

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID**  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sistemas Informáticos



**Creación e implantación de un sistema  
IoT basado en ESP-32 para el análisis  
de espectros VIS-NIR**

**PROYECTO FIN DE GRADO**

**Álvaro Lameiro García**  
Grado en Ingeniería de Computadores

Madrid, 2025



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE  
MADRID  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de  
Sistemas Informáticos

**Grado en Ingeniería de Computadores**

# **Creación e implantación de un sistema IoT basado en ESP-32 para el análisis de espectros VIS-NIR**

## **PROYECTO FIN DE GRADO**

**Álvaro Lameiro García**

Grado en Ingeniería de Computadores

Bajo la dirección de:  
Dr. Vicente García Alcántara

Madrid, 2025

Título: Creación e implantación de un sistema IoT basado en ESP-32 para el análisis de espectros VIS-NIR

Autor: Álvaro Lameiro García

Grado en Ingeniería de Computadores

Dirección:

Dr. Vicente García Alcántara



*<Dedicatoria (opcional) >*



# Agradecimientos

<Página de agradecimientos (opcional)>





# Abstract

<Abstract in English: maximum of 4000 characters, plain text (without symbols), structured summary of the thesis (introduction or motivation, objectives, findings and conclusions)>

# Resumen

<Resumen en español: máximo de 4000 caracteres, texto plano (sin símbolos), resumen estructurado de la tesis (introducción o motivación, objetivos, hallazgos y conclusiones)>

# I. Índice

II.	ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
III.	LISTA DE TABLAS .....	XII
IV.	ABREVIATURAS Y ACRÓNIMOS.....	XIII
1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	ESTADO DE LA TÉCNICA.....	2
2.1.	INTRODUCCIÓN.....	2
2.2.	ALCANCE DEL TEMA .....	2
2.3.	REVISIÓN.....	3
2.3.1.	APLICACIONES DEL ANÁLISIS VIS-NIR.....	3
2.3.1.1.	AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y ANÁLISIS DE LOS SUELOS .....	3
2.3.1.2.	INDUSTRIA ALIMENTARIA .....	4
2.3.2.	DISPOSITIVOS VIS/NIR .....	4
2.3.2.1.	CLASIFICACIÓN DE DISPOSITIVOS VIS/NIR.....	4
2.3.2.2.	APLICACIONES Y DESAFÍOS.....	6
2.3.2.3.	TABLA COMPARATIVA.....	6
2.3.2.4.	JUSTIFICACIÓN DE LA ELECCIÓN DEL SENSOR.....	7
2.3.3.	CONCLUSIONES.....	7
3.	MARCO TEÓRICO .....	9
3.1.	SISTEMAS EMBEBIDOS.....	9
3.2.	ESP32 .....	10
3.3.	ESPRESSIF SYSTEMS .....	11
3.4.	PROTOCOLO MQTT .....	12
3.5.	I2C .....	12
3.6.	INTERNET OF THINGS (IOT) .....	12
3.7.	PLATAFORMA THINGSBOARD .....	12
3.8.	MACHINE LEARNING APLICADO AL ANÁLISIS ESPECTRAL .....	13
3.9.	FUNDAMENTOS DE ESPECTROSCOPÍA VIS/NIR .....	13
	MATERIAL Y MÉTODOS .....	19
IV.1.	<TÍTULO DE SECCIÓN> .....	19
IV.1.1.	<Título de subsección>.....	19
	RESULTADOS .....	21
IV.2.	<TÍTULO DE SECCIÓN> .....	21
IV.2.1.	<Título de subsección>.....	21
	DISCUSIÓN .....	23
IV.3.	<TÍTULO DE SECCIÓN> .....	23

IV.3.1.      <Título de subsección>.....	23
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>25</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>27</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>29</b>

## II. Índice de Figuras

<i>Ilustración 1. Espectro NIR del etanol líquido [5] .....</i>	<i>2</i>
<i>Ilustración 2. El espectro electromagnético [6] .....</i>	<i>3</i>
<i>Ilustración 3: Sensor SM245 de Ocean Optics con rango de 200 a 1050nm .....</i>	<i>5</i>
<i>Ilustración 4: Analizador de Calidad de Producto (General) de Félix Instruments .....</i>	<i>5</i>
<i>Ilustración 5: Componentes de un sistema empotrado .....</i>	<i>9</i>
<i>Ilustración 6.....</i>	<i>16</i>

### III. Lista de Tablas

Tabla 1: Comparación entre sensores para espectrometría VIS/NIR .....	6
Tabla 2.2: Componentes del documento de tesis .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

## IV. Abreviaturas y Acrónimos

UPM	Universidad Politécnica de Madrid
PFG	Proyecto de Fin de Grado
NIR	<i>Near Infrared</i> (Infrarrojo cercano)
VIR	<i>Visible Infrared</i> (Infrarrojo visible)
CH	Carbono
PH	Potencial de Hidrógeno: Índice utilizado en química que expresa el grado de acidez o alcalinidad de una disolución acuosa
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo emisor de luz)
IoT	Internet of Things (Internet de las cosas)
CPU	<i>Central Processing Unit</i> (Unidad Central de Procesamiento)
SOC	<i>System on Chip</i> (Sistema en Chip)
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
I2C	<i>Inter Integrated Circuit</i>
I2S	<i>Inter IC Sound</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>





# 1. Introducción

El agua y el suelo son dos recursos naturales esenciales para la vida en la Tierra. Su disponibilidad, calidad y estado determinan tanto la salud de los ecosistemas como el desarrollo de actividades básicas que sustentan el desarrollo humano, entre ellas la agricultura, la ganadería o la industria, entre otros. En un mundo afectado por el cambio climático, el sobrecrecimiento demográfico y la escasez de recursos, se vuelve prácticamente obligatorio implementar herramientas eficientes y sostenibles para su evaluación y su gestión.

Estos problemas no son ajenos a nuestro país, y aparecen en varias Comunidades Autónomas:

- En la Región de Murcia se advierte de estar “en el vórtice de la desertificación española al ser la provincia que está más cerca de convertirse en un desierto” debido principalmente al pobre contenido en nutrientes del suelo y a la mala calidad del agua de riego [1].
- Al mismo tiempo, la Comunidad de Madrid advierte de “la proliferación masiva de cianobacterias en las aguas del Parque Nacional de Monfragüe” que pueden “producir toxinas perjudiciales para la salud humana y ambiental” [2]

Tradicionalmente, el análisis de estos recursos se ha llevado a cabo mediante una serie de métodos de laboratorio los cuales, aunque precisos, resultan costosos tanto a nivel de equipamiento como de tiempo invertido. Es en este escenario donde surgen las técnicas espectroscópicas, especialmente las del rango visible (VIR) y del infrarrojo cercano (NIR). Estas técnicas permiten realizar análisis rápidos, no destructivos con la muestra e *in situ*, lo que facilita el control y monitoreo del recurso en tiempo real

## 2. Estado de la Técnica

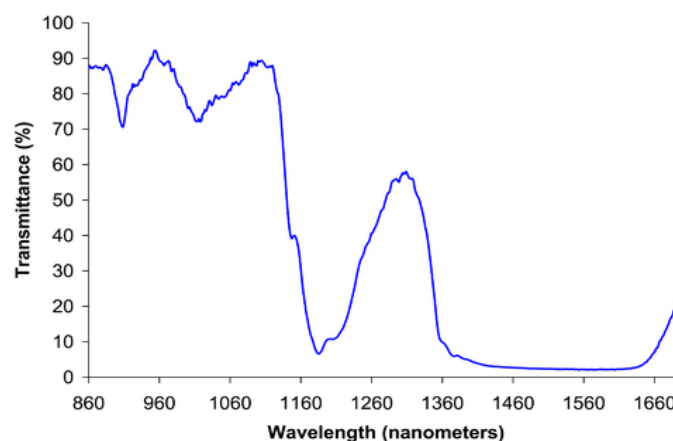
### 2.1. Introducción

El objetivo de este apartado es presentar un análisis exhaustivo de las tecnologías existentes relacionadas con el análisis espectral en el rango visible e infrarrojo cercano (VIS y NIR), tanto a nivel de técnicas analíticas como de dispositivos. Con ello se pretende contextualizar la propuesta de este Proyecto de Fin de Grado en el marco de las soluciones tecnológicas actuales así como encontrar las posibles limitaciones que justifiquen la realización de este estudio.

### 2.2. Alcance del tema

La espectroscopía estudia la cantidad de luz que absorbe, refleja o dispersa un objeto. En otras palabras, fragmenta el haz de luz y mide las diferentes longitudes de onda visible y no visible con el objetivo de identificar o estudiar diferentes sustancias químicas presentes en la muestra analizada [3].

Dicho método de análisis se apoya en el hecho de que las moléculas absorben ciertas frecuencias características de su estructura [4], como se puede ver en la siguiente figura.



*Ilustración 1. Espectro NIR del etanol líquido [5]*

Esta técnica aplica a las longitudes de onda desde los rayos gamma (0.01nm) hasta las microondas (> 30  $\mu\text{m}$ ) y radiofrecuencia (> 100  $\mu\text{m}$ ), pero para este proyecto el estudio se va a enfocar en el rango visible (380 a 750 nm) y el infrarrojo cercano ( $\approx$  780nm a 3000nm).

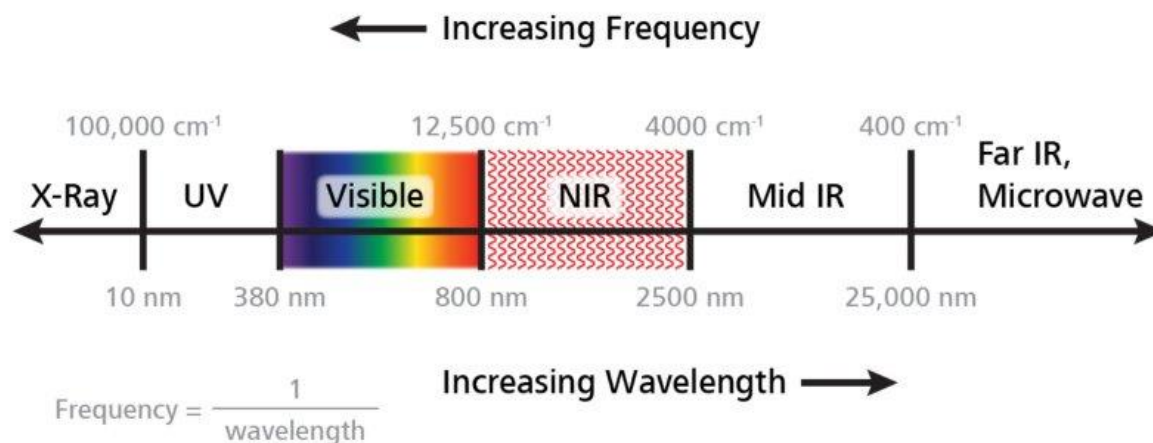


Ilustración 2. El espectro electromagnético [6]

## 2.3. Revisión

Esta revisión se ha llevado a cabo principalmente utilizando la herramienta Google Scholar [7] para la búsqueda de libros y artículos científicos así como el navegador Google [8] para la búsqueda de productos y sensores relacionados con el análisis explicado en el punto anterior.

### 2.3.1. Aplicaciones del análisis VIS-NIR

#### 2.3.1.1. Agricultura de precisión y análisis de los suelos

La espectroscopía VIS-NIR se ha utilizado con éxito para predecir propiedades fisicoquímicas del suelo, tales como el contenido de CH orgánico, la textura o el PH. Con esto se permite analizar las propiedades del suelo en base a su reflectancia, reduciendo así la necesidad de análisis químicos de laboratorio. En el estudio *On-line measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor* se demostró que mediante modelos calibrados con espectros VIS-NIR es posible predecir con alta precisión propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos, facilitando así una caracterización más eficiente y económica para aplicaciones agronómicas [9].

### 2.3.1.2. Industria alimentaria

Otra prometedora aplicación del análisis espectroscópico se encuentra en el estudio *Analyzing the quality parameters of apples by spectroscopy from Vis/NIR to NIR region: A comprehensive review* donde se utilizan los dos rangos de onda comentados anteriormente para evaluar una serie de parámetros clave, con el objetivo de asegurar la calidad de las manzanas. Se destaca la capacidad de esta técnica para realizar mediciones rápidas y no destructivas de la fruta, lo que lo convierte en un procedimiento a tener en cuenta para el control de calidad en la industria frutícola [10].

La espectroscopía VIS/NIR ha sido utilizada en diversas etapas de la cadena de producción de las manzanas, permitiendo así evaluar las siguientes cualidades:

- **Evaluación interna:** Gracias al control de diversos elementos químicos (Éster, Alhendín, Cetona y alcohol) se han conseguido predecir ciertos parámetros como la calidad del sabor, el buen aroma, la textura interna o el contenido nutricional, entre otros.
- **Evaluación externa:** Mediante el análisis NIR, se pueden realizar predicciones del color y tamaño que tendrán las manzanas inmaduras una vez que finalicen su proceso de maduración.
- **Otros parámetros:** Esta técnica también se puede utilizar para optimizar las condiciones de almacenamiento de las manzanas, adivinar su origen o controlar el grado de madurez de la muestra, permitiendo así establecer una fecha de consumo preferente.

### 2.3.2. Dispositivos VIS/NIR

En este apartado se va a presentar un panorama general de los dispositivos disponibles para la espectroscopía VIS/NIR explorando sus características, aplicaciones y limitaciones con el objetivo de determinar que sensor se va a utilizar para esta propuesta de Proyecto de Fin de Grado.

#### 2.3.2.1. Clasificación de dispositivos VIS/NIR

Los dispositivos espectroscópicos se pueden clasificar en tres categorías principales:

- Equipos de laboratorio: Como por ejemplo los de **Ocean Optics**, que ofrecen una altísima resolución espectral y precisión, pero son extremadamente costosos y requieren de condiciones controladas.



*Ilustración 3: Sensor SM245 de Ocean Optics con rango de 200 a 1050nm*

- Dispositivos portátiles: Como el **Felix F-750**, ofrecen un análisis detallado sin la necesidad de hacerse dentro de un laboratorio, lo que permite realizar controles *in situ*.



*Ilustración 4: Analizador de Calidad de Producto (General) de Félix Instruments*

- Sistemas hiperespectrales por imagen: Una herramienta extremadamente cara y poderosa, que permite recopilar y procesar información a lo largo de **todo** el espectro electromagnético.

Todos estos dispositivos utilizan técnicas de detección en el rango de 400 a 2500 nm, con sensores basados en silicio, en su mayoría. Sus fuentes de iluminación pueden ser halógenas, LEDs o láseres.

### 2.3.2.2. Aplicaciones y desafíos

Este tipo de sensores se emplea ampliamente en la agricultura de precisión, farmacología, industria química, medioambiente y más. Sin embargo, su integración en proyectos IoT de bajo coste se ve limitada por factores como:

- Elevado precio de muchos espectrómetros comerciales ( $> 1000\text{€}$ )
- Dimensiones físicas que dificultan su integración en sistemas embebidos
- Necesidad de complejos modelos de calibración

### 2.3.2.3. Tabla comparativa

*Tabla 1: Comparación entre sensores para espectrometría VIS/NIR*

Dispositivo / Sensor	Rango espectral	Nº de bandas	Resolución espectral	Interfaz	Tamaño / Integración	Precio aprox.	Observaciones
<b>Ocean Optics Flame</b> [11]	350–1000 nm	Continuo	~1.5 nm	USB	Voluminoso (de laboratorio)	$> 2000 \text{ €}$	Alta precisión. Requiere PC.
<b>Felix F-750</b> [12]	729–975 nm	Continuo	-	Propietario	Portátil, autónomo	~4000 €	Diseñado para frutas. Muy fiable.
<b>NIRScan Nano (TI)</b> [13]	900–1700 nm	Continuo	~10 nm	I <sup>2</sup> C / USB	Compacto	~1000 €	Versátil, pero caro. Requiere software.
<b>SCiO (Consumer Physics)</b> [14]	740–1070 nm	Pocos puntos	-	Bluetooth	Muy compacto (de consumo)	~300–500 €	Uso limitado. Plataforma cerrada.
<b>AS7265x</b> [15]	410–940 nm	18 bandas (fijas)	~20 nm (por banda)	I <sup>2</sup> C / UART	Muy compacto. Ideal para IoT	~80–120 €	Buena cobertura VIS-NIR. Integrable en ESP32.

#### 2.3.2.4. Justificación de la elección del sensor

En el contexto de este trabajo, que busca desarrollar un sistema IoT de bajo coste y portátil para el análisis espectral VIS/NIR, se ha optado por el sensor **AS7265x**, fabricado por AMS (Austria Microsystems). Este módulo integra tres sensores en un único sistema, lo que permite cubrir 18 longitudes de onda entre 410 nm y 940 nm.

Las razones clave para la elección han sido:

- Compromiso entre prestaciones y precio: Ofrece una resolución espectral algo discreta, pero suficiente para muchas actividades prácticas y a un coste muy inferior al del resto de espectrómetros (< 90 €)
- Fácil integración: Se comunica mediante I2C, por lo que es compatible con microcontroladores ESP32 y puede integrarse en dispositivos portátiles.
- Iluminación integrada: Incorpora 1 dispositivo de iluminación UV de 405 nm, 1 dispositivo de iluminación IR de 875 nm y un LED blanco de 5700K.

Si bien no alcanza la resolución de los espectrómetros de laboratorio, el AS7265x representa una solución robusta, accesible y flexible para sistemas IoT como el que se va a realizar en este proyecto.

#### 2.3.3. Conclusiones

A lo largo de este apartado se ha evidenciado el amplio potencial de la espectroscopía del rango visible e infrarrojo cercano (VIS/NIR) como herramienta de análisis no destructivo en múltiples ámbitos. Los estudios revisados reflejan cómo esta técnica puede reducir la dependencia de análisis químicos tradicionales ofreciendo una alternativa más rápida, sostenible y económicamente viable.

En cuanto a los dispositivos disponibles, se ha evidenciado que, si bien los equipos comerciales de alta gama ofrecen resultados muy fiables, su elevado coste y dimensiones limitan su uso en la creación de aplicaciones IoT.

Frente a estas limitaciones, sensores como el AS7265x ofrecen una solución equilibrada y fácilmente integrable con microcontroladores, lo cual abre un nuevo marco de investigación y desarrollo en el que se basará este proyecto.





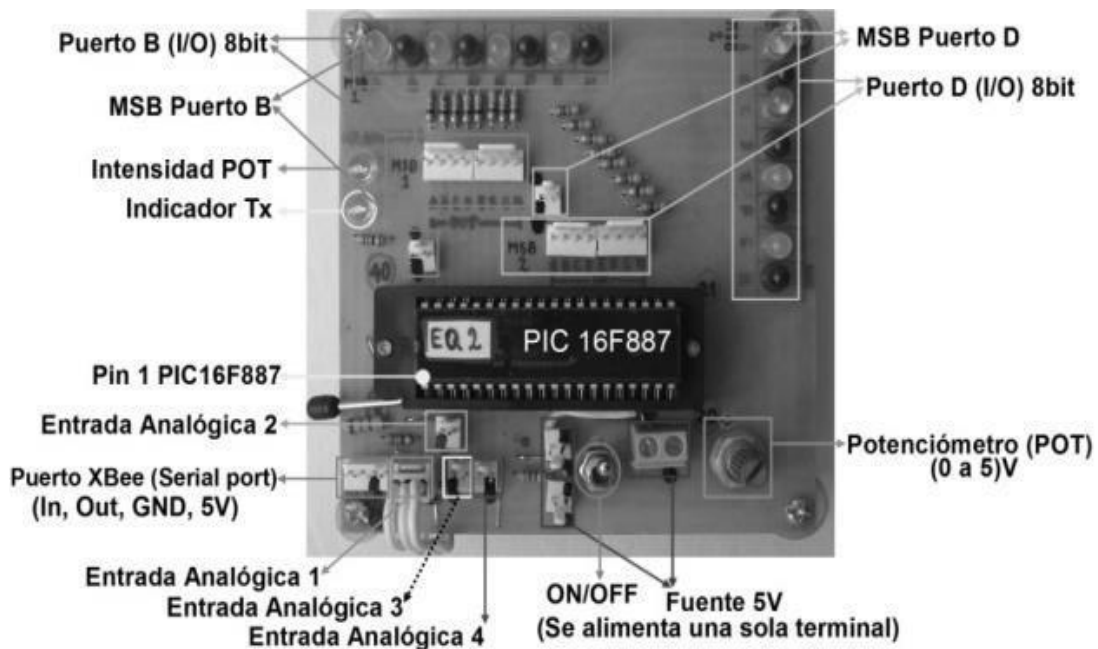
### 3. Marco teórico

#### 3.1. Sistemas embebidos

Un sistema embebido es un sistema de computación compuesto por una combinación de hardware y software diseñado para realizar una o algunas pocas funciones específicas.

Destacan por su fiabilidad, eficiencia energética y bajo coste de fabricación. Además, se pueden programar tanto en lenguajes de bajo nivel (p.ej. ensamblador) como en C o C++, cuando el tiempo de respuesta del sistema no es un factor crítico.

Los componentes principales de un sistema embebido suelen ser la CPU, puertos de comunicaciones, módulos de Entrada/Salida y conversores Analógico/Digital y Digital/Analógico, como se puede comprobar en la imagen [16] [17].



*Ilustración 5: Componentes de un sistema empotrado [18]*

## 3.2. ESP32

Los ESP32 son una familia de microcontroladores realizados por Espressif Systems ampliamente utilizados en el mundo de IoT por su bajo coste, versatilidad y eficiencia energética. Estos dispositivos integran en un único chip capacidades de procesamiento, conectividad inalámbrica y una amplia gama de interfaces de comunicación, lo que los convierte en una solución idónea para el desarrollo de sistemas embebidos.



*Ilustración 6: Algunos microcontroladores de la familia ESP32 [19]*

Para la realización de este PFG se ha escogido el **ESP32 Dev Kit C V2** de AZ Delivey [20], uno de los módulos más populares de la familia basado en el SOC ESP32-WROOM 32 que incluye todo lo necesario para desarrollar aplicaciones IoT compactas y eficientes.

Sus principales características técnicas son:

- Fuente de alimentación y programación a través de micro USB-B.
- Procesador ESP-WROOM-32 con una CPU dual-core Tensica Xtensa LX6 con una frecuencia de reloj de hasta 240 MHz, Bluetooth 4.2 y WLAN-WIFI.
- 512 KB de SRAM integradas en un único chip controlador así como 16 MB de memoria flash.
- 32 Pines E/S digitales, entre los cuales se encuentran interfaces SPI, I2C, I2S y UART como se muestra en la imagen siguiente:

## ESP32 PINOUT DIAGRAM

### ESP32-WROOM-32

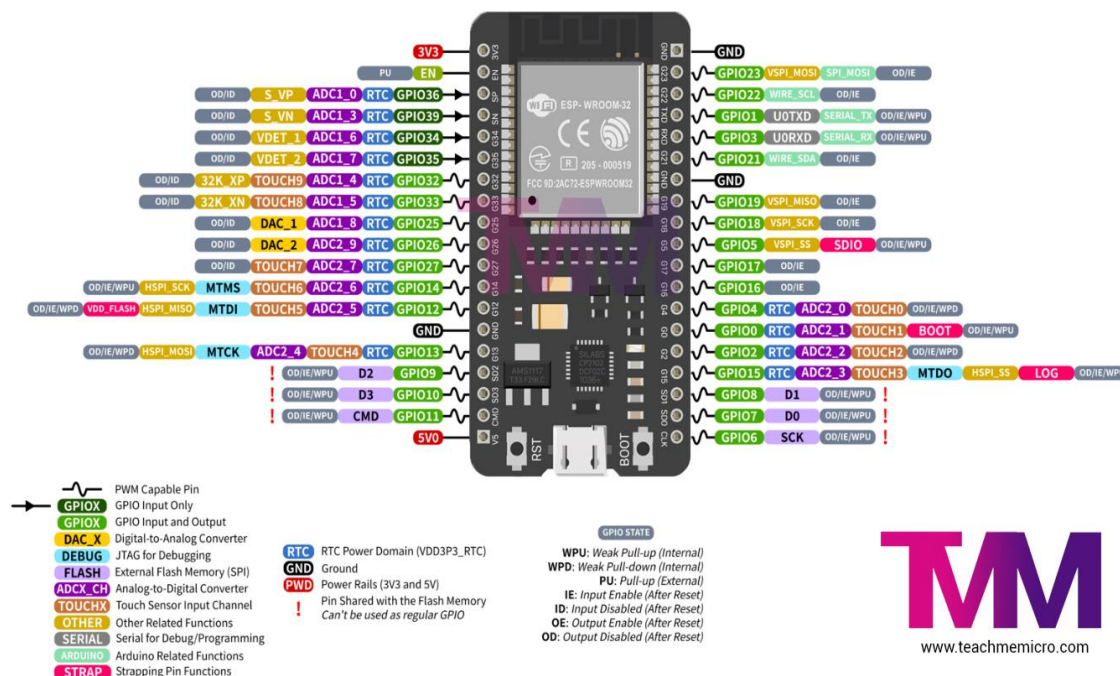


Ilustración 7: Diagrama de pines de ESP32-WROOM-32 [21]

### 3.3. Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF)

ESP-IDF es el principal entorno proporcionado por Espressif Systems. Se trata de un framework de desarrollo en C y C++, de bajo nivel y altamente configurable, que permite acceder de forma bastante directa a las funcionalidades del microcontrolador.

A diferencia de otros entornos, como Arduino IDE, el ESP-IDF ofrece una aproximación más profesional, robusta y pensada para aplicaciones profesionales.

En este proyecto, el Framework actúa como capa intermedia entre el hardware y las capas superiores de comunicación y gestión de datos, permitiendo así el control detallado de la adquisición espectral y el manejo del protocolo MQTT para la conexión con la plataforma Thingsboard [22].

### 3.4. Protocolo MQTT

MQTT (*Message Query Telemetry Transport*) es un protocolo ligero y eficiente diseñado para la transmisión de datos entre dispositivos a través de redes con recursos restringidos y ancho de banda limitado [23].

Está basado en la arquitectura publicador/subscriptor y suele operar bajo el protocolo TCP/IP, lo que permite una comunicación asíncrona, ordenada y bidireccional entre dispositivos, aplicaciones, sensores y servidores.

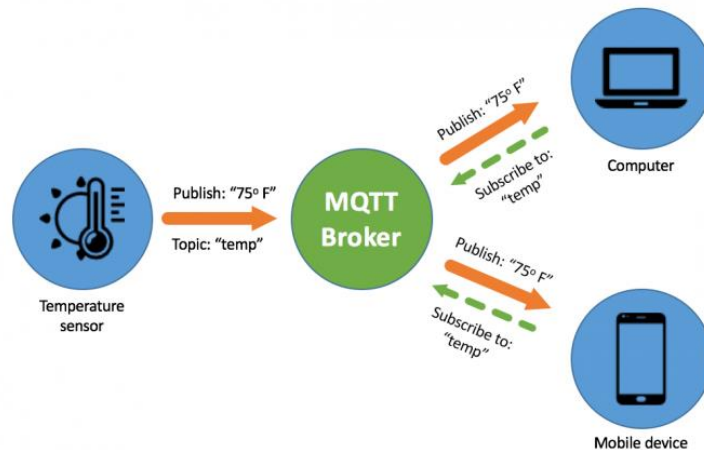


Ilustración 8: Ejemplo de protocolo MQTT [24]

### 3.5. I2C

### 3.6. Internet of Things (IoT)

- Definición y evolución
- Arquitectura de un sistema IoT: sensor → nodo → gateway → nube
- Desafíos: conectividad, escalabilidad, seguridad
- Aplicaciones en agricultura, medio ambiente y automatización
- Rol del ESP32 dentro de un ecosistema IoT

### 3.7. Plataforma ThingsBoard

- ¿Qué es ThingsBoard?

- Funciones principales: recolección de datos, dashboards, alertas, visualización
- Integración con ESP32 vía MQTT
- Ventajas frente a otras plataformas (Blynk, Node-RED, Ubidots)
- Justificación de su uso en el proyecto

### **3.8. Machine Learning aplicado al análisis espectral**

- Conceptos básicos: aprendizaje supervisado, regresión, clasificación
- Técnicas comunes: PLS, regresión lineal, random forest, redes neuronales
- Flujo de trabajo: adquisición → preprocesamiento → entrenamiento → validación
- Herramientas empleadas: plataforma web desarrollada para generar modelos
- Ventajas de integrar ML en un sistema IoT para análisis espectral

### **3.9. Fundamentos de espectroscopía VIS/NIR**

- Principios físicos: absorción, reflectancia, transmitancia
- Rango espectral: Visible (400–700 nm) e Infrarrojo cercano (700–1000/2500 nm)
- Relación entre espectro y propiedades físico-químicas
- Relevancia para agricultura, análisis de suelos y calidad alimentaria
- Necesidad de calibración y preprocesamiento espectral

## Normas de obligado cumplimiento

Las **normas clave** a recordar son:

- Las tres primeras páginas (cubierta, portada y página de créditos) deben utilizar el formato especificado en esta plantilla.
- Las páginas iniciales son obligatorias, a excepción de dedicatoria y agradecimientos.
- El proyecto se presenta en formato electrónico (PDF).
- Idioma: el proyecto puede redactarse en español o en inglés.
- Tamaño de página: A4

- Numeración: Las páginas iniciales – antes del comienzo de los capítulos – utilizan números romanos centrados en el margen inferior, excluyendo la cubierta y la portada, que no deben numerarse. El resto del texto (a partir de la Introducción) utiliza números arábigos centrados en la parte inferior.

**La cubierta:**

- Debe elaborarse utilizando esta plantilla, introduciendo los datos oportunos en los apartados marcados con < > y sin incluir otra información.
- Debe incluir el nombre oficial del centro, en español y sin abreviar (ver [Listado](#)).

**La portada:**

- Debe elaborarse utilizando esta plantilla, introduciendo los datos oportunos en los apartados marcados con < > y sin incluir otra información.
- Debe incluir el nombre oficial del centro, en español y sin abreviar (ver [Listado](#)).
- Debe incluir el nombre completo del alumno.
- Debe incluir el nombre completo del director o tutor (y del codirector si lo hubiese).

**La página de créditos (página i):**

- Debe elaborarse utilizando esta plantilla, introduciendo los datos oportunos en los apartados marcados con < > y sin incluir otra información.
- Incluye datos adicionales del director: puesto e institución (lo mismo para el codirector si lo hubiese).

**El resumen:**

- Se debe incluir un resumen tanto en español como en inglés, independientemente del idioma de la tesis.
- Formato: máximo de 4000 caracteres, texto plano (sin símbolos)

- Estructura: el resumen es una presentación de la tesis y, por tanto, debe tener una estructura clara, incluyendo introducción (o motivación), objetivos, desarrollo y conclusiones.

## Recomendaciones

Por lo general, el cuerpo principal de la tesis abarca varios capítulos, cuyo número y estructura puede variar dependiendo del ámbito de conocimiento y de si se trata de un manuscrito o de una tesis por compendio de publicaciones. A título orientativo, en esta plantilla se incluyen los siguientes capítulos: Introducción, Estado de la cuestión, Material y métodos, Resultados, Discusión y Conclusiones. La estructura del cuerpo principal de cada proyecto específico debe consultarse con los directores o tutores.

Lo ideal es que cada capítulo esté organizado en secciones y subsecciones, con títulos numerados.

En cuanto a la fuente, los estilos recomendados son Times New Roman, Century, Arial, Book Antiqua, o similares.

Utilizar una plantilla ayuda a utilizar el mismo formato a lo largo de toda la tesis. Es aconsejable utilizar siempre el mismo estilo para incluir citas en el texto, como también recomiendan otros autores (Bell, 2010; Carter & Kumar, 2017; Odena & Burgess, 2017; Rivera Camino, 2014), para dar formato a las tablas (ver Esta técnica aplica a las longitudes de onda desde los rayos gamma (0.01nm) hasta las microondas (> 30  $\mu\text{m}$ ) y radiofrecuencia (> 100  $\mu\text{m}$ ), pero para este proyecto el estudio se va a enfocar en el rango visible (380 a 750 nm) y el infrarrojo cercano ( $\approx$  780nm a 3000nm).

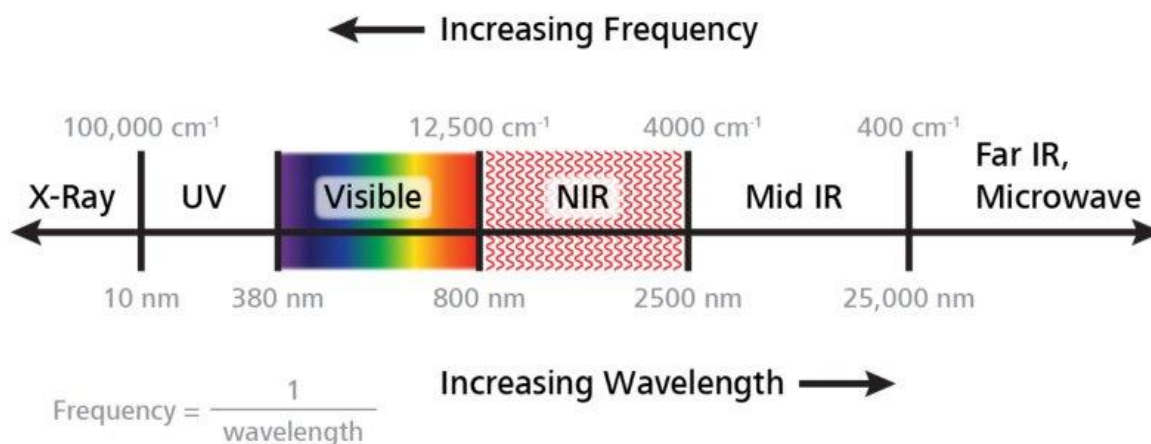


Ilustración 2. El espectro electromagnético



### 3.10. Revisión

Esta revisión se ha llevado a cabo principalmente utilizando la herramienta Google Scholar para la búsqueda de libros y artículos científicos así como el navegador Google para la búsqueda de productos y sensores relacionados con el análisis explicado en el punto anterior.

#### 3.10.1. Aplicaciones del análisis VIS-NIR

##### 3.10.1.1. Agricultura de precisión y análisis de los suelos

La espectroscopía VIS-NIR se ha utilizado con éxito para predecir propiedades fisicoquímicas del suelo, tales como el contenido de CH orgánico, la textura o el PH. Con esto se permite analizar las propiedades del suelo en base a su reflectancia, reduciendo así la necesidad de análisis químicos de laboratorio. En el estudio *On-line measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor* se demostró que mediante modelos calibrados con espectros VIS-NIR es posible predecir con alta precisión propiedades químicas, físicas y biológicas de los suelos, facilitando así una caracterización más eficiente y económica para aplicaciones agronómicas .

##### 3.10.1.2. Industria alimentaria

Otra prometedora aplicación del análisis espectroscópico se encuentra en el estudio *Analyzing the quality parameters of apples by spectroscopy from Vis/NIR to NIR region: A comprehensive review* donde se utilizan los dos rangos de onda comentados anteriormente para evaluar una serie de parámetros clave, con el objetivo de asegurar la calidad de las manzanas. Se destaca la capacidad de esta técnica para realizar mediciones rápidas y no destructivas de la fruta, lo que lo convierte en un procedimiento a tener en cuenta para el control de calidad en la industria frutícola .

La espectroscopía VIS/NIR ha sido utilizada en diversas etapas de la cadena de producción de las manzanas, permitiendo así evaluar las siguientes cualidades:

- **Evaluación interna:** Gracias al control de diversos elementos químicos (Éster, Alhendín, Cetona y alcohol) se han conseguido predecir ciertos

parámetros como la calidad del sabor, el buen aroma, la textura interna o el contenido nutricional, entre otros.

- **Evaluación externa:** Mediante el análisis NIR, se pueden realizar predicciones del color y tamaño que tendrán las manzanas inmaduras una vez que finalicen su proceso de maduración.
- **Otros parámetros:** Esta técnica también se puede utilizar para optimizar las condiciones de almacenamiento de las manzanas, adivinar su origen o controlar el grado de madurez de la muestra, permitiendo así establecer una fecha de consumo preferente.

### 3.10.2. Dispositivos VIS/NIR

En este apartado se va a presentar un panorama general de los dispositivos disponibles para la espectroscopía VIS/NIR explorando sus características, aplicaciones y limitaciones con el objetivo de determinar que sensor se va a utilizar para esta propuesta de Proyecto de Fin de Grado.

#### 3.10.2.1. Clasificación de dispositivos VIS/NIR

Los dispositivos espectroscópicos se pueden clasificar en tres categorías principales:

- Equipos de laboratorio: Como por ejemplo los de **Ocean Optics**, que ofrecen una altísima resolución espectral y precisión, pero son extremadamente costosos y requieren de condiciones controladas.



*Ilustración 3: Sensor SM245 de Ocean Optics con rango de 200 a 1050nm*

- Dispositivos portátiles: Como el **Felix F-750**, ofrecen un análisis detallado sin la necesidad de hacerse dentro de un laboratorio, lo que permite realizar controles *in situ*.



*Ilustración 4: Analizador de Calidad de Producto (General) de Félix Instruments*

- Sistemas hiperespectrales por imagen: Una herramienta extremadamente cara y poderosa, que permite recopilar y procesar información a lo largo de **todo** el espectro electromagnético.

Todos estos dispositivos utilizan técnicas de detección en el rango de 400 a 2500 nm, con sensores basados en silicio, en su mayoría. Sus fuentes de iluminación pueden ser halógenas, LEDs o láseres.

### 3.10.2.2. Aplicaciones y desafíos

Este tipo de sensores se emplea ampliamente en la agricultura de precisión, farmacología, industria química, medioambiente y más. Sin embargo, su integración en proyectos IoT de bajo coste se ve limitada por factores como:

- Elevado precio de muchos espectrómetros comerciales (> 1000€)
- Dimensiones físicas que dificultan su integración en sistemas embebidos
- Necesidad de complejos modelos de calibración

### 3.10.2.3. Tabla comparativa

*Tabla 1: Comparación entre sensores para espectrometría VIS/NIR*

Dispositivo / Sensor	Rango espectral	Nº de bandas	Resolución espectral	Interfaz	Tamaño / Integración	Precio aprox.	Observaciones
Ocean Optics Flame	350–1000 nm	Continuo	~1.5 nm	USB	Voluminoso (de laboratorio)	> 2000 €	Alta precisión. Requiere PC.
Felix F-750	729–975 nm	Continuo	-	Propietario	Portátil, autónomo	~4000 €	Diseñado para frutas. Muy fiable.
NIRScan Nano (TI)	900–1700 nm	Continuo	~10 nm	I²C / USB	Compacto	~1000 €	Versátil, pero caro. Requiere software.
SCiO (Consumer Physics)	740–1070 nm	Pocos puntos	-	Bluetooth	Muy compacto (de consumo)	~300–500 €	Uso limitado. Plataforma cerrada.
AS7265x	410–940 nm	18 bandas (fijas)	~20 nm (por banda)	I²C / UART	Muy compacto. Ideal para IoT	~80–120 €	Buena cobertura VIS-NIR. Integrable en ESP32.

#### 3.10.2.4. Justificación de la elección del sensor

En el contexto de este trabajo, que busca desarrollar un sistema IoT de bajo coste y portátil para el análisis espectral VIS/NIR, se ha optado por el sensor **AS7265x**, fabricado por AMS (Austria Microsystems). Este módulo integra tres sensores en un único sistema, lo que permite cubrir 18 longitudes de onda entre 410 nm y 940 nm.

Las razones clave para la elección han sido:

- Compromiso entre prestaciones y precio: Ofrece una resolución espectral algo discreta, pero suficiente para muchas actividades prácticas y a un coste muy inferior al del resto de espectrómetros (< 90 €)
- Fácil integración: Se comunica mediante I2C, por lo que es compatible con microcontroladores ESP32 y puede integrarse en dispositivos portátiles.

- Iluminación integrada: Incorpora 1 dispositivo de iluminación UV de 405 nm, 1 dispositivo de iluminación IR de 875 nm y un LED blanco de 5700K.

Si bien no alcanza la resolución de los espectrómetros de laboratorio, el AS7265x representa una solución robusta, accesible y flexible para sistemas IoT como el que se va a realizar en este proyecto.

### **3.10.3. Conclusiones**

A lo largo de este apartado se ha evidenciado el amplio potencial de la espectroscopía del rango visible e infrarrojo cercano (VIS/NIR) como herramienta de análisis no destructivo en múltiples ámbitos. Los estudios revisados reflejan cómo esta técnica puede reducir la dependencia de análisis químicos tradicionales ofreciendo una alternativa más rápida, sostenible y económicamente viable.

En cuanto a los dispositivos disponibles, se ha evidenciado que, si bien los equipos comerciales de alta gama ofrecen resultados muy fiables, su elevado coste y dimensiones limitan su uso en la creación de aplicaciones IoT.

Frente a estas limitaciones, sensores como el AS7265x ofrecen una solución equilibrada y fácilmente integrable con microcontroladores, lo cual abre un nuevo marco de investigación y desarrollo en el que se basará este proyecto.

) y para el formato de las figuras (ver Figura 3.1). Se recomienda numerar las tablas y figuras por capítulos (Tabla 1.1, etc.).

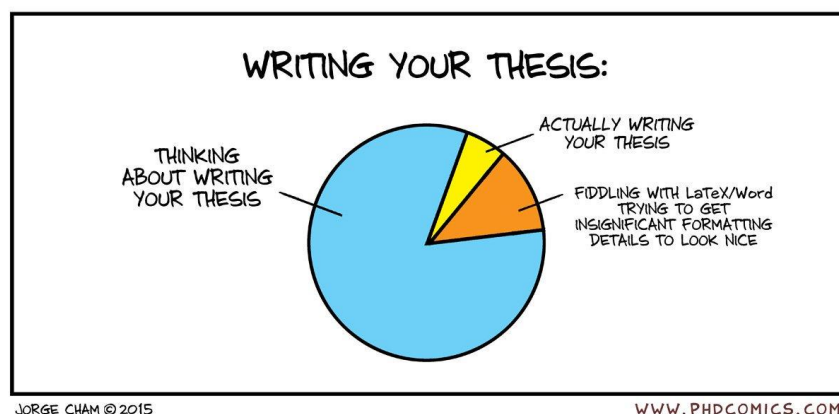


Ilustración 9

Figura 3.1: Escribiendo tu tesis

La parte final de la tesis comprende las referencias y los anexos.

Las referencias deben incluirse utilizando el estilo recomendado para cada ámbito de conocimiento. Esta plantilla utiliza APA, pero cada tesis deberá utilizar el estilo estándar en su ámbito de conocimiento.

Los anexos incluyen material adicional no incluido en el texto principal (cuestionarios, resultados adicionales, etc.). Se recomienda la numeración alfabética de los anexos (A, B, ...) y comenzar cada anexo en una página distinta. En el caso de incluir tablas en anexos, se iniciará una nueva numeración independiente de la del cuerpo de la tesis (Tabla A.1., etc.).

## **Material y métodos**

### **IV.1.<Título de sección>**

#### **IV.1.1.      <Título de subsección>**





# Resultados

## IV.2.<Título de sección>

### IV.2.1. <Título de subsección>



## Discusión

### IV.3.<Título de sección>

#### IV.3.1. <Título de subsección>



## Conclusiones



## Bibliografía

- [1] J. A. Sanchez, «laopiniondemurcia,» 05 Diciembre 2024. [En línea]. Available: <https://www.laopiniondemurcia.es/comunidad/2024/12/05/murcia-riesgo-abandono-tierras-sequia-112335615.html>.
- [2] UAM, «madrimasd,» 11 03 2025. [En línea]. Available: <https://www.madrimasd.org/notiweb/noticias/cianobacterias-toxicas-en-parque-nacional-monfrague-un-desafio-salud-ecologica>.
- [3] F. y. B. Instituto Europeo de Química, «ieqfb,» [En línea]. Available: <https://ieqfb.com/que-es-la-espectroscopia-tipos-y-tecnicas/>.
- [4] N/A, «Espectroscopía infraroja,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Espectroscop%C3%ADa\\_infrarroja](https://es.wikipedia.org/wiki/Espectroscop%C3%ADa_infrarroja).
- [5] Wikipedia, «Espectroscopía del infrarojo cercano,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Espectroscop%C3%ADa\\_del\\_infrarrojo\\_cercano](https://es.wikipedia.org/wiki/Espectroscop%C3%ADa_del_infrarrojo_cercano).
- [6] D. D. v. Staveren, «NIR vs IR: What is the difference?,» [En línea]. Available: [https://www.metrohm.com/en\\_gb/discover/blog/2024/nir-vs-ir.html](https://www.metrohm.com/en_gb/discover/blog/2024/nir-vs-ir.html).
- [7] «Google Scholar,» [En línea]. Available: <https://scholar.google.es/>.
- [8] «Google,» [En línea]. Available: <https://www.google.com/>.
- [9] M. M. J. D. B. H. R. A.M. Mouazen, «On-line measurement of some selected soil properties using a VIS–NIR sensor,» Marzo 2007. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167198706000663>.
- [10] K. B. B. N. U. C. W. H. Justyna Grabska, «MDPI,» 10 Mayo 2023. [En línea]. Available: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/10/1946>.
- [11] [En línea]. Available: <https://www.oceanoptics.com/spectrometers/>.
- [12] [En línea]. Available: <https://felixinstruments.com/food-science-instruments/nir-spectroscopy/f-750-produce-quality-meter/>.
- [13] [En línea]. Available: <https://www.ti.com/tool/DLPNIRNANOEVMM#description>.
- [14] [En línea]. Available: <https://sciolatam.com/>.
- [15] [En línea]. Available: <https://www.sparkfun.com/sparkfun-triad-spectroscopy-sensor-as7265x-qwiic.html>.

- [16 «Sistema embebido,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_embebido](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_embebido).
- [17 N/A, «¿Que es un sistema embebido?,» [En línea]. Available: <https://www.ceupe.com/blog/sistema-embebido.html>.
- [18 «ResearchGate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Componentes-de-la-tarjeta-del-sistema-embebido-Fuente-Autores-Los-tres-sistemas\\_fig3\\_319148610](https://www.researchgate.net/figure/Componentes-de-la-tarjeta-del-sistema-embebido-Fuente-Autores-Los-tres-sistemas_fig3_319148610).
- [19 [En línea]. Available: <https://www.raspberryme.com/premiers-pas-avec-la-carte-de-developpement-esp32/>.
- [20 [En línea]. Available: <https://www.az-delivery.de/es/products/esp32-developmentboard>.
- [21 TeachMeMicro. [En línea]. Available: <https://www.teachmemicro.com/esp32-pinout-diagram-wroom-32/>.



## **Anexos**