una selección final satisfactoria dados los resultados obtenidos en las fases de pruebas. Además, gracias a las modificaciones que permiten tanto el Hardware como el Software, es posible realizar análisis de funcionamiento y pruebas por separado para estudiar y comprender los mecanismos del aparato, por lo que es perfectamente aplicable a tareas didácticas.

Por último, gracias a la fiabilidad que ofrece se puede aplicar para tareas de monitoreo de consumo en el ámbito de los instrumentos de baja potencia y la gestión energética de instalaciones domésticas, gracias a la opción de usar cada una de las tres partes del analizador por separado.

No obstante, durante la ejecución del proyecto, se han ido produciendo eventos y limitaciones que han entorpecido en cierto grado la correcta obtención de un analizador de redes trifásicas íntegro.

Una de ellas, y de las más importantes, ha sido la de no conseguir exportar los datos de las tres líneas que ofrece el aparato de manera remota, debido a que el microcontrolador seleccionado para el proyecto no disponía de la capacidad de utilizar el módulo *Wi-Fi* mientras se usaban los convertidores ADC2, e imposibilitaba otra configuración a la finalmente aplicada por restricciones de uso de los GPIO.

Por otro lado, para las calibraciones del sensor de corriente, no se ha logrado el ajuste preciso a los criterios de diseño, obteniendo desviaciones que si bien se pueden considerar relativamente bajas, permiten una optimización ya sea a nivel de código o incluso llegando a la sustitución de algunos componentes.

9.1. Futuras actualizaciones

Debido al largo tiempo de preparación, estudio e implementación que requiere la obtención de un analizador de redes altamente funcional, se han detectado puntos de mejora a incorporar en el futuro.

Uno de ellos radica en la capacidad de poder ser conectado a instalaciones trifásicas que carecen de acceso al neutro, ya que como se ha mencionado, el aparato diseñado requiere de tensiones máximas de entrada de 250 V, y en las instalaciones trifásicas convencionales la tensión entre fases suele tomar valores nominales de hasta 400 V, por lo que el prototipo del presente proyecto no puede ser usado.

Otra futura mejora podría ser la de incluir un módulo de conexión remota externo, estudiando las diferentes maneras de enviar datos vía *Wi-Fi* o *Bluetooth*. Incluso podría ser una opción incluir algún adaptador para almacenar los datos en un disco duro externo o un lápiz de memoria, para asegurarse de recopilar los datos de manera correcta en caso de desconexión de la red durante la puesta en marcha del dispositivo.

Por último, a nivel más práctico y ergonómico, para facilitar otros aspectos que están relacionados con la maniobrabilidad del aparato, podría incluirse un modo diferente de alimentación externa, tipo batería o un transformador para que se pueda conectar directamente a un enchufe de 230 V.

10. Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a Andreas, mi tutor y mentor en este proyecto, por aceptar mi propuesta y ayudarme en aquellos aspectos del trabajo, facilitando el desarrollo hasta llegar a la solución propuesta.

A mis amigos y familiares, por apoyarme en mis decisiones, por los consejos recibidos y por guiarme durante todas las etapas de mi vida.

A la universidad, por darme todos los conocimientos que he adquirido todos estos años y que me han permitido convertirme en un futuro ingeniero.

Por último, al lector que se interese en este trabajo, al que he dedicado mi tiempo y esfuerzo y espero le haya despertado curiosidad.

11. Bibliografía

- [1] BACHMID, A. *ZMPT101b-arduino*. Indonesia. 2023. [<https://github.com/Abdurraziq/ZMPT101B-arduino>, última consulta: agosto 2023].
- [2] COMBATRONICS ONLINE. *ZMPT101B Sensor de tension alterna (1/2): Caracisticas y forma de onda de salida*. España. 2 enero 2022. [Vídeo]. [https://www.youtube.com/watch?v=4_P5EYhPsxY, última consulta: julio 2023].
- [3] DFROBOT. *SKU:SEN0211*. Shanghai. 2023. [https://wiki.dfrobot.com/Gravity_Analog_AC_Current_Sensor_SKU_SEN0211, última consulta: abril 2023].
- [4] ESPRESSIF SYSTEMS. *Analog to Digital Converter. Overview*. Shanghai. 2020. [<https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.2/esp32/api-reference/peripherals/adc.html>, última consulta: agosto 2023].
- [5] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32. Technical Reference Manual*. Shanghai. 2023. [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_technical_reference_manual_en.pdf#sensor, última consulta: marzo 2023].
- [6] ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series. Datasheet*. Shanghai. 2023. [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf, última consulta: agosto 2023].
- [7] ELECTRONIC CLINIC. *Arduino Home Energy Monitor using CT Clamp Current Sensor & ZMPT101B AC Voltage Sensor*. India. 17 julio 2023. [Vídeo]. [<https://www.youtube.com/watch?v=193DiCxWhkY>, última consulta: setiembre 2023].
- [8] INGENIERO EN CASA. *Estación meteorológica wifi con ESP32 y ThingSpeak*. España. 31 agosto 2019. [Vídeo]. [<https://www.youtube.com/watch?v=LMTtIC2jKUg>, última consulta: julio 2023].
- [9] MATHWORKS. *Learn more about ThingSpeak*. 2023. [https://thingspeak.com/pages/learn_more, última consulta: septiembre 2023].

- [10] RODRÍGUEZ POZUETA, M. A. *Colección: electrotecnia para ingenieros no especialistas. Circuitos de corriente alterna trifásica.* España. [<https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Trif%C3%A1sica.pdf>, última consulta: septiembre 2023].
- [11] RUIZ GARCÍA, M. *ICP ¿Para qué sirve y cómo rearmar el limitador de potencia?*. España. 13 junio 2022. [<https://selectra.es/energia/info/que-es/icp>, última consulta: agosto 2023].
- [12] SANTOS, S. *ESP32 SPI Communication: Set Pins, Multiple SPI Bus Interfaces, and Peripherals (Arduino IDE).* 2022. [<https://randomnerdtutorials.com/esp32-spi-communication-arduino/>, última consulta: junio 2023].
- [13] UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. PEDRA DURÁN, J. *Circuitos monofásicos y trifásicos.* Barcelona. 1993. Última consulta: abril 2023.
- [14] WIKIPEDIA. Microcontrolador. 18 julio 2023. [<https://es.wikipedia.org/wiki/Microcontrolador#>, última consulta: junio 2023].